



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS REGIONAL DE CRECIDAS PLUVIALES EN CHILE CENTRAL (28°- 39°S)
MEDIANTE REGRESIÓN DE CUANTILES Y REGRESIÓN DE PARÁMETROS**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO**

FABIO LEONARDO MESA RAMÍREZ

PROFESOR GUÍA

PABLO MENDOZA ZÚÑIGA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

**XIMENA VARGAS MESA
NICOLÁS VÁSQUEZ PLACENCIA
FRANCO RICCHETTI CAMPOS**

SANTIAGO DE CHILE

2024

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE:
Magister en Ciencias de la Ingeniería mención Recursos y
Medio Ambiente Hídrico
POR: Fabio Leonardo Mesa Ramírez
FECHA: 2024
PROFESOR GUÍA: Pablo Mendoza Zúñiga

ANÁLISIS REGIONAL DE CRECIDAS PLUVIALES EN CHILE CENTRAL (28° - 39°S) MEDIANTE REGRESIÓN DE CUANTILES Y REGRESIÓN DE PARÁMETROS

En esta tesis, se desarrolla un análisis regional de crecidas de origen pluvial mediante regresión lineal múltiple utilizando información física, climática y fluviométrica de 88 cuencas distribuidas a lo largo de Chile central, entre las regiones de Atacama y la Araucanía, extraída de la base de datos de CAMELS-CL (Álvarez et al., 2018) y de la Dirección General de Aguas (DGA). Los modelos de regionalización consideran ocho (8) predictores, definidos por características físicas y climáticas de las cuencas en estudio. Las cuencas seleccionadas presentan una variación altimétrica media entre los 137 msnm y los 3.793 msnm; áreas pluviales aportantes entre los 5 km² y los 5.672 km²; y precipitaciones entre los 33 mm/año y los 2.775 mm/año. Así mismo, las cuencas presentan diversos tipos de fracciones de coberturas de suelo, caracterizadas por diferentes porcentajes de tierras áridas, matorrales y bosque total.

El método de mínimos cuadrados es utilizado para desarrollar los modelos de regresión y evaluar las técnicas de: (i) regresión de parámetros (TRP) de la distribución generalizada de valores extremos GEV (ubicación “ μ ”, escala “ σ ” y forma “ ε ”), y (ii) regresión de los caudales de crecida para diferentes periodos de retorno (cuantiles) (TRQ), correspondientes a 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Igualmente, se evalúa el comportamiento predictivo de diferentes métodos de selección de regiones homogéneas como: (i) región única o dominio completo, (ii) cuencas agrupadas en tres regiones fijas (norte, centro y sur) de acuerdo con el método DGA-AC (DGA, 1995), y (iii) tres grupos de cuencas, definidos en base a sus características físicas y climáticas con el algoritmo de agrupación *K-Means*. Por último, el comportamiento de los modelos se evalúa mediante el coeficiente de determinación (R^2), el criterio de información Bayesiano (BIC por sus siglas en inglés), y el error cuadrático medio normalizado (RMSNE por sus siglas en inglés).

Los resultados indican que las técnicas TRP y TRQ entregan comportamientos similares para caudales con periodos de retorno bajos (hasta 10 años), mientras que, para mayores periodos de retorno, se observan diferencias considerables en algunas regiones homogéneas. La TRQ entrega los mejores resultados para cuatro (4) de las siete regiones homogéneas (Única, Norte, Sur y Grupo 3), mientras que la regresión de los parámetros de la GEV lo hace en dos (2) regiones (Grupo 1 y Grupo 2). En el caso de la región Centro, los menores errores para periodos de retorno de hasta 10 años se obtienen mediante la TRP, mientras que en el caso de periodos de retorno mayores se obtienen menores errores para la TRQ. Desde el punto de vista del tipo de región homogénea, la TRP entrega consistentemente mejores resultados al usar áreas definidas con el método de agrupación *K-Means*, mientras que, en los demás métodos (regiones DGA-AC y dominio único), se aprecian mejores resultados mediante la TRQ. Los resultados obtenidos sugieren que, bajo algunas condiciones, la TRP podría ser un enfoque viable como alternativa a la comúnmente aplicada TRQ en cuencas no controladas.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERAL	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	2
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 ESTIMACIÓN DE CRECIDAS EN CUENCAS NO CONTROLADAS.....	4
2.1.1 Procesos.....	4
2.1.2 Medidas de similitud.....	4
2.1.3 Agrupación de cuencas.....	6
2.1.4 Métodos estadísticos para estimar crecidas	7
2.2 MANUAL DE CÁLCULO DE CRECIDAS (MOP - DGA, 1995)	8
2.2.1 Generalidades.....	8
2.2.2 Método de Verni y King Modificado	9
2.2.3 Método DGA-AC	9
3. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS UTILIZADOS.....	11
3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	11
3.1.1 Descripción general.....	11
3.1.2 Cuencas de estudio.....	12
3.2 DATOS.....	20
3.2.1 Precipitación diaria	20
3.2.2 Caudales máximos instantáneos	20
3.2.3 Resumen	20
4. METODOLOGÍA	21
4.1 ÁREA PLUVIAL APORTANTE.....	21
4.2 ANÁLISIS PREVIOS.....	21
4.2.1 Análisis de tendencias.....	21
4.2.2 Análisis de frecuencia de caudales y precipitaciones	23
4.3 ANÁLISIS EXPLORATORIO	24
4.4 FORMACIÓN DE REGIONES HOMOGÉNEAS.....	24
4.4.1 Dominio completo	24
4.4.2 Tres regiones según las zonas del método DGA-AC	24
4.4.3 Algoritmo de agrupación K-Means.....	24

4.5	MODELOS DE REGIONALIZACIÓN	25
4.5.1	Ecuación potencial	25
4.5.2	Selección de predictores para los modelos de regionalización	26
4.5.3	Evaluación y selección de los modelos de regionalización	26
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
5.1	ANÁLISIS PRELIMINARES	28
5.1.1	Análisis de tendencias	28
5.1.2	Ilustración de análisis de frecuencias individuales	30
5.2	REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA EL DOMINIO COMPLETO	33
5.2.1	Análisis exploratorio	33
5.2.2	Modelos de regionalización	39
5.3	REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS SEGÚN ZONAS DEL MÉTODO DGA-AC (DGA, 1995) 47	
5.4	REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA CUENCAS AGRUPADAS	49
5.4.1	Resultado de la agrupación	49
5.4.2	Modelos de regionalización	51
5.5	RESUMEN COMPARATIVO	53
5.5.1	Evaluación de modelos de regionalización	53
5.5.2	Selección de modelos de regionalización	57
5.5.3	Comparación en la estimación de caudales de crecida mediante TRP vs TRQ y método de Verni y King Modificado	60
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
6.1	GENERALIDADES	63
6.2	CONCLUSIONES	63
6.3	RECOMENDACIONES	66
	BIBLIOGRAFÍA	68
	ANEXOS	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Resumen de estadísticos de los predictores de las 88 cuencas seleccionadas.....	15
Tabla 3.2 Resumen de estadísticas de los predictores de las 88 cuencas seleccionadas según zona del país	16
Tabla 3.3 Resumen de estadísticas de caudal máximo instantáneo y precipitación diaria máxima de las 88 cuencas seleccionadas para el periodo abril – septiembre.....	20
Tabla 5.1 Indicadores de tendencias para las series de caudales máximos instantáneos y precipitación diaria máxima en la cuenca del río Cautín en Rari-Ruca (región de la Araucanía)	28
Tabla 5.2 Predictores de los mejores modelos de regionalización de Q_{10} , para la región definida por dominio completo.....	39
Tabla 5.3 Predictore de los mejores modelos de regionalización del parámetro de posición μ de la GEV, para la región definida por dominio completo.....	39
Tabla 5.4 Resumen modelos de regionalización seleccionados para el dominio completo	42
Tabla 5.5 RMSNE para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para el dominio completo	45
Tabla 5.6 Resumen modelos de regionalización seleccionados para la Región 1 según zonas del método DGA-AC	47
Tabla 5.7 Resumen de modelos de regionalización seleccionados para la Región 2 según zonas del método DGA-AC	47
Tabla 5.8 Resumen de modelos de regionalización seleccionados para la Región 3 según zonas del método DGA-AC	48
Tabla 5.9 Resumen de los modelos de regionalización seleccionados para la región Grupo 1 .	51
Tabla 5.10 Resumen de los modelos de regionalización seleccionados para la región Grupo 2	51
Tabla 5.11 Resumen de los modelos de regionalización seleccionados para la región Grupo 3	52
Tabla 5.12 Resumen $R^2_{ajustado}$ modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea	53
Tabla 5.13 Resumen CV_k para modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea	55
Tabla 5.14 Resumen BIC para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea	56
Tabla 5.15 Predictores de los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea	58

Tabla 5.16 Exponente del área pluvial en modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea 59

Tabla 5.17 Exponente Precipitación diaria máxima modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea 60

Tabla 5.18 RMSNE para modelos de regionalización de cuantiles de crecida y parámetros de la GEV vs método de Verni y King Modificado según tipo de región homogénea. 60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Promedio anual de variables hidroclimáticas a lo largo de Chile Continental.	12
Figura 3.2 Área de estudio y cuencas seleccionadas.....	14
Figura 3.3. Variación espacial predictores físicos	17
Figura 3.4. Variación espacial predictores de porcentaje de área cubierta por tierras áridas (panel izquierdo) y matorrales (panel derecho)	18
Figura 3.5 Variación espacial predictor porcentaje de cobertura de bosque total (panel izquierdo) y índice de aridez (panel derecho)	19
Figura 5.1 Análisis de tendencias para la serie de caudales máximos instantáneos en la estación río Cautín en Rari-Ruca (región de la Araucanía)	28
Figura 5.2 Análisis de tendencias para la serie de precipitación diaria máxima en la estación río Cautín en Rari-Ruca (región de la Araucanía)	29
Figura 5.3 Ajuste a la distribución GEV para la serie de caudales máximos instantáneos estación río Cautín en Rari-Ruca (región de la Araucanía).	31
Figura 5.4 Ajuste de la distribución Log Normal a la serie de precipitación diaria máxima en la cuenca del río Cautín en Rari-Ruca (región de la Araucanía)	32
Figura 5.5 Análisis exploratorio Q_{10} (escala logarítmica), para las cuencas del dominio completo	34
Figura 5.6 Análisis exploratorio del parámetro de posición μ de la GEV (escala logarítmica), para las cuencas del dominio completo	35
Figura 5.7 Coeficientes de correlación de Spearman para Q_{10} (panel superior) y parámetro de ubicación μ de la GEV (panel inferior) vs predictores, para el dominio completo	36
Figura 5.8 Mejores modelos de regionalización de Q_{10} , según número de predictores, para la región definida por dominio completo.....	40
Figura 5.9 Mejores modelos de regionalización del parámetro de ubicación μ de la GEV, según número de predictores, para la región definida por dominio completo.....	41
Figura 5.10 Caudal modelado vs observado para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida (paneles 1 y 3 en azul) y parámetros de la GEV (paneles 2 y 4 en verde), ajustados para el dominio completo	44
Figura 5.11 RMSNE para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la región definida por dominio completo	45
Figura 5.12 Verificación de supuestos de la regresión lineal múltiple para Q_{10} , utilizando datos del dominio completo	46
Figura 5.13 Varianza según número de Grupos.....	49

Figura 5.14 Regiones homogéneas formadas mediante agrupación K-Means.....	50
Figura 5.15 Resumen R^2_{ajustado} para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida según tipo de región homogénea.....	54
Figura 5.16 Resumen CV_k para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea	55
Figura 5.17 Resumen BIC para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea	56

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERAL

La estimación de variables hidrológicas, y en particular la escorrentía, es de vital importancia para la planificación y la gestión de recursos hídricos (Blöschl, 2016). Una caracterización robusta requiere de mediciones por un periodo climatológico de al menos 30 años de acuerdo con la organización meteorológica mundial (WMO por sus siglas en inglés). Sin embargo, la disponibilidad de datos por un período prolongado suele ser escasa, debido a razones económicas, logísticas o simplemente por falta de interés o planificación.

En particular, la predicción de caudales de crecida en cuencas no controladas (sin registros fluviométrico) es vital para estudios de inundaciones y el diseño de infraestructura de drenaje y obras de excedencias en embalses (Blöschl, 2016). Para abordar este problema, se suelen utilizar métodos indirectos, entre los cuales destacan las relaciones P-Q (precipitación – escorrentía), siendo las más reconocidas el Método Racional (Mulvaney, 1851) y el Hidrograma Unitario Sintético (Sherman, 1932). Sin embargo, estos presentan restricciones en su aplicación, como, por ejemplo, el tamaño de las cuencas, determinación del hietograma de precipitación, estimación de parámetros y cumplimiento de supuestos y condiciones bajo los que fueron desarrollados.

En situaciones de déficit de información de caudales medidos, también es posible realizar un análisis de frecuencias regional de crecidas, en el cual las variables de interés (p.ej. caudal máximo instantáneo – QMI – para diferentes periodos de retorno, parámetros de una función de distribución de probabilidad, etc.) son estimadas en cuencas con buenos registros en longitud y calidad y, luego, transferidas a los sitios de estudio (p. ej., Haddad & Rahman, 2012). El análisis regional presenta varias ventajas: (i) analiza en forma integrada una amplia base de datos y registros, compatibilizándolos espacial y temporalmente; (ii) permite extraer la estructura y dependencia espacial del fenómeno de estudio; (iii) disminuye la incertidumbre y los errores que puedan existir en registros individuales; y (iv) complementa registros puntuales (MOP, 2018).

Los primeros esfuerzos en el análisis de frecuencias regional de crecidas consideraron dos etapas (Dalrymple, 1960). La primera es el desarrollo de curvas de frecuencia adimensionales que representan la relación entre el caudal máximo instantáneo de cualquier periodo de retorno y un caudal índice (crecida anual media). La segunda etapa es el desarrollo de una relación entre la crecida anual media y el tamaño de la cuenca aportante para poder estimar las crecidas medias anuales en los lugares sin registros.

En el proceso de regionalización, se supone que las cuencas pertenecen a una región homogénea aceptable cuya delimitación se ha basado tradicionalmente en límites geográficos o administrativos y, posteriormente, en análisis que buscan determinar una región de Influencia (Haddad & Rahman, 2012) o algoritmos de agrupación (*clustering*), en base a proximidad espacial o índices de similitud (Kader et al., 2015). Al respecto, los métodos que utilizan proximidad espacial han mostrado mejores resultados que aquellos que solo usan atributos de las cuencas (Haddad & Rahman, 2012). Una vez que se ha formado la región según algún criterio, es posible estimar los QMI para diferentes

periodos de retorno mediante métodos de regresión o de la crecida índice (Kader et al., 2015).

El grado de homogeneidad de una región en el ámbito de crecidas es usualmente evaluado a partir de variables como el caudal máximo medio diario o instantáneo de la serie anual, crecida índice o estadísticas similares. Para una cuenca no controlada, su grado de pertenencia a una región homogénea propuesta no puede ser evaluado directamente. Por lo tanto, la proximidad espacial o alguna característica de la cuenca son utilizadas generalmente como una aproximación de la similitud hidrológica. Regiones basadas enteramente en límites geográficos o administrativos pueden carecer de similitud u homogeneidad hidrológica siendo, en estos casos, más recomendable la aplicación de algún método de agrupación de cuencas, entre los que se destaca el algoritmo *K-Means* (Hartigan & Wong, 1979), frecuentemente utilizado en el manejo de la alta heterogeneidad que usualmente presentan las cuencas (Blöschl et al., 2013).

La Dirección General de Aguas (MOP - DGA, 1995) presenta varios métodos para estimación de crecidas en cuencas no controladas basados en análisis regionales, válidos entre las regiones de Atacama y de la Araucanía, y que han sido ampliamente utilizados en ingeniería. Sin embargo, trabajos complementarios (p. ej. Lagos & Jara, 2017 y Ricchetti, 2018), la existencia de nuevos registros y tecnologías de registro y manejo de información (imágenes satelitales, sistemas de información geográfica, entre otros) y la disponibilidad de nueva información y de mejor calidad, (p. ej. base de datos de CAMELS-CL, Álvarez-Garretón et al., 2018), sugieren que dicho manual debe ser revisado, complementado y actualizado.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es desarrollar un análisis regional de crecidas de origen pluvial a partir de datos de 88 estaciones fluviométricas distribuidas a lo largo de Chile, entre las regiones de Atacama y la Araucanía (28 - 39° de latitud sur), usando regresión lineal múltiple.

En particular, se buscan los siguientes objetivos:

- Regionalizar los cuantiles de crecida y los parámetros de la distribución generalizada de valores extremos o GEV (*Generalized Extreme Value*) mediante el análisis de diferentes predictores formulados en base a características físico-climáticas de las cuencas de estudio.
- Comparar el comportamiento predictivo de diferentes métodos de selección de regiones homogéneas.
- Evaluar técnicas de regresión de parámetros (TRP) y regresión de los caudales de crecida para diferentes periodos de retorno (cuantiles) (TRQ).

1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El presente informe está compuesto por seis capítulos, los cuales se resumen a continuación.

En el capítulo 2, se realiza una revisión de la literatura enfocada en la estimación de caudales de crecidas en cuencas no controladas. Se presta atención especial al concepto de similitud y a las diferentes técnicas de agrupación de cuencas. Adicionalmente, se destacan las características básicas de los principales métodos estadísticos utilizados en el análisis regional de crecidas. Finalmente, se describen los métodos de Verni y King Modificado, y DGA - AC (DGA, 1995), de amplio uso en la ingeniería práctica en Chile para la estimación de crecidas en cuencas no controladas.

En el capítulo 3, se presenta la selección de las 88 cuencas de estudio que comprenden desde la región de Atacama hasta la región de la Araucanía. Adicionalmente, se resumen sus características físicas y climáticas, que constituyen las variables predictoras en la regionalización de los cuantiles de crecida y en los parámetros de la GEV. Por último, se resumen los datos de precipitación máxima diaria y caudales máximos instantáneos utilizados en el análisis regional.

En el capítulo 4, se resume la metodología utilizada en la regionalización de los cuantiles de crecida y de los parámetros de la GEV. Adicionalmente, se incluye la metodología para la estimación del área pluvial y las distribuciones de probabilidad empleadas en el análisis de frecuencias de los datos de precipitación y caudal. Igualmente, se incluyen los criterios utilizados para la definición de las regiones homogéneas y de las variables explicativas o predictores. Finalmente, se describe el modelo de regresión múltiple empleado y los diferentes indicadores de bondad de ajuste utilizados para su evaluación.

En el capítulo 5, se resume el análisis preliminar realizado a las 88 series de caudales máximos instantáneos y de precipitaciones máximas diarias, consistente en el cálculo de los principales estadísticos que caracterizan dichas series, en la identificación y cuantificación de sus tendencias y, por último, en el análisis de frecuencias para diferentes periodos de retorno. Posteriormente, se presentan y analizan los modelos de regionalización de los seis cuantiles de crecida y de los tres parámetros de la GEV considerados, para cada una de las siete regiones homogéneas estudiadas. Por último, se presenta un análisis comparativo que integra y sintetiza los resultados obtenidos en este capítulo.

En el capítulo 6 se resumen los principales resultados y conclusiones de la tesis, y se incluyen recomendaciones para el desarrollo de futuros estudios.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ESTIMACIÓN DE CRECIDAS EN CUENCAS NO CONTROLADAS

2.1.1 *Procesos*

Las crecidas reflejan el resultado neto de las interacciones a diferentes escalas temporales y espaciales entre la precipitación (distribución, intensidad, duración y extensión), las características físicas de la cuenca (p. ej., área pluvial, uso y tipo de suelo, vegetación, pendiente y geología); y las condiciones hidrológicas iniciales (humedad del suelo y manto nival). Estas relaciones pueden ayudar a mejorar la estimación de crecidas, y avanzar en la calidad de las predicciones a través de la mejor comprensión de los fenómenos involucrados (Blöschl et al., 2013).

2.1.2 *Medidas de similitud*

La regionalización de ecuaciones para la estimación de crecidas en cuencas no controladas depende del concepto de similitud. Desde el punto de vista de crecidas, dos cuencas pueden considerarse similares si sus curvas de frecuencia lo son. El enfoque más simple para establecer similitud es la proximidad espacial, es decir, suponer que las cuencas que están cerca son física, climática e hidrológicamente similares. Por lo tanto, presentan un comportamiento hidrológico similar, bajo el supuesto que los procesos lluvia-escorrentía varían ligeramente en el espacio o son uniformes en regiones predefinidas (Merz & Blöschl, 2005).

Merz & Blöschl (2005), mostraron en un estudio comparativo en Austria que la proximidad espacial es un predictor de regionalización de crecidas significativamente mejor que cualquier otra característica de la cuenca. Bates et al. (1998), en un estudio en Australia, mostraron que grupos conformados de manera agregada por sitios dentro de regiones homogéneas, con respuestas hidrológicas razonablemente similares, muestran cierto grado de coherencia espacial. En el Reino Unido, Kjeldsen & Jones (2009, 2010), encontraron que la proximidad espacial es un sustituto útil para compensar la incapacidad de los modelos concentrados de explicar las diferencias en curvas de frecuencias de diferentes cuencas de análisis.

A continuación, se presentan diferentes medidas de similitud que se adoptan en la práctica y que explican de manera más detallada los procesos de generación de crecidas.

2.1.2.1 *Similitud hidrológica*

Dos cuencas pueden ser hidrológicamente similares y tener diferentes curvas de frecuencia. Dichas curvas pueden ser similares en forma, pero no en términos de su magnitud. Una forma de medir esta similitud es escalar la curva de frecuencia por un valor índice, que generalmente se adopta como la media o mediana de la serie de caudales máximos instantáneos anuales. El coeficiente de variación (CV) de la serie anual de QMI refleja la pendiente de la curva de frecuencia (Blöschl et al., 2013), y ha sido la métrica de similitud más utilizada en análisis regionales de crecidas. Varios estudios han mostrado que el CV depende de la escala y se relaciona con una serie de factores,

dependiendo del contexto hidrológico de la región analizada (Smith, 1992 y Blöschl & Sivapalan, 1997). Por otro lado, una medida de similitud que ha recibido amplia atención en los últimos años es la estacionalidad de las crecidas (Merz et al., 1999; Jain & Lall, 2000 y Petrow et al., 2007). Los índices de estacionalidad se han utilizado para identificar la similitud de crecidas a nivel regional y para agrupar cuencas en regiones con procesos similares de generación de crecidas (Piocck-Ellena et al., 1999; Castellarin et al., 2001; Sivapalan et al., 2005; Parajka et al., 2010a). También es relevante analizar si la estacionalidad del QMI cambia con las magnitudes de los eventos y con el tiempo; es decir, si para un cierto periodo de retorno el QMI es mayor en alguna estación del año y luego para otro periodo de retorno es mayor en una estación diferente. Ambas dependencias (escala y tiempo) pueden otorgar indicios sobre los fenómenos que rigen las crecidas, ayudando en el proceso de regionalización.

2.1.2.2 Similitud climática

La similitud climática en el contexto de crecidas puede cuantificarse por la similitud de las precipitaciones extremas. Las curvas de intensidad – duración – frecuencia (IDF) representan la distribución acumulada de lluvia extrema para un intervalo de agregación dado. La curva de frecuencia es una transformación no lineal de la curva IDF que captura los fenómenos que generan las crecidas por medio de la selección del periodo de retorno deseado y de la duración de la precipitación (Blöschl et al., 2013). La similitud climática también se puede cuantificar por la estacionalidad de las precipitaciones extremas, y por patrones de circulación atmosféricos (Petrow et al., 2007, 2009; Parajka et al., 2010a).

Muchos estudios han demostrado que la precipitación anual media es una excelente medida de similitud para el análisis de crecidas (ver, por ejemplo, Madsen et al., 1997; Reed et al., 1999; Merz et al. Merz & Blöschl, 2008a, b, 2009b). Primero, la precipitación anual, podría estar altamente correlacionada con los eventos de precipitación extrema al ser una medida agregada de los eventos que ocurren en la cuenca, especialmente en zonas áridas a semiáridas. Segundo, la precipitación anual media es un control importante de la humedad del suelo a la escala estacional, y esta variable es importante para el mecanismo de generación de crecidas. Tercero, debido a la coevolución del clima, la vegetación, los suelos y los accidentes geográficos, hay un vínculo estrecho entre el régimen de precipitación, los suelos y la forma de relieve, que son factores importantes en la generación de crecidas. Por lo tanto, la precipitación anual media, es un índice de similitud que puede capturar los resultados de la coevolución de las cuencas hidrográficas y los factores más relevantes que intervienen en la generación de crecidas.

2.1.2.3 Similitud física de cuencas

El área de la cuenca es una de las medidas de similitud más importantes (Blöschl et al., 2013). En general, los caudales de crecida serán mayores en cuencas más grandes, debido a que el volumen de precipitación es mayor. Por supuesto, esto será moderado por la heterogeneidad de la precipitación y de los procesos dentro de la cuenca.

Otra característica de la cuenca que contribuye a identificar tanto similitudes como diferencias en las curvas de frecuencia de crecidas es el uso de suelo, dada su relación con el coeficiente de escorrentía. Por ejemplo, una zona urbanizada contribuirá más que otros tipos de cobertura a la generación de escorrentía superficial que finalmente

desencadena las crecidas. Asimismo, otras características físicas relevantes son la pendiente de la cuenca, la densidad de drenaje y la elevación topográfica, las cuales presentan una estrecha relación con el tiempo de concentración de la cuenca.

2.1.3 Agrupación de cuencas

El principio que sustenta la agrupación de cuencas en el análisis de frecuencia de crecidas es que los eventos extremos que no se han observado en un lugar en particular podrían haberse observado en otro. Por lo tanto, los datos de muchos sitios se agrupan para obtener una muestra representativa de lo que podría suceder en una ubicación en particular. Utilizando las medidas de similitud anteriores, las cuencas se pueden agrupar en regiones homogéneas para hacer predicciones de crecidas en cuencas sin registros, y también para mejorar las predicciones de crecidas cuando solo hay registros por un periodo corto de tiempo. Existen diferentes métodos para realizar dicha agrupación tal como se menciona a continuación.

2.1.3.1 Grupos fijos

Este enfoque consiste en subdividir el área de estudio en una serie de regiones fijas y contiguas que se utilizan para regionalizar los parámetros de las ecuaciones para la estimación de las crecidas, considerando todas las cuencas en dicha área. El supuesto principal es que las cuencas que se encuentran contiguas se caracterizan por un clima, topografía, geología, tipo y uso del suelo similares, lo que da lugar a una respuesta hidrológica similar y, por lo tanto, a crecidas de características similares. La agrupación generalmente se realiza combinando mapas con características de las cuencas o límites geográficos (Beable & McKerchar, 1982). El supuesto de regiones contiguas se puede flexibilizar para permitir que los grupos no sean contiguos. Luego, el grupo de cuencas se selecciona basándose únicamente en las características climáticas y físicas, sin utilizar la proximidad espacial como medida de similitud. Métodos estadísticos multivariados, y en particular la agrupación, son métodos usualmente implementados para realizar la agrupación (por ejemplo, Acreman & Sinclair, 1986; Burn & Goel, 2000). Debido a que los grupos no son contiguos, se necesita una regla de asignación para asociar cuencas sin registros fluviométricos a un grupo en particular.

2.1.3.2 Agrupación (*clustering*)

La agrupación (*clustering*) es una técnica para encontrar y clasificar datos en grupos. Así, los elementos que comparten características semejantes estarán en un mismo grupo, separados de los otros con los que no comparten características. La similitud entre las cuencas se puede medir por la distancia euclidiana de algunas características físicas y climáticas, aunque también se pueden utilizar otras métricas de similitud. Debido a que los atributos pueden tener diferentes unidades, generalmente son estandarizados para hacerlos comparables. Es posible asignar ponderadores a las características de la cuenca para dar preferencia a algunas de ella sobre la base de una comprensión previa de cuáles deberían ser los controles hidrológicos importantes (Kjeldsen & Jones, 2007, 2009).

Los algoritmos de agrupación son considerados métodos de aprendizaje no supervisado, y buscan patrones en los datos sin tener una predicción específica como objetivo (no hay

variable dependiente). Hay una relación costo beneficio entre el número de grupos y la homogeneidad dentro de ellos: cuantos más grupos se forman, más homogéneos serán, lo que implica un número relativamente menor de cuencas por grupo. Existen diferentes algoritmos de agrupación. Por ejemplo, Burn (1997) utilizó un algoritmo genético y Shu & Burn (2004a) aplicaron el método de sistemas de lógica difusa y algoritmos genéticos para la delineación de grupos homogéneos. Numerosos estudios han utilizado métodos de clasificación basados en redes neuronales artificiales (p. ej. Jingyi & Hall, 2004; Lin & Chen, 2006; Srinivas et al., 2008; Di Prinzio et al., 2011; Ley et al., 2011).

Cualquiera sea el método de clasificación, los grupos o regiones nunca serán completamente homogéneos en términos de su respuesta hidrológica. Se han propuesto varios métodos para evaluar la homogeneidad de los grupos, es decir, para examinar si los grupos obtenidos a partir de las características físicas o climáticas son estadísticamente similares en términos de escurrimiento (por ejemplo, si tienen el mismo coeficiente de variación (CV) o curva de frecuencias).

Por último, es posible agrupar las cuencas en términos de los modelos hidrológicos (regionalización, precipitación-escurrimiento, etc.). Sin embargo, estos procedimientos son más complejos y requieren largos procesos iterativos (Blöschl et al., 2013).

2.1.4 Métodos estadísticos para estimar crecidas

Una vez que se ha identificado un grupo de cuencas hidrológicamente similares, se pueden analizar los datos de crecidas para transferirlos, mediante algún método, a la cuenca de estudio. Estos métodos se agrupan en modelos estadísticos y basados en procesos (Blöschl et al., 2013), siendo los primeros, a destacar de manera general a continuación.

2.1.4.1 Métodos de regresión

El método de regresión supone que existe una relación entre el caudal máximo medio diario o instantáneo de la crecida para un periodo de retorno en específico (Q_T , cuantil) o los parámetros de una función de distribución probabilidad (p. ej., la GEV) y las características físicas y/o climáticas de una cuenca, (Thomas & Benson, 1970). En general, esta relación no es lineal, pero a menudo se aproxima mediante un modelo lineal con variables transformadas, por ejemplo, mediante una transformación logarítmica (p. ej. Thomas & Benson, 1970; Pandey & Nguyen, 1999; Griffis & Stedinger, 2007). En la estimación regional de cuantiles de crecidas, se puede establecer una relación potencial de la forma:

$$Q_T = k(T) * A^{\alpha(T)} * P^{\beta(T)} * S^{\gamma(T)} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde k , α , β y γ son los parámetros de regresión del modelo en función del periodo de retorno, y A , P y S son características físicas y climáticas de la cuenca de estudio a definir. Se pueden desarrollar relaciones análogas para parámetros de la distribución de probabilidad de crecidas. Los parámetros representan los procesos de generación de crecidas de forma simplificada, que pueden variar dentro de una región. Por lo tanto, en lugar de aplicar una regresión global dentro del área de estudio, usualmente el área se subdivide en regiones homogéneas. Thomas & Benson (1970) utilizaron la regresión

múltiple para predecir los cuantiles de crecidas para cuatro regiones diferentes en los Estados Unidos. Posteriormente, Tasker et al. (1996) encontraron que la subdivisión en subregiones espaciales más pequeñas conduce a resultados más precisos.

2.1.4.2 Métodos de crecida índice

El método consiste en derivar una curva de frecuencia de crecidas adimensional, dividiendo, cada uno de los cuantiles de crecidas para diferentes periodos de retorno en la zona homogénea definida previamente, por una crecida de referencia llamada índice de la estación. Dicha crecida índice usualmente corresponde a la crecida media anual, mediana, 10 años de periodo de retorno o similar. Posteriormente, mediante algún criterio, se define una curva regional y su intervalo de confianza. Luego, se establece una relación para estimar la crecida índice en función de las características de la cuenca (área, pendiente, proporción de área impermeable, etc.) y de la precipitación (precipitación anual, máxima diaria, máxima en cinco días, etc.). La curva de frecuencia de crecidas en un punto sin registro, ubicado dentro de la región hidrológicamente homogénea, se obtiene estimando el valor de la crecida de referencia o índice del lugar, en función de las variables explicativas y, posteriormente utilizando dicho valor para convertir las razones de la curva de frecuencia regional en valores de crecidas (MOP, 2018). En el caso más simple, se puede usar una regresión para aproximar el valor de la crecida índice, aunque existen métodos más complejos basados en geoestadística o en procesos (por ejemplo, Bocchiola et al., 2003). Los enfoques más conocidos son los elaborados por el U.S. Geological Survey y el National Environment Research Council del Reino Unido (Blöschl et al., 2013).

2.1.4.2.1 Comparación entre métodos de regresión y de crecida índice

La principal diferencia con los métodos de regresión es que la relación de los cuantiles de crecida o los parámetros de la distribución de probabilidad con las características físicas o climáticas de la cuenca dependen del periodo de retorno, mientras que la crecida índice que se relaciona con dichas características no lo hace. Adicionalmente, el método de regresión supone una dependencia espacial de la curva de frecuencias con las características físico-climáticas de la cuenca, mientras los métodos de la crecida índice suponen que dicha curva es representativa de la región homogénea, y en el caso de la crecida de referencia, esta depende de las características físicas o climáticas de la cuenca. En un estudio comparativo, Rosbjerg (2007) encontró que el método de la crecida índice condujo a estimaciones de cuantiles con un poco menos de incertidumbre que los obtenidos por el método de regresión. Generalmente, el método de la crecida índice usa un modelo de regresión para estimar dicho valor, por lo que la eficacia del método depende de la calidad del ajuste de dicho modelo.

2.2 MANUAL DE CÁLCULO DE CRECIDAS (MOP - DGA, 1995)

2.2.1 Generalidades

El “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica”, presenta cinco métodos para la estimación de crecidas pluviales en cuencas no controladas para periodos de retorno inferiores a 100 años y cuencas hasta 10.000 km² ubicadas entre las regiones de Atacama y la Araucanía.

A continuación, se describen los métodos Verni y King Modificado y DGA-AC, al servir de referencia con el objetivo del presente estudio.

2.2.2 Método de Verni y King Modificado

Este método está basado en la fórmula de Verni y King (1977), que relaciona el caudal instantáneo máximo de una crecida con la precipitación diaria máxima y el área pluvial a través de una relación potencial. La fórmula original, establecida para periodos de retorno mayores que 30 años (DGA, 1995), fue complementada agregando un coeficiente empírico variable con el período de retorno, producto de un proceso de ajuste y calibración a los resultados de los análisis de frecuencias realizados a un total de 130 estaciones limnigráficas ubicadas entre la III y IX región (Atacama – Araucanía). El método tiene validez para cuencas pluviales o pluvionivales (mixtas) sin información fluviométrica dentro de dichas regiones, con áreas comprendidas entre 20 y 10.000 km² y periodos de retorno sugeridos hasta 100 años. Dicha fórmula modificada se presenta a continuación:

$$Q = C(T) * 0,00618 * A^{0,88} * (P_d)^{1,24} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

- Q : Caudal máximo instantáneo asociado al periodo de retorno T años, m³/s
- C(T) : Coeficiente empírico para el periodo de retorno T (en años)
- A : Área pluvial de la cuenca, km².
- P_d : Precipitación diaria máxima asociada al periodo de retorno de T años, mm.

Para determinar C(T), se calcula primero el valor del factor de frecuencia C(T) / C(T= 10 años), según la región del país y en el caso de la IV región según la cuenca a la que pertenece la zona de análisis; y luego se multiplica éste por el coeficiente asociado al período de retorno de 10 años obtenido mediante tabla según la región.

2.2.3 Método DGA-AC

El método DGA-AC para crecidas pluviales corresponde a un análisis regional de crecidas de origen pluvial, basado en series de máximos anuales generados a partir de la información de caudales medios diarios máximos e instantáneos máximos del período pluvial, de 234 estaciones de control fluviométrico. Este método, que abarca desde la región de Atacama hasta la Araucanía, es válido para cuencas pluviales o pluvionivales sin información fluviométrica, con áreas comprendidas entre 20 y 10.000 km² y periodos de retorno de hasta 100 años.

El método consiste en determinar una curva de frecuencias para el caudal máximo instantáneo de la cuenca de estudio. En primer lugar, se define la zona homogénea a la que pertenece la cuenca de estudio dentro de cuatro agrupaciones principales diferenciadas según la latitud. Se definen 23 zonas definidas según su ubicación y las características físicas y climáticas de la cuenca. Luego, se determina la curva de frecuencias de la cuenca para el caudal medio diario máximo mediante relaciones de la forma Q_T/Q₁₀. El caudal medio diario máximo (m³/s) de periodo de retorno de 10 años (Q₁₀) se determina según la región a partir de las siguientes expresiones regionalizadas.

$$\text{III y IV Región: } Q_{10} = 1,94x10^{-7} * A^{0,776} * P_d^{10^{3,108}} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$\text{V - RM - VI Región: } Q_{10} = 5,42x10^{-8} * A^{0,915} * P_d^{10^{3,432}} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$\text{VII - IX Región: } Q_{10} = 2x10^{-3} * A^{0,973} * P_d^{10^{1,224}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

A : Área pluvial aportante representativa de la cuenca, en km².

P_d^{10} : Precipitación diaria máxima de periodo de retorno 10 años, en mm.

Finalmente, la curva de frecuencias de caudales medios diarios máximos se convierte a la correspondiente de caudales máximos instantáneos, a través de la determinación de un factor de conversión según la zona homogénea a la cual pertenece la cuenca.

3. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS UTILIZADOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1 *Descripción general*

La variabilidad hidroclimática de Chile (Figura 3.1) se relaciona con varios factores, incluyendo la presencia de las cadenas montañosas de la Costa y de los Andes (que sumado a la estrechez de su territorio en sentido este-oeste generan gradientes altitudinales en cortas distancias), la existencia de la corriente fría de Humboldt, la presencia del Anticiclón del Pacífico y del Frente Polar.

Al norte de los 27°S, existen condiciones desérticas con carencia de lluvias, que puede llegar a ser absoluta en determinados puntos y que se explican por: (1) la presencia del Anticiclón del Pacífico, que impide el ingreso de masas de aire húmedas que provienen del océano; (2) la corriente fría de Humboldt y (3) la gran elevación de la Cordillera de Los Andes. Las condiciones de aridez de esta región solo son alteradas por la influencia de un fenómeno estacional, conocido como "Invierno Altiplánico", que consiste en el ingreso de masas de aire húmedas provenientes de la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, lo que genera lluvias en el altiplano. En el "Norte Chico" (27°S a 33°S) comienzan a variar estas características, aun cuando el clima presenta características semiáridas, debido a sus rasgos transicionales. En esta zona, se presenta un ecosistema de tipo xeromórfico, cuya mayor expresión se encuentra en el desierto, con muy poca o nula vegetación.

La Zona Central de Chile (33°S a 37°S) se identifica con un clima de tipo mediterráneo. En esta parte del territorio, las condiciones climáticas son más moderadas en comparación con el norte. Las lluvias tienden a concentrarse fundamentalmente en los meses de invierno, las estaciones del año se encuentran más marcadas y las temperaturas medias anuales son más bajas que en la región norte del país. El ecosistema es de carácter mesomórfico, entendido como una zona de transición o ecotona entre los caracteres xeromórficos del norte e hidromórficos del sur. Esta región presenta una amplia presencia de arbustos espinosos, y hojas especialmente acondicionadas para evitar la pérdida de humedad a través de transpiración. Dentro de esta macrorregión biogeográfica, la distribución de las precipitaciones va en aumento hacia el sur, por lo que se presentan fenómenos y formaciones vegetales distintas. Dentro del paisaje típico de este ecosistema, se desarrolla el denominado bosque esclerófilo, vegetación de tipo mediterráneo que ha sido intensamente deteriorada principalmente por la intervención humana.

En el centro-sur de Chile (37°S a 42°S, clima templado oceánico) se inicia una transición hacia los climas más fríos y lluviosos, donde la influencia de las bajas presiones provenientes del polo provocan altos montos de precipitaciones, los que en algunos sectores de barlovento pueden alcanzar sobre 5.000 mm, como en el caso de las islas y canales australes. Aquí el ecosistema es de carácter higromórfico, el cual se extiende aproximadamente hasta el archipiélago del Cabo de Hornos, limitando al este con el Ecosistema Patagónico en su extremo sur. Sus clases comprenden comunidades de bosque, tal como la conocida selva valdiviana o bosque templado oceánico del hemisferio sur, cuyos componentes higrófilos siempre verdes (*Nothofagus*) pueden alcanzar alturas de hasta 40 m. En los contrafuertes cordilleranos se presenta el bosque de araucarias. Igualmente, más al sur, destacan asociaciones de alerces andinos y bosque de cipreses (coníferas). En el sector andino el bosque valdiviano deja lugar a un bosque caducifolio.

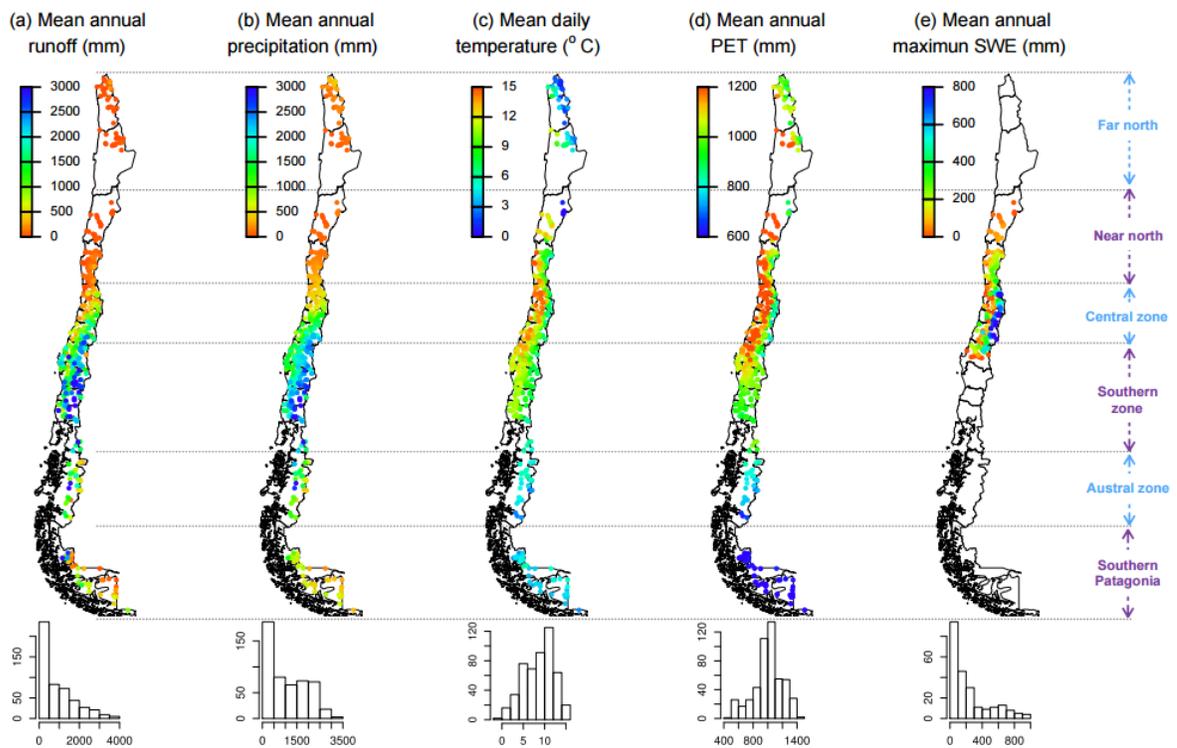


Figura 3.1 Promedio anual de variables hidroclimáticas a lo largo de Chile Continental.
a) Escorrentía media anual, b) Precipitación anual, c) Temperatura media diaria, d) Evapotranspiración anual y e) Equivalente agua de nieve anual. Fuente: Base de Datos de CAMELS-CL (Álvarez-Garretón et al., 2018).

3.1.2 Cuencas de estudio

La selección de las cuencas considera la base de datos de CAMELS-CL (Álvarez-Garretón et al., 2018), que integra información física e hidro-meteorológica de cuencas a lo largo de todo Chile (17,8 S – 55,0 S). Esta base de datos contiene las cuencas aportantes a 516 estaciones fluviométricas, para las cuales se compilan los registros públicos de caudal medio diario, y se generan diferentes series hidro-meteorológicas promediadas a escala de cuenca, dentro de las cuales se destacan: 1) serie de precipitación diaria en base a productos grillados, incluyendo CR2METv1.3 (DGA, 2017), periodo 1979-2016, 2) series diarias de temperaturas medias, máximas y mínimas,

basadas en CR2MET y 3) evapotranspiración potencial (PET) a escala diaria estimada con la fórmula de Hargreaves. Adicionalmente, CAMELS-CL (Álvarez-Garretón et al., 2018) cuenta con datos procesados de topografía, cobertura de suelo, tipo de suelo y geología a la escala de cuenca. Las fracciones de cobertura fueron definidas a partir de imágenes de los años 2013 y 2014. Por otro lado, para cuantificar la intervención antrópica dentro de las cuencas, se procesaron datos públicos de derechos de agua superficial y subterránea, y ubicación de embalses a lo largo del país. Todas estas bases de datos se sintetizan mediante una serie de atributos de cuencas (atributos climáticos, hidrológicos, topográficos, etc.).

Considerando la información anterior, y teniendo en cuenta el periodo de análisis abril-septiembre (ambos inclusive), se aplicaron los siguientes filtros de selección, con lo cual se obtuvieron 88 cuencas pluviales (Figura 3.2) a lo largo de Chile Continental:

- Cuencas con al menos 30 años de registros que posean un 95 % de datos (es decir, máximo 10 días sin datos de caudal diario al año en el periodo abril-septiembre), independientemente si dichos datos faltantes son continuos o distribuidos en el periodo adoptado.
- Cuencas sin grandes embalses.
- Cuencas entre las regiones de Atacama y la Araucanía (28° a 39° latitud sur).

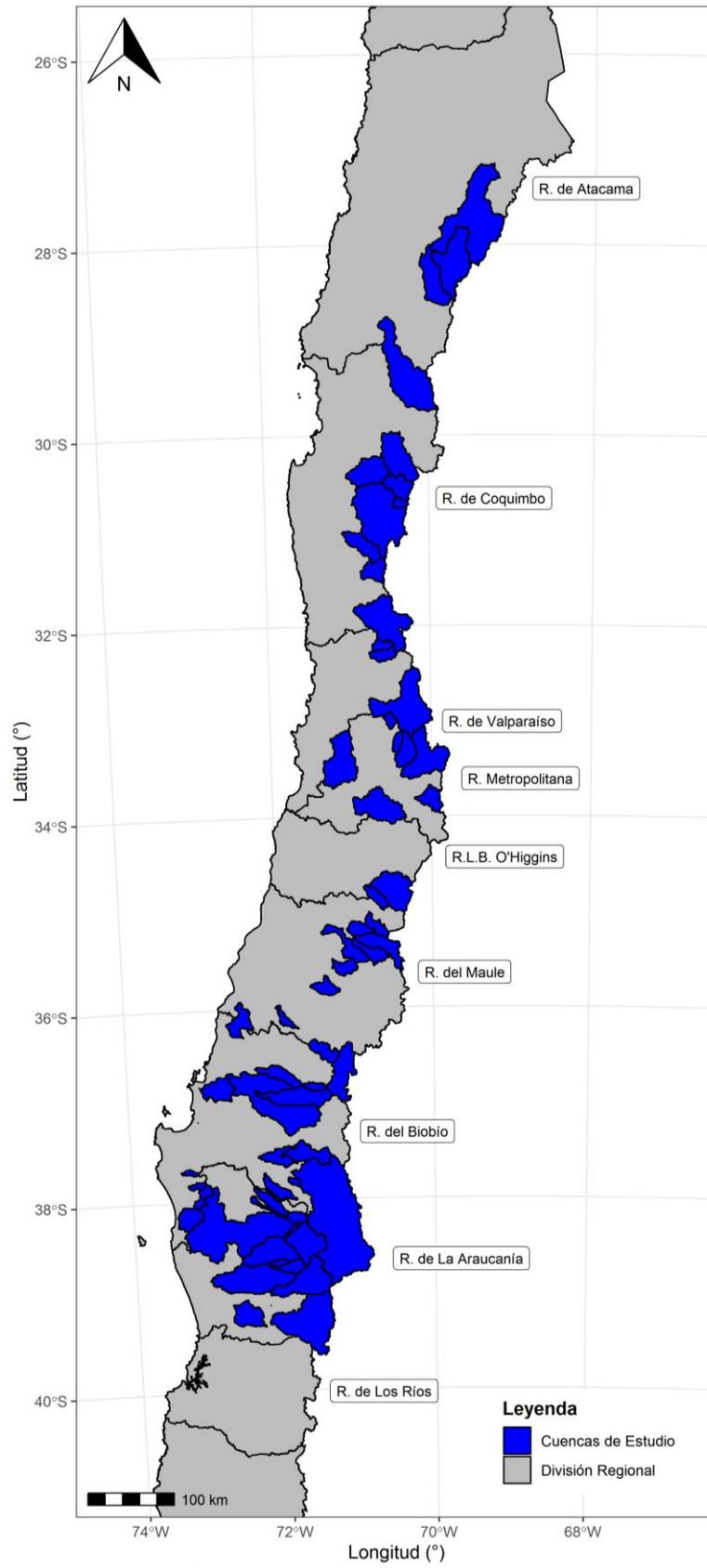


Figura 3.2 Área de estudio y cuencas seleccionadas

Las 88 cuencas utilizadas para el presente estudio corresponden a igual número de estaciones fluviométricas. De éstas, 21 se encuentran en la zona norte (Atacama-Coquimbo), 18 en la zona centro (Valparaíso – Libertador Bernardo O'Higgins) y 49 en la zona sur (Maule – Araucanía). Las cuencas seleccionadas presentan una variación altimétrica media entre los 137 msnm y los 3793 msnm, con un valor promedio de 1.745 msnm; mientras que las áreas pluviales abarcan entre los 5 km² y los 5.672 km², con un valor promedio de 809 km². Con respecto a las precipitaciones, éstas varían entre los 33 mm/año hasta los 2.775 mm/año, con un valor promedio de 1.144 mm/año.

En la Tabla 3.1 se presenta el resumen de los estadísticos principales para siete de los ocho predictores o variables explicativas seleccionadas para el presente estudio, en base a la influencia que tienen en la magnitud de caudales de crecida, complementado a otras variables indicadas en la literatura (Haddad & Rahman, 2012 y Blöschl et al., 2013). Así mismo, la elección de los predictores considera como criterio su presencia de manera heterogénea a lo largo de las cuencas seleccionadas, con el fin de evitar la selección de predictores de poca influencia. Finalmente, el último predictor de los ocho seleccionados corresponde a la precipitación diaria máxima para el periodo de retorno de análisis, en el caso de la regionalización de la curva de frecuencias (TRQ), y de 10 años de periodo de retorno para la regionalización de los parámetros de la GEV (TRP).

Tabla 3.1 Resumen de estadísticos de los predictores de las 88 cuencas seleccionadas

Parámetro	Símbolo	Unidad	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar
Área Pluvial*	A	km ²	5.672	809	5	1.126
Elevación Media	Em	m s.n.m.	3.793	1.745	137	1.206
Pendiente Media	Sm	[m/km]	305	190	52	66
Fracción Cobertura de Tierras Áridas**	Ta	%	79	27	0	29
Fracción Cobertura de Matorrales-Arbustos**	Mat	%	77	26	1	17
Fracción Cobertura de Bosque Total**	Bos	%	96	29	0	29
Índice de Aridez	Ia	Adimensional	35,7	3,3	0,4	6,5

*Definida según la metodología descrita en el capítulo 0

**Definidas a partir de imágenes de los años 2013 y 2014 (Álvarez-Garretón et al., 2018)

En la Tabla 3.2, se presenta el resumen de los estadísticos anteriores para tres zonas del país (norte, centro y sur). Allí se resalta que, en términos promedio y considerando los valores de la zona de estudio, las cuencas del norte presentan las mayores elevaciones medias e índices de aridez y, a su vez mayor presencia de coberturas del tipo tierras áridas y matorrales. Por otro lado, las cuencas de la zona centro presentan mayores pendientes medias, baja cobertura de bosques e índices de aridez; y valores promedios

en las demás variables estudiadas. Por último, las cuencas del sur evidencian las mayores áreas y coberturas de bosques totales; junto con las menores elevaciones, pendientes, índices de aridez y los demás tipos de coberturas considerados en el estudio.

Tabla 3.2 Resumen de estadísticas de los predictores de las 88 cuencas seleccionadas según zona del país

Variable/Zona	A	Em	Sm	Ta	Mat	Bos	la
	[km ²]	[m s.n.m.]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[Adim]
Norte							
Promedio	654	3.153	240	58	38	0,2	10,7
Máximo	2.902	3.793	273	79	62	0,6	35,7
Mínimo	6	2.124	196	33	19	0,0	2,6
Centro							
Promedio	348	2.569	250	47	31	4	2
Máximo	1.713	3.690	305	79	77	27	3,4
Mínimo	5	507	154	0	5	0,0	0,6
Sur							
Promedio	1.045	839	146	6	18	50	0,7
Máximo	5.672	2.288	256	57	49	96	1,4
Mínimo	89	137	52	0	1	5	0,4

Finalmente, en la Figura 3.3, Figura 3.4 y Figura 3.5 se presenta la variación espacial de los predictores físicos, de cobertura de suelo y climatológicos utilizados en el presente estudio.

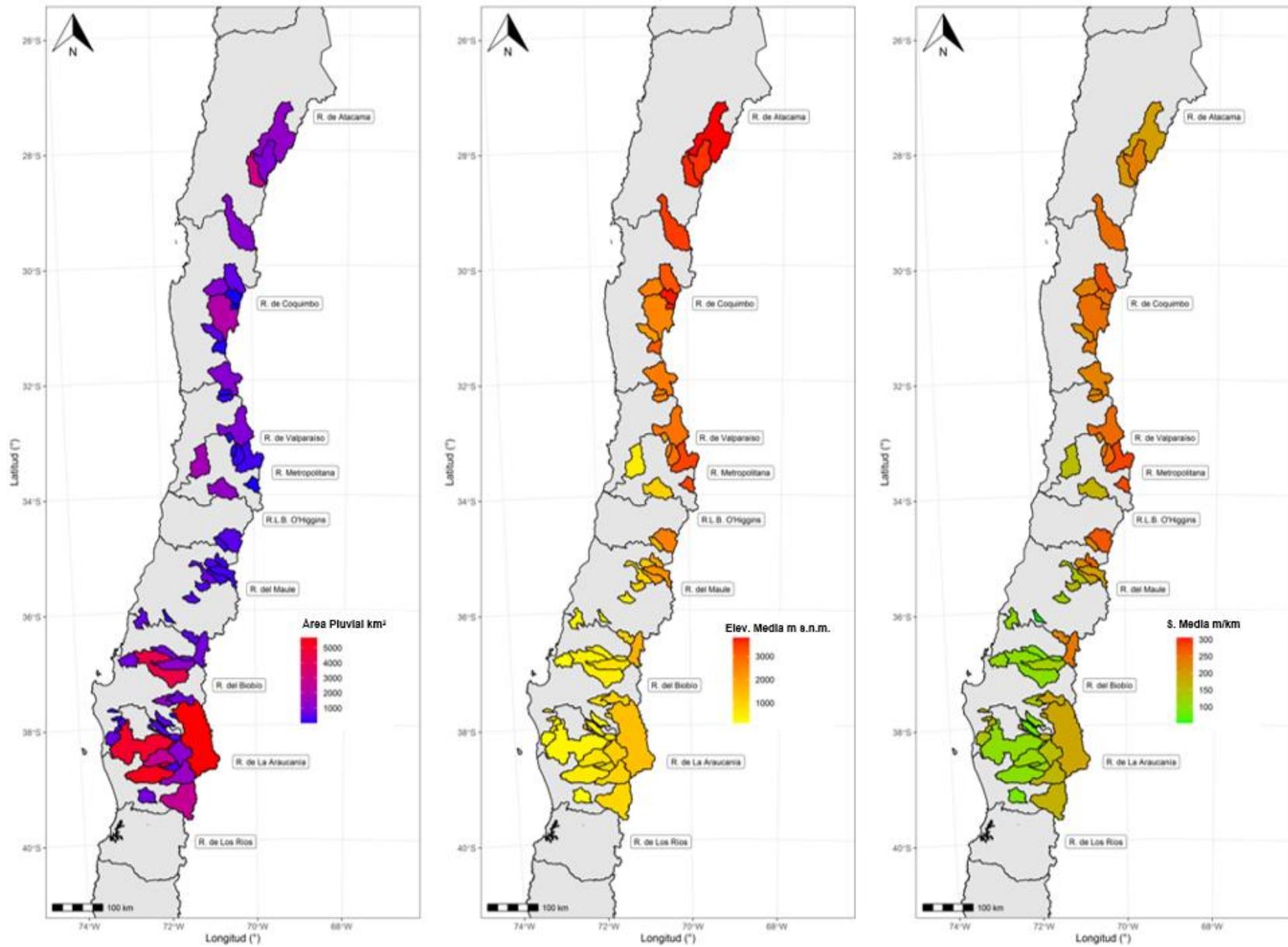


Figura 3.3. Variación espacial predictores físicos
Panel Izquierdo: Área Pluvial, Panel Central: Elevación Media, Panel Derecho: Pendiente Media

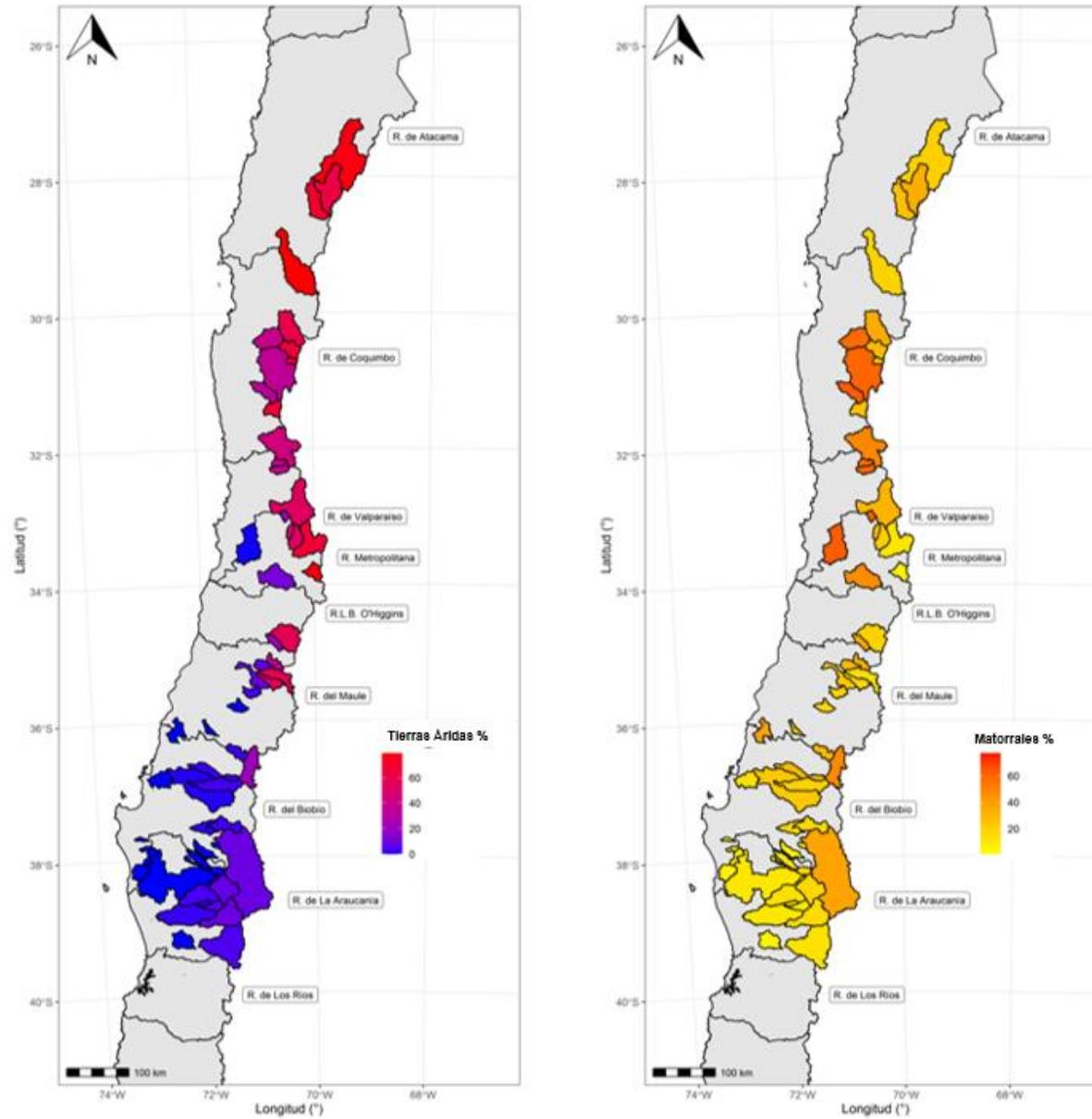


Figura 3.4. Variación espacial predictores de porcentaje de área cubierta por tierras áridas (panel izquierdo) y matorrales (panel derecho)

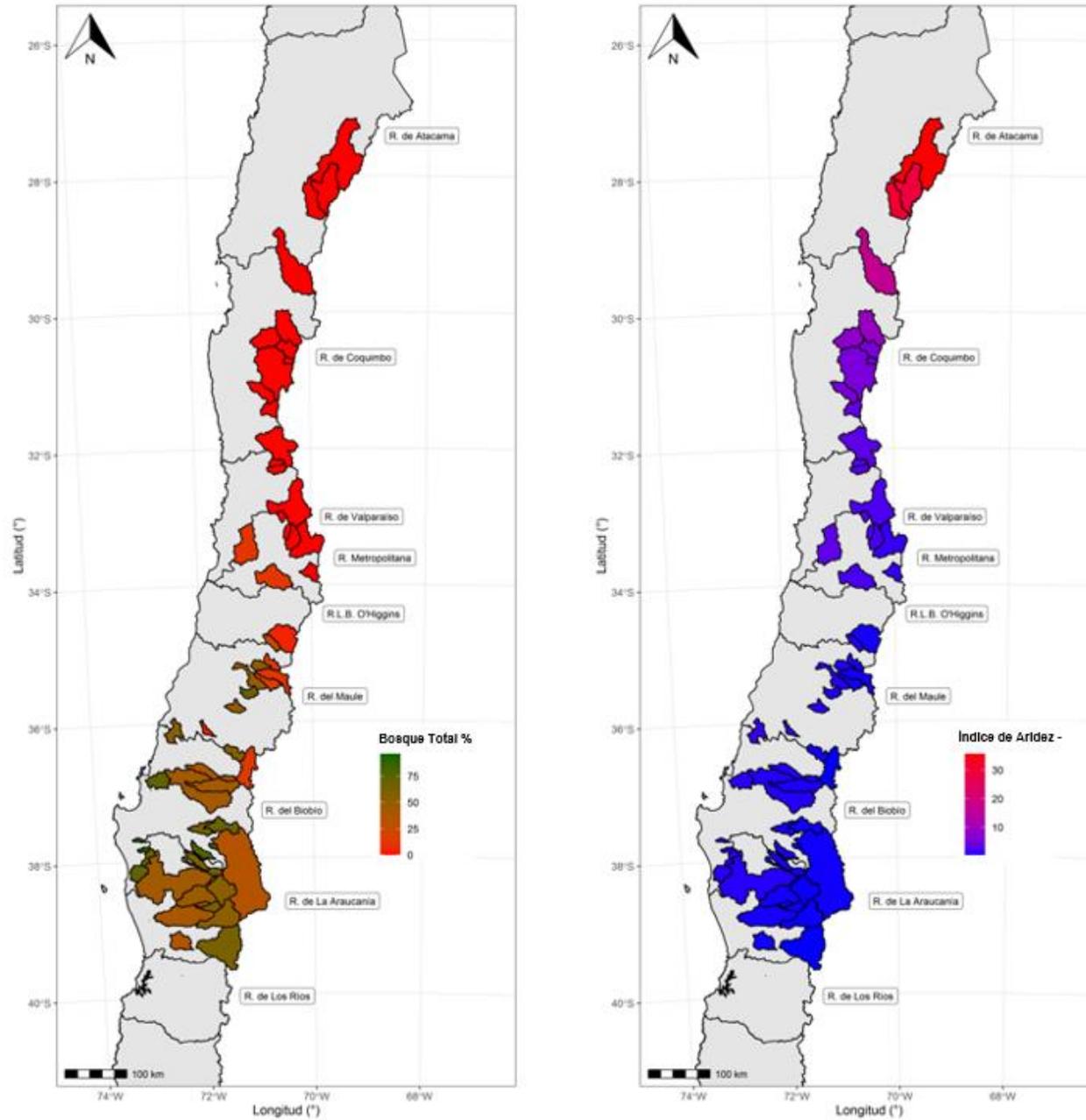


Figura 3.5 Variación espacial predictor porcentaje de cobertura de bosque total (panel izquierdo) y índice de aridez (panel derecho)

3.2 DATOS

3.2.1 Precipitación diaria

La serie de precipitaciones diarias promediadas a la escala de cuenca fue obtenida de la base de datos CAMELS-CL, (Álvarez-Garretón et al., 2018), y específicamente del producto CR2METv1.3 (DGA, 2017), el cual contiene una resolución horizontal 0,05° lat-lon. El periodo de registro considerado en el presente estudio comprende entre los años 1979-2016 (38 años).

3.2.2 Caudales máximos instantáneos

La serie de caudales máximos instantáneos para las cuencas de estudio fue obtenida de registros de la DGA, utilizando sólo estaciones con al menos 30 años de información que tuviesen al menos 95 % de datos no vacíos en el periodo abril-septiembre, es decir, un máximo de 10 días sin datos de caudal medio diario. Con esto, se obtuvieron periodos de registros variables (30 a 85 años) con año final 2018 que, si bien no son concurrentes con el periodo de datos de precipitación, se considera aceptable al corresponder a eventos de crecida independientes entre sí.

3.2.3 Resumen

En la Tabla 3.3, se presenta el resumen de las principales características de las series anuales de caudal máximo instantáneo y precipitación diaria máxima, considerando los datos de las 88 cuencas de estudio. Se resalta que los datos de caudal y precipitación corresponden al periodo pluvial comprendido entre abril-septiembre independiente que la cuenca sea predominantemente de origen nival, pluvial o pluvio nival.

Tabla 3.3 Resumen de estadísticas de caudal máximo instantáneo y precipitación diaria máxima de las 88 cuencas seleccionadas para el periodo abril – septiembre.

Parámetro	Caudal Máximo Instantáneo	Precipitación Diaria Máxima
	(m ³ /s)	(mm)
Años de registro	30 - 85	38
Máximo	8.410	169
Mínimo	0,02	0,2
Promedio	289	64
Desviación Estándar	0,4 - 1476	10,6 – 31
Coficiente de Variación CV	0,28 – 0,83	0,19 – 0,79
Coficiente de Asimetría	-0,20 – 6,22	-0,35 – 1,90

4. METODOLOGÍA

4.1 ÁREA PLUVIAL APORTANTE

El área pluvial aportante en cada cuenca se define a partir de la ubicación de la línea de nieves, estimada mediante la metodología de Covián & Stowhas (2015), diseñada en base a datos de temperatura y precipitación de varias estaciones hidrometeorológicas ubicadas en zonas próximas a la Cordillera de Los Andes. A partir de lo anterior, se parametriza la elevación de la línea de nieves en función de la latitud (28,5° a 46,5° latitud sur) y diferentes probabilidades de excedencia (de acuerdo con las temperaturas índice y umbral) para tres temporadas del año: invierno (mayo a septiembre), otoño-primavera (abril, octubre y noviembre) y verano (diciembre a marzo).

Tomando como referencia el Manual de Cálculo de Crecidas (DGA, 1995), y con el fin de evaluar condiciones promedio, en el presente estudio se adopta, para cada cuenca, la misma línea de nieves para todos los análisis (cuantiles de crecidas y estimación de parámetros de la GEV), utilizando aquella correspondiente a una probabilidad de excedencia del 50 %. La temporada del año utilizada corresponde a otoño-primavera, en atención a que algunas precipitaciones diarias máximas anuales utilizadas en el presente análisis sucedieron en el mes de abril. Así mismo, la línea de nieves obtenida para cada cuenca fue comparada con las estimaciones de Lagos & Jara (2017), realizada a partir de imágenes satelitales para la época de otoño.

4.2 ANÁLISIS PREVIOS

Previo al proceso de regionalización de crecidas y para cada una de las 88 cuencas, se realiza un análisis preliminar de las series anuales de caudales máximos instantáneos y de las de precipitaciones diarias máximas. Este análisis consiste en el cálculo de los principales estadísticos que caracterizan las variables hidrológicas estudiadas, en la identificación y cuantificación de sus tendencias y, por último, en el análisis de frecuencias para estimar caudales de crecida y precipitaciones diarias para diferentes periodos de retorno.

4.2.1 *Análisis de tendencias*

Para la identificación y cuantificación de las tendencias se emplearon tres técnicas matemáticas:

- Test de Mann-Kendall
- Coeficientes de Hurst
- Ajuste de pendientes lineales

4.2.1.1 *Test de Mann-Kendall*

Introducido por Mann (1945), este test no paramétrico busca comparar los signos de la diferencia entre un punto de la serie de tiempo y todos los puntos siguientes. El test supone que el valor esperado de la suma de los cambios de signos es nulo mientras que la varianza queda expresada analíticamente. Se calcula el test normal estadístico,

suponiendo que el número de datos analizados es mayor a $n = 10$, y el estadístico de prueba se compara con aquél obtenido para un nivel de significancia específico (5% en este caso). De esta manera, se detecta una tendencia si el valor del estadístico calculado por el test es menor que el asociado al nivel de significancia definido.

4.2.1.2 Coeficientes de Hurst

Hurst (1951) introduce la variación en los estadísticos de largo plazo para series de caudales afluentes a reservorios de agua. El fenómeno descrito en tal trabajo es retomado por Koutsoyannis (2006), donde se introduce el cálculo de un coeficiente H que describe la pendiente en un gráfico doble logarítmico entre el número de datos considerados “ n ” y las desviaciones estándar de los promedios disjuntos, obtenidos en base al mismo número “ n ” de datos considerados. Esto queda expresado en base a la siguiente ecuación:

$$\text{StD}(\bar{X}_n) = \frac{\sigma}{n^{1-H}} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

- n : Número de datos considerados
- H : Coeficiente de Hurst
- \bar{X}_n : Promedios móviles disjuntos de ventana temporal “ n ”, en mm o m^3/s
- StD : Desviación estándar, en mm o m^3/s

4.2.1.3 Ajustes de pendientes lineales

Este método hace referencia al ajuste de una regresión lineal simple ($y=m x +n$) a la serie de tiempo en cuestión. El problema posee una solución analítica a través del método de mínimos cuadrados, que depende de las características de la muestra empleada.

Las diferentes pendientes ajustadas a la serie cuantifican una disminución/aumento promedio de la variable analizada. Este ajuste lineal se utiliza en los trabajos de d’Arcangeli (1997) y Falvey & Garreaud (2009). Por otro lado, el criterio Sen (1968) permite ajustar una pendiente a los datos basándose en la mediana de los ajustes lineales de todos los pares de la muestra, permitiendo descartar puntos que se escapen de la tendencia de la muestra. La aplicación de dicha herramienta se muestra en Gocic & Trajkovic (2013), con resultandos coherentes con la aplicación del test de Mann-Kendall.

4.2.2 Análisis de frecuencia de caudales y precipitaciones

4.2.2.1 Caudales máximos instantáneos

La distribución Generalizada de Valores Extremos GEV se selecciona a partir de una evaluación de bondad de ajuste que incluye el criterio de información de Akaike (AIC), el criterio de información bayesiano (BIC) y la prueba de Chi-cuadrado. Posteriormente, se realiza un análisis de frecuencias para los caudales máximos instantáneos registrados en la salida de cada cuenca de estudio por medio del ajuste a la distribución antes mencionada. Para esto, se utiliza el paquete de RStudio “extRemes” (Gilleland, E., 2019). Los periodos de retorno considerados fueron 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Los parámetros de la GEV se estimaron mediante el Método de Máxima Verosimilitud, usualmente utilizado en la estimación de parámetros estadísticos (Villón, 2006).

Del análisis de frecuencias, se obtuvieron para cada cuenca los parámetros de la GEV definidos por medio de su función de distribución acumulada G:

$$G(z; \theta) = e^{\left\{-\left[1 + \varepsilon \left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\varepsilon}\right\}} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

z	:	Caudal máximo instantáneo
θ	:	$\{\mu, \sigma, \varepsilon\}, 1 + \varepsilon \left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right) \geq 0$
μ	:	Parámetro de ubicación
σ	:	Parámetro de escala
ε	:	Parámetro de forma

De acuerdo con el parámetro de forma, la GEV puede tomar tres (3) distribuciones: Gumbel (si $\varepsilon = 0$), Fréchet si $\varepsilon > 0$, y Weibull si $\varepsilon < 0$.

4.2.2.2 Precipitaciones diarias máximas

Para obtener las precipitaciones diarias máximas asociadas a los periodos de retorno analizados, se realiza el ajuste con el Método de Máxima Verosimilitud considerando diferentes distribuciones de probabilidad. Se selecciona como la de mejor ajuste la distribución Log Normal, la cual ha sido ampliamente utilizada en estudios de crecidas en Chile (DGA, 1995) y, al igual que en el caso de los caudales máximos instantáneos, para probar su bondad de ajuste se incluye el análisis de los indicadores AIC, BIC y la prueba de Chi-cuadrado.

4.3 ANÁLISIS EXPLORATORIO

Antes de efectuar la regionalización de crecidas para cada una de las siete regiones homogéneas, se realiza un análisis exploratorio con el fin de: (i) identificar los mejores predictores para las variables dependientes (seis cuantiles de crecidas y los tres parámetros de la GEV), e (ii) identificar colinealidad entre ellos. Luego de realizar una transformación logarítmica, se analizaron histogramas y gráficos de dispersión, estimando además el coeficiente de correlación de Pearson entre cada par de variables.

4.4 FORMACIÓN DE REGIONES HOMOGÉNEAS

El ajuste de los modelos regionales para los cuantiles de crecidas y los parámetros de la GEV se llevó a cabo en tres grupos de regiones homogéneas, los que fueron creados mediante las metodologías descritas a continuación:

4.4.1 *Dominio completo*

Esta zona considera las 88 cuencas de estudio, y se extiende desde la región de Atacama hasta la región de la Araucanía.

4.4.2 *Tres regiones según las zonas del método DGA-AC*

Esta metodología considera las tres regiones definidas en el método de estimación de crecidas DGA-AC (DGA, 1995) para calcular el caudal medio diario máximo de 10 años de periodo de retorno. Por lo tanto, las regiones quedaron conformadas de la siguiente manera:

- Región 1: Regiones de Atacama y Coquimbo (21 cuencas).
- Región 2: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y Libertador Bernardo O'Higgins (18 cuencas).
- Región 3: Regiones de Maule, Biobío (incluye región de Ñuble) y Araucanía (49 cuencas).

4.4.3 *Algoritmo de agrupación K-Means*

Esta metodología considera regiones formadas mediante el algoritmo de agrupación K-Means, el cual necesita como dato de entrada el número k de grupos, así como un conjunto de atributos (p.ej., características físicas y climáticas de las cuencas de estudio) a utilizar en la formación de los grupos. A partir del número de grupos, el algoritmo genera aleatoriamente k puntos (centroides). Luego, asigna a cualquiera de esos puntos todas las observaciones con las distancias euclidianas más pequeñas. A continuación, se recalculan los centroides y se re-asignan las observaciones. Este proceso se repite de forma iterativa, y los grupos se van ajustando hasta que la asignación de pertenencia a cada grupo ya no cambia. Este resultado final representa el ajuste que maximiza la distancia entre los distintos grupos y minimiza la distancia dentro del grupo, resolviendo de esta manera la Ecuación 4.3.

$$\text{Mín. } C_1, C_2, \dots, C_k \left[\sum_{k=1}^K \frac{1}{|C_k|} = \sum_{i, i' \in C_k} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2 \right] \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde:

K	:	Número de grupos deseados
p	:	Número de variables explicativas
$ C_k $:	Número de observaciones en el grupo k
i	:	Observación
j	:	Variable explicativa

Se adopta como criterio que la cantidad de grupos minimice la varianza (Ec. 4.3) y a su vez que los grupos formados tengan al menos 20 cuencas, con el fin de conseguir muestras con tamaños adecuados para análisis estadísticos, obteniéndose tres grupos. Previo a la generación de los grupos, se realizó un análisis exploratorio con el fin de identificar y seleccionar los predictores que mostraran una mayor correlación con los caudales máximos instantáneos observados. La verificación de los grupos se lleva a cabo mediante diferentes indicadores de respuesta hidrológica, como relación caudal máximo medio diario y caudal máximo instantáneo, coeficiente de variación CV y pendiente de la curva de frecuencias, buscando que estos fueran similares para las cuencas dentro de cada grupo.

4.5 MODELOS DE REGIONALIZACIÓN

4.5.1 Ecuación potencial

Para relacionar la variable hidrológica de interés (cuantiles de crecida y los parámetros de la GEV) y los predictores (características físicas y climáticas), se adoptó una ecuación de tipo potencial (Thomas & Benson), determinada por:

$$Y_T = k(T) * A^{\alpha(T)} * P^{\beta(T)} * S^{\gamma(T)} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Donde:

Y_T	:	Variable de interés (cuantil de crecida o parámetro de la GEV)
A, P y S	:	Características físicas y climáticas de la cuenca de estudio
k, α , β y γ	:	Parámetros de regresión del modelo
T	:	Periodo de retorno

Los parámetros de la ecuación anterior fueron obtenidos mediante el ajuste a un modelo lineal por el método de los mínimos cuadrados, para lo cual, se realiza una transformación logarítmica con el fin de abordar la no linealidad de la expresión general (p. ej. Thomas & Benson, 1970; Pandey & Nguyen, 1999; Griffis & Stedinger, 2007).

4.5.2 Selección de predictores para los modelos de regionalización

Los predictores para los modelos de regionalización fueron seleccionados a partir de ocho (8) predictores candidatos mediante el método paso a paso hacia adelante (*Forward Stepwise Selection*). El modelo inicial no contiene ningún predictor (p.ej., sólo el término constante), y a partir de él se generan todos los posibles modelos, introduciendo un solo predictor (el que entregue la mayor mejora en el ajuste) a la vez. En caso de que varios predictores mejoren el ajuste en la misma medida, se selecciona el que incremente más la capacidad predictiva del modelo. Este proceso se repite hasta incluir todos los predictores, con lo que finalmente se obtiene el mejor modelo según cantidad de predictores (1, 2....., 8), para un total de ocho (8) modelos de regionalización.

4.5.3 Evaluación y selección de los modelos de regionalización

El comportamiento de los modelos de regresión se evalúa mediante diferentes criterios estadísticos. A partir del proceso de evaluación, se selecciona en todos los casos el modelo más simple, siendo aquel en que la incorporación de un predictor adicional no presenta una mejora sustancial (> 1%) en el poder predictivo. Los criterios de evaluación empleados se describen a continuación.

4.5.3.1 Coeficiente de determinación del ajuste

El coeficiente de determinación R^2 , indica el porcentaje de varianza de la variable de interés que se explica mediante el modelo respecto al total de variabilidad. El $R^2_{ajustado}$ (Ec. 4.4), introduce una penalización al valor de R^2 por cada predictor que se introduce en el modelo, la que depende del número de predictores utilizados (m) y del tamaño de la muestra (n).

$$R^2_{ajustado} = 1 - \frac{n-1}{n-m-1} * (1 - R^2) \quad (\text{Ec. 4.5})$$

4.5.3.2 BIC

El criterio de información Bayesiano (BIC), es utilizado para la selección de un modelo entre un conjunto de candidatos. Se basa, en parte, en la función de verosimilitud, introduciendo un término de penalización para el número de parámetros. Está dado por la siguiente expresión:

$$\text{BIC} = -2 * \ln L + m * \ln(n) \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Donde:

n	:	Tamaño de la muestra
m	:	Número de variables explicativas
L	:	Máximo valor de la función de verosimilitud del modelo

4.5.3.3 Validación cruzada

La capacidad predictiva de los modelos fue evaluada mediante el método de validación cruzada de los k grupos, con el fin de evitar problemas de sobreajuste u *overfitting* (Gareth et al., 2013). En este método se dividen los datos de forma aleatoria en k grupos de aproximadamente el mismo tamaño: k-1 grupos se emplean para entrenar el modelo, y uno de los grupos se emplea como test. Este proceso se repite k veces utilizando un grupo distinto como test en cada iteración. El proceso genera k estimaciones del error cuadrático medio (MSE_i) como medida del test *error*, cuyo promedio se emplea como estimación final (CV_k).

$$CV_{(k)} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (MSE_i) \quad (\text{Ec. 4.7})$$

4.5.3.4 RMSNE

Con el fin de comparar los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de los parámetros de la GEV se utilizó la Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado (RMSNE por sus siglas en inglés) usado típicamente en estudios de regionalización de crecidas (Blöschl, 2016 & Haddad, 2015):

$$RMSNE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{cal} - Q_{obs}}{Q_{obs}} \right)^2} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Donde:

- Q_{obs} : Caudal observado, obtenido del análisis de frecuencias en cada estación.
- Q_{cal} : Caudal calculado o estimado, obtenido por los modelos de regionalización para cuantiles de crecida y para los parámetros de la GEV
- n : Tamaño de la muestra

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 ANÁLISIS PRELIMINARES

En este capítulo se presenta, a modo de ejemplo, el análisis realizado para una cuenca de régimen pluvial (río Cautín en Rari-Ruca, región de la Araucanía). Por otro lado, en los Anexos A.1 y A.2, se presenta el análisis de las 88 cuencas de estudio para los caudales máximos instantáneos y precipitaciones diarias máximas, respectivamente. Finalmente, en dichos Anexos se incluye, como complemento, el análisis gráfico para la cuenca nivo pluvial, río Alicahue en Colliguay, y para la cuenca nival, río Blanco en río Blanco, ambas de la región de Valparaíso.

5.1.1 Análisis de tendencias

En la Tabla 5.1, se muestra un resumen de los diferentes métodos de cuantificación de tendencias empleados para la cuenca de ejemplo, mientras que en la Figura 5.1 y Figura 5.2 se muestran las tendencias de las series a nivel anual para las variables hidrológicas de la estación río Cautín en Rari-Ruca.

Tabla 5.1 Indicadores de tendencias para las series de caudales máximos instantáneos y precipitación diaria máxima en la cuenca del río Cautín en Rari-Ruca (región de la Araucanía)

Variable	Ajuste lineal		Porcentajes*		MK test, $\alpha = 5\%$ [p-value]	Coeficiente de Hurst
	Min ECM [m ³ /s /año, mm /año]	ThielSen [mm-m ³ /s /año]	Mínimo ECM [%]	ThielSen [%]		
Caudales	-1,43	-1,35	-0,27	-0,25	0 (0,11)	0,56
Precipitaciones	-0,25	-0,14	-0,19	-0,17	0 (0,23)	0,48

*Porcentaje calculado respecto al promedio

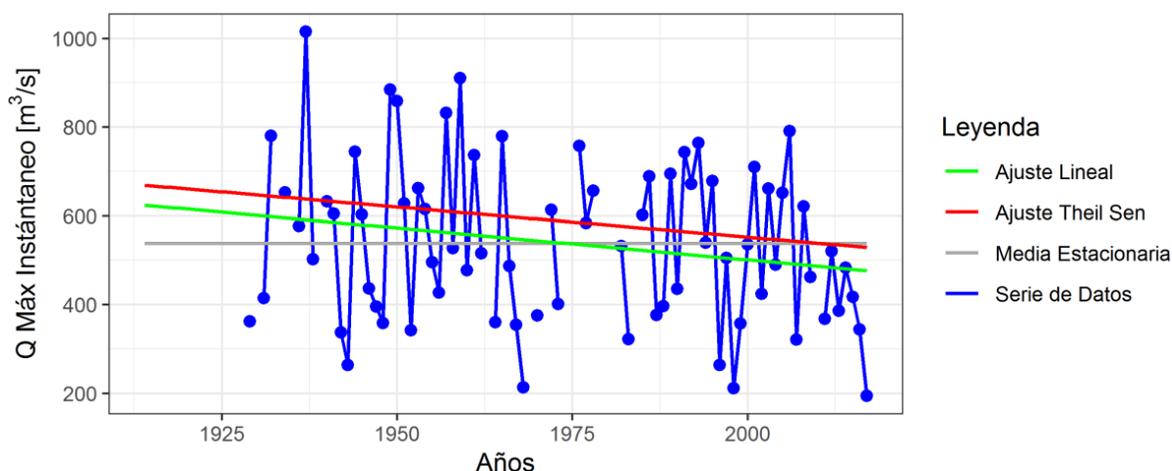


Figura 5.1 Análisis de tendencias para la serie de caudales máximos instantáneos en la estación río Cautín en Rari-Ruca (región de la Araucanía)

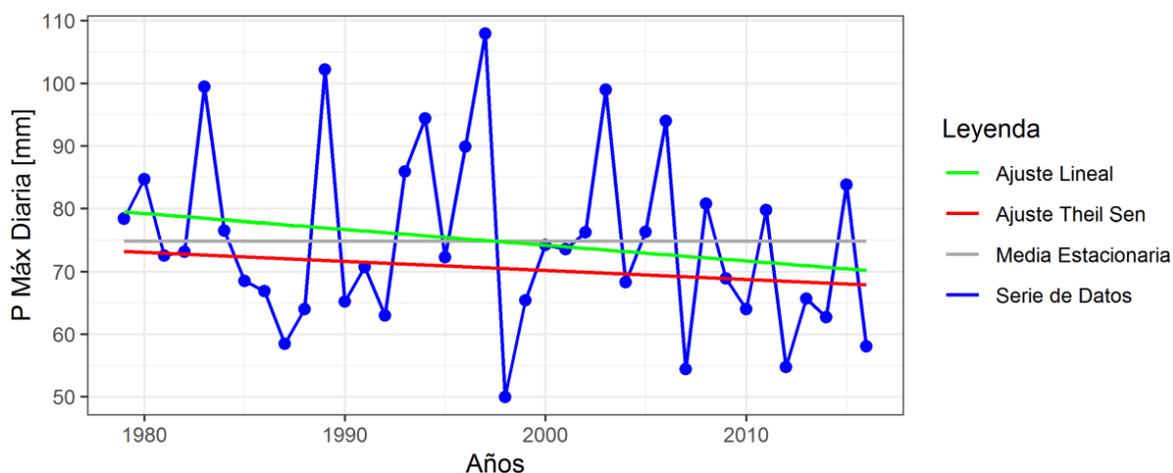


Figura 5.2 Análisis de tendencias para la serie de precipitación diaria máxima en la estación río Cautín en Rari-Ruca (región de la Araucanía)

En términos generales, los resultados indican un comportamiento estacionario tanto para la serie de caudales como de precipitaciones en la cuenca de ejemplo. A pesar de lo anterior, se resalta que las series exhiben una leve tendencia a la baja, evidenciada tanto gráficamente como en los valores de los ajustes lineales ECM y Sen; no obstante, dicha tendencia no es significativa desde el punto de vista estadístico. Lo anterior se confirma con el test de Mann-Kendall, en el cual se acepta la hipótesis nula y el coeficiente de Hurst que presenta valores cercanos a 0,5, sugiriendo de esta manera que en el largo plazo los estadísticos se mantienen estacionarios.

El análisis realizado para las cuencas restantes (Anexos A.1 y A.2) indica que un grupo reducido (< 10%) de estas presentan algún signo de tendencia significativa, ya sea en la serie de caudales máximos instantáneos o de precipitaciones diarias máximas y, por lo general, en sólo una de las técnicas de detección empleadas. Dichas cuencas se encuentran espacialmente ubicadas en la zona centro norte de Chile para el caso de las series de caudales y en la zona central para el caso de las precipitaciones, lo que coincide con diferentes publicaciones (Pizarro et al., 2017; Ricchetti, 2018;) que muestran evidencia de no estacionariedad en las series de precipitaciones, especialmente en la zona central de Chile.

Lo anterior evidencia la necesidad de realizar estudios de atribución que expliquen las razones de dichas tendencias, incorporando no solo consideraciones de cambio climático, sino que también otros componentes del proceso lluvia-escorrentía – como cobertura y tipo de suelo –, que puedan estar atenuando o generando tendencias en los caudales de crecida no explicadas solamente por las precipitaciones diarias máximas. En caso de ser necesario, convendría realizar un análisis de frecuencias bajo un escenario no estacionario, que permita identificar su efecto en el proceso de regionalización acá presentado.

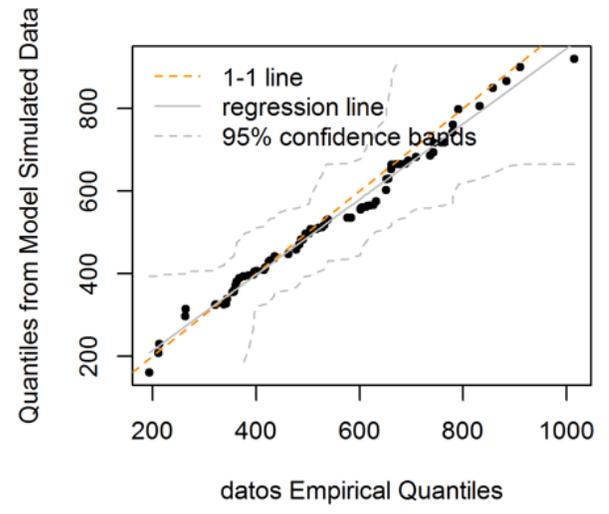
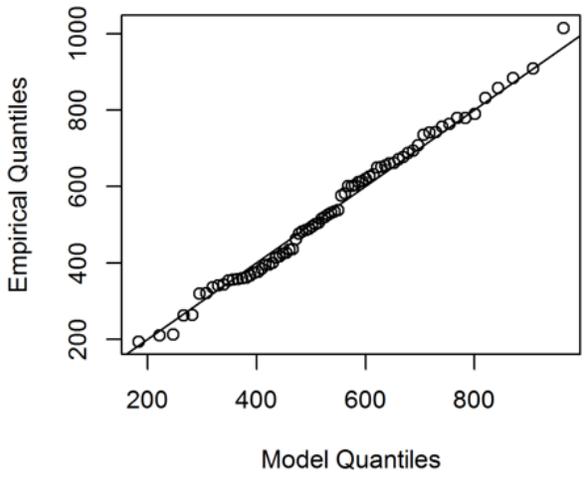
Por último, considerando la poca cantidad de cuencas con tendencia de acuerdo con algún método de detección, y dado que un grupo todavía más reducido lo evidenció para más de un test de evaluación, se conservan dichas cuencas para efectos del proceso de regionalización de caudales de crecida. Esto es relevante, ya que el ajuste lineal múltiple en la presente tesis supone que tanto las series de precipitación diarias máximas y caudales máximos instantáneos son estacionarias.

5.1.2 Ilustración de análisis de frecuencias individuales

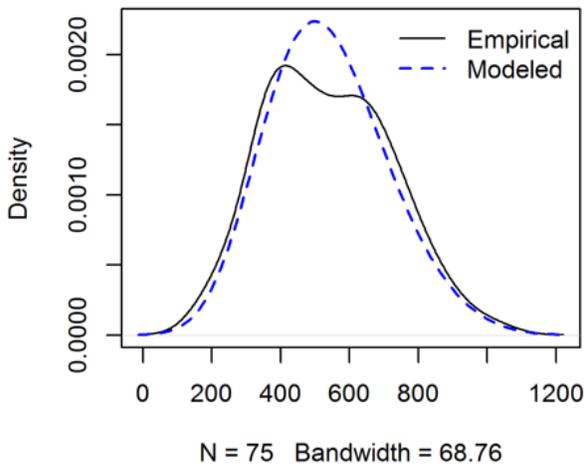
En la Figura 5.3 se ilustra, para la cuenca de ejemplo, el ajuste a la distribución GEV de los caudales máximos instantáneos, mientras que en la Figura 5.4 se presenta el ajuste de la distribución Log Normal para el caso de las precipitaciones diarias máximas. En ambos paneles, se evidencia la bondad del ajuste a dichas distribuciones mediante los gráficos cuantil-cuantil y la función de densidad. Lo anterior se comprueba, además, con el análisis de diferentes indicadores como AIC, BIC y la prueba de Chi-cuadrado.

Es necesario resaltar que, en el caso del ajuste de las precipitaciones diarias, la distribución Log Normal entregó, en la mayoría de las cuencas, los mejores resultados para cada uno de los tres indicadores de bondad de ajuste implementados. En el caso de los caudales máximos instantáneos, se presentaron resultados similares para las distribuciones Log Normal, Log Pearson III y GEV, con una ligera ventaja favorable a esta última, motivo por el cual fue adoptada.

En el Anexo A.1 y A.2, se incluyen las gráficas de ajuste para las dos cuencas de ejemplo adicionales, y se presentan los valores de caudales máximos instantáneos y precipitaciones diarias máximas para diferentes periodos de retorno en todas las cuencas de estudio. En el caso de los caudales máximos instantáneos se incluyen, además, los parámetros de posición, forma y escala que caracterizan la distribución GEV.



Rio.Cautin.En.Rari.Ruca



Rio.Cautin.En.Rari.Ruca

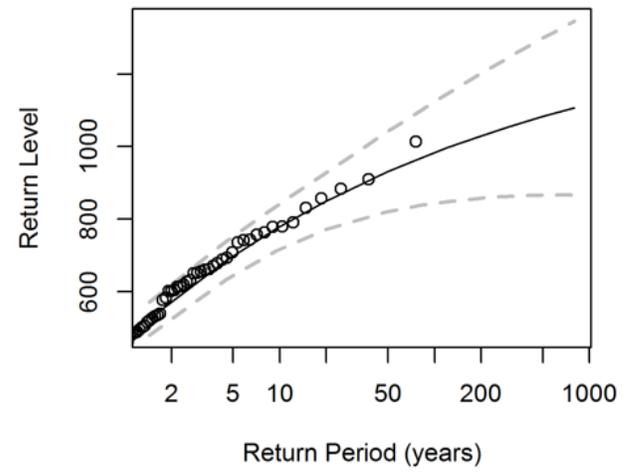


Figura 5.3 Ajuste a la distribución GEV para la serie de caudales máximos instantáneos estación río Cautín en Rari-Ruca (región de la Araucanía).

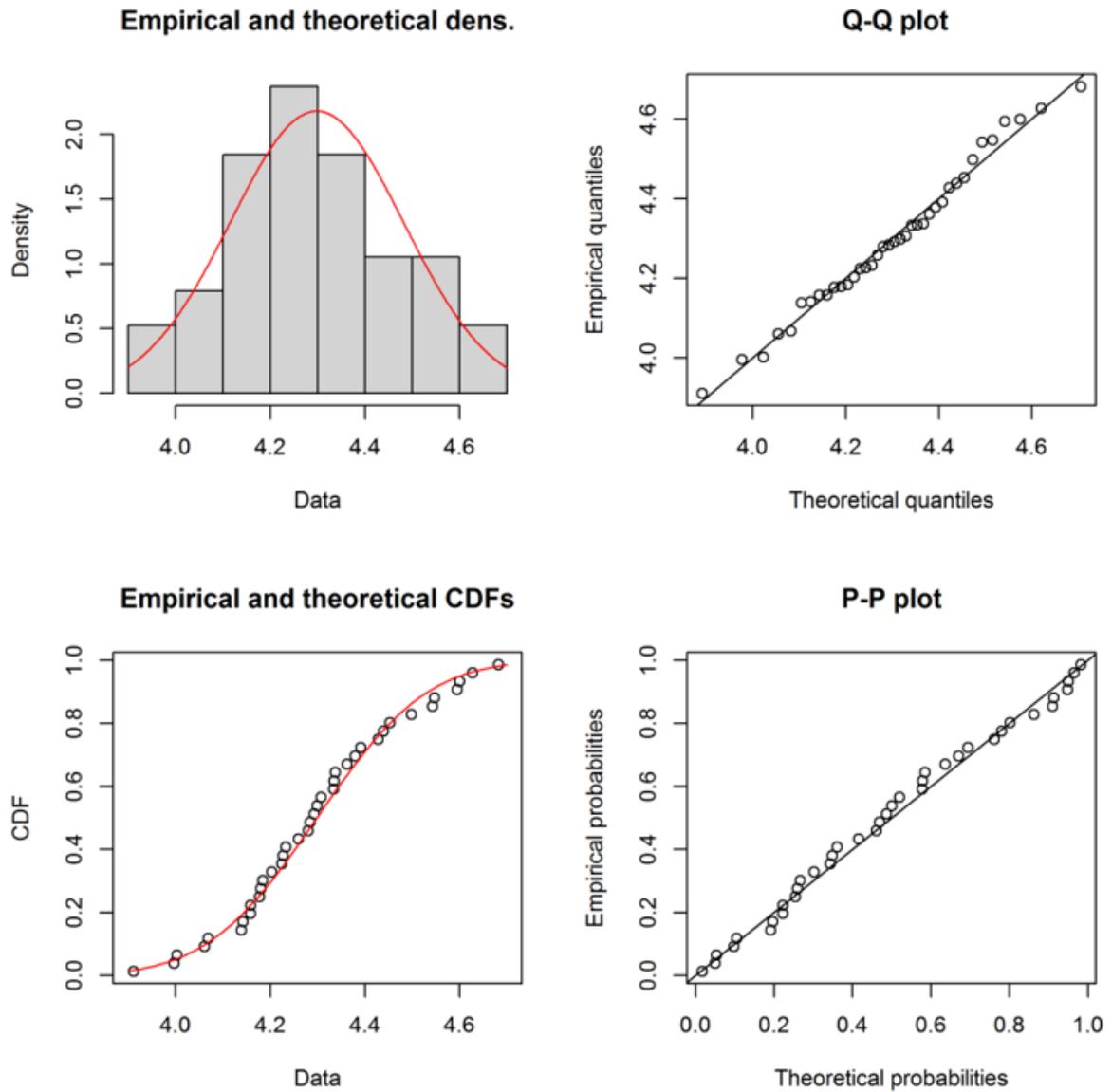


Figura 5.4 Ajuste de la distribución Log Normal a la serie de precipitación diaria máxima en la cuenca del río Cautín en Rari-Ruca (región de la Araucanía)

5.2 REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA EL DOMINIO COMPLETO

5.2.1 *Análisis exploratorio*

En la Figura 5.5 y Figura 5.6 se presenta el análisis exploratorio para el caudal máximo instantáneo de 10 años de periodo de retorno (Q_{10}) y el parámetro de posición de la GEV (μ_{GEV}), respectivamente. Por otro lado, en el Anexo B.1 se incluyen más ejemplos de este análisis para las restantes zonas homogéneas estudiadas. Como complemento, en la Figura 5.7 se presentan, para las dos variables dependientes de ejemplo, los coeficientes de correlación de Spearman, el cual se escoge por ser un coeficiente no paramétrico (Yue et al, 2002) y, además, más robusto ante la presencia de *outliers* en comparación con el de Pearson. No obstante, se resalta que en el presente estudio se obtuvieron resultados concordantes entre ambos respecto a la identificación de correlaciones de tipo lineal entre las variables analizadas. Finalmente, se resalta que el análisis acá presentado fue igualmente desarrollado para cada uno de los caudales de periodo de retorno considerados y para los tres parámetros de la GEV.

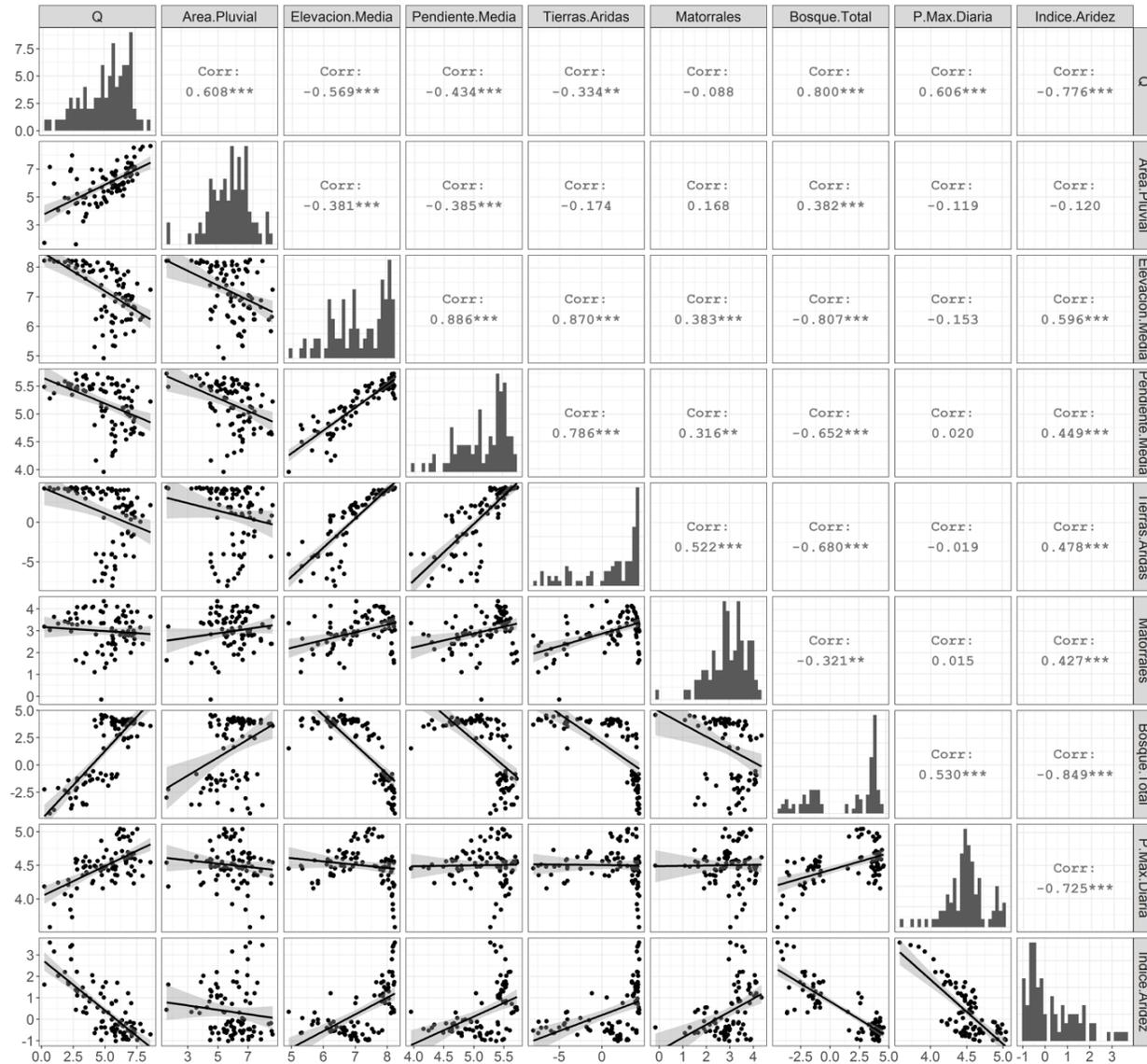


Figura 5.5 Análisis exploratorio Q_{10} (escala logarítmica), para las cuencas del dominio completo
 *p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

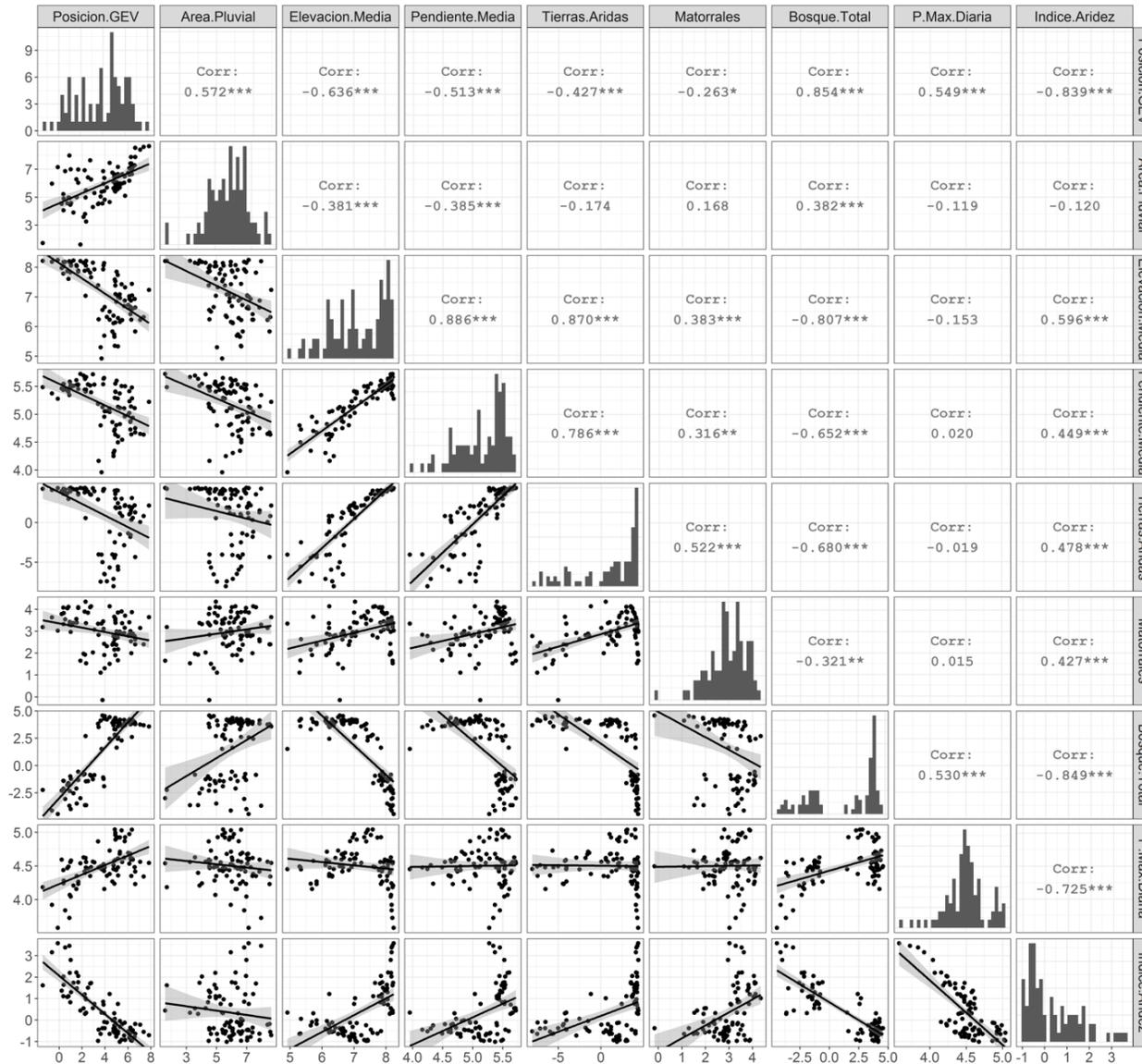


Figura 5.6 Análisis exploratorio del parámetro de posición μ de la GEV (escala logarítmica), para las cuencas del dominio completo
 *p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

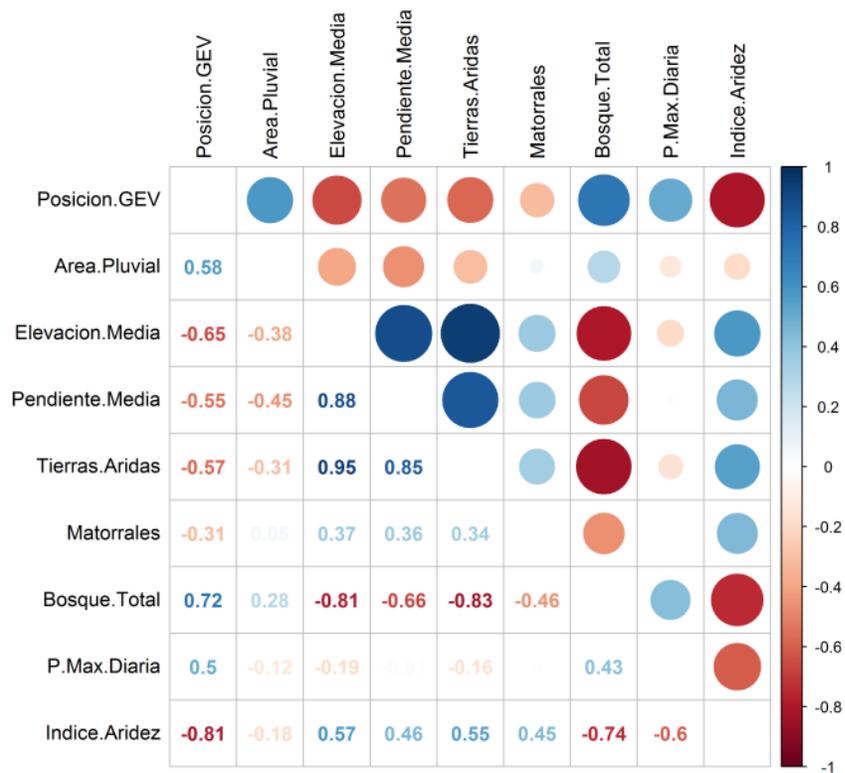
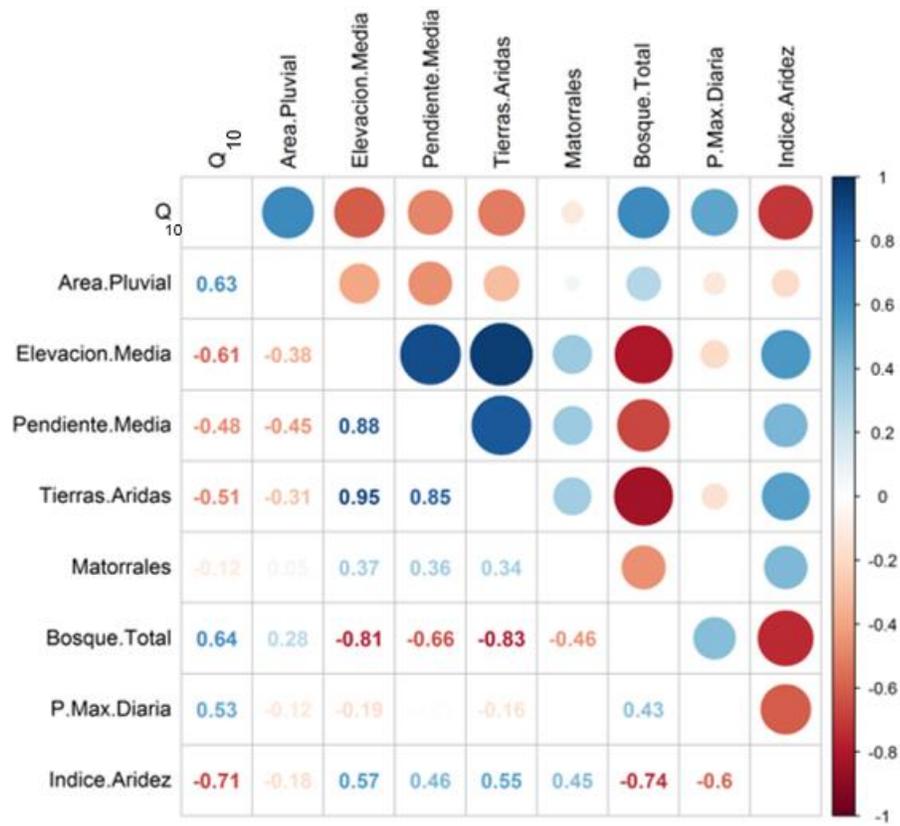


Figura 5.7 Coeficientes de correlación de Spearman para Q_{10} (panel superior) y parámetro de ubicación μ de la GEV (panel inferior) vs predictores, para el dominio completo (Tamaño del círculo muestra magnitud del valor)

Del análisis exploratorio, es posible extraer las siguientes conclusiones para la variable Q_{10} :

- Los predictores que presentaron una buena correlación ($> 0,60$) con Q_{10} fueron: índice de aridez (-0,71), cobertura de bosque total (0,64), área pluvial (0,63) y P_d^{10} (0,61). Por otro lado, la menor relación se dio con cobertura de matorrales (-0,12). Los demás predictores presentaron una correlación moderada.
- Dentro de los predictores que entregaron una mayor correlación con Q_{10} , llama la atención la cobertura de bosque total, cuya relación resultó ser positiva con valores de 0,80 y de 0,64 para los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, respectivamente. Era esperable que (a igualdad de condiciones, es decir, igual área de drenaje, igual precipitación, etc.) se diera una relación negativa, dado el efecto amortiguador de las crecidas que, en general, presenta la cobertura vegetal debido al favorecimiento de los procesos de intercepción e infiltración (Pizarro et al, 2017). Esta correlación positiva se explica principalmente por la composición de la muestra analizada, la cual está conformada por 49 cuencas (de 88) de la zona sur que, por su ubicación geográfica, presentan mayores caudales y coberturas de bosque en comparación con las cuencas de las zonas norte y centro de Chile, que presentan valores menores en ambos parámetros, tal como se detalló anteriormente en el capítulo 3 específicamente en la Tabla 3.2. Por lo tanto, es posible concluir que esta correlación no es evidencia de causalidad, sino que obedece principalmente a la composición de la muestra seleccionada, lo cual será evidenciado en el Anexo D donde se consideran en el análisis sólo cuencas de la zona sur de Chile.
- Se evidencia una importante correlación lineal ($> 0,60$) entre los predictores elevación media, tierras áridas, pendiente media, cobertura de bosque total e índice de aridez, por lo que no es recomendable incluirlos conjuntamente como predictores del modelo, dado que un supuesto importante de la regresión lineal múltiple es que no exista colinealidad entre predictores.
- La alta heterogeneidad en las características de las cuencas definidas en la región de dominio único genera correlaciones que, desde el punto de vista hidrológico, no son esperables. Lo anterior se debe a la agregación de efectos sobre los procesos de generación de crecidas o al fuerte predominio de unos sobre otros. A manera de ejemplo, se destaca la correlación negativa de Q_{10} con la pendiente media, parámetro que, por lo general, exhibe una relación positiva con los caudales de crecida de acuerdo con lo documentado en la literatura (Blöschl et al., 2013; Rao, 2006). Lo anterior se debe a que las cuencas con menor área pluvial generan menor caudal y, a su vez, tienen mayor pendiente al estar ubicadas en la cabecera de cuencas de mayor tamaño.
- Por último, correlaciones similares a las obtenidas para Q_{10} se obtuvieron para caudales de crecida con diferentes periodos de retorno; sin embargo, sus valores se fueron reduciendo conforme aumentaba este, salvo la existente con el área pluvial, que se mantuvo relativamente constante, siendo la de valor más alto e igual a 0,6 (Pearson y Spearman) para Q_{100} .

Del análisis exploratorio, se pueden extraer las siguientes conclusiones para el caso de μ_{GEV} y los demás parámetros de la GEV (incluidos en el Anexo F.1):

- Las variables que presentaron una buena correlación ($> 0,60$) con el parámetro de posición (μ) y el parámetro de escala (σ) de la GEV fueron (en orden de importancia): índice de aridez (-), cobertura de bosque total (+), elevación media (-), área (+) y P_d^{10} .
- En el caso del parámetro de forma (ϵ), las variables que arrojaron mejor correlación ($> 0,50$) fueron: bosque total (-), matorrales (+), tierras áridas (+) y elevación media (+).
- En el caso de los parámetros de posición (μ) y escala (σ), las correlaciones coinciden de manera general con las obtenidas para los cuantiles de crecida. Lo anterior es esperable, considerando que dichos parámetros son una medida de la magnitud y la variabilidad de las crecidas anuales en la cuenca de análisis. Estos resultados son consistentes con varias experiencias reportadas en la literatura donde se regionaliza la distribución Log Pearson III (Haddad & Rahman, 2012; Haddad et al., 2014; Kader et al., 2015) y la GEV (Blöschl et al., 2013; Wu et al, 2019).
- Con respecto a los resultados obtenidos para el parámetro de forma (ϵ), el cual mide el grado de asimetría de la distribución, es de notar la baja correlación con el área. Esto ha sido destacado por varios autores (Blöschl et al., 2013; Wu et al, 2019), y evidenciado en algunos estudios de regionalización con otras distribuciones de probabilidad, como lo es la Log Pearson III (Haddad & Rahman, 2012; Haddad et al., 2014; Kader et al., 2015), en los cuales el coeficiente de asimetría o de forma se correlacionó de menor manera con otros predictores físico-climáticos como cobertura de bosques, pendiente, longitud del cauce principal, evaporación; entre otros.
- Se identifica una importante relación lineal entre la elevación media, tierras áridas, pendiente media, cobertura de bosque total e índice de aridez; por lo que no es conveniente su inclusión conjunta como predictores del modelo, dados los supuestos detrás de modelos de regresión lineal múltiple.

5.2.2 Modelos de regionalización

5.2.2.1 Selección de predictores

El procedimiento de *Forward Stepwise Selection* se ilustra en la Tabla 5.2 para el caso de Q_{10} y en la Tabla 5.3 para μ_{GEV} . Para cada variable dependiente, se incluye el mejor modelo de regresión según el número de predictores. En el Anexo C.1, se presenta el mismo análisis anterior para las restantes zonas homogéneas consideradas en este trabajo.

Tabla 5.2 Predictores de los mejores modelos de regionalización de Q_{10} , para la región definida por dominio completo

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área Pluvial	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	X	X	X	X	X	✓	X	X
2	✓	✓	X	X	X	X	✓	X	X
3	✓	✓	X	X	X	X	✓	✓	X
4	✓	✓	X	X	X	X	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	X	X	X	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 5.3 Predictore de los mejores modelos de regionalización del parámetro de posición μ de la GEV, para la región definida por dominio completo

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área Pluvial	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	X	X	X	X	X	✓	X	X
2	✓	✓	X	X	X	X	✓	X	X
3	✓	✓	X	X	X	X	✓	X	✓
4	✓	✓	X	X	X	X	✓	✓	✓
5	✓	✓	X	X	X	✓	✓	✓	✓
6	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Los resultados de la Tabla 5.2 y Tabla 5.3 son coherentes con el análisis exploratorio incluido en el capítulo 5.2.1; es decir, los predictores que muestran una mejor correlación son aquellos que mejor explican la variabilidad de Q_{10} y μ_{GEV} . Por otro lado, se destaca que modelos de menos de tres predictores están conformados exclusivamente por constantes independientes del periodo de retorno, siendo estas: área pluvial (en el presente estudio se ha considerado la línea de nieves constante), fracción de bosque total e índice de aridez. Esto puede indicar erróneamente que cuencas con valores similares de dichos predictores tengan, por lo tanto, caudales de crecida similares, a pesar de tener respuestas hidrológicas diferentes ante eventos extremos de precipitación.

De lo anterior, se puede concluir que los modelos que no dependen de la precipitación diaria máxima podrían ser derivados y aplicados en zonas geográficas muy acotadas, donde el régimen de precipitaciones sea relativamente constante y, por lo tanto, las crecidas puedan ser explicadas por variaciones en otros parámetros físicos y climáticos como el área, bosque total e índice de aridez.

5.2.2.2 Evaluación de modelos de regionalización

En la Figura 5.8 y Figura 5.9 se presentan los valores de los criterios de evaluación de los modelos de regresión en función del número de predictores para el caso de Q_{10} y μ_{GEV} , respectivamente. Se observa que los valores de $R^2_{ajustado}$ varían entre 0,64 y 0,92 para Q_{10} y entre 0,73 y 0,93 para μ_{GEV} , mientras que los valores de BIC estos son menores que cero con máximos de -81 y -106 respectivamente. Finalmente, los valores del *test error* CV_k obtenidos mediante validación cruzada, se encuentran entre 1,30 y 0,33 para Q_{10} y entre 1,32 y 0,34 para μ_{GEV} .

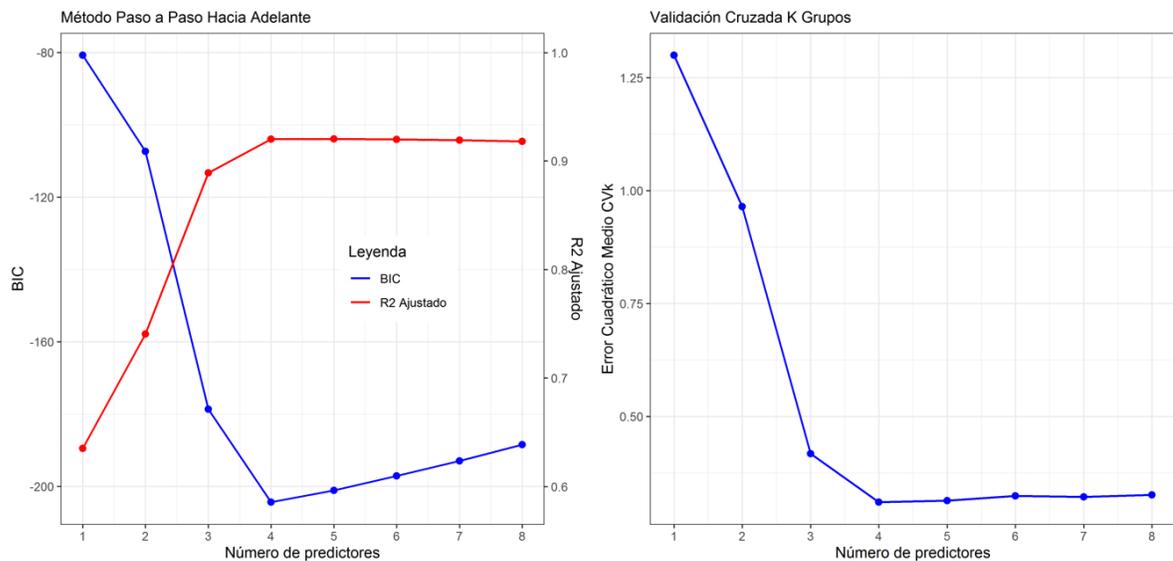


Figura 5.8 Mejores modelos de regionalización de Q_{10} , según número de predictores, para la región definida por dominio completo

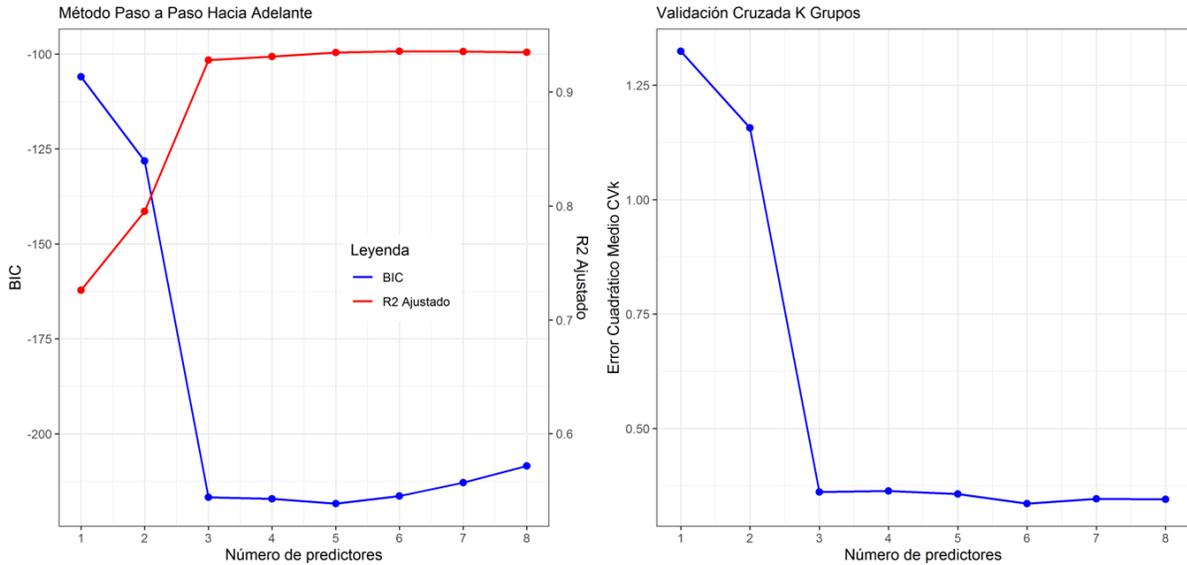


Figura 5.9 Mejores modelos de regionalización del parámetro de ubicación μ de la GEV, según número de predictores, para la región definida por dominio completo

En la Figura 5.8 y Figura 5.9 se aprecia que, para los tres criterios de evaluación, el beneficio de utilizar más de tres predictores es poco relevante. Por lo tanto, se seleccionan los modelos de tres predictores con valor de $R^2_{ajustado}$ de 0,89 en el caso de Q_{10} y de 0,93 para μ_{GEV} , obteniéndose en ambos casos un buen ajuste lineal en los modelos de regresión. Finalmente, se indica que, para el resto de los caudales de crecida (i.e., periodos de retorno) y parámetros de la GEV, los resultados fueron similares a los aquí presentados.

5.2.2.3 Selección de modelos de regionalización

En la Tabla 5.4, se resumen los modelos de regresión de tres predictores seleccionados para cada cuantil de crecida y los parámetros de la GEV, incluyéndose los estadísticos de evaluación que fueron indicados anteriormente.

En la Tabla 5.4, se muestra en el caso de los cuantiles de crecida que, a medida que aumenta el periodo de retorno, disminuye la calidad del ajuste de los modelos de regresión. Por ejemplo, los valores de $R^2_{ajustado}$ se reducen de 0,93 a 0,58 al pasar de 2 a 100 años de periodo de retorno. Esta disminución del ajuste refleja una mayor incertidumbre en el modelamiento de caudales con alto periodo de retorno, asociado principalmente al tamaño de la muestra, puesto que en la práctica es difícil disponer de series que abarquen registros del orden de 100 años, hecho documentado ampliamente en la literatura (Haddad & Rahman, 2012; Haddad et al., 2014; Kader et al., 2015, Blöschl et al., 2013). Lo anterior, se traduce en la necesidad de introducir predictores adicionales en los modelos de regresión si se desean lograr mejores indicadores en los estadísticos de evaluación. A manera de ejemplo se indica que, para el caso del periodo de retorno de 100 años, es posible alcanzar valores de $R^2_{ajustado}$ de hasta 0,70 para modelos con cinco predictores.

Tabla 5.4 Resumen modelos de regionalización seleccionados para el dominio completo

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV _k	R ² _{ajust.}	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 0,87 * A^{0,75} * Bos^{0,03} * Ia^{-1,41}$	0,36	0,93	-217
$\sigma = 0,71 * A^{0,71} * Bos^{0,02} * Ia^{-1,31}$	0,43	0,90	-190
$\varepsilon = -0,0829 + 0,0046 * Ta + 0,0143 * Mat - 0,0021 * Bos$	0,07	0,65	-78
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 1,15 * A^{0,74} * Bos^{0,02} * Ia^{-1,39}$	0,34	0,93	-217
$Q_5 = 2,16^{-6} * A^{0,76} * Bos^{0,20} * P_5^{3,00}$	0,45	0,92	-203
$Q_{10} = 4,83^{-7} * A^{0,74} * Bos^{0,21} * P_{10}^{3,23}$	0,42	0,89	-179
$Q_{20} = 3,23^{-7} * A^{0,72} * Bos^{0,23} * P_{20}^{3,41}$	0,70	0,83	-141
$Q_{50} = 1,07^{-7} * A^{0,67} * Bos^{0,26} * P_{50}^{3,19}$	1,14	0,70	-92
$Q_{100} = 6,90^{-6} * A^{0,64} * Bos^{0,26} * P_{100}^{2,84}$	1,39	0,58	-62

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

En el caso de los parámetros de la GEV, es apreciable la buena calidad de los ajustes, con valores de R²_{ajustado} entre 0,65 y 0,93, y CV_k entre 0,07 y 0,36. En general, se evidencia un mejor ajuste para el caso de los parámetros de posición (μ) y escala (σ), respecto al parámetro de forma (ε), destacado igualmente por algunos autores en estudios similares (Haddad & Rahman, 2012; Kader et al., 2015, Blöschl et al., 2013).

Con respecto a los exponentes de los predictores, se destacan aquéllos asociados al área pluvial, que tanto para los cuantiles de crecidas como parámetros de la GEV es menor que 1,0 (0,64 – 0,75) lo que concuerda con la literatura respecto a la reducción del rendimiento (m³/s/km²) conforme al aumento del área (Blöschl et al., 2013). Se aprecia además una reducción del exponente del área conforme aumenta el periodo de retorno, lo que concuerda con trabajos previos (Blöschl & Sivapalan, 1997). Lo anterior a su vez es comparable con estudios similares donde se obtuvieron valores entre 0,776 – 0,973 para el Método DGA-AC y de 0,88 para la fórmula de Verni & King Modificada (DGA, 1995).

Es importante destacar la notable influencia de P_d^T sobre los valores de caudales de crecida, lo que se refleja en exponentes mayores de 3,0, similar a lo presentado por el Método DGA-AC (3,11 – 3,43). Con respecto a regresiones que involucren una zona más amplia del país, se destaca la fórmula de Verni & King Modificada (DGA, 1995), en la cual se obtuvo un coeficiente de la Precipitación diaria máxima de 1,24, considerablemente menor al obtenido en este trabajo.

Los exponentes del predictor cobertura de bosque total para el caso de los cuantiles de crecida se encuentran entre 0,20 y 0,26, indicando una menor influencia de las crecidas con este predictor, y todavía menor en el caso de los parámetros de la GEV (Posición y Escala) con valores cercanos a 0, sugiriendo la posibilidad de eliminar dicho predictor del modelo de regresión.

Por otro lado, en la Figura 5.10 se comparan los caudales observados y los estimados, mediante la técnica de regresión de parámetros de la GEV (TRP) y de la de regresión de cuantiles de crecida (TRQ). De manera general, se observan resultados satisfactorios en la reproducción de los caudales observados; no obstante, se observa una ligera

subestimación de los caudales de crecida conforme aumenta el periodo de retorno, especialmente en los caudales obtenidos mediante la regresión de parámetros de la GEV. Lo anterior se evidencia en la Tabla 5.5 y Figura 5.11, donde se muestra que el RMSNE, crece para ambas técnicas de regresión en la medida que aumenta el periodo de retorno, aunque en mayor medida para la técnica de regresión de parámetros de la GEV.

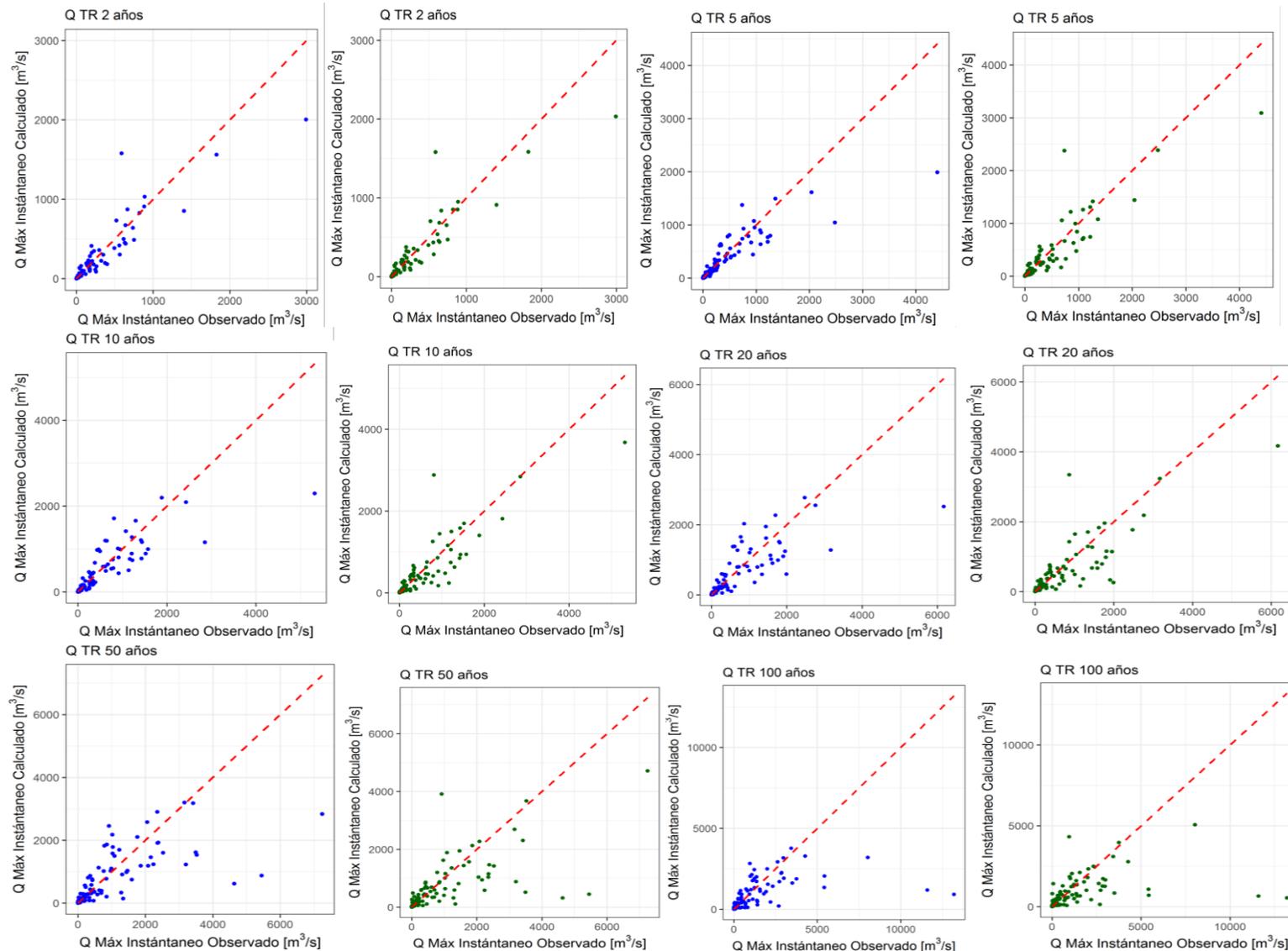


Figura 5.10 Caudal modelado vs observado para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida (paneles 1 y 3 en azul) y parámetros de la GEV (paneles 2 y 4 en verde), ajustados para el dominio completo

Tabla 5.5 RMSNE para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para el dominio completo

Modelo de regionalización	Periodo de Retorno (años)					
	2	5	10	20	50	100
Cuantiles de crecidas	0,796	0,670	0,707	1,020	2,180	4,194
Parámetros de la GEV	0,773	0,753	1,052	1,726	3,584	6,319

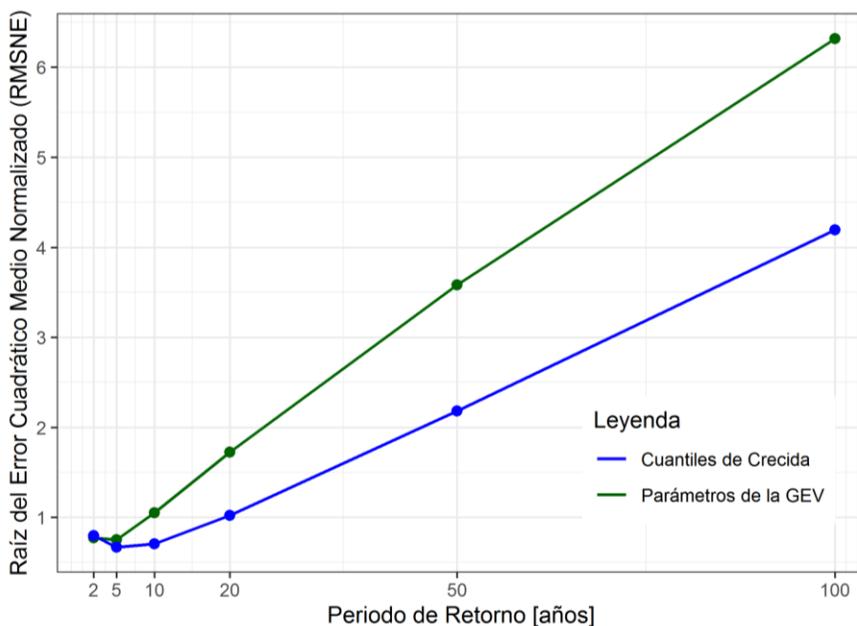


Figura 5.11 RMSNE para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la región definida por dominio completo

Finalmente, para cada modelo de regresión se realizó una validación de las condiciones requeridas por los modelos de regresión lineal múltiple, cuyos resultados se presentan en la Figura 5.12. El panel “A” presentan los diagramas de dispersión entre cada uno de los predictores y los residuos del modelo, en los que se verifica que los residuos se distribuyen aleatoriamente en torno a 0 con una variabilidad relativamente constante a lo largo del eje X, especialmente en los predictores área pluvial y precipitación diaria máxima, mientras que el predictor cobertura de bosque parece requerir alguna transformación especial. El panel “B” muestra un gráfico Q-Q plot para verificar la normalidad de los residuos. Por último, el panel “C” muestra la identificación de valores atípicos o influyentes mediante el test *T Student*, identificándose en este caso un valor atípico u *outlier* (residuo estudentizado > 3). Como su eliminación de la muestra no modifica sustancialmente los resultados, se mantiene dentro de la base de datos para análisis posteriores.

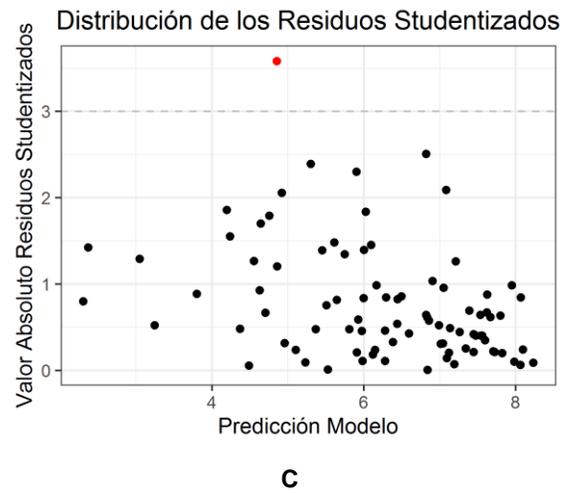
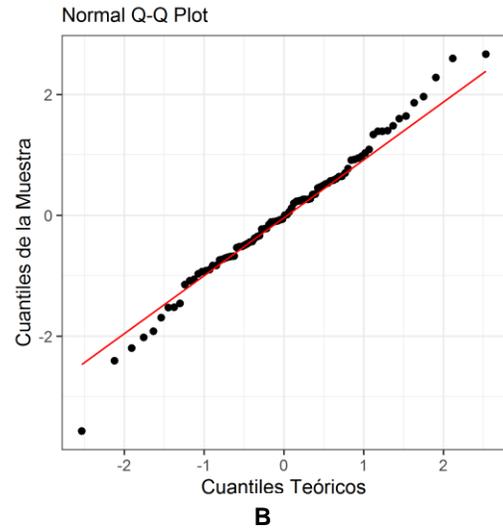
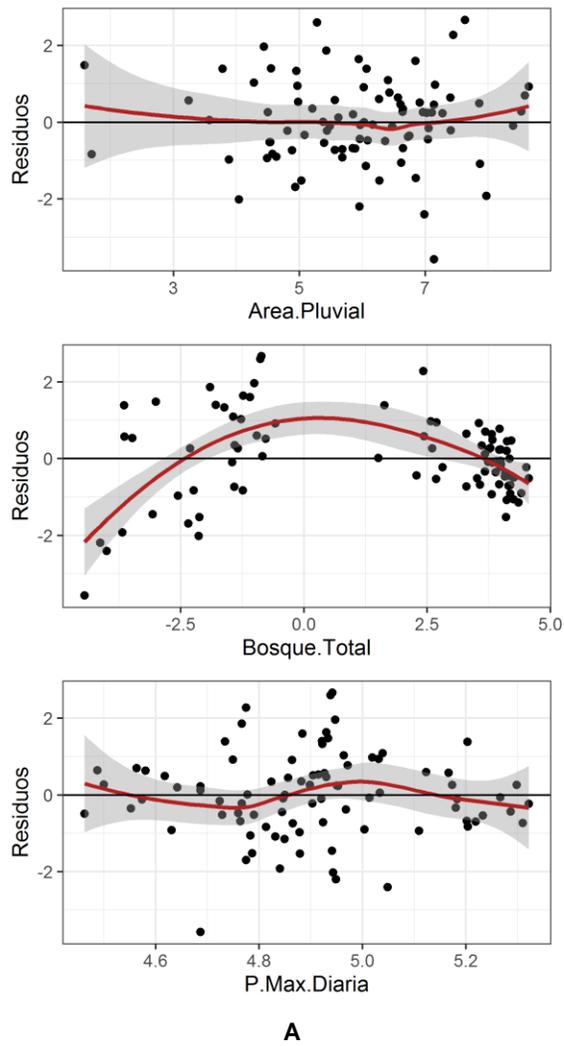


Figura 5.12 Verificación de supuestos de la regresión lineal múltiple para Q_{10} , utilizando datos del dominio completo

5.3 REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS SEGÚN ZONAS DEL MÉTODO DGA-AC (DGA, 1995)

Al igual que para la región de dominio único, se realiza la regionalización de crecidas para cada una de las zonas definidas por el método DGA-AC (DGA, 1995), cuyos modelos obtenidos se presentan en la Tabla 5.6, Tabla 5.7 y Tabla 5.8, para las regiones 1, 2 y 3 respectivamente (numeral 4.4.2). El análisis detallado del proceso de regionalización se presenta en el Anexo D.

Tabla 5.6 Resumen modelos de regionalización seleccionados para la Región 1 según zonas del método DGA-AC

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV _k	R ² _{ajust.}	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 6,88^{13} * A^{0,71} * Em^{-5,75} * P_{10}^{3,55}$	0,95	0,87	-33
$\sigma = 1,40^8 * A^{0,58} * Em^{-2,35} * Ia^{-1,09}$	0,28	0,88	-35
$\varepsilon = 6,04^7 * Mat^{0,89} * P_{10}^{2,22} * Ia^{0,64}$	0,27	0,57	-9
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 6,56^{-4} * A^{0,62} * Em^{-0,12} * P_2^{1,84}$	0,43	0,80	-25
$Q_5 = 54,2 * A^{0,60} * Em^{-1,88} * P_5^{2,56}$	0,26	0,87	-34
$Q_{10} = 1,02^6 * A^{0,57} * Em^{-3,34} * P_{10}^{3,01}$	0,29	0,88	-36
$Q_{20} = 2,27^{12} * A^{0,51} * Em^{-5,22} * P_{20}^{3,15}$	0,44	0,87	-34
$Q_{50} = 1,01^{24} * A^{0,40} * Em^{-8,14} * P_{50}^{2,53}$	0,74	0,83	-29
$Q_{100} = 4,98^{32} * A^{0,35} * Em^{-10,08} * P_{100}^{1,70}$	1,07	0,81	-36

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

**Región 1: Regiones de: Atacama y Coquimbo

Tabla 5.7 Resumen de modelos de regionalización seleccionados para la Región 2 según zonas del método DGA-AC

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV _k	R ² _{ajust.}	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 2,15 * A^{1,03} * Mat^{-0,71} * Ia^{-1,44}$	0,79	0,77	-19
$\sigma = 0,76 * A^{1,08} * Mat^{-0,51} * Ia^{-1,26}$	0,57	0,82	-23
$\varepsilon = 2,72^{-8} * Sm^{3,22} * Mat^{1,45} * P_{10}^{-1,26}$	2,91	0,26	3
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 6,09^{-8} * A^{0,69} * Bos^{-0,05} * P_2^{3,99}$	1,19	0,58	-8
$Q_5 = 1,04^{-6} * A^{0,74} * Bos^{0,01} * P_5^{3,23}$	0,79	0,69	-13
$Q_{10} = 4,22^{-5} * A^{0,75} * Bos^{0,07} * P_{10}^{2,42}$	0,61	0,76	-18
$Q_{20} = 3,97^{-3} * A^{0,76} * Bos^{0,13} * P_{20}^{1,50}$	0,52	0,82	-22
$Q_{50} = 2,45 * A^{0,77} * Bos^{0,21} * P_{50}^{0,28}$	0,51	0,84	-25
$Q_{100} = 212,96 * A^{0,78} * Bos^{0,25} * P_{100}^{-0,54}$	0,62	0,83	-24

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

**Región 2: Regiones de: Valparaíso, Metropolitana y Libertador Bernardo O'Higgins

Tabla 5.8 Resumen de modelos de regionalización seleccionados para la Región 3 según zonas del método DGA-AC

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV _k	R ² _{ajust.}	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 6,07^{-4} * A^{0,93} * Em^{0,39} * P_{10}^{0,94}$	0,14	0,89	-97
$\sigma = 2,28^{-5} * A^{0,89} * Em^{0,22} * P_{10}^{1,83}$	0,12	0,89	-96
$\varepsilon = -0,58 + 0,0035 * Ta + 0,0031 * P_{10} + 0,455 * Ia$	0,04	0,38	-11
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 3,76^{-5} * A^{0,94} * Bos^{0,16} * P_2^{2,15}$	0,13	0,91	-105
$Q_5 = 1,89^{-4} * A^{0,90} * Em^{0,24} * P_5^{1,63}$	0,11	0,91	-103
$Q_{10} = 1,19^{-4} * A^{0,89} * Em^{0,25} * P_{10}^{1,74}$	0,12	0,89	-97
$Q_{20} = 7,16^{-5} * A^{0,88} * Em^{0,25} * P_{20}^{1,86}$	0,14	0,87	-89
$Q_{50} = 3,44^{-5} * A^{0,88} * Em^{0,25} * P_{50}^{2,02}$	0,19	0,84	-77
$Q_{100} = 1,89^{-5} * A^{0,87} * Em^{0,26} * P_{100}^{2,15}$	0,26	0,81	-69

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

**Región 3: Regiones de Maule, Biobío (incluye Región de Ñuble) y Araucanía.

5.4 REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA CUENCAS AGRUPADAS

5.4.1 Resultado de la agrupación

Luego de la aplicación del método de K-Means, se obtuvieron tres grupos o regiones homogéneas con 22, 21 y 45 cuencas respectivamente, empleándose como elementos de agrupación el área, la pendiente media y la relación de precipitaciones diarias máximas de 100 y 10 años de periodo de retorno " P_{100}/P_{10} ". Para el presente estudio, estos tres grupos se denominan Grupo 1, Grupo 2 y Grupo 3, respectivamente. En la Figura 5.13 se presenta la varianza en función del número de grupos o clústeres, en la cual se identifica que, a partir de 3 grupos, la reducción de la varianza es marginal, mientras en la Figura 5.14 se presenta la distribución espacial de los tres grupos de regiones homogéneas.

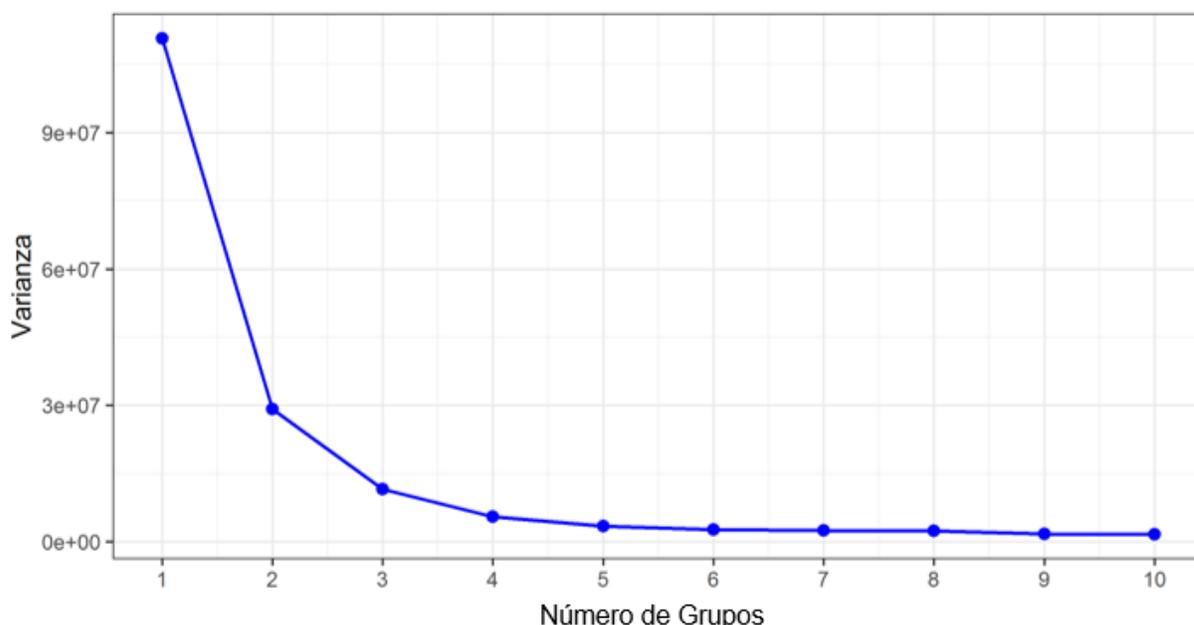


Figura 5.13 Varianza según número de Grupos

Se destaca que, en general, los tres grupos de regiones guardan una alta similitud con la definición geográfica Norte, Centro y Sur del método DGA-AC (DGA, 1994), lo cual es esperable debido al gradiente hidroclimático que naturalmente se da de norte a sur a lo largo de Chile continental. No obstante, se identifican algunas cuencas de diferente ubicación geográfica en el mismo grupo homogéneo, evidenciando que, desde el punto de vista de los elementos de agrupación, presentan alguna similitud.

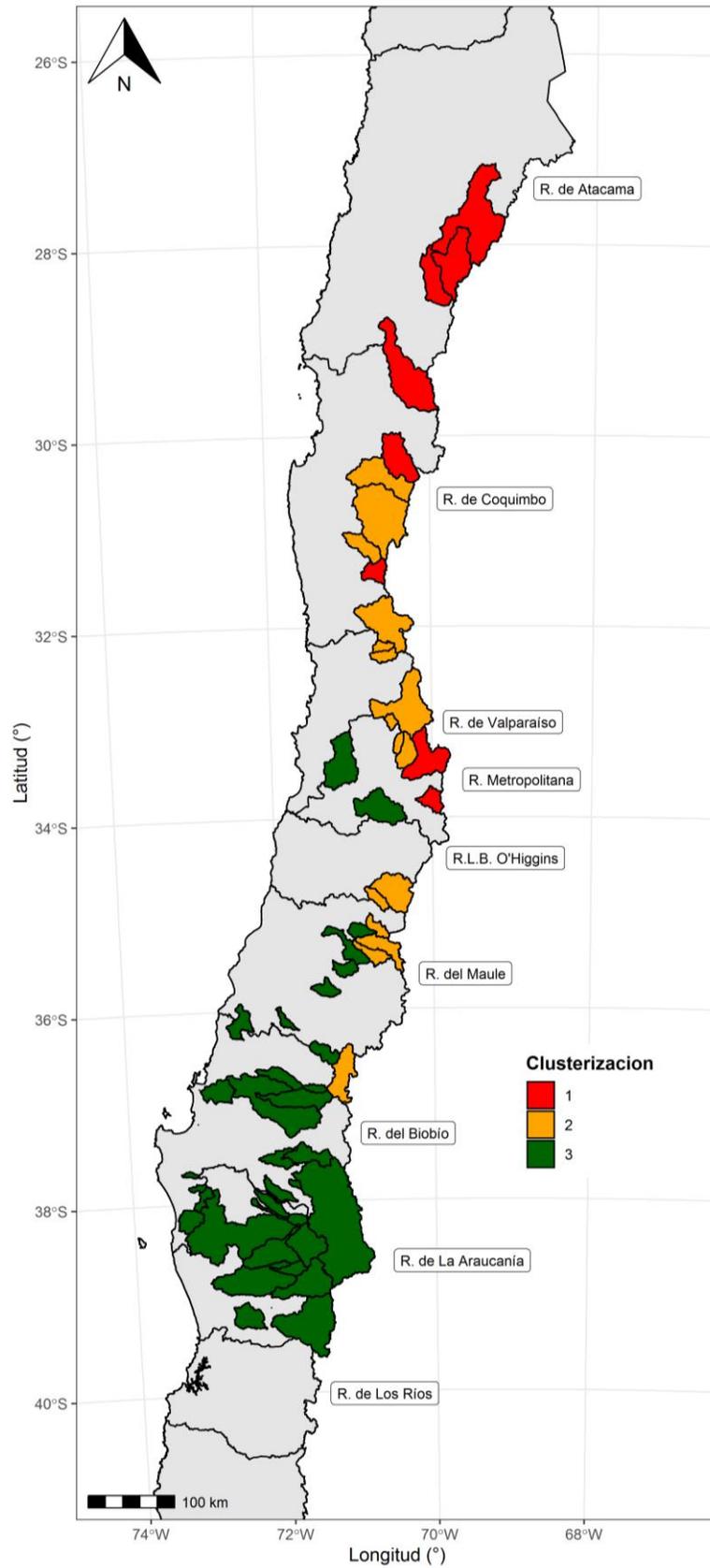


Figura 5.14 Regiones homogéneas formadas mediante agrupación K-Means

5.4.2 Modelos de regionalización

En la Tabla 5.9, Tabla 5.10 y Tabla 5.11, se presentan los modelos de regionalización para los grupos 1, 2 y 3 respectivamente. El análisis detallado del proceso de regionalización se presenta en el Anexo E.

Tabla 5.9 Resumen de los modelos de regionalización seleccionados para la región Grupo 1

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV _k	R ² _{ajust.}	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 4,43^{-19} * A^{0,80} * Em^{5,22} * Ia^{0,94}$	0,24	0,90	-43
$\sigma = 1,71^{-8} * A^{0,72} * Sm^{3,13} * Ia^{-1,33}$	0,15	0,95	-56
$\varepsilon = 1,49 + 0,00034 * Em + 0,2646 * Bos + 0,0068 * Ia$	0,02	0,41	-3
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 8,42^{-17} * A^{0,64} * Sm^{5,33} * P_2^{1,70}$	0,38	0,81	-28
$Q_5 = 6,17^{-19} * A^{0,63} * Sm^{5,62} * P_5^{2,47}$	0,37	0,81	-27
$Q_{10} = 1,48^{-21} * A^{0,61} * Sm^{6,29} * P_{10}^{2,97}$	0,43	0,77	-23
$Q_{20} = 9,27^{-25} * A^{0,58} * Sm^{7,42} * P_{20}^{3,18}$	0,56	0,70	-18
$Q_{50} = 7,75^{-28} * A^{0,51} * Sm^{9,29} * P_{50}^{2,48}$	0,84	0,59	-11
$Q_{100} = 3,94^{-27} * A^{0,49} * Sm^{10,17} * P_{100}^{1,15}$	1,05	0,52	-7

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

Tabla 5.10 Resumen de los modelos de regionalización seleccionados para la región Grupo 2

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV _k	R ² _{ajust.}	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 5,82^{-11} * A^{0,91} * Bos^{0,23} * P_{10}^{4,61}$	0,55	0,91	-43
$\sigma = 6,97^{-9} * A^{0,96} * P_{10}^{3,58} * Ia^{-0,57}$	0,44	0,91	-41
$\varepsilon = 0,02112 + 0,00037 * Em - 0,00200 * Sm + 0,03116 * Ia$	0,04	0,66	-13
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 7,99^{-7} * A^{1,02} * Bos^{0,25} * P_2^{2,80}$	0,46	0,91	-42
$Q_5 = 1,29^{-8} * A^{0,96} * Bos^{0,16} * P_5^{3,77}$	0,34	0,91	-42
$Q_{10} = 8,41^{-10} * A^{0,95} * Mat^{-0,49} * P_{10}^{4,73}$	0,31	0,91	-42
$Q_{20} = 6,51^{-10} * A^{0,90} * Mat^{-0,68} * P_{20}^{4,93}$	0,28	0,91	-42
$Q_{50} = 1,39^{-9} * A^{0,84} * Mat^{-0,95} * P_{50}^{4,99}$	0,28	0,89	-38
$Q_{100} = 7,18^{-9} * A^{0,80} * Mat^{-1,16} * P_{100}^{4,82}$	0,32	0,87	-33

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

Tabla 5.11 Resumen de los modelos de regionalización seleccionados para la región Grupo 3

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV _k	R ² _{ajust.}	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 2,77^{-4} * A^{0,90} * P_{10}^{1,62} * I_a^{-0,93}$	0,09	0,94	-111
$\sigma = 9,50^{-6} * A^{0,89} * P_{10}^{2,28} * I_a^{-0,41}$	0,13	0,89	-88
$\varepsilon = 0,49655 - 0,0003 * A + 0,00396 * P_{10} + 0,24922 * I_a$	0,05	0,38	-9
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 1,56^{-4} * A^{0,89} * P_2^{1,98} * I_a^{-0,56}$	0,08	0,94	-113
$Q_5 = 6,17^{-5} * A^{0,89} * P_5^{2,20} * I_a^{-0,43}$	0,10	0,92	-101
$Q_{10} = 3,67^{-5} * A^{0,89} * P_5^{2,32} * I_a^{-0,35}$	0,14	0,90	-90
$Q_{20} = 4,03^{-5} * A^{0,86} * Em^{0,29} * P_{20}^{1,95}$	0,17	0,87	-79
$Q_{50} = 2,59^{-5} * A^{0,85} * Em^{0,33} * P_{50}^{2,01}$	0,19	0,84	-70
$Q_{100} = 1,46^{-5} * A^{0,84} * Em^{0,35} * P_{100}^{2,11}$	0,24	0,80	-64

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

5.5 RESUMEN COMPARATIVO

En esta sección, se presenta una síntesis de los resultados con el fin de analizar el comportamiento predictivo de los modelos de regionalización (TRP y TRQ) bajo diferentes métodos de selección de regiones homogéneas.

5.5.1 Evaluación de modelos de regionalización

En la Tabla 5.12, se presenta el resumen de la evaluación de los modelos de regionalización (mediante el estadístico $R^2_{ajustado}$) para las siete (7) regiones homogéneas definidas para el presente estudio. En rojo se resaltan los casos con $R^2_{ajustado}$ menor a 0,6 como indicadores de baja correlación en el ajuste. Como complemento, en la Figura 5.15 se presenta gráficamente dicha evaluación para el caso de los cuantiles de crecida.

Tabla 5.12 Resumen $R^2_{ajustado}$ modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea

Ecuación de Regresión	Región Homogénea						
	Única	Norte	Centro	Sur	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Parámetros de la GEV							
μ	0,93	0,87	0,77	0,89	0,90	0,91	0,94
σ	0,90	0,88	0,82	0,89	0,95	0,91	0,89
ε	0,65	0,57	0,26	0,38	0,41	0,66	0,38
Cuantiles de crecidas							
Q_2	0,93	0,80	0,58	0,91	0,81	0,91	0,94
Q_5	0,92	0,87	0,69	0,91	0,81	0,91	0,92
Q_{10}	0,89	0,88	0,76	0,89	0,77	0,91	0,90
Q_{20}	0,83	0,87	0,82	0,87	0,70	0,91	0,87
Q_{50}	0,70	0,83	0,84	0,84	0,59	0,89	0,84
Q_{100}	0,58	0,81	0,83	0,81	0,52	0,87	0,80

Con respecto a los parámetros de la GEV, es posible concluir que los modelos de regionalización presentan ajustes aceptables en el caso del parámetro de posición (μ) y escala (σ), con valores de $R^2_{ajustado}$ similares o superiores a 0,80 en la mayoría de los casos, y tan altos como 0,95 en el caso del Grupo 1. Por otro lado, el parámetro de forma (ε) fue la variable dependiente que consistentemente entrega los resultados más bajos en su estimación, con valores de $R^2_{ajustado}$ entre 0,26 y 0,66.

En el caso de los cuantiles de crecida se obtuvo, en la mayoría (5 de las 7) de las regiones homogéneas analizadas, una reducción de la calidad del ajuste conforme aumenta el periodo de retorno, explicado principalmente por la incertidumbre asociada a estimaciones de caudales de crecida con periodos de retorno mayor a 30 años al ser fenómenos observados con poca o nula frecuencia (Blöschl et al., 2013). Por otro lado, los modelos de regresión de las regiones homogéneas Norte y Centro presentaron una tendencia a mejorar con el aumento del periodo de retorno. Dichos modelos fueron forzados a incluir dentro de sus predictores la precipitación diaria máxima, lo que significó una reducción leve (con respecto al caso libre) en el ajuste para altos periodos de retorno y una mayor para los más bajos. Lo anterior puede atribuirse a que las crecidas menores pueden ser explicadas de mejor manera por predictores que reflejen las condiciones

promedio de largo plazo (anual) como el índice de aridez en el caso específico de estos dos ejemplos, mientras las de mayor periodo de retorno son explicadas de mejor manera por la precipitación diaria máxima.

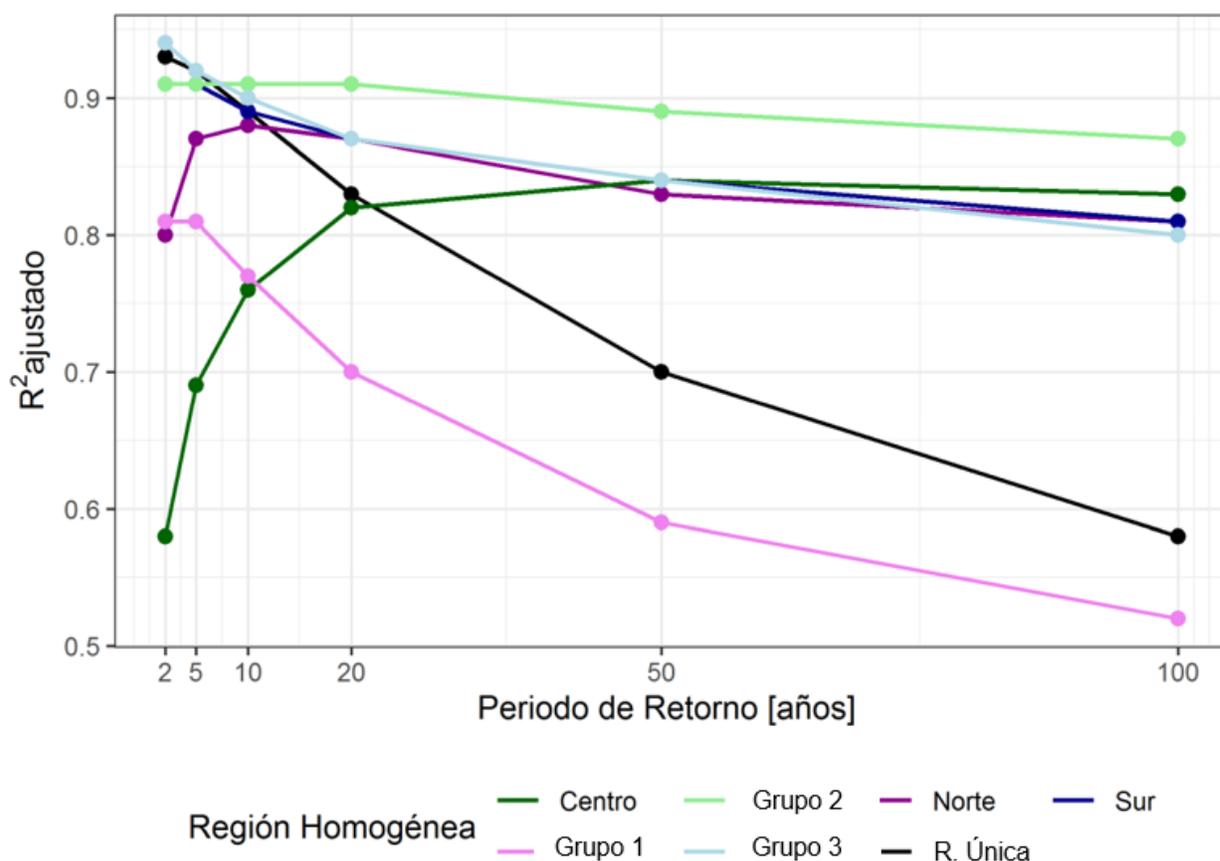


Figura 5.15 Resumen $R^2_{ajustado}$ para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida según tipo de región homogénea

De manera general, los mejores indicadores se obtienen para los modelos de las regiones húmedas, siendo estas representadas principalmente por las regiones Grupo 3 y Sur, mientras que, las regiones más secas o áridas (Norte y Grupo 1), presentan peores resultados en los estadísticos de evaluación. Existen varios factores que pueden explicar esta relación. La variabilidad interanual de las crecidas en términos del coeficiente de variación (CV) en regiones áridas es generalmente mayor que en otros climas debido a la menor linealidad entre los procesos que generan las crecidas y la respuesta de estas (Blöschl et al., 2013). Como referencia, en el presente trabajo se tiene que las cuencas de la región Norte presentan un CV promedio de 1,26, las del Centro, de 1,06; mientras que en las del Sur este es 0,56. Esta fuerte no linealidad también implica que la variabilidad hidrológica espacial en los procesos generadores de crecidas impacte más fuerte en la curva de frecuencia de crecidas, por lo que incluso cuencas vecinas pueden exhibir curvas de frecuencia bastante diferentes, reflejando predicciones regionales de baja calidad, a diferencia de las cuencas de regiones húmedas que tienden a ser más lineales (Blöschl et al., 2013). Por último, el comportamiento acá explicado se aprecia tanto en los modelos de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, aunque es menos notorio en estos últimos.

Los resultados descritos en los párrafos anteriores son consistentes tanto con los valores obtenidos del *test error* (CV_k) estimados mediante validación cruzada y presentados en la Tabla 5.13 y Figura 5.16, como, con los obtenidos mediante el estadístico BIC cuyos resultados se presentan en la Tabla 5.14 Figura 5.17.

Tabla 5.13 Resumen CV_k para modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea

Ecuación de Regresión	Región Homogénea						
	Única	Norte	Centro	Sur	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Parámetros de la GEV							
μ	0,36	0,95	0,79	0,14	0,24	0,55	0,09
σ	0,43	0,28	0,57	0,12	0,15	0,44	0,13
ε	0,07	0,27	2,91	0,04	0,02	0,04	0,05
Cuantiles de crecidas							
Q_2	0,34	0,43	1,19	0,13	0,38	0,46	0,08
Q_5	0,45	0,26	0,79	0,11	0,37	0,34	0,10
Q_{10}	0,42	0,29	0,61	0,12	0,43	0,31	0,14
Q_{20}	0,70	0,44	0,52	0,14	0,56	0,28	0,17
Q_{50}	1,14	0,74	0,51	0,19	0,84	0,28	0,19
Q_{100}	1,39	1,07	0,62	0,26	1,05	0,32	0,24

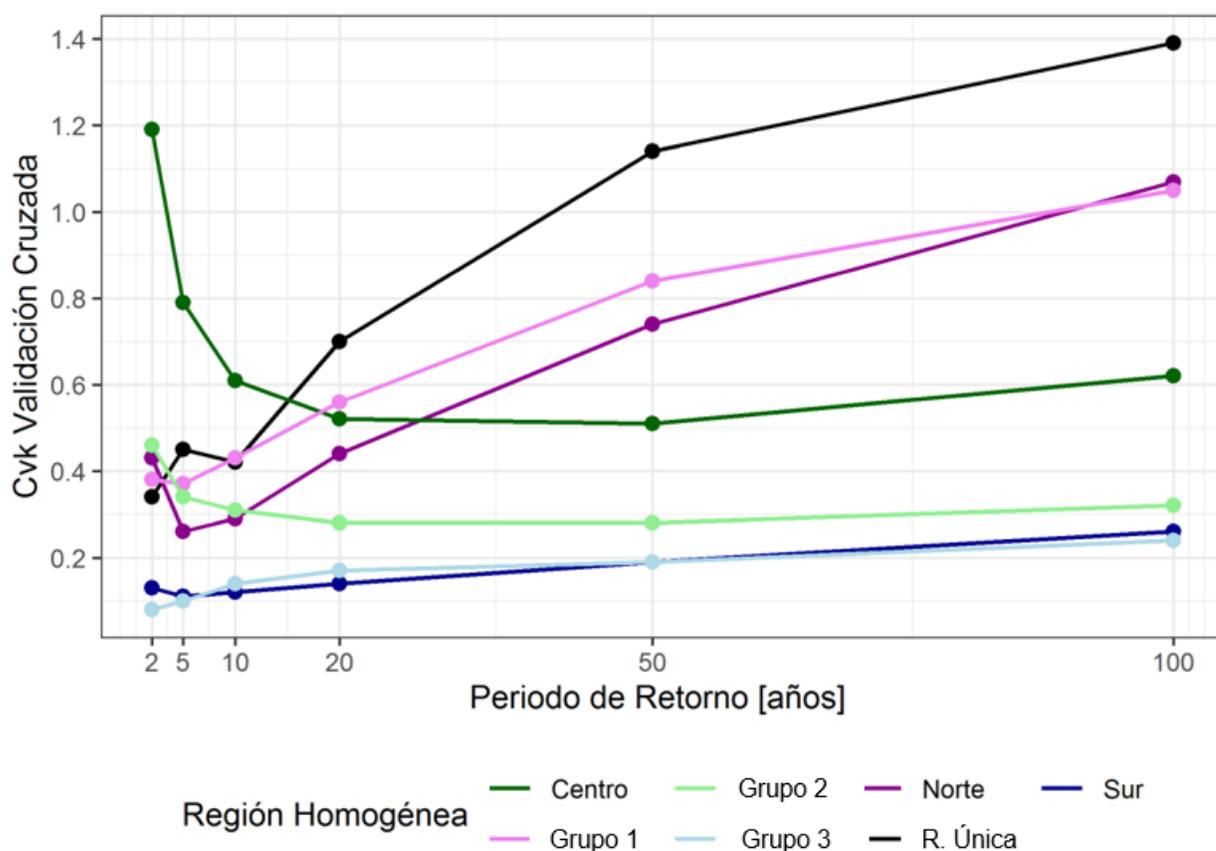


Figura 5.16 Resumen CV_k para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea

Tabla 5.14 Resumen BIC para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea

Ecuación de Regresión	Región Homogénea						
	Única	Norte	Centro	Sur	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Parámetros de la GEV							
μ	-217	-33	-19	-97	-43	-43	-111
σ	-190	-35	-23	-96	-56	-41	-88
ε	-78	-9	3	-11	-3	-13	-9
Cuantiles de crecidas							
Q_2	-217	-25	-8	-105	-28	-42	-113
Q_5	-203	-34	-13	-103	-27	-42	-101
Q_{10}	-179	-36	-18	-97	-23	-42	-90
Q_{20}	-141	-34	-22	-89	-18	-42	-79
Q_{50}	-92	-29	-25	-77	-11	-38	-70
Q_{100}	-62	-36	-24	-69	-7	-33	-64

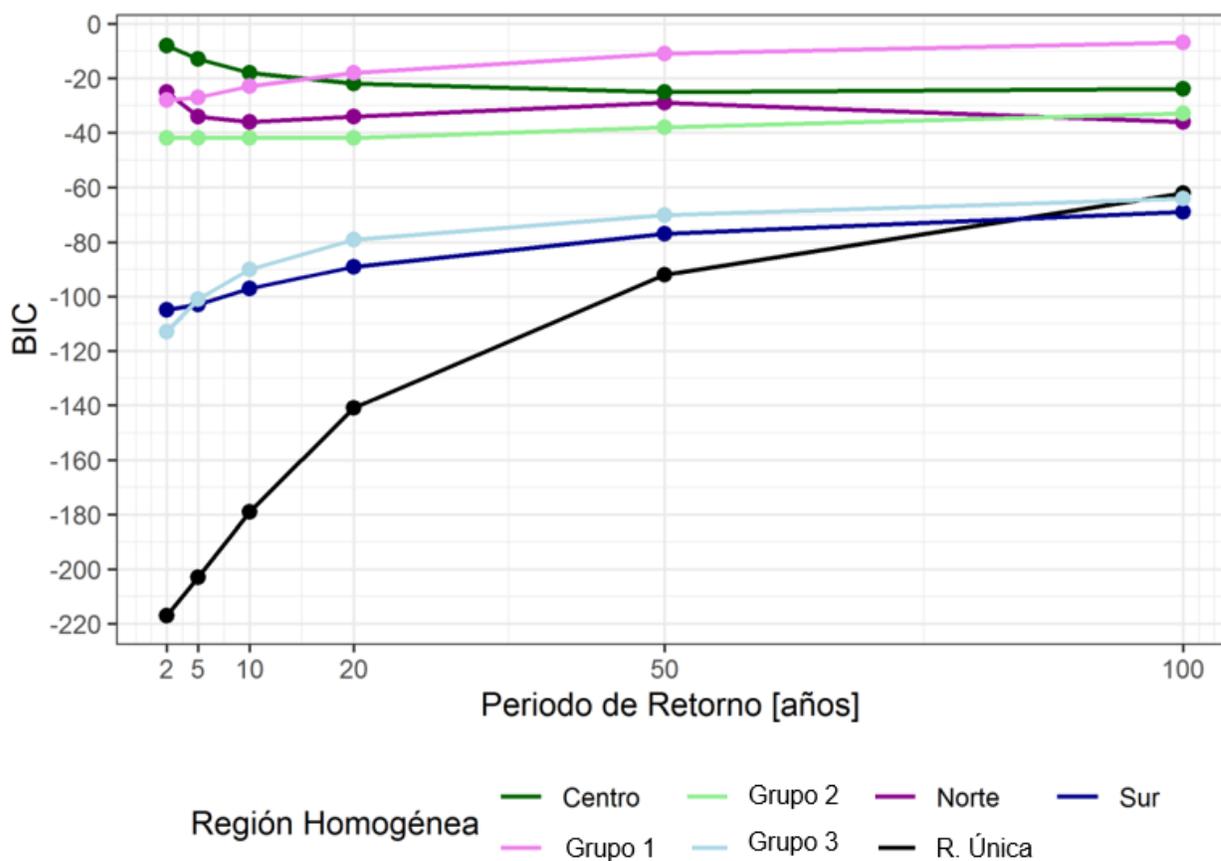


Figura 5.17 Resumen BIC para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea

En complemento a lo anterior, los resultados indican que, con la excepción del Grupo 2 (21 cuencas), las regiones que exhibieron peores resultados en los parámetros de evaluación corresponden a las de menor información, siendo estas las regiones Norte (21 cuencas), Centro (18 cuencas) y Grupo 1 (22 cuencas), lo que está en línea con lo reportado en estudios previos (p. ej., Blöschl et al., 2013).

Comparando los resultados para cada región homogénea, se obtiene una ligera mejora en las regiones homogéneas definidas mediante agrupación (Grupos 1, 2 y 3) en comparación con las definidas geográficamente (Norte, Centro y Sur).

Considerando solamente los estadísticos R^2_{ajustado} y *test error* (CVk), se obtiene una mejoría en el caso de las regiones definidas por algún tipo de criterio de agrupación respecto a la región de dominio único que, al incluir más sitios y, con ello, aumentar la heterogeneidad, podría traer en algunos casos efectos no deseados como el incremento de la varianza del error y, en consecuencia, menor poder de predicción, lo cual no está solamente relacionado con los predictores seleccionados (Haddad et al, 2014). No obstante, en el caso del estadístico BIC, el uso de un dominio único resulta ser mejor, especialmente en los caudales con un periodo de retorno de hasta 50 años.

Considerando los resultados diferenciados por el área pluvial de la cuenca, experiencias previas reportan mejoras en el comportamiento de los modelos conforme dicha variable aumenta, lo que se puede atribuir a dos factores (Blöschl et al., 2013). El primero de ellos se relaciona con la disponibilidad de datos: al ser más grande una cuenca, es más probable contar con más estaciones meteorológicas dentro de ella. Además, para cuencas con áreas de drenaje mayor, hay agregación espacial de efectos sobre los procesos de generación crecidas y mayores tiempos de concentración, por lo que las mismas tienden a ser más fáciles de predecir. En el presente trabajo, las regiones homogéneas están conformadas por cuencas de áreas pluviales variadas; sin embargo, en términos promedio la región Grupo 1, y en especial la región Centro, presentan los menores valores promedio de área con 402,3 km² y 348 km² respectivamente. A modo de referencia, los valores promedio para las regiones Grupo 3 y Sur, corresponden a 1.160 km² y 1.045 km², siendo estas regiones las que en términos generales presentaron los mejores ajustes.

Por último, no se obtiene una conclusión clara a partir de los presentes resultados ni de la literatura en relación con la posible dependencia entre la bondad de los ajustes y el valor o magnitud de los predictores utilizados. Además de las variables discutidas anteriormente (área pluvial, clima y tamaño de la muestra), se han registrado mejores resultados (Blöschl et al., 2013) a medida que aumenta la elevación de la cuenca en estudios de regionalización de crecidas de origen nival; sin embargo, un análisis de este tipo se encuentra fuera del alcance del presente estudio.

5.5.2 Selección de modelos de regionalización

En la Tabla 5.15 se resumen los predictores que componen los diferentes modelos de regresión según el tipo de región homogénea definido. En el caso de los parámetros de posición (μ) y escala (σ), los predictores que componen los modelos de regionalización coinciden de manera general con los obtenidos para los cuantiles de crecida. Esto es esperable, considerando que dichos parámetros son una medida de la magnitud y la

variabilidad de las crecidas anuales, y los resultados son consistentes con estudios previos en que se regionaliza la distribución Log Pearson III (Haddad & Rahman, 2012; Haddad et al., 2014; Kader et al., 2015) y la GEV (Blöschl et al., 2013; Wu et al, 2019).

Con respecto a los resultados obtenidos para el parámetro de forma (ϵ), el cual mide el grado de asimetría de la distribución, es de notar la baja correlación con el área. Esto ha sido destacado por varios autores (p. ej. Blöschl et al., 2013; Wu et al, 2019) y evidenciado en algunos estudios de regionalización de otras distribuciones de probabilidad, como la Log Pearson III (Haddad & Rahman, 2012; Haddad et al., 2014; Kader et al., 2015), en los cuales el coeficiente de asimetría se correlacionó de mejor manera con otros predictores físicos y climáticos como cobertura de bosques, pendiente, longitud del cauce principal, evaporación, entre otros (Tabla 5.15).

En el caso de los parámetros de la GEV, hay una mayor heterogeneidad en los predictores resultantes que conforman los modelos de regionalización, en particular el parámetro de forma; sin embargo, de manera general se resaltan el área, la precipitación para $T = 10$ años y el índice de aridez.

Tabla 5.15 Predictores de los modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea

Ecuación de Regresión	Región Homogénea						
	Única	Norte	Centro	Sur	Clust. 1	Clust. 2	Clust. 3
Parámetros de la GEV							
μ	A, Bos, la	A, Em, P ₁₀	A, Mat, la	A, Em, P ₁₀	A, Em, la	A, Bos, P ₁₀	A, la, P ₁₀
σ	A, Bos, la	A, Em, la	A, Mat, la	A, Em, P ₁₀	A, Sm, la	A, la, P ₁₀	A, la, P ₁₀
ϵ	Ta, Mat, Bos	Mat, la, P ₁₀	Sm, Mat, P ₁₀	Ta, la, P ₁₀	Em, Bos, la	Em, Sm, la	A, la, P ₁₀
Cuantiles de crecidas							
Q ₂	A, Bos, la	A, Em, P ₂	A, Bos, P ₂	A, Bos, P ₂	A, Sm, P ₂	A, Bos, P ₂	A, la, P ₂
Q ₅	A, Bos, P ₅	A, Em, P ₅	A, Bos, P ₅	A, Em, P ₅	A, Sm, P ₅	A, Bos, P ₅	A, la, P ₅
Q ₁₀	A, Bos, P ₁₀	A, Em, P ₁₀	A, Bos, P ₁₀	A, Em, P ₁₀	A, Sm, P ₁₀	A, Mat, P ₁₀	A, la, P ₁₀
Q ₂₀	A, Bos, P ₂₀	A, Em, P ₂₀	A, Bos, P ₂₀	A, Em, P ₂₀	A, Sm, P ₂₀	A, Mat, P ₂₀	A, Em, P ₂₀
Q ₅₀	A, Bos, P ₅₀	A, Em, P ₅₀	A, Bos, P ₅₀	A, Em, P ₅₀	A, Sm, P ₅₀	A, Mat, P ₅₀	A, Em, P ₅₀
Q ₁₀₀	A, Bos, P ₁₀₀	A, Em, P ₁₀₀	A, Bos, P ₁₀₀	A, Em, P ₁₀₀	A, Sm, P ₁₀₀	A, Mat, P ₁₀₀	A, Em, P ₁₀₀

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

Para los cuantiles de crecida, se destaca que, además del área pluvial (A) y la precipitación diaria máxima (P), los principales predictores que conforman los modelos de regionalización son la cobertura de bosque total (Bos) y elevación media (Em), seguidos por la pendiente media (Sm) y cobertura de matorrales (Mat).

En la Tabla 5.16, se presenta el valor del exponente del área pluvial de los diferentes modelos de regionalización de cuantiles de crecida definidos en este estudio. Se obtienen menores valores de dicho exponente en las regiones más áridas – 0,57 y 0,61 para $T = 10$ años en zonas Norte y Grupo 1, respectivamente – en comparación con las regiones más húmedas (Sur y Grupo 3), con valores de 0,89 en ambos casos y para el mismo

periodo de retorno. La diferencia anterior puede atribuirse a que las regiones más áridas se caracterizan por eventos de precipitación de tipo convectivo, los cuales son más intensos, pero de corta duración y baja cobertura espacial en comparación con los presentados en las regiones húmedas del sur de Chile que son principalmente de origen ciclónico. Los resultados anteriores están en línea con aquellos obtenidos en estudios de regionalización de crecidas efectuados en Chile (DGA, 1995) donde se obtiene un exponente de 0,776 para la III y IV Región en el Método DGA-AC y de 0,973 para las regiones VII a IX en dicho método. Finalmente, estos valores son consistentemente menores que uno (1), confirmando la reducción del rendimiento (Q/A) de las cuencas conforme aumenta el tamaño de estas (Blöschl et al., 2013).

Tabla 5.16 Exponente del área pluvial en modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea

Ecuación de Regresión	Región Homogénea						
	Única	Norte	Centro	Sur	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Parámetros de la GEV							
μ	0,75	0,71	1,03	0,93	0,80	0,91	0,90
σ	0,71	0,58	1,08	0,89	0,72	0,96	0,89
ε	-	-		-	-	-	1,00
Cuantiles de crecidas							
Q_2	0,74	0,62	0,69	0,94	0,64	1,02	0,89
Q_5	0,76	0,60	0,74	0,90	0,63	0,96	0,89
Q_{10}	0,74	0,57	0,75	0,89	0,61	0,95	0,89
Q_{20}	0,72	0,51	0,76	0,88	0,58	0,90	0,86
Q_{50}	0,67	0,40	0,77	0,88	0,51	0,84	0,85
Q_{100}	0,75	0,71	1,03	0,93	0,80	0,91	0,90

En la Tabla 5.17, se presenta el valor del exponente correspondiente a la precipitación diaria máxima, de los diferentes modelos de regionalización obtenidos en el presente estudio. En general, dichos valores son mucho más dispersos y con tendencias poco claras en comparación con los obtenidos en el caso del área pluvial; sin embargo, es rescatable que, en general, son mayores en cuencas más áridas (Norte, Centro, Grupo 1 y Grupo 2) en comparación con cuencas húmedas (Sur y Grupo 3). Esto refleja la influencia de los eventos de precipitación en las crecidas de esta zona del país, debido al poco aporte del flujo base durante la ocurrencia de estas (Blöschl et al., 2013) debido a la aridez, baja cobertura y precipitaciones de origen convectivo, que caracterizan las cuencas de la zona norte de Chile. Lo anterior es similar a lo obtenido en estudios de regionalización de crecidas efectuados en Chile (DGA, 1995) donde se obtiene un exponente de 3,108 para la III y IV Región en el Método DGA-AC y de 1,224 para las regiones VII a IX en dicho método.

Tabla 5.17 Exponente Precipitación diaria máxima modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV según tipo de región homogénea

Ecuación de Regresión	Región Homogénea						
	Única	Norte	Centro	Sur	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Parámetros de la GEV							
μ	-	3,55	-	0,94	-	4,61	1,62
σ	-	-	-	1,83	-	3,58	2,28
ε	-	2,22	-1,26	1,00	-	-	1,00
Cuantiles de crecidas							
Q_2	-	1,84	3,99	2,15	1,70	2,80	1,98
Q_5	3,00	2,56	3,23	1,63	2,47	3,77	2,20
Q_{10}	3,23	3,01	2,42	1,74	2,97	4,73	2,32
Q_{20}	3,41	3,15	1,50	1,86	3,18	4,93	1,95
Q_{50}	3,19	2,53	0,28	2,02	2,48	4,99	2,01
Q_{100}	2,84	1,70	-0,54	2,15	1,15	4,82	2,11

5.5.3 Comparación en la estimación de caudales de crecida mediante TRP vs TRQ y método de Verni y King Modificado

En la Tabla 5.18 se presenta el resumen del RMSNE obtenido de la estimación de los caudales de crecida para diferentes periodos de retorno según el tipo de región homogénea, tanto para la técnica de regresión de parámetros de la GEV (TRP) como para la regresión de cuantiles de crecida (TRQ). Adicionalmente, se incluye el RMSNE obtenido mediante el método de Verni y King Modificado (DGA, 1995). Para efectos de visualización, se resalta en rojo el menor RMSNE para cada caso.

Los resultados muestran el aumento del error de ajuste conforme aumenta el periodo de retorno. Así mismo, la TRP y TRQ reflejan en general comportamientos similares para caudales de periodos de retorno bajos (hasta 10 años), mientras que, para mayores periodos de retorno, se obtienen diferencias considerables en algunas regiones homogéneas.

Tabla 5.18 RMSNE para modelos de regionalización de cuantiles de crecida y parámetros de la GEV vs método de Verni y King Modificado según tipo de región homogénea.

Región Homogénea	Técnica de regresión	Periodo de Retorno (años)					
		2	5	10	20	50	100
Única	Cuantiles de crecidas	0,796	0,670	0,707	1,020	2,180	4,194
	Parámetros de la GEV	0,773	0,753	1,052	1,726	3,584	6,319
	Verni y King Modificado	0,725	0,588	0,575	0,692	0,956	1,202
Norte	Cuantiles de crecidas	0,581	0,534	0,525	0,595	0,992	1,537
	Parámetros de la GEV	0,637	0,836	1,359	2,275	4,460	7,407
	Verni y King Modificado	0,482	0,559	0,745	1,079	1,675	2,218
Centro	Cuantiles de crecidas	1,625	1,349	1,155	0,970	0,774	0,723
	Parámetros de la GEV	1,062	0,885	0,872	1,027	1,744	2,913
	Verni y King Modificado	1,319	0,914	0,654	0,622	0,703	0,759
Sur	Cuantiles de crecidas	0,332	0,346	0,376	0,418	0,487	0,548
	Parámetros de la GEV	0,992	1,126	1,301	1,568	2,118	2,742
	Verni y King Modificado	0,452	0,423	0,447	0,468	0,507	0,527

Región Homogénea	Técnica de regresión	Periodo de Retorno (años)					
		2	5	10	20	50	100
Grupo 1	Cuantiles de crecidas	0,629	0,615	0,649	0,741	0,954	1,084
	Parámetros de la GEV	0,367	0,328	0,368	0,427	0,533	0,638
	Verni y King Modificado	0,600	0,620	0,790	1,099	1,659	2,178
Grupo 2	Cuantiles de crecidas	0,483	0,441	0,415	0,413	0,442	0,473
	Parámetros de la GEV	0,458	0,411	0,384	0,368	0,371	0,393
	Verni y King Modificado	1,137	0,811	0,561	0,521	0,615	0,687
Grupo 3	Cuantiles de crecidas	0,314	0,362	0,407	0,438	0,493	0,561
	Parámetros de la GEV	0,328	0,367	0,408	0,459	0,542	0,616
	Verni y King Modificado	0,498	0,425	0,442	0,469	0,514	0,536

*En rojo se resalta el menor RMSNE para cada combinación

En el caso de la estimación de crecidas mediante la regresión de cuantiles, se obtienen los mejores resultados en cuatro de las siete regiones homogéneas definidas (Única, Norte, Sur y Grupo 3), mientras que, mediante la regresión de los parámetros de la GEV, lo anterior ocurre en dos regiones (Grupo 1 y Grupo 2). En el caso de la región Centro, se encontraron los menores errores para la TRP con periodos de retorno de 2, 5 y 10 años, y para la TRQ con valores de T mayores a estos. Considerando los resultados en su conjunto, se resalta que el mejor ajuste (menor valor RMSNE) se obtuvo para el caso de la TRP, específicamente en la región Grupo 2.

Desde el punto de vista del tipo de región homogénea, se destaca que la TRP entregó, en general, mejores resultados en zonas definidas con el método de agrupación, mientras que se aprecian mejores resultados mediante la TRQ en los demás métodos de agrupación de cuencas. Además, es necesario notar que, en los casos en los que fue posible obtener un buen ajuste del parámetro de forma (ϵ), la TRP arroja menores valores de RMSNE, considerando que, en la mayoría de los casos, se obtienen mejores ajustes para los parámetros de posición (μ) y escala (σ) de la GEV.

Los resultados de la Tabla 5.18 sugieren que, bajo algunas condiciones, la TRP podría ser un enfoque viable como alternativa a la comúnmente aplicada TRQ en cuencas no controladas, como también lo sugieren otros estudios (Haddad et al., 2014; Kader et al., 2015).

En cuanto a la comparación con el método de Verni y King Modificado (DGA, 1995), se aprecia que este último presenta los mejores resultados de manera consistente solo para el caso de la región única. Para los demás casos, entregó el peor ajuste salvo en tres datos. Es importante destacar que la expresión de Verni y King Modificada fue desarrollada con información de un periodo diferente al utilizado en este trabajo, que considera nuevos registros obtenidos con nuevas tecnologías de recolección. Además, la fórmula original de Verni y King (1977) se obtuvo a base de un análisis dimensional y con datos de estaciones del país, por lo que es esperable un buen ajuste en condiciones de alta heterogeneidad (cuencas de diferentes áreas, diferentes zonas climáticas, diferentes coberturas, etc.). Por otro lado, y a pesar de que la fórmula modificada incluye un coeficiente empírico variable con el periodo de retorno y con la ubicación geográfica, no presentó un mejor ajuste para zonas acotadas en comparación con los métodos TRP y TRQ estudiados en el presente trabajo.

Por último, Blöschl et al. (2013) reportó resultados de diferentes estudios de regionalización mediante regresión a nivel global (España, Canadá, UK Alemania, México, entre otros), en los que, para el caso de Q_{100} , se obtuvieron valores de RMSNE entre 0,54 y 0,88. Valores similares o incluso menores fueron conseguidos con varios modelos de regionalización en el presente trabajo, llegando incluso a valores más bajos que 0,40; lo que demuestra la consistencia de estos resultados con experiencias internacionales en este ámbito.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 GENERALIDADES

En el presente estudio, se realizó un análisis regional de crecidas de origen pluvial mediante regresión lineal múltiple, a partir de información fluviométrica, física y climática de 88 cuencas distribuidas a lo largo de Chile entre las regiones de Atacama y la Araucanía (28 - 39° de latitud sur). El desarrollo de modelos predictivos para las variables dependientes consideró la elección de ocho (8) variables explicativas o predictores. Las cuencas seleccionadas presentan una variación altimétrica media entre los 137 msnm y los 3.793 msnm, con un valor promedio de 1.745 msnm; mientras que las áreas pluviales aportantes varían entre los 5 km² y los 5.672 km², con un valor promedio de 809 km². Con respecto a las precipitaciones, estas varían entre los 33 mm/año y los 2.775 mm/año, con un valor promedio de 1.144 mm/año. Así mismo, dichas cuencas presentan diversos tipos de fracciones de coberturas de suelo, caracterizadas por diferentes porcentajes de tierras áridas, matorrales y bosque total.

A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes, y se incluyen recomendaciones para futuros estudios que involucren los diferentes aspectos acá tratados.

6.2 CONCLUSIONES

Se realizó un análisis de identificación y cuantificación de tendencias en las series de estudio, mediante el empleo de tres técnicas: (a) test de Mann-Kendall, (b) coeficientes de Hurst y (c) ajuste de pendientes lineales (ECM y Sen). Dicho análisis indica que un grupo reducido (< 10%) de las cuencas presenta algún signo de tendencia significativa, ya sea en la serie de caudales o de precipitaciones y, por lo general, en solo una de las técnicas de detección empleadas. Dichas cuencas se encuentran ubicadas en la zona centro-norte de Chile para el caso de las series de caudales, y en la zona central para el caso de las precipitaciones.

El análisis de frecuencias entrega un mejor ajuste con la distribución GEV para un mayor número de cuencas en el caso de los caudales máximos instantáneos, mientras que, en el caso de las precipitaciones diarias máximas, la distribución Log Normal entrega mejores resultados. La bondad de ajuste fue verificada mediante los gráficos QQ-Plot y de función de densidad de probabilidad, comprobada además con el análisis de diferentes indicadores como AIC, BIC y la prueba de Chi-cuadrado. En el caso de las series anuales de precipitaciones diarias máximas, la distribución Log Normal entrega consistentemente los mejores resultados para cada uno de los indicadores de bondad de ajuste. En el caso de los caudales máximos instantáneos, se presentan resultados similares para las distribuciones Log Normal, Log Pearson III y GEV, con una ligera ventaja favorable a esta última, motivo por el cual fue la distribución adoptada.

Se utilizaron tres estrategias para la formación de regiones homogéneas: (1) una sola región considerando todas las estaciones de estudio, (2) tres regiones de acuerdo con la caracterización realizada para el método de crecidas DGA-AC (DGA, 1995) en la estimación del caudal medio diario máximo de T = 10 años, y (3) tres regiones mediante

el método de agrupación *K-means*, considerando características físicas y climáticas de las cuencas de acuerdo con la base de datos de CAMELS-CL (Álvarez-Garretón et al., 2018). En el caso del método de agrupación, los tres grupos de regiones guardan una similitud con la definición geográfica Norte, Centro y Sur, lo que es esperable considerando el gradiente hidroclimático que se da a lo largo de Chile continental. No obstante, se identifican algunas cuencas de diferente ubicación geográfica que comparten una misma región homogénea (Grupo), evidenciando que, desde el punto de vista de los elementos de agrupación seleccionados (área pluvial, pendiente media y relación P_{100}/P_{10}), presentan alguna similitud.

En este estudio, se regionalizaron seis (6) cuantiles de crecidas (2, 5, 10, 20, 50 y 100 años) y los tres parámetros de la GEV (posición, escala y forma). Los modelos de regionalización fueron seleccionados a partir de la combinación de ocho predictores mediante el método paso a paso hacia adelante (*Forward Stepwise Selection*) y su comportamiento fue evaluado mediante los indicadores $R^2_{ajustado}$, BIC y el método de validación cruzada de K grupos. En el caso de los cuantiles de crecida, se obtiene una reducción en la calidad del ajuste conforme aumenta el periodo de retorno, lo que se explica principalmente por la incertidumbre generada al estimar caudales de crecida con periodos de retorno mayores a 30 años. Específicamente, en las diferentes regiones analizadas se aprecia el mayor detrimento en el indicador de evaluación a partir de $T = 50$ años. En cuanto a los parámetros de la GEV, los modelos de regionalización presentan ajustes satisfactorios para los parámetros de posición (μ) y escala (σ), con valores de $R^2_{ajustado}$ entre 0,80 y 0,95. Por otro lado, para el parámetro de forma (ε) se obtienen los valores de $R^2_{ajustado}$ entre 0,26 y 0,66.

Los mejores indicadores de evaluación se obtienen para los modelos de las regiones húmedas, Grupo 3 y Sur, seguidas por las regiones Única y Grupo 2, las cuales cuentan con más de un 30 % de cuencas con estas características. Por otro lado, en las regiones más áridas – Norte, Grupo 1 y Centro – se obtuvieron en general peores resultados. La variabilidad interanual de las crecidas en términos del coeficiente de variación (CV) en regiones áridas es generalmente mayor que en otros climas debido a la menor linealidad entre los procesos que generan las crecidas y la respuesta de estas (Blöschl et al., 2013). En el presente trabajo se tiene que las cuencas de la región Norte presentan un CV promedio de 1,26, las del Centro, de 1,06; mientras que en las del Sur este es 0,56. Esta fuerte no linealidad en los climas áridos también implica que la variabilidad hidrológica espacial en los procesos generadores de crecidas impacte más fuerte en la curva de frecuencia de crecidas, por lo que incluso cuencas vecinas pueden exhibir curvas de frecuencia bastante diferentes, reflejando predicciones regionales de baja calidad, a diferencia de las cuencas de regiones húmedas que tienden a ser más lineales (Blöschl et al., 2013). Por último, el comportamiento acá explicado se aprecia tanto en los modelos de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, aunque es menos notorio en estos últimos.

En el caso de las regiones definidas por algún tipo de criterio de agrupación (ubicación geográfica o agrupación), se encontraron mejoras en la calidad de las estimaciones en comparación a la región de dominio único.

Los resultados indican una mejora en el comportamiento de los modelos conforme aumenta el área pluvial de la cuenca. En general, la región Grupo 1 y, en especial, la región Centro presentaron los menores valores promedios de área con 402,3 km² y 348 km², respectivamente, mientras las regiones Grupo 3 y Sur, con promedios de 1.160 km² y 1.045 km², respectivamente, obteniéndose un mejor poder predictivo en estas últimas.

Con respecto a los predictores de los modelos de regionalización, se obtiene que, en el caso de los parámetros de posición (μ) y escala (σ), los predictores que componen los modelos de regionalización coinciden en general con los obtenidos para los cuantiles de crecida. Para el parámetro de forma (ϵ) se obtiene una baja correlación con el área y, en general, una alta correlación con predictores físico-climáticos como cobertura de bosques total, pendiente e índice de aridez. En resumen, en el caso de los parámetros de la GEV los predictores que conforman los modelos de regionalización presentan una alta variabilidad, notablemente en el caso del parámetro de forma. Sin embargo, de manera general se resaltan el área pluvial, la precipitación con T = 10 años y el índice de aridez. Por el lado de los cuantiles de crecida, se destaca que, además del área y la precipitación diaria máxima, los principales predictores que conforman los modelos de regionalización son la cobertura de bosque total y elevación media, seguidos por la pendiente media y cobertura de matorrales.

Además del análisis regional de crecidas, este estudio presentó dos objetivos complementarios consistentes en comparar el comportamiento predictivo de: (1) diferentes métodos de selección de regiones homogéneas, y (2) técnica de regresión de parámetros (TRP) y regresión de los caudales de crecida para diferentes periodos de retorno (cuantiles) (TRQ), para lo cual se utilizó como indicador el Error Cuadrático Medio Normalizado (RMSNE). Se obtuvo que ambas técnicas, de manera general, reflejan comportamientos similares para caudales con periodos de retorno bajos (hasta 10 años), mientras que, para mayores periodos de retorno, existen diferencias considerables en algunas regiones homogéneas. La regresión de cuantiles entrega los mejores resultados para cuatro (4) de las siete regiones homogéneas definidas (Única, Norte, Sur y Grupo 3), mientras que la regresión de los parámetros de la GEV lo hace en dos (2) regiones (Grupo 1 y Grupo 2). En el caso de la región Centro, los menores errores para periodos de retorno de hasta 10 años se obtienen mediante la TRP, mientras que en el caso de periodos de retorno mayores se obtienen menores errores para la TRQ.

Desde el punto de vista del tipo de región homogénea, la TRP entrega consistentemente mejores resultados al usar áreas definidas con el método de agrupación *K-Means*, mientras que, en los demás métodos (regiones DGA-AC y dominio único), se aprecian mejores resultados mediante la TRQ. En los casos en los que es posible obtener un buen ajuste del parámetro de forma (ϵ), la TRP entrega menores valores de RMSNE que los obtenidos con la TRQ, considerando que de manera general se obtienen ajustes adecuados para los parámetros de posición (μ) y escala (σ) de la GEV. Los resultados obtenidos sugieren que, bajo algunas condiciones, la TRP podría ser un enfoque viable como alternativa a la comúnmente aplicada TRQ en cuencas no controladas.

En comparación con el método de Verni y King Modificado (DGA, 1995) se obtiene que este último presenta los mejores resultados solo para el caso de la región única; para los demás casos, siempre entregó el peor ajuste. Si bien los métodos no son comparables debido al periodo en que fue formulada la expresión de Verni y King Modificada, se podría explicar el buen ajuste en la región única por el hecho de abarcar una mayor cantidad de cuencas y que a su vez incluye todas las zonas del país estudiadas. La fórmula original de Verni y King (1977) se obtuvo a base de un análisis dimensional y con datos de estaciones del país, por lo que es esperable un buen ajuste en condiciones de alta heterogeneidad (cuencas de diferentes áreas, diferentes zonas climáticas, diferentes coberturas, etc.). Por otro lado, y a pesar de que la fórmula modificada, incluye un coeficiente empírico variable con el periodo de retorno y con la ubicación geográfica, no presentó un mejor ajuste para zonas acotadas en comparación con los métodos TRP y TRQ.

Por último, la literatura registra diferentes estudios de regionalización utilizando regresiones globales que, para el caso de $Q_T = 100$ años, entregaron valores de RMSNE entre 0,54 y 0,88. Dichos valores fueron conseguidos en varios modelos de regionalización del presente trabajo de tesis llegando, no obstante, a valores cercanos a 0,40 en algunos casos.

6.3 RECOMENDACIONES

Considerando los resultados y conclusiones obtenidos en esta tesis, se presentan las siguientes recomendaciones para el desarrollo de trabajos futuros:

- Se sugiere incluir una mayor cantidad de cuencas, a partir de un proceso cuidadoso de relleno y extensión de series, para evitar el sesgo de la muestra. Así mismo, se recomienda analizar el efecto de incorporar cuencas al norte de la región de Atacama y al sur de la región de la Araucanía en el proceso de regionalización, considerando la diversidad climática que aportan estas zonas del país.
- Se recomienda explorar el potencial de otros predictores incluidos en la base de datos de CAMELS-CL (Álvarez-Garretón et al., 2018), y considerar la versión de CR2MET más reciente.
- Dado que algunas series presentaron tendencias significativas con al menos algún indicador, se recomienda realizar un análisis de atribución para explicar su origen. Además de considerar posibles factores climáticos, se recomienda evaluar el efecto de la cobertura y tipo de suelo y línea de nieves, los cuales pueden estar atenuando o generando tendencias en los caudales de crecida no explicadas solamente por las precipitaciones diarias máximas. También se recomienda diseñar estrategias para incorporar la no estacionariedad en el análisis de frecuencia regional de crecidas.
- Los ajustes de parámetros se realizaron con el método de Máxima Verosimilitud, por lo que se sugiere probar con métodos alternativos, como por ejemplo *L Moments* o Bayes (Haddad et al., 2014).

- Se recomienda explorar otros métodos de agrupación para la definición de zonas homogéneas, como por ejemplo clúster jerárquico. Del mismo modo, se sugiere explorar otros criterios de agrupación de cuencas como la distribución de frecuencia equitativa o algún método similar para obtener parámetros de modelos de regresión (Blöschl et al., 2013).
- Estudios futuros podrían evaluar el potencial de otros métodos como índice de crecidas y técnicas geoestadísticas, las que han mostrado en general resultados bastante satisfactorios (Blöschl et al., 2013).
- Por último, se sugiere regionalizar los parámetros de otras distribuciones de probabilidad que el presente estudio identificó de buen ajuste, especialmente la Log Normal y la Log Pearson III, y acotar dicha regionalización en zonas donde predomine el buen ajuste de dichas distribuciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acreman, M. C., & C. D. Sinclair (1986). "Classification of Drainage Basins According to Their Physical Characteristics: An Application for Flood Frequency Analysis in Scotland". *Journal of Hydrology*, 84(3–4), 365–380, doi:10.1016/0022-1694(86)90134-4.
- [2] Álvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). "The CAMELS-CL Dataset: Catchment Attributes & Meteorology for Large Sample Studies – Chile Dataset", *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2018-23>, in review, 2018.
- [3] Andrade, B. (1999). "El Marco Natural de Chile su Diversidad de Paisajes". *Estudios Geográficos*, Vol 60 Num 234, pag 7-24.
- [4] Bates, B. C., A. Rahman, R. G. Mein, & P. E. Weinmann (1998). "Climatic & Physical Factors that Influence the Homogeneity of Regional Floods in Southeastern Australia". *Water Resources Research*, 34(12), 3369–3381, doi:10.1029/98WR02521.
- [5] Beable, M. E., & A. I. McKerchar (1982). "Regional Flood Estimation in New Zealand". National Water & Soil Conservation Organisation, Water & Soil Division, Technical Report No. 20.
- [6] Blösch, G. (2016). "Runoff Predictions in Ungauged Basins – Where Do We Stand?". *International Association of Hydrological Sciences*, 373, 57–60. DOI: 10.5194/piahs-373-57-2016.
- [7] Blösch, G. & Sivapalan. M. (1997). "Process Controls on Regional Flood Frequency: Coefficient of Variation & Basin Scale". *Water Resources Research*, VOL. 33, NO. 12, Pages 2967-2980.
- [8] Blösch, G., Sivapalan. M., Wagener, T.; Viglione, A. & Savenije, H. (2013). "Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places & Scales". Cambridge University Press.
- [9] Bocchiola, D., De Michele, C., and Rosso, R. (2003). "Review of Recent Advances in Index Flood Estimation". *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(3), 283–296.
- [10] Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018, April). "CR2MET: A high-resolution precipitation & temperature dataset for hydroclimatic research in Chile". In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 19739).
- [11] Burn, D. H. (1997). "Catchment Similarity for Regional Flood Frequency Analysis Using Seasonality Measures". *Journal of Hydrology*, 202(1–4), 212–230, doi:10.1016/S0022–1694 (97)00068–1.

- [12] Burn, D., & N. K. Goel (2000). “*The Formation of Groups for Regional Flood Frequency Analysis*”. *Hydrological Sciences Journal*, 45(1), 97–112, doi:10.1080/02626660009492308.
- [13] Castellarin, A., D. H. Burn, & A. Brath (2001). “*Assessing the Effectiveness of Hydrological Similarity Measures for Flood Frequency Analysis*”. *Journal of Hydrology*, 241(3–4), 270– 285, doi:10.1016/S0022–1694(00)00383–8.
- [14] Cheng, L., AghaKouchack, A., Gillel, E. & Katz, R.W. (2014). “*Non-Stationary Extreme Value Analysis*”. *Climatic Change*, 127: 353-369, DOI 10.1007/s10584-014-1254-5.
- [15] Chow, V.; Maidment, D. & Mays, L. (1994). “*Hidrología Aplicada*”. McGraw Hill.
- [16] Covián, F., & Stowhas, L. (2015). “*Modelación Probabilística de la Línea de Nieves Durante Eventos de Tormenta Entre Los 28,5° y 46,5°LS*”. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- [17] d’Arcangeli, V.R. (1997). “*Variación Temporal de Algunos Factores Meteorológicos en Chile*”. Memoria Para Optar al Título de Ingeniero civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- [18] Di Prinzio, M., A. Castellarin, & E. Toth (2011). “*Data-Driven Catchment Classification: Application to the PUB Problem*”. *Hydrology and Earth System Sciences*. 15, 1921–1935.
- [19] F Dalrymple, T. (1960). “*Flood-Frequency Analyses. Manual of Hydrology. Part 3: Flood–Flow Techniques*”. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 1543-A.
- [20] Falvey, M. & R.N. Garreaud (2009). “*Regional Cooling in a Warming World: Recent Temperature Trends in the Southeast Pacific and Allong the West Coast of Subtropical South America (1979-2006)*”. *Journal of Geophysical Research*, 114, D04102.
- [21] Faraway, J. (2013). “*Linear Models with R*”. Taylor & Francis, Text in Statistics Science.
- [22] Gareth, J., Witten, D., Hastie, T. & Tibshirani, R. (2013). “*An Introduction to Statistical Learning. with Applications in R*”. Springer Text in Statistics.
- [23] Gilleland, E. (2019). “*RStudio Package ‘extRemes*”. Repository CRAN. URL <http://www.ral.ucar.edu/staff/ericg/extRemes>
- [24] Gocic, M. & S. Trajkovic (2013). “*Analysis of Changes in Meteorological Variables Using Mann-Kendall and Sen’s Slope Estimator Statistical Test in Serbia*”. *Global and Planetary Change*, 100, pp. 172-182.

- [25] Griffis, V. W., and J. R. Stedinger (2007). "The Log-Pearson Type 3 Distribution and its Application in Flood Frequency Analysis, 2. Parameter Estimation Methods". *Journal of Hydrological Engineering*, 12(4), 492–500.
- [26] Haddad, K. & Rahman, A. (2012). "Regional Flood Frequency Analysis in Eastern Australia: Bayesian GLS Regression-Based Methods within Fixed Region & ROI Framework – Quantile Regression vs Parameter Regression Technique". *Journal of Hydrology*, 430–431 (2012) 142–161.
- [27] Haddad, K., Rahman, A. & Ling, F. (2014). "Regional Flood Frequency Analysis Method for Tasmania, Australia: a case study on the comparison of fixed region & region-of-influence approaches". *Hydrological Sciences Journal*, 60:12, 2086-2101, DOI: 10.1080/02626667.2014.950583.
- [28] Hartigan, J. A. & Wong, M. A. (1979). "Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm". *Applied Statistics*, 28, 100--108. 10.2307/2346830.
- [29] Hurst, H. E. (1951). "Long-term Storage Capacity of Reservoirs". *Transaction of the American Society of Civil Engineers*, 116, pp. 770-808.
- [30] Jain, S. & U. Lall (2000). "Magnitude & Timing of Annual Maximum Floods: Trends & Large-Scale Climatic Associations for the Blacksmith Fork River". *Utah, Water Resources Research*, 36(12), 3641–3651, doi:10.1029/2000WR900183.
- [31] Jingyi, Z., & M. J. Hall (2004), *Regional Flood Frequency Analysis for the Gan-Ming River Basin in China*". *Journal of Hydrology*, 296(1–4), 98–117, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.03.018.
- [32] Kader, F., Derbas, A., Haddad, K. & Rahman, A. (2015). "Regional Flood Estimation for NSW: Comparison of Quantile Regression & Parameter Regression Techniques". 21st International Congress on Modelling & Simulation, Gold Coast, Australia.
- [33] Kjeldsen, T. R., & D. Jones (2007). "Estimation of An Index Flood Using Data Transfer in the UK". *Hydrological Sciences Journal*, 52(1), 86–98.
- [34] Kjeldsen, T. R., & D. A. Jones (2009). "An Exploratory Analysis of Error Components in Hydrological Regression Modelling". *Water Resources Research*, 45(2), 1–13.
- [35] Kjeldsen, T. R., & D. A. Jones (2010). "Predicting the Index Flood in Ungauged UK Catchments: on the Link Between Data-Transfer & Spatial Model Error Structure". *Journal of Hydrology*, 387(1–2), 1–9.
- [36] Koutsoyiannis, D. (2006). "Nonstationary Versus Scaling in Hydrology". *Journal of Hydrology*, 324, pp. 239-254.
- [37] Lagos, M. A. & Jara, F. (2017). "Estimación de la Línea de Nieves Utiliz&o Técnicas de Percepción Remota, Entre -28° y -36° de Latitud ¿Qué Ha Pasado Desde Peña y

Vidal? Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

[38] Ley, R., M. C. Casper, H. Hellebrand, & R. Merz (2011). “*Catchment Classification by Runoff Behaviour with Self-Organizing Maps (SOM)*”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(9), 2947–2962, doi:10.5194/hess-15-2947-2011.

[39] Lin, G. F., & L. H. Chen (2006). “*Identification of Homogeneous Regions for Regional Frequency Analysis Using the Self-Organizing Map*”. *Journal of Hydrology*, 324(1–4), 1–9, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.09.009

[40] Lumley, T. (2017). “*RStudio Package ‘leaps’*”. Repository CRAN. URL <https://CRAN.R-project.org/package=leaps>

[41] Machiwal, D. & Kumar, M. (2012). “*Hydrologic Time Series Analysis: Theory & Practice*”. Springer.

[42] Madsen, H., & D. Rosbjerg (1997). “*Generalized Least Squares & Empirical Bayes estimation in Regional Partial Duration Series Index-Flood Modeling*.” *Water Resources Research*, 33(4), 771–781, doi:10.1029/96WR03850.

[43] Mann, H. (1945). “*Nonparametric Test Against Trend*”. *Journal of the Econometric Society*, 13, pp. 245-259.

[44] Merz, R. & Blöschl, G. (2005). “*Flood Frequency Regionalization: Spatial Proximity vs. Catchment Attributes*”. *Journal of Hydrology*, 302(1–4), 283–306, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.07.018.

[45] Merz, R., & G. Blöschl (2008a). “*Flood Frequency Hydrology: 1. Temporal, Spatial, & Causal Expansion of Information*”. *Water Resources Research*, 44(8), 1–17, doi:10.1029/2007WR006744.

[46] Merz, R., & G. Blöschl (2008b). “*Flood Frequency Hydrology: 2. Combining Data Evidence*”. *Water Resources Research*, 44(8), 1–16, doi:10.1029/2007WR006745.

[47] Merz, R., & G. Blöschl (2009b). “*Process Controls on the Statistical Flood Moments: A Data Based Analysis*”. *Hydrological Processes*, 23 (5) 675–696.

[48] Merz, R., G. Blöschl, & U. Piock-Ellena (1999). “*Zur Anwendbarkeit des Gradex-Verfahrens in Österreich (Applicability of the Gradex-Method in Austria)*”. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 51(11/12), 291–305.

[49] Ministerio de Obras Públicas (MOP), Dirección General de Aguas (DGA). (1995). “*Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica*”. Ayala, Cabrera y Asociados Ingenieros Consultores Ltda.

[50] Ministerio de Obras Públicas (MOP), Dirección General de Aguas (DGA). (2017). “*Actualización del Balance Hídrico Nacional*”. SIT No. 417, División de Estudios y

Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.

[51] Ministerio de Obras Públicas (MOP), DGOP, Dirección de Vialidad (2018). “*Manual de Carreteras*”. Volumen 2 y 3. Chile.

[52] M Mulvany, T. J. (1851). “*On the Use of Self-Registering Rain & Flood Gauges in Making Observations of the Relations of Rainfall & Flood Discharges in a Given Catchment*”. Proceedings of the institution of Civil Engineers of Ire&, 4, 19-31.

[53] Pandey, G. R., & V. T. V. Nguyen (1999). “*A Comparative Study of Regression Based Methods in Regional Flood Frequency Análisis*”. Journal of Hydrology, 225(1–2), 92–101, doi:10.1016/S0022–1694(99)00135–3.

[54] Parajka, J., S. Kohnová, G. Bálint, et al. (2010a). “*Seasonal Characteristics of Flood Regimes Across the Alpine– Carpathian Range*”. Journal of Hydrology, 394(1–2), 78–89, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.05.015.

[55] Petrow, T., B. Merz, K.-E. Lindenschmidt, & A. H. Thielen (2007). “*Aspects of Seasonality & Flood Generating Circulation Patterns in a Mountainous Catchment in south-eastern Germany*”. Hydrology & Earth System Sciences, 11, 1455–1468.

[56] Pizarro, R. et al. (2017). “*Antecedentes de la Relación Masa Forestal y Disponibilidad Hídrica en Chile Central*”. Universidad de Talca & Universidad de Chile.

[57] Piock-Ellena, U., R. Merz, G. Blöschl, & D. Gutknecht (1999). “*On the Regionalization of Flood Frequencies: Catchment Similarity Based on Seasonality Measures*”. XXVIII IAHR Proceedings 22–27 August 1999, Graz, Austria.

[58] Reis Jr, D.S., Stedinger, J.R., T. & Martins, E.S. (2005). “*Bayesian Generalized Least Squares Regression With Application to Log Pearson Type 3 Regional Skew Estimation*”. Water Resources Research, Vol. 41, W10419, doi:10.1029/2004WR003445.

[59] Ricchetti, F. (2018). “*Hidrología en la Ingeniería Incorporación del Efecto de la No Estacionariedad en el Análisis de Series Hidrometeorológicas de Precipitación Diaria y Temperatura Media Diaria. Caso de Estudio: Valores Extremos y Mensuales en Chile Central*”. Tesis Para Optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

[60] Rao, A. R. (2006). “*Flood Frequency Relationships For Indiana Final Report*”. School of Civil Engineering, Purdue University. FHWA/IN/JTPR-2005/18.

[61] Reed, D. W., D. Jakob, A. J. Robson, D. S. Faulkner, & E. J. Stewart (1999). “*Regional Frequency Analysis: A New Vocabulary*”. L. Gottschalk, J.-C. Olivry, D. Reed, & D. Rosbjerg (Eds.), Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating (Proceedings, Birmingham Symposium, July 1999), Wallingford: IAHS Publication 255, pp. 237–243.

- [62] Rosbjerg, D. (2007). “*Regional Flood Frequency Analysis, in O. F. Vasiliev, P. H. A. J. M. van Gelder, E. J. Plate, & M. V. Bolgov (Eds.)*”. Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security, NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences, Volume 78, pp. 151–171.
- [63] Sáenz, G. (2009). “*Hidrología en la Ingeniería*”. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2 edición.
- [64] Salas, J. D. & Jara, F. (2000). “*Hidrología de Zonas Áridas y Semiáridas*”. Ingeniería del Agua, Vol. 7. N°4.
- [65] Sawicz, K., Wagener, T., Troch, P.A. & Carillo, G. (2011). “*Catchment Classification: Empirical Analysis of Hydrologic Similarity Based on Catchment Function in the Eastern USA*”. Hydrology & Earth System Sciences, 15, 2895-2911, DOI: 10.5194/hess-15-2895-2011.
- [66] Sen, P. (1968). “*Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's tau*”. Journal of the American Statistical Association, 63, pp. 1379-1389.
- [67] Sherman, L. K. (1932). “*Streamflow From Rainfall by the Unit-Graph Method*”. Eng. News Record, 108, 501-505.
- [68] Shu, C., and D. H. Burn (2004a). “*Homogeneous Pooling Group Delineation for Flood Frequency Analysis Using a Fuzzy Expert System with Genetic Enhancement*”. Journal of Hydrology, 291(1–2), 132–149, doi:10.1016/j.jhydrol.2003.12.011.
- [69] Sivapalan, M., G. Blöschl, R. Merz, & D. Gutknecht (2005). “*Linking Flood Frequency to Long-Term Water Balance: Incorporating Effects of Seasonality*”. Water Resources Research, 41(6), 1–17, doi:10.1029/2004WR003439
- [70] Smith, J. A. (1992). “*Representation of Basin Scale in Flood Peak Distributions*”. Water Resources Research, 28(11), 2993– 2999, doi:10.1029/92WR01718.
- [71] Stowhas, L. (2016). “*Fundamentos de Hidrología Aplicada*”. Editorial USM.
- [72] Srinivas, V. V., S. Tripathi, A. R. Rao, & R. S. Govindaraju (2008). “*Regional Flood Frequency Analysis by Combining Self-Organizing Feature Map and Fuzzy Clustering*”. Journal of Hydrology, 348(1–2), 148–166, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.046.
- [73] Tasker, G. D., S. A. Hodge, and C. S. Barks (1996). “*Region of Influence Regression for Estimating the 50-year Flood at Ungauged Sites*”. Journal of the American Water Resources Association, 32(1), 163–170, doi:10.1111/j.1752- 1688.1996.tb03444.x
- [74] Thomas, D. M., & M. A. Benson (1970). “*Generalization of Streamflow Characteristics from Drainage-Basin Characteristics*.” U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1975, U.S. Government Printing Office.
- [75] Verni, F., & King, H. (1977). “*Estimación de Crecidas en Cuencas no Controladas*”. III Coloquio Nacional de Hidráulica.

- [76] Villón, M. (2006). "*Hidrología Estadística*". Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- [77] Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P.A. & Woods, R. (2007). "*Catchment Classification & Hydrologic Similarity*". *Geography Compass* 1/4, 901–931, 10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x.
- [78] Yue, S., Pilon, P. & Cavadias, R. (2002). "*Power of the Mann-Kendall & Spearman's rho test for detecting monotonic trends in hydrological series*". *Journal of Hydrology*, 259, pp. 254-271.
- [79] Wu, Y., Xue, L. & Liu, Y. (2019). "*Local & Regional Flood Frequency Analysis Based on Hierarchical Bayesian Model in Dongting Lake Basin, China*". *Water Science & Engineering*, Elsevier.
- [80] www.rpubs.com

ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS PRELIMINAR

Anexo A.1: Caudales Máximos Instantáneos

Tabla A.1.1: Estadísticos básicos de las series de caudales máximos instantáneos

Cuenca - Estación		Mín.	Media	Máx.	Desv.	CV	Coef. Asim	Num, Datos
		(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)			
1	Río Jorquera En Vertedero	0,5	1,2	2,4	0,5	0,44	0,79	39
2	Río Pulido En Vertedero	0,7	4,6	30,4	7,2	1,55	2,87	41
3	Río Manflas En Vertedero	0,2	1,1	4,4	1,0	0,99	2,02	35
4	Río Copiapó En Pastillo	1,1	5,5	50,0	8,8	1,59	4,00	40
5	Río Carmen En Ramadillas	0,5	5,0	23,0	4,6	0,92	2,11	49
6	Estero Derecho En Alcohuáz	0,7	2,0	5,6	1,1	0,55	1,50	33
7	Río Cochiguaz En El Peñón	1,2	3,5	8,0	1,8	0,51	0,93	33
8	Río Claro En Rivadavia	0,9	8,3	51,8	8,7	1,05	2,92	85
9	Río Hurtado En San Agustín	1,8	4,7	11,5	2,3	0,49	1,15	39
10	Río Hurtado En Angostura De Pangué	0,9	29,2	643,8	83,8	2,87	6,22	67
11	Río Grande En Las Ramadas	1,3	10,6	62,0	12,5	1,19	2,73	44
12	Río Tascadero En Desembocadura	0,4	4,3	25,6	5,4	1,27	2,37	42
13	Río Grande En Cuyano	2,5	43,1	441,7	77,2	1,79	3,66	47
14	Río Mostazal En Cuestecita	0,7	3,0	10,7	2,8	0,93	1,72	31
15	Río Los Molles En Ojos De Agua	0,0	0,5	1,5	0,4	0,88	0,90	31
16	Río Rapel En Junta	0,6	21,3	159,6	39,1	1,84	2,44	33
17	Río Grande En Puntilla San Juan	4,1	124,1	1287,4	248,6	2,00	3,08	54
18	Río Cogotí Entrada Embalse Cogotí	0,9	55,0	230,6	64,1	1,17	1,37	34
19	Río Choapa En Cuncumén	3,5	19,2	77,7	16,8	0,87	1,96	41
20	Río Choapa En Salamanca	0,5	52,6	640,0	102,2	1,94	4,52	45
21	Río Illapel En Las Burras	0,9	7,2	67,8	11,4	1,58	4,03	42
22	Río Sobrante En Piadero	0,4	7,8	47,7	10,7	1,37	2,12	31
23	Río Alicahue En Colliguay	0,3	4,6	16,5	5,0	1,07	1,13	38
24	Río Juncal En Juncal	4,5	9,9	51,2	9,8	0,99	3,57	36
25	Río Blanco En Río Blanco	1,7	14,4	70,3	13,3	0,92	2,36	52
26	Río Aconcagua En Río Blanco	3,3	33,0	146,0	32,3	0,98	1,98	32
27	Río Aconcagua En Chacabuquito	13,6	90,9	677,3	106,1	1,17	3,47	53
28	Río Aconcagua En San Felipe	7,4	108,0	567,2	121,8	1,13	1,98	41
29	Estero Pocuro En El Sifón	0,4	10,2	79,3	16,0	1,57	2,83	49
30	Río Volcán En Queltehues	0,7	16,2	79,6	15,0	0,92	2,57	43
31	Río Olivares Antes Junta Río Colorado	2,2	14,2	32,8	8,5	0,60	0,57	30
32	Río Colorado Antes Junta Río Maipo	18,6	84,4	329,8	63,4	0,75	1,52	44
33	Río Angostura En Valdivia De Paine	13,2	334,7	1206,4	322,2	0,96	1,09	34
34	Estero Arrayan En La Montosa	0,5	11,5	83,0	16,5	1,44	2,67	51
35	Río Mapocho En Los Almendros	1,8	71,4	330,2	89,1	1,25	1,62	49
36	Estero Puangue En Boquerón	0,0	34,4	163,0	38,9	1,13	1,46	35
37	Estero Puangue En Ruta 78	27,0	207,6	888,1	241,5	1,16	1,70	30

	Cuenca - Estación	Mín.	Media	Máx.	Desv.	CV	Coef. Asim	Num, Datos
		(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)			
38	Río Claro En El Valle	32,8	199,4	621,1	130,9	0,66	1,22	30
39	Río Tinguiririca Bajo Los Briones	40,1	303,4	1430,5	313,1	1,03	1,77	53
40	Río Claro En Los Queñes	5,8	179,1	528,0	124,9	0,70	0,96	63
41	Río Colorado En Junta Con Palos	21,3	303,1	1770,5	297,8	0,98	3,08	41
42	Río Palos En Junta Con Colorado	30,3	209,1	597,4	153,3	0,73	0,79	36
43	Estero Upeo En Upeo	29,0	194,9	490,3	137,6	0,71	0,74	34
44	Río Perquilauquén En San Manuel	121,6	783,4	8410,0	1163,3	1,49	6,17	47
45	Estero Curipeumo En Lo Hernández	5,8	72,3	198,2	43,7	0,60	0,57	36
46	Río Cauquenes En El Arrayan	7,5	251,7	1032,1	267,9	1,06	1,52	39
47	Río Putagán En Yervas Buenas	52,8	288,0	824,6	180,4	0,63	1,18	44
48	Río Claro En Camarico	24,0	493,8	1723,8	375,7	0,76	1,29	35
49	Río Lircay En Puente Las Rastras	16,6	311,8	1067,9	210,9	0,68	1,56	34
50	Río Saucos Antes Junta Con Ñuble	55,1	337,7	799,7	200,2	0,59	0,64	41
51	Río Ñuble En La Punilla	109,6	856,8	2785,0	601,9	0,70	1,06	35
52	Río Chillan En Camino A Confluencia	31,5	368,2	809,5	245,1	0,67	0,53	30
53	Río Itata En Cholguán	129,5	517,5	1156,3	251,2	0,49	0,42	51
54	Río Itata En General Cruz	150,3	665,2	1577,8	351,5	0,53	0,76	32
55	Río Itata En Trilaleo	147,0	724,8	2274,1	449,0	0,62	1,34	33
56	Río Renegado En Invernada	2,7	51,7	167,3	37,9	0,73	0,83	52
57	Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	59,4	376,9	772,0	168,3	0,45	0,21	60
58	Río Diguillín En Longitudinal	118,0	723,3	2194,3	465,2	0,64	1,43	38
59	Río Itata En Balsa Nueva Aldea	295,1	1430,3	3251,2	664,4	0,46	0,27	46
60	Río Andalién Camino A Penco	17,0	156,3	368,0	80,2	0,51	0,34	40
61	Río Biobío En Rucalhue	814,3	3156,2	7893,8	1475,8	0,47	0,60	67
62	Río Lirquén En Cerro El Padre	32,0	103,5	225,1	44,7	0,43	0,65	63
63	Río Duqueco En Cerrillos	201,6	840,6	2453,1	473,3	0,56	1,26	38
64	Río Duqueco En Villucura	184,9	682,7	2929,9	491,5	0,72	3,02	55
65	Río Mulchén En Mulchén	34,6	155,1	293,4	67,0	0,43	0,02	45
66	Río Mininco En Longitudinal	25,0	145,5	367,1	81,8	0,56	0,70	39
67	Río Malleco En Collipulli	99,3	368,9	853,5	172,5	0,47	0,52	41
68	Río Caramávida En Caramávida	18,6	70,5	178,4	31,8	0,45	1,08	30
69	Río Butamalal En Butamalal	13,0	72,9	185,0	45,8	0,63	0,98	35
70	Río Llieu-Llieu En Desague Lago Llieu-Llieu	23,7	71,8	202,0	37,7	0,53	1,43	34
71	Río Puren En Tranaman	18,6	80,3	163,6	26,8	0,33	0,85	47
72	Río Lumaco En Lumaco	29,9	144,9	295,6	77,9	0,54	0,37	55
73	Río Traiguén En Victoria	8,7	42,8	109,4	22,3	0,52	1,06	50
74	Río Quino En Longitudinal	26,0	151,3	370,0	77,0	0,51	0,81	43
75	Río Quillén En Galvarino	55,8	188,7	471,7	102,5	0,54	1,00	46
76	Río Cholchol En Cholchol	304,8	919,6	2031,0	348,0	0,38	0,68	51
77	Río Cautín En Rari-Ruca	193,9	537,6	1015,0	181,2	0,34	0,29	75
78	Río Muco En Puente Muco	68,5	210,3	398,6	84,8	0,40	0,49	45
79	Río Cautín En Cajón	343,6	946,4	1957,7	396,7	0,42	0,62	56
80	Río Quepe En Vilcún	38,8	191,7	488,0	95,8	0,50	0,77	45
81	Río Quepe En Quepe	214,8	669,8	1550,6	300,0	0,45	0,75	45

Cuenca - Estación		Mín.	Media	Máx.	Desv.	CV	Coef. Asim	Num, Datos
		(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)			
82	Río Cautín En Almagro	527,4	1853,4	3485,0	692,4	0,37	0,25	44
83	Río Allipén En Los Laureles	300,8	827,7	1534,4	281,6	0,34	0,11	55
84	Río Trancura En Curarrehue	74,5	228,6	436,0	80,5	0,35	0,06	41
85	Río Trancura Antes Río Llafenco	235,1	659,9	1060,2	207,6	0,31	-0,20	35
86	Río Toltén En Villarica	272,6	591,4	928,0	165,5	0,28	-0,02	70
87	Río Puyehue En Quitratue	13,4	45,4	84,5	15,6	0,34	0,15	54
88	Río Dónguil En Gorbea	65,6	210,7	413,0	80,4	0,38	0,61	42

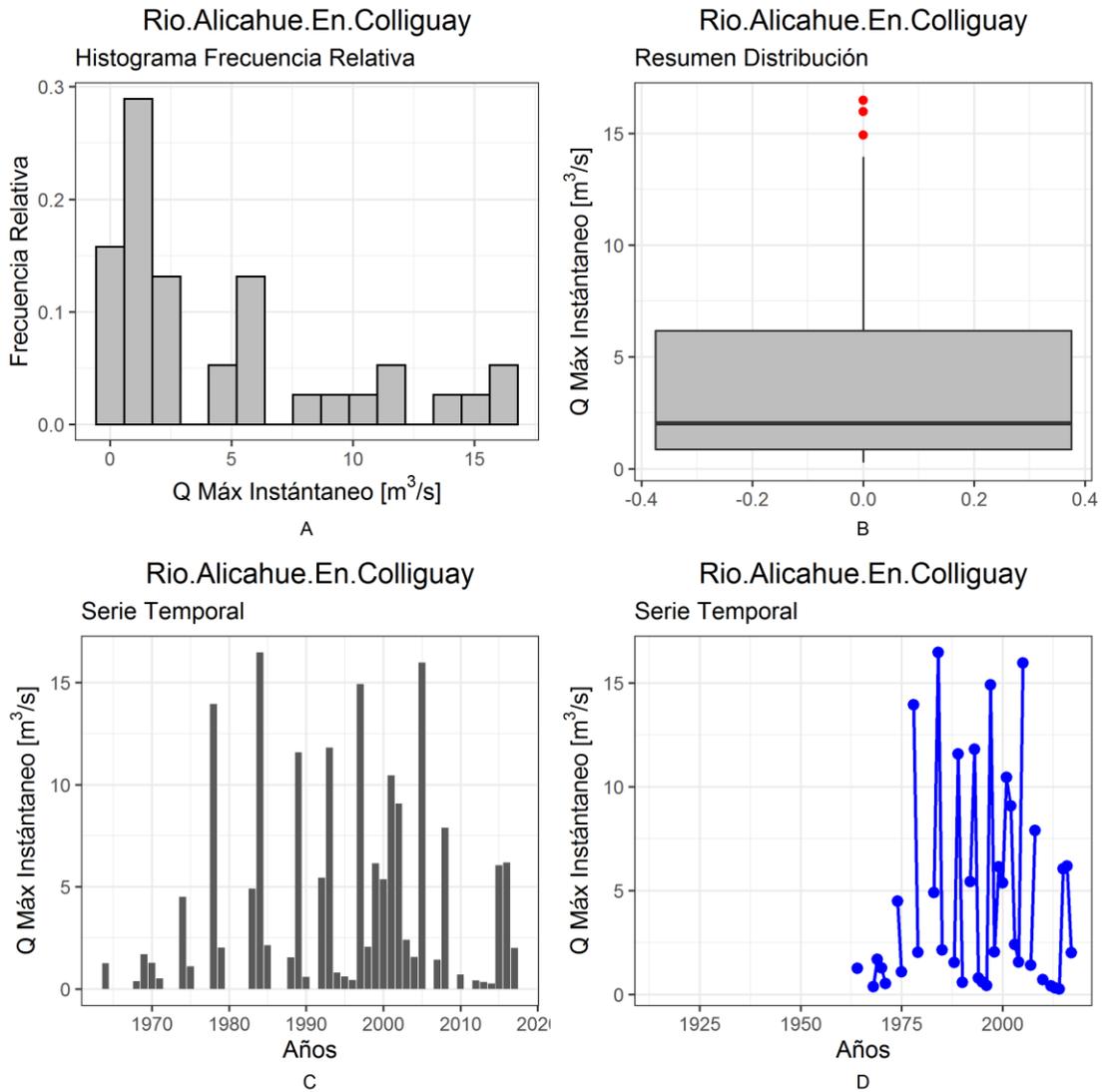


Figura A.1.1: Análisis general de la serie anual de máximos caudales instantáneos estación río Alicahue en Colliguay (cuenca nivel pluvial).

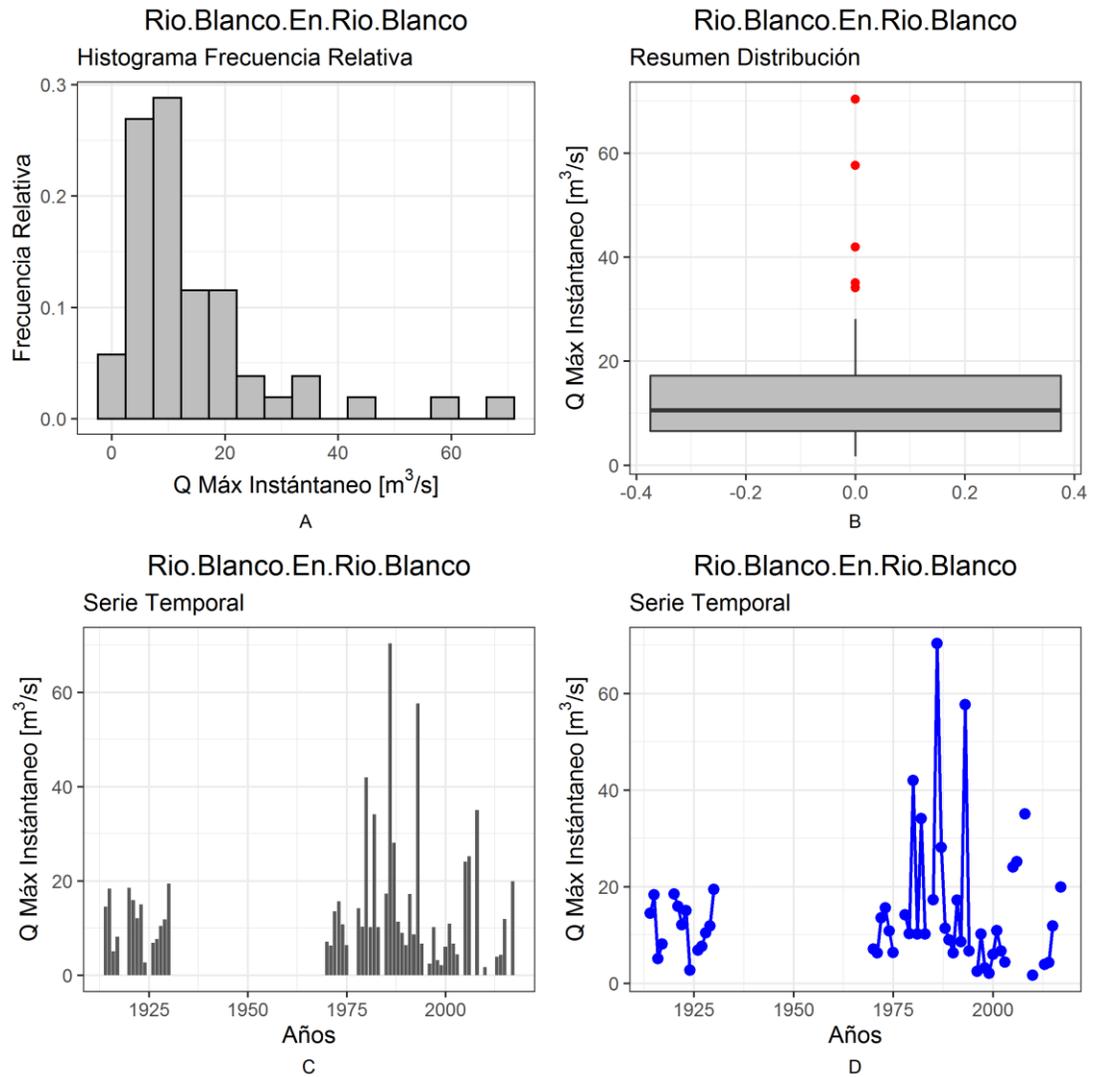


Figura A.1.2: Análisis general de la serie de caudales máximos instantáneos estación río Blanco en río Blanco (cuenca nival).

Tabla A.1.2: Diferentes indicadores de tendencias para las series de caudales máximos instantáneos

Cuenca - Estación		Ajuste lineal		Porcentajes		MK test, $\alpha = 5\%$ (p-value)	Coeficiente de Hurst
		Min ECM (m ³ /s/año)	ThielSen (m ³ /s/año)	Mínimo ECM (%)	ThielSen (%)		
1	Río Jorquera En Vertedero	0,00	0,00	0,40	-0,08	0,46	0,71
2	Río Pulido En Vertedero	0,08	0,03	1,74	0,72	0,08	0,41
3	Río Manflas En Vertedero	0,01	0,00	0,55	0,29	0,51	0,62
4	Río Copiapó En Pastillo	0,14	0,05	2,59	0,88	0,00	0,44
5	Río Carmen En Ramadillas	-0,05	0,01	-0,95	0,15	0,65	0,62
6	Estero Derecho En Alcohúaz	-0,06	-0,05	-2,83	-2,65	0,00	0,60
7	Río Cochiguaz En El Peñón	-0,05	-0,08	-1,58	-2,27	0,03	0,60
8	Río Claro En Rivadavia	-0,09	-0,02	-1,08	-0,25	0,02	0,61
9	Río Hurtado En San Agustín	0,00	-0,02	0,06	-0,47	0,80	0,59
10	Río Hurtado En Angostura De Pangué	-0,12	-0,02	-0,42	-0,07	0,52	0,48
11	Río Grande En Las Ramadas	-0,05	0,06	-0,45	0,54	0,61	0,50
12	Río Tascadero En Desembocadura	-0,02	0,00	-0,55	-0,04	0,48	0,57
13	Río Grande En Cuyano	0,14	-0,05	0,32	-0,12	0,88	0,59
14	Río Mostazal En Cuestecita	-0,03	-0,02	-1,14	-0,71	0,66	0,62
15	Río Los Molles En Ojos De Agua	-0,01	-0,02	-2,71	-4,08	0,00	0,64
16	Río Rapel En Junta	-0,13	-0,05	-0,60	-0,22	0,45	0,48
17	Río Grande En Puntilla San Juan	-0,17	-0,17	-0,13	-0,14	0,40	0,56
18	Río Cogotí Entrada Embalse Cogotí	0,49	-0,01	0,90	-0,02	0,68	0,57
19	Río Choapa En Cuncumén	-0,11	0,00	-0,55	-0,02	0,65	0,49
20	Río Choapa En Salamanca	-0,17	-0,10	-0,33	-0,19	0,56	0,48
21	Río Illapel En Las Burras	0,04	-0,02	0,62	-0,33	0,32	0,52
22	Río Sobrante En Piadero	-0,12	-0,05	-1,50	-0,61	0,16	0,46
23	Río Alicahue En Colliguay	0,02	0,03	0,46	0,61	0,84	0,56
24	Río Juncal En Juncal	0,03	0,02	0,30	0,17	0,28	0,45
25	Río Blanco En Río Blanco	0,03	-0,03	0,21	-0,22	0,30	0,59
26	Río Aconcagua En Río Blanco	-0,18	-0,48	-0,54	-1,47	0,21	0,57
27	Río Aconcagua En Chacabuquito	1,03	0,65	1,13	0,72	0,08	0,51
28	Río Aconcagua En San Felipe	0,42	-0,09	0,39	-0,09	0,97	0,53
29	Estero Pocuro En El Sifón	0,11	-0,02	1,09	-0,16	0,82	0,57
30	Río Volcán En Queltehues	0,12	0,03	0,72	0,16	0,35	0,55
31	Río Olivares Antes Junta Río Colorado	-0,22	-0,19	-1,52	-1,33	0,10	0,61
32	Río Colorado Antes Junta Río Maipo	0,83	0,76	0,98	0,90	0,10	0,58

Cuenca - Estación		Ajuste lineal		Porcentajes		MK test, $\alpha = 5\%$ (p-value)	Coeficiente de Hurst
		Min ECM (m ³ /s/año)	ThielSen (m ³ /s/año)	Mínimo ECM (%)	ThielSen (%)		
33	Río Angostura En Valdivia De Paine	-3,63	-5,22	-1,08	-1,56	0,31	0,55
34	Estero Arrayan En La Montosa	0,11	0,07	0,95	0,57	0,21	0,57
35	Río Mapocho En Los Almendros	0,80	0,02	1,12	0,02	0,93	0,60
36	Estero Puangue En Boquerón	-0,27	-0,03	-0,79	-0,09	0,93	0,59
37	Estero Puangue En Ruta 78	-8,18	-7,89	-3,94	-3,80	0,06	0,52
38	Río Claro En El Valle	-1,65	-0,91	-0,83	-0,45	0,35	0,51
39	Río Tinguiririca Bajo Los BRiones	3,29	1,12	1,08	0,37	0,10	0,59
40	Río Claro En Los Queñes	1,49	1,66	0,83	0,93	0,08	0,68
41	Río Colorado En Junta Con Palos	2,83	2,07	0,93	0,68	0,10	0,64
42	Río Palos En Junta Con Colorado	-1,92	-2,55	-0,92	-1,22	0,21	0,61
43	Estero Upeo En Upeo	2,89	2,19	1,48	1,13	0,12	0,60
44	Río Perquilauquén En San Manuel	-9,11	-2,75	-1,16	-0,35	0,15	0,49
45	Estero Curipeumo En Lo Hernández	-0,17	-0,68	-0,24	-0,94	0,65	0,51
46	Río Cauquenes En El Arrayan	3,80	2,53	1,51	1,01	0,10	0,67
47	Río Putagán En Yervas Buenas	0,98	2,95	0,34	1,02	0,17	0,66
48	Río Claro En Camarico	5,15	3,84	1,04	0,78	0,16	0,54
49	Río Lircay En Puente Las Rastras	2,98	1,13	0,96	0,36	0,36	0,53
50	Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	4,17	4,47	1,23	1,32	0,09	0,63
51	Río Ñuble En La Punilla	1,89	2,68	0,22	0,31	0,91	0,50
52	Río Chillan En Camino A Confluencia	4,63	6,30	1,26	1,71	0,12	0,61
53	Río Itata En Cholguán	5,28	6,19	1,02	1,20	0,00	0,70
54	Río Itata En General Cruz	4,96	1,74	0,75	0,26	0,51	0,59
55	Río Itata En Trilaleo	8,39	5,28	1,16	0,73	0,34	0,61
56	Río Renegado En Invernada	0,28	0,32	0,54	0,62	0,23	0,57
57	Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	0,23	-0,34	0,06	-0,09	0,96	0,55
58	Río Diguillín En Longitudinal	0,78	-1,48	0,11	-0,20	0,62	0,60
59	Río Itata En Balsa Nueva Aldea	-12,46	-15,24	-0,87	-1,07	0,03	0,65
60	Río Andalién Camino A Penco	-1,70	-0,94	-1,09	-0,60	0,05	0,56
61	Río Biobío En Rucalhue	-11,38	-16,15	-0,36	-0,51	0,05	0,64
62	Río Lirquén En Cerro El Padre	-0,08	-0,01	-0,08	-0,01	0,67	0,53

Cuenca - Estación		Ajuste lineal		Porcentajes		MK test, $\alpha = 5\%$ (p-value)	Coeficiente de Hurst
		Min ECM (m ³ /s/año)	ThielSen (m ³ /s/año)	Mínimo ECM (%)	ThielSen (%)		
63	Río Duqueco En Cerrillos	-2,51	-4,14	-0,30	-0,49	0,53	0,60
64	Río Duqueco En Villucura	-1,11	-0,83	-0,16	-0,12	1,00	0,62
65	Río Mulchén En Mulchén	-0,63	-0,34	-0,40	-0,22	0,20	0,42
66	Río Mininco En Longitudinal	-0,08	-0,96	-0,06	-0,66	0,61	0,62
67	Río Malleco En Collipulli	1,66	1,27	0,45	0,34	0,60	0,53
68	Río Caramávida En Caramávida	0,59	1,14	0,84	1,62	0,05	0,66
69	Río Butamalal En Butamalal	-0,08	-0,54	-0,11	-0,74	0,78	0,65
70	Río Lleu-Lleu En Desague Lago Lleu-Lleu	-0,39	-0,25	-0,54	-0,35	0,44	0,39
71	Río Puren En Tranaman	0,16	0,07	0,20	0,08	0,65	0,58
72	Río Lumaco En Lumaco	-1,04	-1,23	-0,72	-0,85	0,03	0,54
73	Río Traiguen En Victoria	-0,27	-0,27	-0,63	-0,64	0,16	0,52
74	Río Quino En Longitudinal	-0,04	-0,37	-0,03	-0,24	1,00	0,58
75	Río Quillén En Galvarino	-0,20	-0,38	-0,10	-0,20	0,56	0,54
76	Río Cholchol En Cholchol	-1,83	-4,10	-0,20	-0,45	0,11	0,60
77	Río Cautín En Rari-Ruca	-1,43	-1,35	-0,27	-0,25	0,11	0,56
78	Río Muco En Puente Muco	0,61	0,16	0,29	0,08	0,76	0,55
79	Río Cautín En Cajón	0,29	0,17	0,03	0,02	0,85	0,59
80	Río Quepe En Vilcún	0,32	0,64	0,17	0,34	0,73	0,52
81	Río Quepe En Quepe	-0,44	-1,87	-0,07	-0,28	0,59	0,58
82	Río Cautín En Almagro	6,34	2,00	0,34	0,11	0,61	0,54
83	Río Allipén En Los Laureles	1,28	0,17	0,15	0,02	0,61	0,54
84	Río Trancura En Curarrehue	-0,25	0,66	-0,11	0,29	0,85	0,39
85	Río Trancura Antes Río Llafenco	2,16	3,09	0,33	0,47	0,50	0,45
86	Río Toltén En Villarica	-0,42	-0,27	-0,07	-0,05	0,58	0,57
87	Río Puyehue En Quitratue	-0,09	-0,19	-0,20	-0,42	0,36	0,48
88	Río Dónguila En Gorbea	-0,03	0,82	-0,01	0,39	0,76	0,54

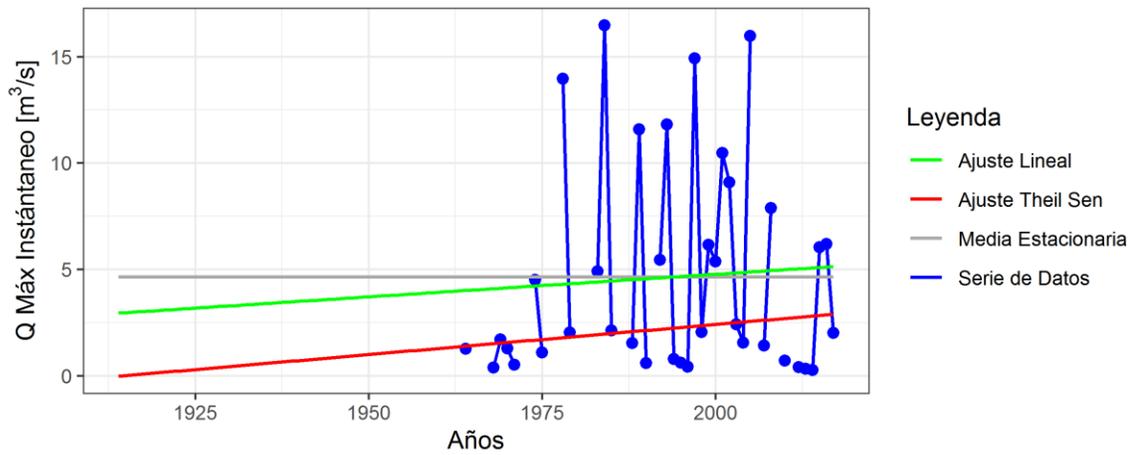


Figura A.1.3: Análisis de tendencias de la serie de caudales máximos instantáneos estación río Alichue en Colliguay (cuena nivo pluvial)

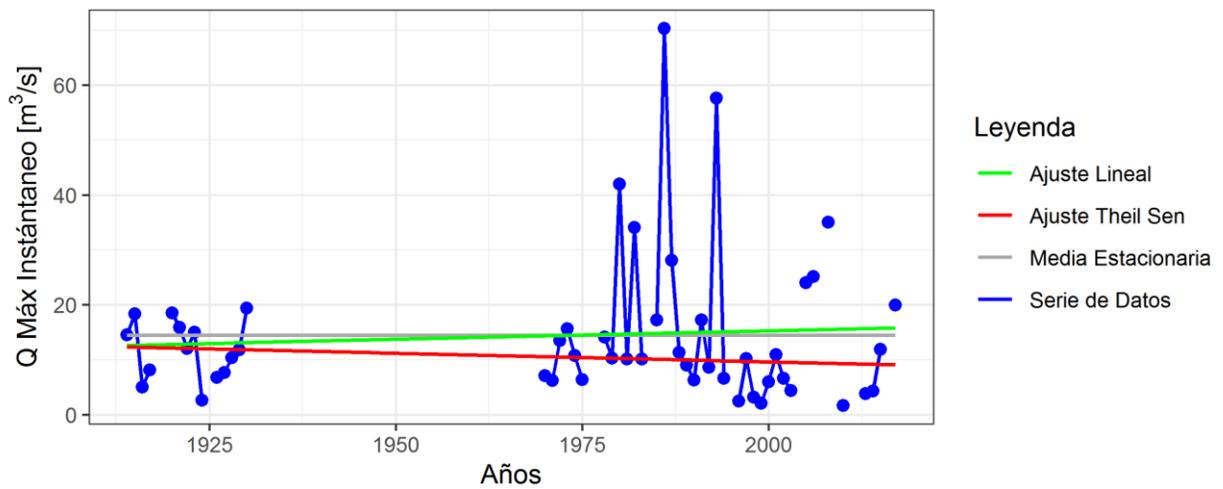


Figura A.1.4: Análisis de tendencias de la serie de caudales máximos instantáneos estación río Blanco en rio Blanco (cuena nival)

Tabla A.1.3: Ajuste a la distribución GEV de las series de caudales máximos instantáneos (m³/s)

Cuenca - Estación		Posición	Escala	Forma	Periodos de Retorno (Años)					
		(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	2	5	10	20	50	100
1	Río Jorquera En Vertedero	0,9	0,4	0,18	1,1	1,6	2,0	2,4	3,0	3,6
2	Río Pulido En Vertedero	1,7	1,2	0,86	2,2	5,3	9,8	18,0	40,1	73,2
3	Río Manflas En Vertedero	0,5	0,4	0,75	0,7	1,6	2,7	4,6	9,1	15,2
4	Río Copiapó En Pastillo	2,5	1,6	0,71	3,1	6,7	11,2	18,7	36,5	60,5
5	Río Carmen En Ramadillas	2,8	2,0	0,45	3,6	7,0	10,5	15,1	23,7	33,0
6	Estero Derecho En Alcohuáz	1,5	0,7	0,33	1,7	2,8	3,7	4,9	6,9	8,8
7	Río Cochiguaz En El Peñón	2,6	1,3	0,21	3,1	4,9	6,4	8,0	10,5	12,7
8	Río Claro En Rivadavia	4,5	3,1	0,44	5,7	11,1	16,4	23,4	36,5	50,6
9	Río Hurtado En San Agustín	3,5	1,6	0,25	4,1	6,4	8,3	10,4	13,9	17,0
10	Río Hurtado En Angostura De Pangué	5,3	5,8	1,02	7,7	25,2	54,6	114,3	297,2	607,7
11	Río Grande En Las Ramadas	4,7	3,9	0,68	6,4	15,0	25,9	43,1	82,8	134,7
12	Río Tascadero En Desembocadura	1,3	1,3	1,11	1,9	6,5	15,0	33,8	96,9	213,6
13	Río Grande En Cuyano	12,4	13,4	1,02	18,3	58,9	127,4	266,5	692,5	1415,9
14	Río Mostazal En Cuestecita	1,5	1,1	0,76	2,0	4,7	8,4	14,7	30,5	52,7
15	Río Los Molles En Ojos De Agua	0,2	0,3	0,45	0,3	0,8	1,3	1,9	3,1	4,4
16	Río Rapel En Junta	5,4	6,7	1,05	7,6	26,3	58,7	125,8	336,5	702,3
17	Río Grande En Puntilla San Juan	15,1	19,4	1,49	25,5	128,7	391,6	1147,7	4633,6	13196,6
18	Río Cogotí Entrada Embalse Cogotí	16,5	21,2	0,85	27,1	82,2	159,3	294,0	639,5	1137,9
19	Río Choapa En Cuncumén	10,5	7,8	0,56	14,7	30,0	46,4	69,7	116,2	169,5
20	Río Choapa En Salamanca	9,4	13,3	0,92	16,0	52,2	106,3	205,7	476,8	890,7
21	Río Illapel En Las Burras	2,9	2,3	0,80	3,8	9,3	16,8	29,7	62,1	108,0
22	Río Sobrante En Piadero	2,1	2,7	1,09	3,2	11,9	27,8	62,2	176,4	384,8
23	Río Alicahue En Colliguay	1,4	1,8	1,06	2,2	7,5	16,8	36,0	96,5	201,9
24	Río Juncal En Juncal	6,5	2,0	0,55	7,4	11,1	15,3	21,2	33,3	47,2
25	Río Blanco En Río Blanco	8,5	6,6	0,41	11,1	21,9	32,2	45,5	69,4	94,3
26	Río Aconcagua En Río Blanco	19,1	16,7	0,47	25,2	53,9	83,5	123,8	201,4	286,9
27	Río Aconcagua En Chacabuquito	48,4	38,5	0,71	63,5	148,7	257,9	435,0	852,3	1408,4
28	Río Aconcagua En San Felipe	47,4	51,8	0,75	69,0	190,5	352,2	622,9	1284,1	2195,6

Cuenca - Estación		Posición	Escala	Forma	Periodos de Retorno (Años)					
		(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	2	5	10	20	50	100
29	Estero Pocuro En El Sifón	2,3	2,9	1,14	3,6	13,6	32,4	74,4	218,1	488,0
30	Río Volcán En Queltehues	9,6	8,3	0,27	12,4	24,2	34,4	46,4	66,0	84,5
31	Río Olivares Antes Junta Río Colorado	10,6	7,6	-0,01	13,0	21,4	27,1	32,6	39,9	45,4
32	Río Colorado Antes Junta Río Maipo	50,9	34,9	0,49	64,8	127,9	194,3	286,1	466,1	667,9
33	Río Angostura En Valdivia De Paine	170,3	208,2	0,59	255,0	676,9	1167,8	1904,8	3492,7	5438,1
34	Estero Arrayan En La Montosa	2,7	3,3	1,24	4,3	17,3	44,0	108,1	346,3	828,8
35	Río Mapocho En Los Almendros	21,6	26,5	0,98	34,7	118,0	254,6	526,5	1338,9	2687,7
36	Estero Puangue En Boquerón	10,2	15,6	0,98	17,1	62,7	136,1	279,7	700,1	1385,5
37	Estero Puangue En Ruta 78	82,3	89,8	1,12	121,4	408,2	915,9	1991,6	5448,7	11586,8
38	Río Claro En El Valle	135,0	103,3	0,25	173,3	317,0	436,1	572,3	787,4	983,2
39	Río Tinguiririca Bajo Los BRíones	151,6	131,9	0,74	205,5	511,5	914,5	1583,8	3203,6	5417,0
40	Río Claro En Los Queñes	134,5	98,9	0,11	166,8	289,8	381,7	478,5	618,0	733,9
41	Río Colorado En Junta Con Palos	167,1	146,9	0,38	223,5	457,0	675,9	952,1	1439,8	1934,1
42	Río Palos En Junta Con Colorado	128,3	107,7	0,35	170,5	340,5	496,9	691,1	1028,1	1364,1
43	Estero Upeo En Upeo	137,3	109,5	0,23	176,9	332,3	463,5	615,8	860,5	1086,8
44	Río Perquilauquén En San Manuel	460,6	267,7	0,28	565,4	960,4	1300,2	1700,8	2355,4	2971,2
45	Estero Curipeumo En Lo Hernández	41,0	36,4	0,12	56,4	101,5	134,3	168,1	215,5	254,0
46	Río Cauquenes En El Arrayan	122,8	132,5	0,64	174,7	439,9	751,2	1221,6	2243,0	3503,7
47	Río Putagán En Yervas Buenas	202,6	123,2	0,24	248,2	421,7	566,2	732,2	995,6	1236,5
48	Río Claro En Camarico	305,8	250,1	0,29	400,1	764,0	1077,8	1448,2	2054,5	2625,8
49	Río Lircay En Puente Las Rastras	200,9	154,0	0,15	261,5	462,3	615,5	779,7	1020,7	1225,0
50	Río Sauces Antes Junta Con Nuble	235,0	161,9	0,13	297,0	500,5	651,4	809,5	1035,5	1222,3
51	Río Nuble En La Punilla	568,8	452,4	0,25	736,3	1363,2	1883,0	2477,8	3417,8	4273,9
52	Río Chillan En Camino A Confluencia	244,9	215,0	0,14	324,4	592,3	793,2	1005,6	1312,6	1568,9
53	Río Itata En Cholguán	414,6	227,7	-0,04	495,8	742,1	898,9	1044,8	1227,4	1359,7

Cuenca - Estación		Posición	Escala	Forma	Periodos de Retorno (Años)					
		(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	2	5	10	20	50	100
54	Río Itata En General Cruz	501,5	309,2	0,03	614,9	970,5	1212,4	1449,3	1763,3	2004,1
55	Río Itata En Trilaleo	516,1	343,7	0,16	643,3	1092,5	1440,8	1818,8	2381,3	2864,5
56	Río Renegado En Invernada	30,3	26,6	0,26	40,7	78,8	110,7	147,5	206,1	259,9
57	Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	317,6	164,3	-0,19	374,0	529,0	614,8	686,3	765,6	816,5
58	Río Diguillín En Longitudinal	503,3	337,9	0,17	629,6	1074,6	1420,7	1797,4	2359,8	2844,4
59	Río Itata En Balsa Nueva Aldea	1175,1	637,4	-0,12	1401,9	2044,5	2426,4	2763,2	3160,1	3431,0
60	Río Andalién Camino A Penco	129,2	79,8	-0,13	156,7	235,3	281,3	321,3	367,9	399,2
61	Río Biobío En Rucalhue	2529,0	1290,6	-0,03	2994,9	4408,6	5317,9	6170,7	7247,0	8033,6
62	Río Lirquén En Cerro El Padre	83,0	38,5	-0,01	96,7	139,6	167,8	194,8	229,6	255,6
63	Río Duqueco En Cerrillos	616,5	356,8	0,16	751,0	1217,4	1574,5	1958,5	2523,6	3003,9
64	Río Duqueco En Villucura	468,3	233,8	0,30	558,9	905,7	1207,7	1567,1	2160,9	2725,5
65	Río Mulchén En Mulchén	136,5	68,3	-0,26	159,5	219,8	250,9	275,5	301,1	316,6
66	Río Mininco En Longitudinal	114,7	71,5	0,02	138,3	219,8	275,2	329,4	401,4	456,6
67	Río Malleco En Collipulli	292,0	159,0	-0,05	351,3	520,9	627,3	725,1	845,9	932,3
68	Río Caramávida En Caramávida	44,0	26,8	0,10	55,2	87,9	111,7	136,2	170,7	198,6
69	Río Butamalal En Butamalal	53,7	35,9	0,16	66,4	112,9	148,8	187,6	245,3	294,6
70	Río Lleu-Lleu En Desague Lago Lleu-Lleu	51,6	26,4	0,18	61,5	96,7	124,4	154,9	200,8	240,8
71	Río Puren En Tranaman	64,4	25,0	-0,07	73,7	100,0	116,2	130,9	148,8	161,3
72	Río Lumaco En Lumaco	104,6	67,8	0,01	130,3	206,6	257,1	305,4	367,8	414,5
73	Río Traiguen En Victoria	31,3	16,9	0,09	37,5	58,2	73,3	88,7	110,3	127,8
74	Río Quino En Longitudinal	115,3	63,2	0,07	139,0	214,1	266,7	319,5	391,3	447,9
75	Río Quillén En Galvarino	125,6	68,5	0,26	155,4	253,5	335,1	428,8	577,4	713,2
76	Río Cholchol En Cholchol	770,6	313,4	-0,05	882,9	1217,2	1427,8	1622,0	1862,7	2035,4
77	Río Cautín En Rari-Ruca	459,9	170,3	-0,14	521,0	689,3	786,8	871,1	968,2	1033,0
78	Río Muco En Puente Muco	172,7	77,9	-0,07	200,7	282,6	333,2	379,1	435,1	474,5
79	Río Cautín En Cajón	767,7	333,8	0,01	889,0	1268,4	1522,0	1767,0	2086,7	2328,2
80	Río Quepe En Vilcún	146,1	79,4	0,06	176,3	270,3	335,5	400,4	488,0	556,4
81	Río Quepe En Quepe	547,4	262,1	0,02	640,6	940,4	1142,7	1339,7	1599,0	1796,6
82	Río Cautín En Almagro	1587,7	677,5	-0,17	1826,3	2482,0	2853,3	3168,8	3525,3	3758,8

Cuenca - Estación		Posición	Escala	Forma	Periodos de Retorno (Años)					
		(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	2	5	10	20	50	100
83	Río Allipén En Los Laureles	723,6	281,0	-0,20	822,4	1084,3	1227,0	1344,6	1473,3	1554,7
84	Río Trancura En Curarrehue	199,3	81,5	-0,18	228,8	306,4	349,5	385,5	425,7	451,5
85	Río Trancura Antes Río Llafenco	586,6	225,2	-0,31	666,2	855,2	947,2	1016,8	1086,0	1125,7
86	Río Toltén En Villarica	529,8	170,8	-0,29	589,6	736,2	809,6	866,4	924,2	958,2
87	Río Puyehue En Quitratue	37,3	15,3	-0,15	42,8	57,8	66,4	73,8	82,3	87,9
88	Río Dónguila En Gorbea	169,1	70,8	-0,03	196,2	273,3	322,6	368,8	426,8	469,1

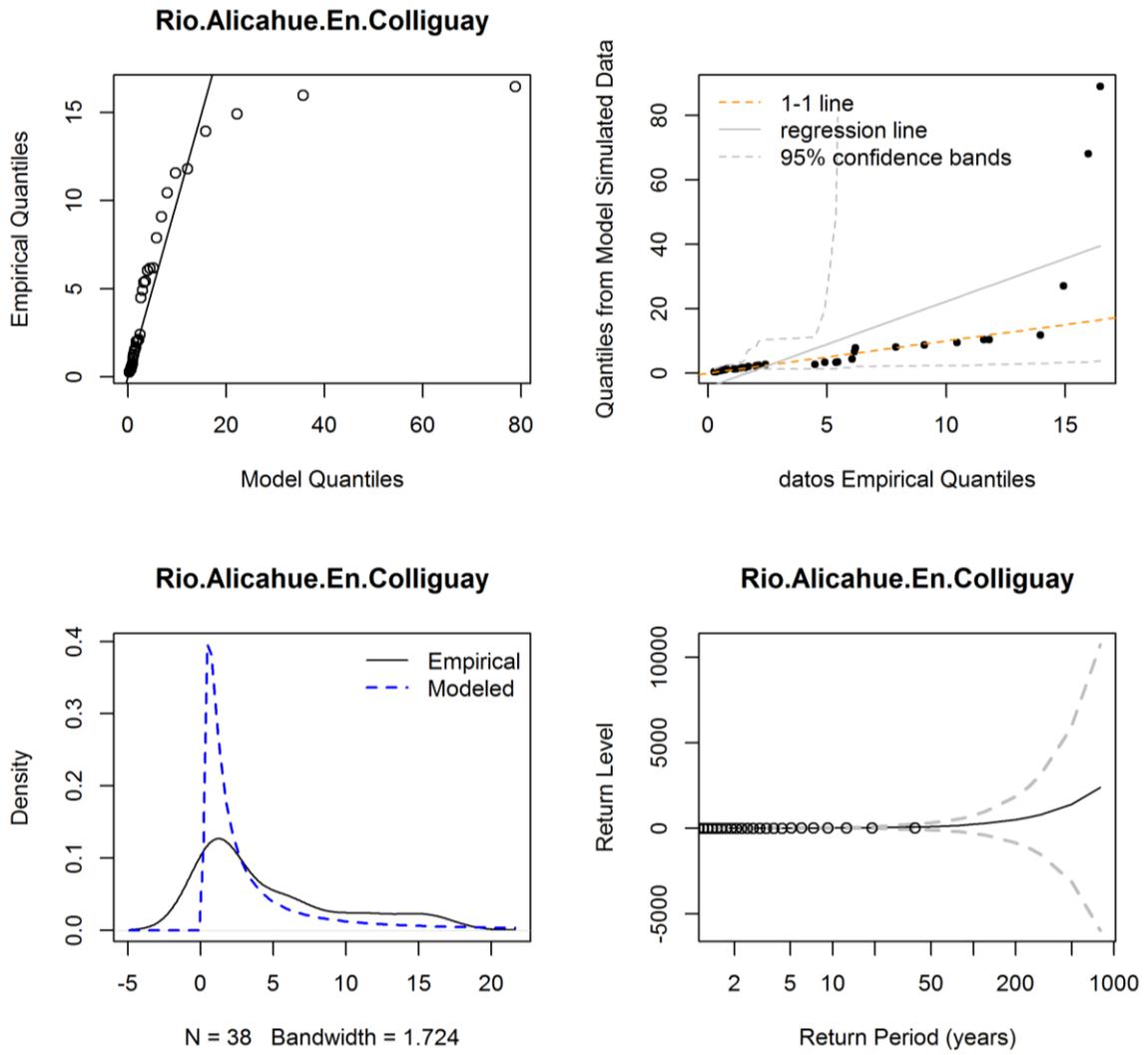


Figura A.1.5: Ajuste de la distribución GEV para la serie de caudales máximos instantáneos estación río Alicahue en Colliguay (cuenca nivo pluvial)

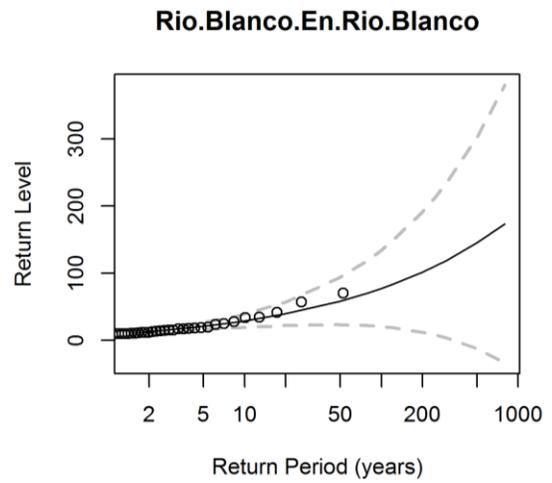
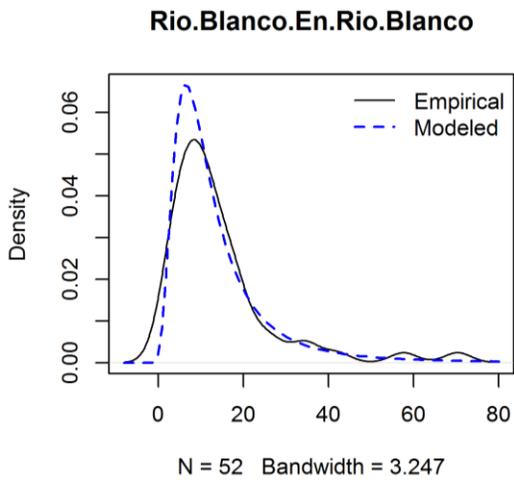
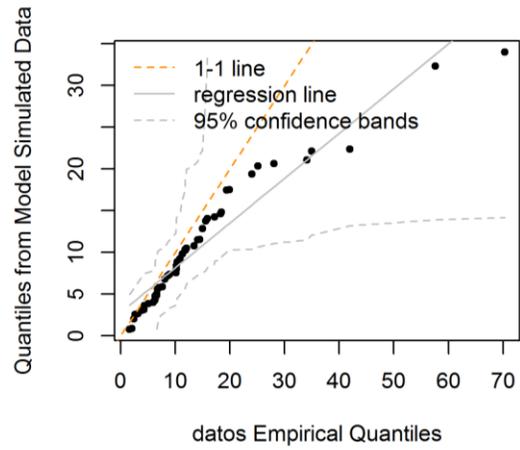
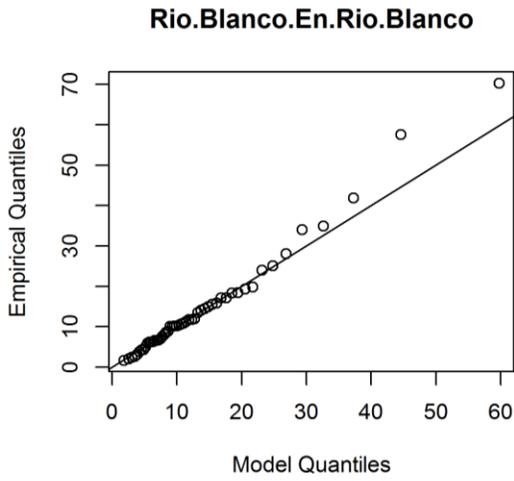


Figura A.1.6: Ajuste de la distribución GEV para la serie de caudales máximos instantáneos estación río Blanco en río Blanco (cuenca nival)

Anexo A.2: Precipitaciones diarias máximas anuales

Tabla A.2.1: Estadísticos básicos de las series de precipitación diaria máxima

Cuenca - Estación		Mín.	Media	Máx.	Desv.	CV	Coef. Asim	Num, Datos
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			
1	Río Jorquera En Vertedero	0,2	13,2	53,2	10,6	0,78	1,42	38
2	Río Pulido En Vertedero	0,2	16,1	42,4	12,0	0,69	0,47	38
3	Río Manflas En Vertedero	0,4	17,2	54,6	13,9	0,69	0,58	38
4	Río Copiapó En Pastillo	0,2	14,5	47,1	11,2	0,72	0,72	38
5	Río Carmen En Ramadillas	0,8	18,2	76,5	18,9	0,79	1,09	38
6	Estero Derecho En Alcohuáz	4,0	31,4	106,3	23,5	0,65	1,25	38
7	Río Cochiguaz En El Peñón	2,8	24,3	89,7	19,8	0,66	1,33	38
8	Río Claro En Rivadavia	2,6	26,6	96,6	21,3	0,66	1,27	38
9	Río Hurtado En San Agustín	6,5	29,8	104,0	22,9	0,64	1,17	38
10	Río Hurtado En Angostura De Pangue	5,4	30,8	97,9	22,2	0,61	1,07	38
11	Río Grande En Las Ramadas	12,1	37,2	114,2	24,5	0,55	1,05	38
12	Río Tascadero En Desembocadura	14,5	48,4	136,7	30,4	0,54	0,91	38
13	Río Grande En Cuyano	12,5	42,4	119,4	26,4	0,54	0,89	38
14	Río Mostazal En Cuestecita	11,6	35,6	110,7	24,4	0,59	1,28	38
15	Río Los Molles En Ojos De Agua	10,1	31,5	106,7	22,7	0,63	1,27	38
16	Río Rapel En Junta	9,8	33,2	107,7	23,0	0,57	1,14	38
17	Río Grande En Puntilla San Juan	10,3	37,7	111,2	24,2	0,56	1,02	38
18	Río Cogotí Entrada Embalse Cogotí	7,8	39,8	120,6	27,6	0,58	0,98	38
19	Río Choapa En Cuncumén	14,4	55,1	104,5	21,6	0,39	0,38	38
20	Río Choapa En Salamanca	10,7	49,4	104,6	21,5	0,43	0,51	38
21	Río Illapel En Las Burras	8,2	47,2	132,2	30,6	0,57	1,03	38
22	Río Sobrante En Piadero	12,5	51,7	113,8	22,4	0,41	0,63	38
23	Río Alicahue En Colliguay	12,0	49,5	109,5	21,3	0,40	0,64	38
24	Río Juncal En Juncal	22,9	60,9	108,2	21,8	0,35	0,24	38
25	Río Blanco En Río Blanco	22,7	64,8	125,4	24,9	0,38	0,48	38
26	Río Aconcagua En Río Blanco	21,6	61,2	114,8	22,8	0,36	0,38	38
27	Río Aconcagua En Chacabuquito	19,3	58,8	108,4	21,8	0,36	0,34	38
28	Río Aconcagua En San Felipe	17,5	54,8	105,0	21,1	0,37	0,44	38
29	Estero Pocuro En El Sifón	15,0	51,2	109,5	23,1	0,41	0,75	38
30	Río Volcán En Queltehues	22,7	60,3	88,9	16,5	0,29	-0,14	38
31	Río Olivares Antes Junta Río Colorado	28,3	65,3	124,5	22,4	0,35	0,64	38
32	Río Colorado Antes Junta Río Maipo	27,6	58,5	96,1	17,2	0,30	-0,10	38
33	Río Angostura En Valdivia De Paine	27,8	61,6	117,7	25,6	0,39	0,52	38
34	Estero Arrayan En La Montosa	21,2	58,0	121,3	23,5	0,37	0,71	38
35	Río Mapocho En Los Almendros	21,0	61,1	116,4	22,5	0,36	0,50	38
36	Estero Puangue En Boquerón	26,7	60,3	154,9	27,9	0,42	1,14	38
37	Estero Puangue En Ruta 78	21,2	47,2	117,4	20,6	0,39	0,95	38
38	Río Claro En El Valle	49,9	97,0	159,5	31,0	0,30	0,18	38

Cuenca - Estación		Mín.	Media	Máx.	Desv.	CV	Coef. Asim	Num, Datos
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			
39	Río Tinguiririca Bajo Los BRiones	56,8	99,9	162,9	26,3	0,26	0,19	38
40	Río Claro En Los Queñes	56,8	106,0	146,5	26,6	0,25	-0,04	38
41	Río Colorado En Junta Con Palos	55,4	107,6	139,1	22,9	0,22	-0,32	38
42	Río Palos En Junta Con Colorado	60,6	116,2	153,4	28,2	0,25	-0,30	38
43	Estero Upeo En Upeo	41,5	99,2	143,3	27,1	0,29	0,11	38
44	Río Perquilauquén En San Manuel	55,5	105,4	164,8	28,2	0,27	0,06	38
45	Estero Curipeumo En Lo Hernández	30,5	59,5	129,3	20,1	0,33	1,08	38
46	Río Cauquenes En El Arrayan	28,4	58,8	168,8	28,9	0,45	1,90	38
47	Río Putagán En Yervas Buenas	37,1	76,6	123,0	22,4	0,28	0,12	38
48	Río Claro En Camarico	40,2	91,7	138,8	26,2	0,29	-0,02	38
49	Río Lircay En Puente Las Rastras	49,9	102,2	156,0	26,9	0,27	0,00	38
50	Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	63,2	119,8	156,1	26,3	0,23	-0,35	38
51	Río Ñuble En La Punilla	63,1	116,7	156,7	26,7	0,23	-0,30	38
52	Río Chillan En Camino A Confluencia	39,0	67,4	104,6	17,8	0,25	0,19	38
53	Río Itata En Cholguán	45,3	80,1	121,1	20,9	0,26	0,22	38
54	Río Itata En General Cruz	39,6	72,8	112,6	20,0	0,27	0,29	38
55	Río Itata En Trilaleo	43,3	77,8	119,1	20,8	0,27	0,25	38
56	Río Renegado En Invernada	50,5	99,3	141,3	22,7	0,23	0,17	38
57	Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	56,2	107,1	148,6	24,8	0,24	0,14	38
58	Río Diguillín En Longitudinal	43,5	78,4	117,0	20,1	0,25	0,09	38
59	Río Itata En Balsa Nueva Aldea	36,2	67,8	102,3	18,9	0,27	0,30	38
60	Río Andalién Camino A Penco	26,9	55,6	100,8	18,6	0,31	0,30	38
61	Río Biobío En Rucalhue	46,4	70,9	103,8	14,8	0,20	0,27	38
62	Río Lirquén En Cerro El Padre	44,1	77,4	148,0	23,3	0,28	0,90	38
63	Río Duqueco En Cerrillos	39,8	69,3	110,8	18,6	0,25	0,37	38
64	Río Duqueco En Villucura	45,0	78,0	119,2	19,6	0,24	0,28	38
65	Río Mulchén En Mulchén	37,6	71,2	120,9	18,5	0,25	0,49	38
66	Río Mininco En Longitudinal	36,3	68,1	105,8	16,0	0,23	0,16	38
67	Río Malleco En Collipulli	46,1	77,7	120,3	17,1	0,22	0,34	38
68	Río Caramávida En Caramávida	30,7	59,7	104,3	17,9	0,28	0,32	38
69	Río Butamalal En Butamalal	30,5	59,0	103,8	17,3	0,27	0,32	38
70	Río Llieu-Llieu En Desague Lago Llieu-Llieu	23,3	41,9	83,4	14,3	0,31	0,94	38
71	Río Puren En Tranaman	26,3	52,4	94,2	15,3	0,27	0,51	38
72	Río Lumaco En Lumaco	25,5	48,0	91,4	14,6	0,28	0,66	38
73	Río Traiguen En Victoria	34,9	64,1	95,7	15,4	0,23	0,00	38
74	Río Quino En Longitudinal	38,6	64,9	102,4	14,7	0,22	0,34	38
75	Río Quillén En Galvarino	29,3	51,1	81,8	12,8	0,25	0,44	38
76	Río Cholchol En Cholchol	26,6	47,6	83,1	13,7	0,27	0,65	38
77	Río Cautín En Rari-Ruca	50,0	72,8	107,9	14,1	0,19	0,55	38
78	Río Muco En Puente Muco	38,6	58,9	95,1	12,9	0,21	0,46	38
79	Río Cautín En Cajón	42,6	63,6	99,3	13,0	0,20	0,45	38

Cuenca - Estación		Mín.	Media	Máx.	Desv.	CV	Coef. Asim	Num, Datos
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			
80	Río Quepe En Vilcún	45,1	66,1	96,0	13,3	0,20	0,35	38
81	Río Quepe En Quepe	37,7	58,3	88,6	13,4	0,22	0,35	38
82	Río Cautín En Almagro	38,2	59,0	90,6	12,9	0,21	0,35	38
83	Río Allipén En Los Laureles	46,5	69,9	101,3	13,9	0,20	0,27	38
84	Río Trancura En Curarrehue	48,2	78,1	121,3	19,5	0,24	0,34	38
85	Río Trancura Antes Río Llafenco	51,1	76,3	110,6	17,4	0,23	0,21	38
86	Río Toltén En Villarica	47,7	75,3	107,0	17,3	0,23	0,18	38
87	Río Puyehue En Quitratue	40,6	57,8	129,8	20,1	0,31	1,16	38
88	Río Dónquil En Gorbea	40,6	61,1	121,4	19,0	0,30	0,94	38

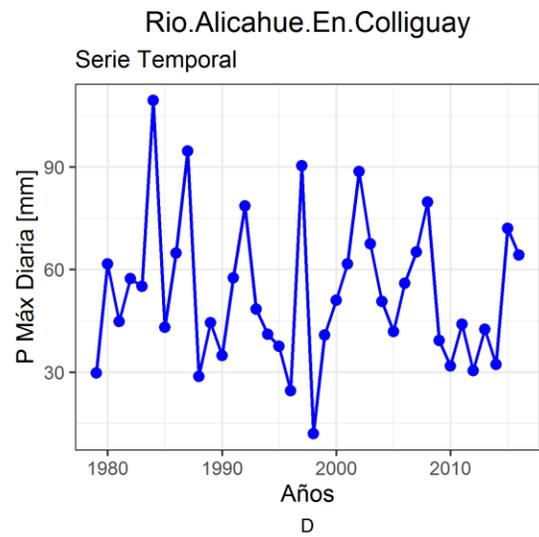
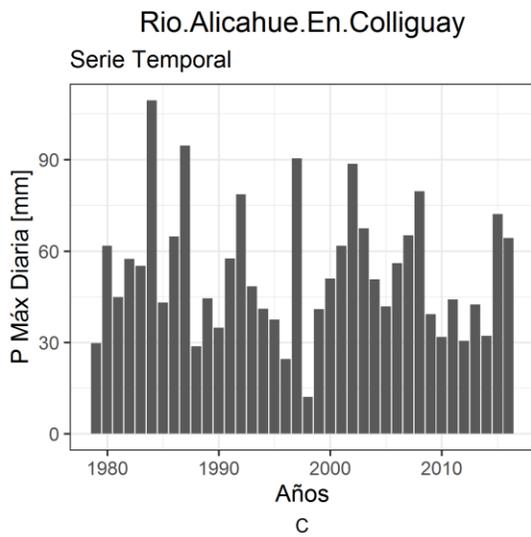
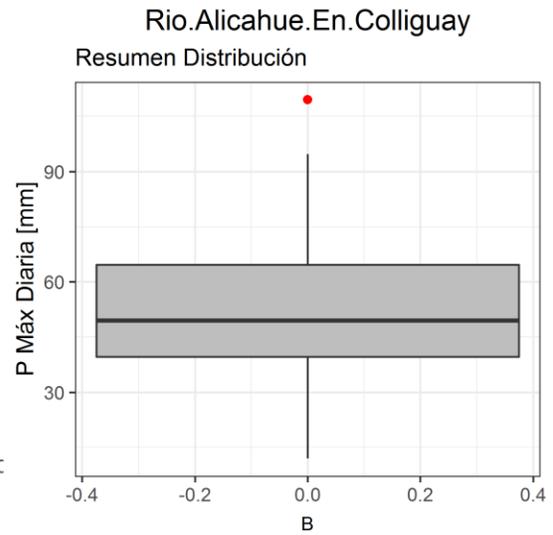
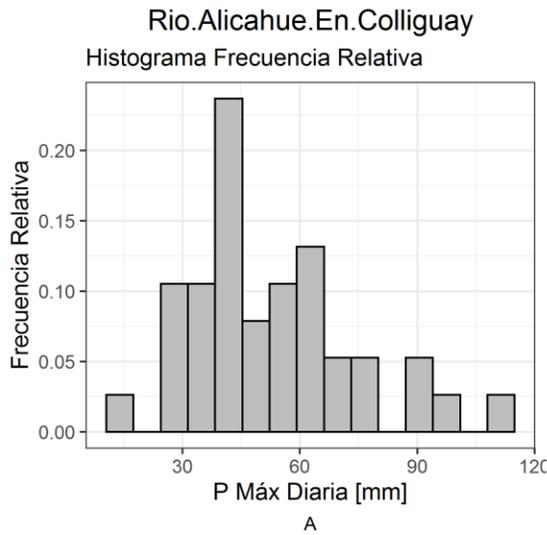


Figura A.2.1: Análisis general para la serie de precipitaciones diarias máximas estación río Alicahue en Colliguay (cuenca nivo pluvial).

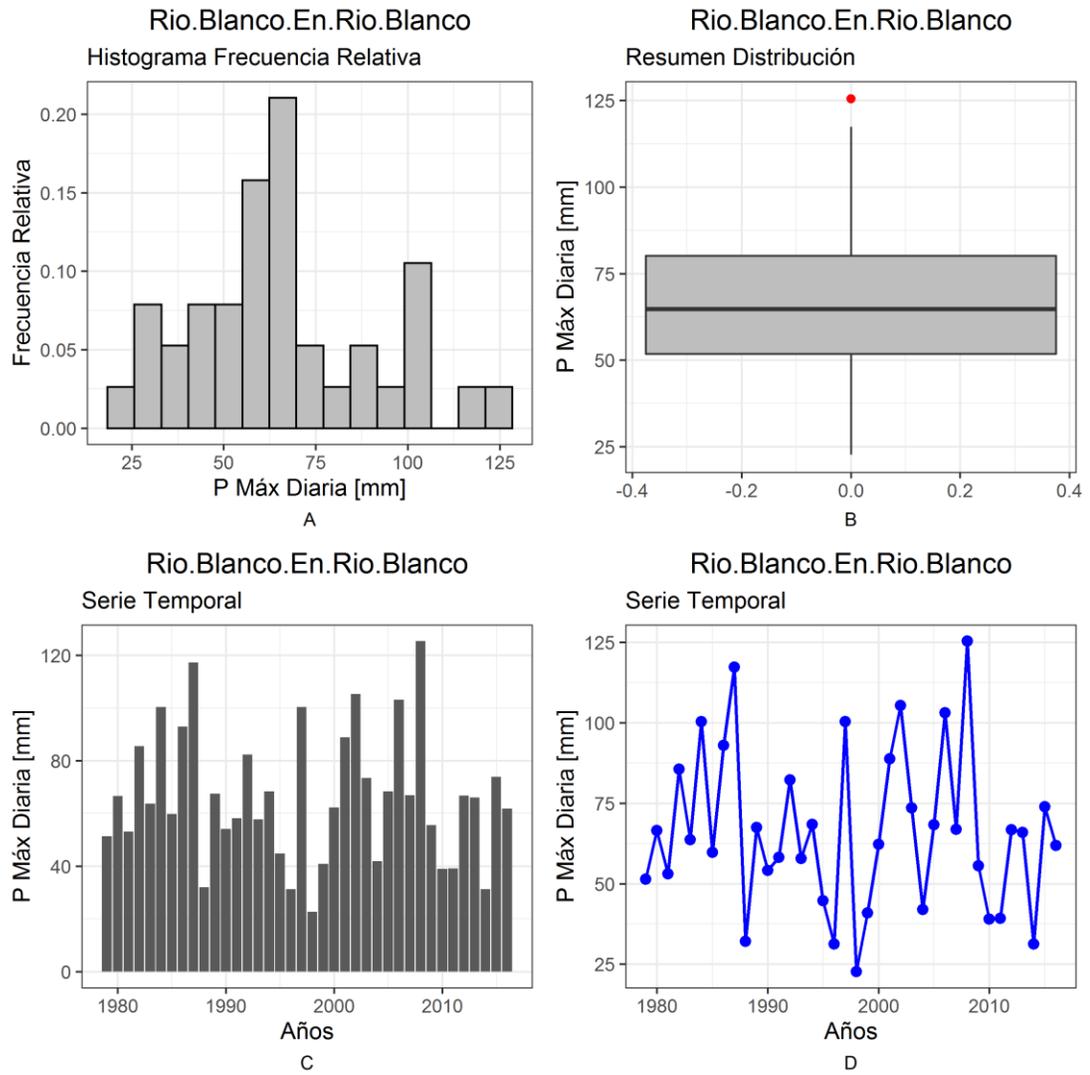


Figura A.2.2: Análisis general para la serie de precipitaciones diarias máximas estación río Blanco en río Blanco (cuena nival).

Tabla A.2.2: Diferentes indicadores de tendencias para las series de precipitaciones diarias máximas anuales

Cuenca - Estación		Ajuste lineal		Porcentajes		MK test, $\alpha = 5\%$ (p-value)	Coeficiente de Hurst
		Min ECM (mm/año)	ThielSen (mm/año)	Mínimo ECM (%)	ThielSen (%)		
1	Río Jorquera En Vertedero	-0,20	-0,12	-1,46	-0,86	0,56	0,60
2	Río Pulido En Vertedero	-0,15	-0,08	-0,89	-0,48	0,62	0,57
3	Río Manflas En Vertedero	-0,15	-0,08	-0,75	-0,41	0,56	0,55
4	Río Copiapó En Pastillo	-0,18	-0,14	-1,14	-0,89	0,69	0,59
5	Río Carmen En Ramadillas	-0,40	-0,21	-1,66	-0,87	0,39	0,57
6	Estero Derecho En Alcohuáz	-0,54	-0,29	-1,49	-0,81	0,29	0,54
7	Río Cochiguaz En El Peñón	-0,50	-0,28	-1,67	-0,92	0,22	0,56
8	Río Claro En Rivadavia	-0,48	-0,20	-1,49	-0,61	0,24	0,54
9	Río Hurtado En San Agustín	-0,45	-0,12	-1,27	-0,32	0,65	0,53
10	Río Hurtado En Angostura De Pangué	-0,36	-0,01	-0,98	-0,03	0,76	0,52
11	Río Grande En Las Ramadas	-0,43	0,00	-0,97	0,01	0,68	0,49
12	Río Tascadero En Desembocadura	-0,50	-0,04	-0,89	-0,08	0,82	0,49
13	Río Grande En Cuyano	-0,45	-0,07	-0,93	-0,15	0,80	0,48
14	Río Mostazal En Cuestecita	-0,55	-0,04	-1,33	-0,09	0,64	0,53
15	Río Los Molles En Ojos De Agua	-0,43	0,01	-1,19	0,03	0,65	0,52
16	Río Rapel En Junta	-0,47	-0,11	-1,17	-0,28	0,74	0,53
17	Río Grande En Puntilla San Juan	-0,49	0,01	-1,12	0,02	0,71	0,51
18	Río Cogotí Entrada Embalse Cogotí	-0,46	0,09	-0,97	0,18	0,90	0,51
19	Río Choapa En Cuncumén	-0,04	0,16	-0,08	0,30	0,90	0,47
20	Río Choapa En Salamanca	-0,18	-0,17	-0,36	-0,34	0,67	0,50
21	Río Illapel En Las Burras	-0,62	-0,18	-1,17	-0,33	0,55	0,53
22	Río Sobrante En Piadero	-0,23	-0,24	-0,43	-0,43	0,56	0,47
23	Río Alicahue En Colliguay	-0,17	-0,17	-0,32	-0,31	0,69	0,46
24	Río Juncal En Juncal	-0,11	0,05	-0,19	0,08	0,90	0,48
25	Río Blanco En Río Blanco	-0,18	-0,02	-0,28	-0,03	0,71	0,48
26	Río Aconcagua En Río Blanco	-0,12	0,06	-0,19	0,09	0,78	0,48
27	Río Aconcagua En Chacabuquito	-0,10	0,05	-0,17	0,08	0,86	0,49
28	Río Aconcagua En San Felipe	-0,09	0,04	-0,15	0,08	0,86	0,50
29	Estero Pocuro En El Sifón	-0,19	-0,10	-0,33	-0,18	0,55	0,49
30	Río Volcán En Queltehues	-0,01	0,11	-0,02	0,20	0,91	0,49
31	Río Olivares Antes Junta Río Colorado	-0,11	0,19	-0,17	0,29	0,86	0,44
32	Río Colorado Antes Junta Río Maipo	-0,21	0,09	-0,37	0,15	0,74	0,43
33	Río Angostura En Valdivia De Paine	-0,17	-0,20	-0,25	-0,30	0,67	0,53
34	Estero Arrayan En La Montosa	-0,10	0,00	-0,16	0,01	0,67	0,50
35	Río Mapocho En Los Almendros	-0,07	-0,06	-0,11	-0,09	0,74	0,52
36	Estero Puangue En Boquerón	-0,22	-0,21	-0,33	-0,32	0,53	0,46
37	Estero Puangue En Ruta 78	-0,27	-0,25	-0,52	-0,48	0,17	0,49
38	Río Claro En El Valle	-0,08	-0,40	-0,08	-0,39	0,69	0,47

Cuenca - Estación		Ajuste lineal		Porcentajes		MK test, $\alpha = 5\%$ (p-value)	Coeficiente de Hurst
		Min ECM (mm/año)	ThielSen (mm/año)	Mínimo ECM (%)	ThielSen (%)		
39	Río Tinguiririca Bajo Los BRiones	0,04	0,07	0,04	0,07	0,88	0,52
40	Río Claro En Los Queñes	-0,33	-0,73	-0,31	-0,70	0,38	0,40
41	Río Colorado En Junta Con Palos	-0,52	-0,77	-0,50	-0,74	0,13	0,45
42	Río Palos En Junta Con Colorado	-0,67	-1,35	-0,59	-1,19	0,11	0,45
43	Estero Upeo En Upeo	-0,59	-0,84	-0,62	-0,89	0,14	0,52
44	Río Perquilauquén En San Manuel	-0,80	-0,58	-0,77	-0,56	0,05	0,50
45	Estero Curipeumo En Lo Hernández	-0,56	-0,46	-0,94	-0,77	0,05	0,49
46	Río Cauquenes En El Arrayan	-0,95	-0,34	-1,48	-0,53	0,05	0,56
47	Río Putagán En Yervas Buenas	-0,55	-0,67	-0,69	-0,84	0,05	0,50
48	Río Claro En Camarico	-1,08	-1,42	-1,18	-1,54	0,00	0,59
49	Río Lircay En Puente Las Rastras	-1,20	-1,36	-1,21	-1,37	0,00	0,60
50	Río Sauces Antes Junta Con Nuble	-0,66	-0,30	-0,58	-0,26	0,14	0,49
51	Río Nuble En La Punilla	-0,73	-0,25	-0,64	-0,22	0,12	0,51
52	Río Chillan En Camino A Confluencia	-0,45	-0,42	-0,63	-0,59	0,07	0,53
53	Río Itata En Cholguán	-0,61	-0,44	-0,76	-0,54	0,07	0,57
54	Río Itata En General Cruz	-0,51	-0,32	-0,70	-0,43	0,06	0,56
55	Río Itata En Trilaleo	-0,58	-0,40	-0,74	-0,51	0,06	0,57
56	Río Renegado En Invernada	-0,66	-0,14	-0,67	-0,15	0,09	0,56
57	Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	-0,80	-0,28	-0,78	-0,27	0,05	0,56
58	Río Diguillín En Longitudinal	-0,56	-0,25	-0,70	-0,32	0,11	0,56
59	Río Itata En Balsa Nueva Aldea	-0,44	-0,55	-0,64	-0,79	0,06	0,56
60	Río Andalién Camino A Penco	-0,71	-0,83	-1,19	-1,40	0,01	0,56
61	Río Biobío En Rucalhue	-0,21	-0,13	-0,28	-0,18	0,28	0,50
62	Río Lirquén En Cerro El Padre	-0,19	-0,14	-0,23	-0,17	0,63	0,58
63	Río Duqueco En Cerrillos	-0,43	-0,42	-0,58	-0,58	0,09	0,54
64	Río Duqueco En Villucura	-0,54	-0,50	-0,67	-0,62	0,09	0,56
65	Río Mulchén En Mulchén	-0,34	-0,32	-0,46	-0,44	0,13	0,52
66	Río Mininco En Longitudinal	-0,36	-0,33	-0,53	-0,48	0,10	0,50
67	Río Malleco En Collipulli	-0,14	0,16	-0,17	0,20	0,64	0,54
68	Río Caramávida En Caramávida	-0,43	-0,47	-0,67	-0,73	0,06	0,49
69	Río Butamalal En Butamalal	-0,41	-0,34	-0,65	-0,53	0,04	0,48
70	Río Lleu-Lleu En Desague Lago Lleu-Lleu	-0,36	-0,35	-0,80	-0,77	0,04	0,44
71	Río Puren En Tranaman	-0,32	-0,24	-0,57	-0,42	0,16	0,48
72	Río Lumaco En Lumaco	-0,23	-0,15	-0,44	-0,28	0,22	0,41
73	Río Traiguen En Victoria	-0,49	-0,53	-0,74	-0,80	0,03	0,55
74	Río Quino En Longitudinal	-0,29	-0,17	-0,44	-0,25	0,16	0,50
75	Río Quillén En Galvarino	-0,14	-0,08	-0,27	-0,15	0,53	0,43
76	Río Cholchol En Cholchol	-0,24	-0,15	-0,46	-0,29	0,17	0,47
77	Río Cautín En Rari-Ruca	-0,25	-0,14	-0,34	-0,19	0,23	0,48
78	Río Muco En Puente Muco	-0,17	-0,20	-0,28	-0,33	0,50	0,45

Cuenca - Estación		Ajuste lineal		Porcentajes		MK test, $\alpha = 5\%$ (p-value)	Coeficiente de Hurst
		Min ECM (mm/año)	ThielSen (mm/año)	Mínimo ECM (%)	ThielSen (%)		
79	Río Cautín En Cajón	-0,22	-0,16	-0,33	-0,24	0,39	0,45
80	Río Quepe En Vilcún	-0,11	-0,02	-0,16	-0,03	0,53	0,45
81	Río Quepe En Quepe	-0,11	-0,04	-0,19	-0,07	0,56	0,48
82	Río Cautín En Almagro	-0,17	-0,12	-0,28	-0,20	0,67	0,47
83	Río Allipén En Los Laureles	-0,11	-0,06	-0,16	-0,08	0,70	0,52
84	Río Trancura En Curarrehue	0,01	-0,04	0,01	-0,04	0,98	0,57
85	Río Trancura Antes Río Llafenco	0,07	0,16	0,09	0,21	0,78	0,58
86	Río Toltén En Villarica	0,00	0,03	0,00	0,04	0,88	0,55
87	Río Puyehue En Quitratue	-0,30	-0,12	-0,47	-0,19	0,18	0,45
88	Río Dónguila En Gorbea	-0,25	-0,08	-0,39	-0,12	0,38	0,45

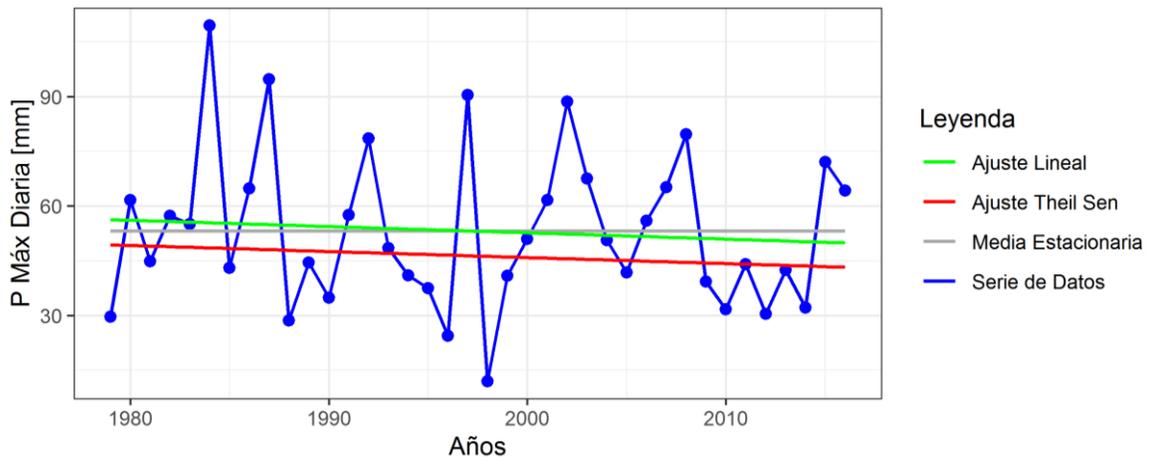


Figura A.2.3: Análisis de tendencias de la serie de precipitaciones diarias máximas estación río Alichahue en Colliguay (cuenca nivo pluvial)

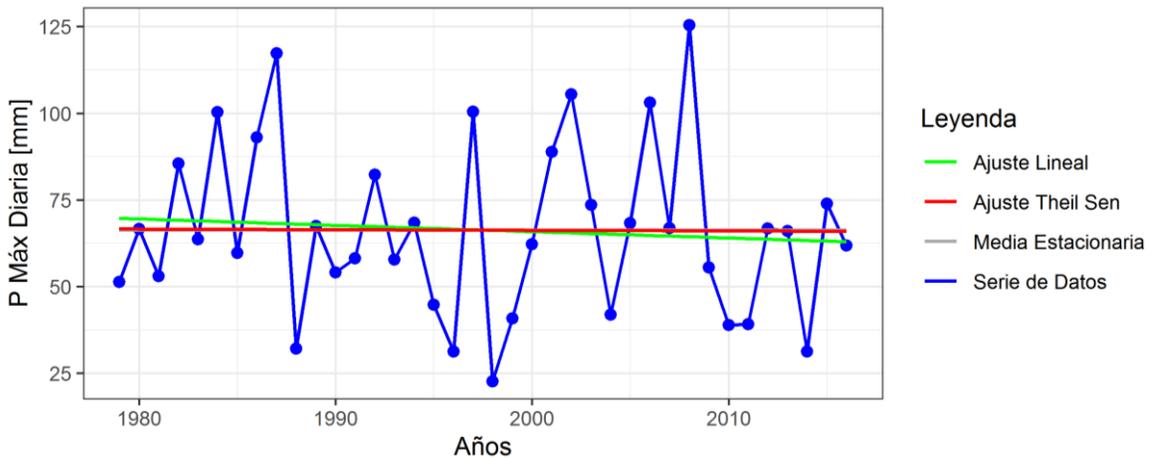


Figura A.2.4: Análisis de tendencias de la serie de precipitaciones diarias máximas estación río Blanco en río Blanco (cuenca nival)

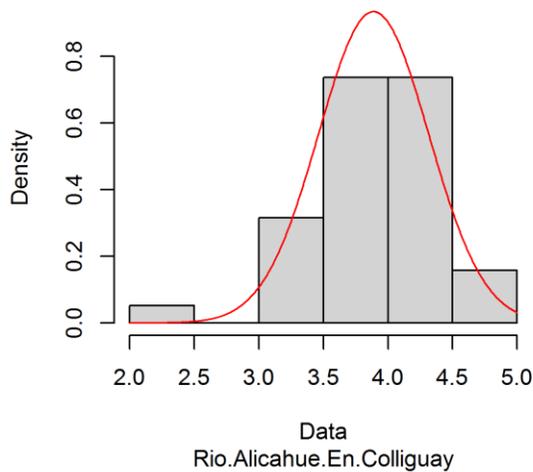
Tabla A.2.3: Ajuste de la distribución Log Normal a las series de precipitaciones diarias máximas anuales (mm)

Cuenca - Estación		Periodos de Retorno (Años)					
		2	5	10	20	50	100
1	Río Jorquera En Vertedero	9,2	22,5	35,8	52,7	81,3	108,5
2	Río Pulido En Vertedero	12,0	29,2	46,4	68,1	105,0	140,0
3	Río Manflas En Vertedero	14,3	32,8	50,5	72,2	107,9	141,0
4	Río Copiapó En Pastillo	10,6	26,0	41,6	61,2	94,7	126,6
5	Río Carmen En Ramadillas	16,6	37,3	57,0	80,9	119,9	155,9
6	Estero Derecho En Alcohuáz	29,4	51,7	69,5	88,7	116,7	140,2
7	Río Cochiguaz En El Peñón	24,5	43,3	58,4	74,7	98,6	118,6
8	Río Claro En Rivadavia	26,3	47,0	63,8	82,1	108,9	131,6
9	Río Hurtado En San Agustín	29,5	50,7	67,2	84,9	110,3	131,4
10	Río Hurtado En Angostura De Pangue	30,4	52,0	68,8	86,8	112,7	134,1
11	Río Grande En Las Ramadas	38,7	61,1	77,5	94,3	117,6	136,3
12	Río Tascadero En Desembocadura	48,5	77,4	98,8	120,9	151,8	176,6
13	Río Grande En Cuyano	42,3	67,6	86,3	105,7	132,7	154,4
14	Río Mostazal En Cuestecita	35,4	56,6	72,4	88,7	111,4	129,8
15	Río Los Molles En Ojos De Agua	30,3	50,3	65,6	81,7	104,5	123,2
16	Río Rapel En Junta	34,2	55,4	71,2	87,7	110,8	129,6
17	Río Grande En Puntilla San Juan	37,5	60,4	77,5	95,2	120,0	140,0
18	Río Cogotí Entrada Embalse Cogotí	40,0	67,2	88,2	110,3	142,0	167,9
19	Río Choapa En Cuncumén	50,7	72,7	87,7	102,5	122,0	137,1
20	Río Choapa En Salamanca	45,5	67,4	82,8	98,1	118,8	134,9
21	Río Illapel En Las Burras	45,2	74,8	97,3	121,0	154,6	182,0
22	Río Sobrante En Piadero	49,8	71,9	87,1	102,0	121,9	137,3
23	Río Alicahue En Colliguay	48,8	70,0	84,4	98,6	117,4	131,9
24	Río Juncal En Juncal	57,4	79,0	93,4	107,2	125,2	138,9
25	Río Blanco En Río Blanco	61,7	85,8	101,9	117,5	137,9	153,5
26	Río Aconcagua En Río Blanco	58,4	80,8	95,7	110,1	128,9	143,2
27	Río Aconcagua En Chacabuquito	56,1	77,8	92,3	106,3	124,5	138,4
28	Río Aconcagua En San Felipe	53,3	74,0	87,9	101,3	118,8	132,2
29	Estero Pocuro En El Sifón	52,1	74,0	88,9	103,4	122,6	137,4
30	Río Volcán En Queltehues	53,5	70,3	81,1	91,2	104,2	113,8
31	Río Olivares Antes Junta Río Colorado	60,6	81,6	95,3	108,4	125,3	137,9
32	Río Colorado Antes Junta Río Maipo	54,7	72,2	83,4	94,0	107,5	117,6
33	Río Angostura En Valdivia De Paine	60,4	84,2	100,2	115,6	135,9	151,3
34	Estero Arrayan En La Montosa	59,1	80,9	95,3	109,2	127,2	140,8
35	Río Mapocho En Los Almendros	58,8	80,4	94,7	108,3	126,1	139,6
36	Estero Puangue En Boquerón	60,9	85,0	101,3	116,9	137,5	153,2
37	Estero Puangue En Ruta 78	49,2	67,6	79,9	91,6	106,9	118,6
38	Río Claro En El Valle	99,3	128,5	147,0	164,3	186,2	202,3
39	Río Tinguiririca Bajo Los BRiones	97,9	122,5	137,7	151,7	169,1	181,8
40	Río Claro En Los Queñes	101,7	126,9	142,4	156,7	174,4	187,4
41	Río Colorado En Junta Con Palos	101,3	123,6	137,1	149,3	164,4	175,3
42	Río Palos En Junta Con Colorado	109,3	137,2	154,5	170,4	190,2	204,7

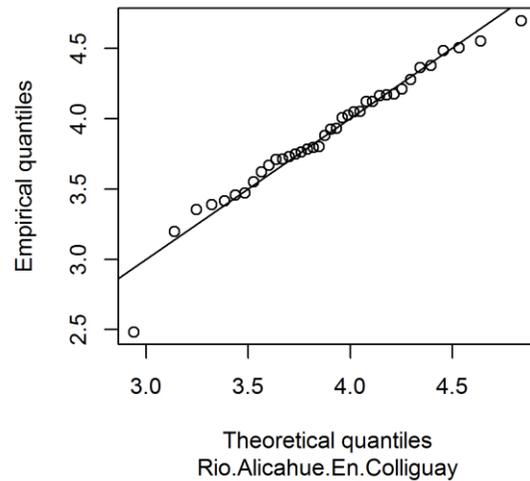
Cuenca - Estación		Periodos de Retorno (Años)					
		2	5	10	20	50	100
43	Estero Upeo En Upeo	90,6	116,5	132,9	148,2	167,4	181,7
44	Río Perquilauquén En San Manuel	100,5	127,5	144,3	159,9	179,5	193,8
45	Estero Curipeumo En Lo Hernández	57,2	74,5	85,5	95,9	109,1	118,8
46	Río Cauquenes En El Arrayan	59,5	82,0	96,9	111,3	130,0	144,2
47	Río Putagán En Yervas Buenas	76,4	97,7	111,0	123,4	139,0	150,5
48	Río Claro En Camarico	87,7	113,4	129,7	144,9	164,1	178,3
49	Río Lircay En Puente Las Rastras	95,5	121,2	137,4	152,3	171,1	184,8
50	Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	110,6	136,5	152,3	166,7	184,6	197,6
51	Río Ñuble En La Punilla	112,0	138,1	154,2	168,8	186,9	200,0
52	Río Chillan En Camino A Confluencia	68,7	85,1	95,3	104,6	116,1	124,5
53	Río Itata En Cholguán	77,7	97,1	109,1	120,1	133,8	143,8
54	Río Itata En General Cruz	71,0	89,5	101,1	111,7	125,0	134,8
55	Río Itata En Trilaleo	75,7	95,0	106,9	117,9	131,6	141,6
56	Río Renegado En Invernada	95,5	116,5	129,3	140,9	155,2	165,6
57	Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	100,6	123,6	137,7	150,4	166,3	177,7
58	Río Diguillín En Longitudinal	77,3	96,1	107,8	118,4	131,7	141,3
59	Río Itata En Balsa Nueva Aldea	67,0	84,5	95,4	105,5	118,1	127,3
60	Río Andalién Camino A Penco	56,5	74,1	85,4	96,0	109,5	119,6
61	Río Biobío En Rucalhue	72,8	86,0	93,9	100,9	109,5	115,6
62	Río Lirquén En Cerro El Padre	80,1	100,3	112,8	124,2	138,6	149,0
63	Río Duqueco En Cerrillos	71,3	88,3	98,7	108,2	120,0	128,6
64	Río Duqueco En Villucura	78,1	96,1	107,1	117,1	129,4	138,4
65	Río Mulchén En Mulchén	71,3	88,0	98,3	107,7	119,3	127,7
66	Río Mininco En Longitudinal	66,8	81,8	90,9	99,1	109,4	116,7
67	Río Malleco En Collipulli	77,1	92,5	101,8	110,2	120,5	127,8
68	Río Caramávida En Caramávida	62,0	78,8	89,3	99,1	111,4	120,4
69	Río Butamalal En Butamalal	61,9	78,1	88,1	97,4	109,0	117,5
70	Río Lleu-Lleu En Desague Lago Lleu-Lleu	43,7	56,0	63,7	71,0	80,1	86,8
71	Río Puren En Tranaman	55,1	69,0	77,6	85,5	95,4	102,6
72	Río Lumaco En Lumaco	50,4	63,4	71,4	78,8	88,1	94,9
73	Río Traiguen En Victoria	64,1	78,7	87,7	95,8	105,9	113,2
74	Río Quino En Longitudinal	64,5	77,9	85,9	93,2	102,1	108,5
75	Río Quillén En Galvarino	50,6	62,0	69,0	75,4	83,2	88,9
76	Río Cholchol En Cholchol	49,2	61,2	68,6	75,4	83,9	90,0
77	Río Cautín En Rari-Ruca	73,6	85,8	93,0	99,4	107,2	112,6
78	Río Muco En Puente Muco	59,8	71,3	78,1	84,2	91,6	97,0
79	Río Cautín En Cajón	64,5	76,0	82,7	88,8	96,1	101,3
80	Río Quepe En Vilcún	65,8	77,6	84,5	90,8	98,4	103,8
81	Río Quepe En Quepe	58,3	70,2	77,4	83,9	91,9	97,6
82	Río Cautín En Almagro	58,5	69,9	76,8	83,0	90,5	95,9
83	Río Allipén En Los Laureles	68,5	80,9	88,3	94,8	102,8	108,5
84	Río Trancura En Curarrehue	79,2	96,7	107,4	117,0	129,0	137,6
85	Río Trancura Antes Río Llafenco	75,2	90,9	100,4	109,0	119,5	127,1
86	Río Toltén En Villarica	73,7	89,3	98,8	107,3	117,8	125,4

Cuenca - Estación		Periodos de Retorno (Años)					
		2	5	10	20	50	100
87	Río Puyehue En Quitratue	62,1	78,8	89,2	98,9	111,0	119,9
88	Río Dónquil En Gorbea	61,8	77,9	87,9	97,2	108,7	117,2

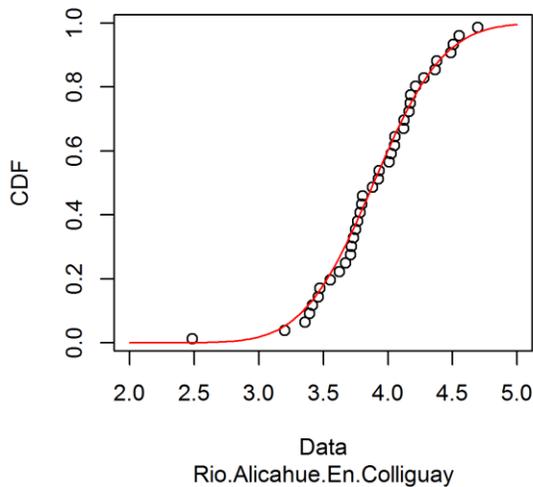
Empirical and theoretical dens.



Q-Q plot



Empirical and theoretical CDFs



P-P plot

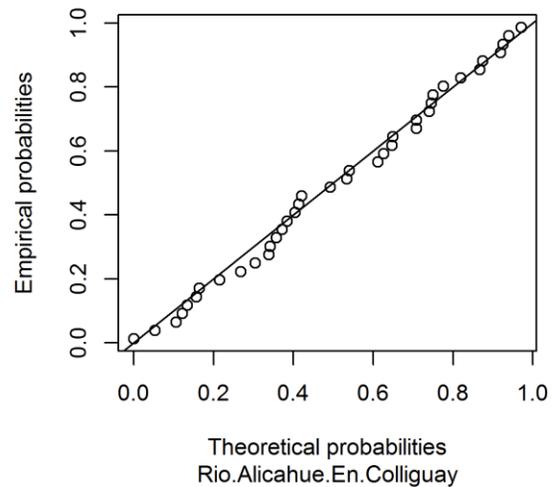


Figura A.2.5: Ajuste a la distribución Log Normal serie de precipitaciones diarias máximas estación río Alicahue en Colliguay (cuenca nivo pluvial)

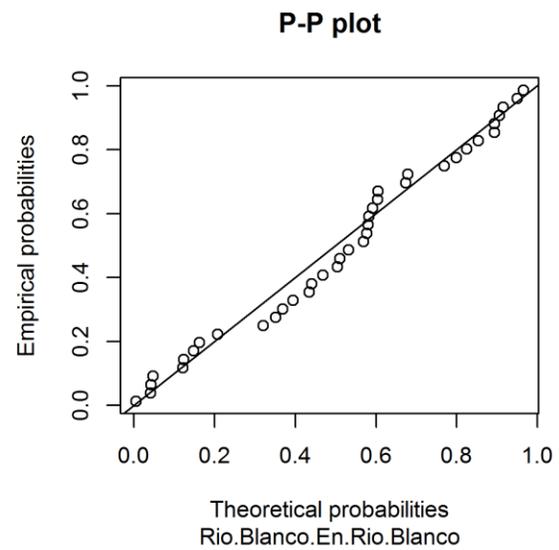
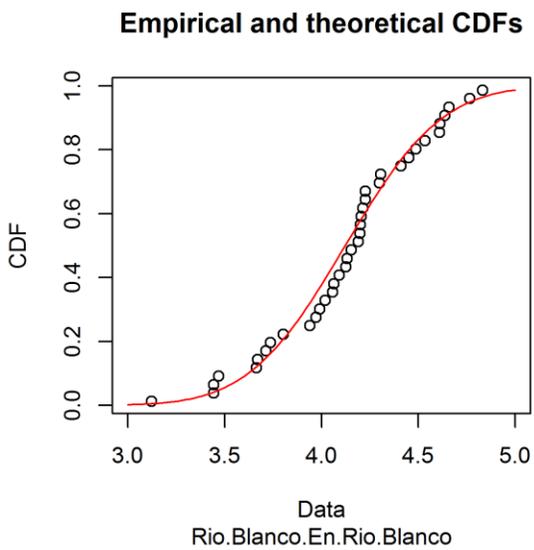
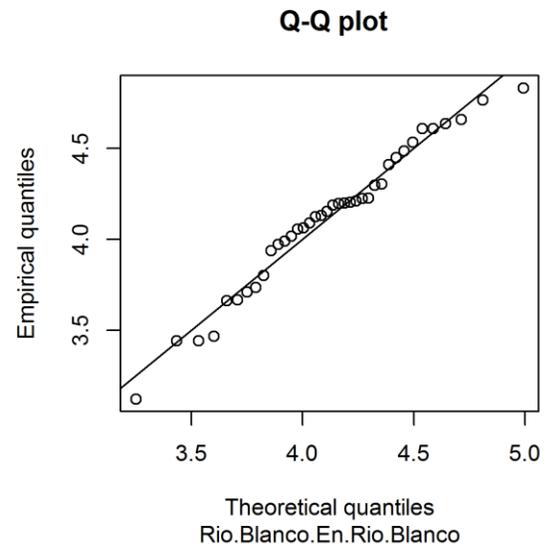
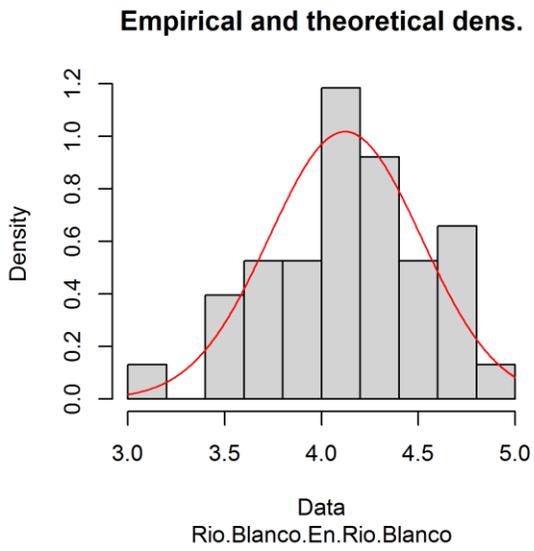


Figura A.2.6: Ajuste a la distribución Log Normal serie de precipitaciones diarias máximas estación río Blanco en río Blanco (cuena nival)

ANEXO B: ANÁLISIS EXPLORATORIO DE VARIABLES EXPLICATIVAS

Anexo B.1: Gráficos de Dispersión y Coeficientes de Correlación

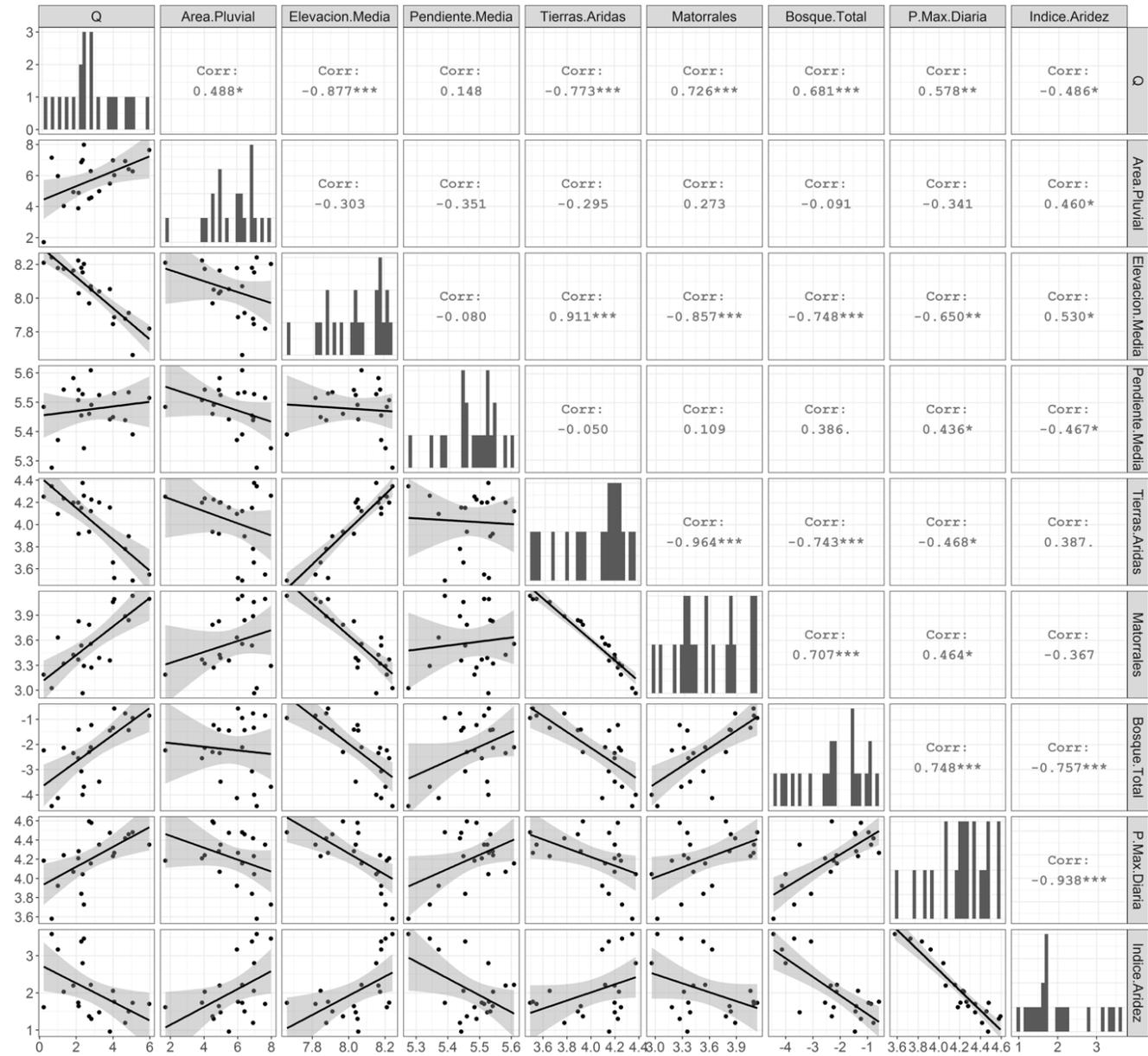


Figura B.1.1: Análisis exploratorio Q₁₀ (escala logarítmica), para la Región 1 según zonas del método DGA-AC
 *p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

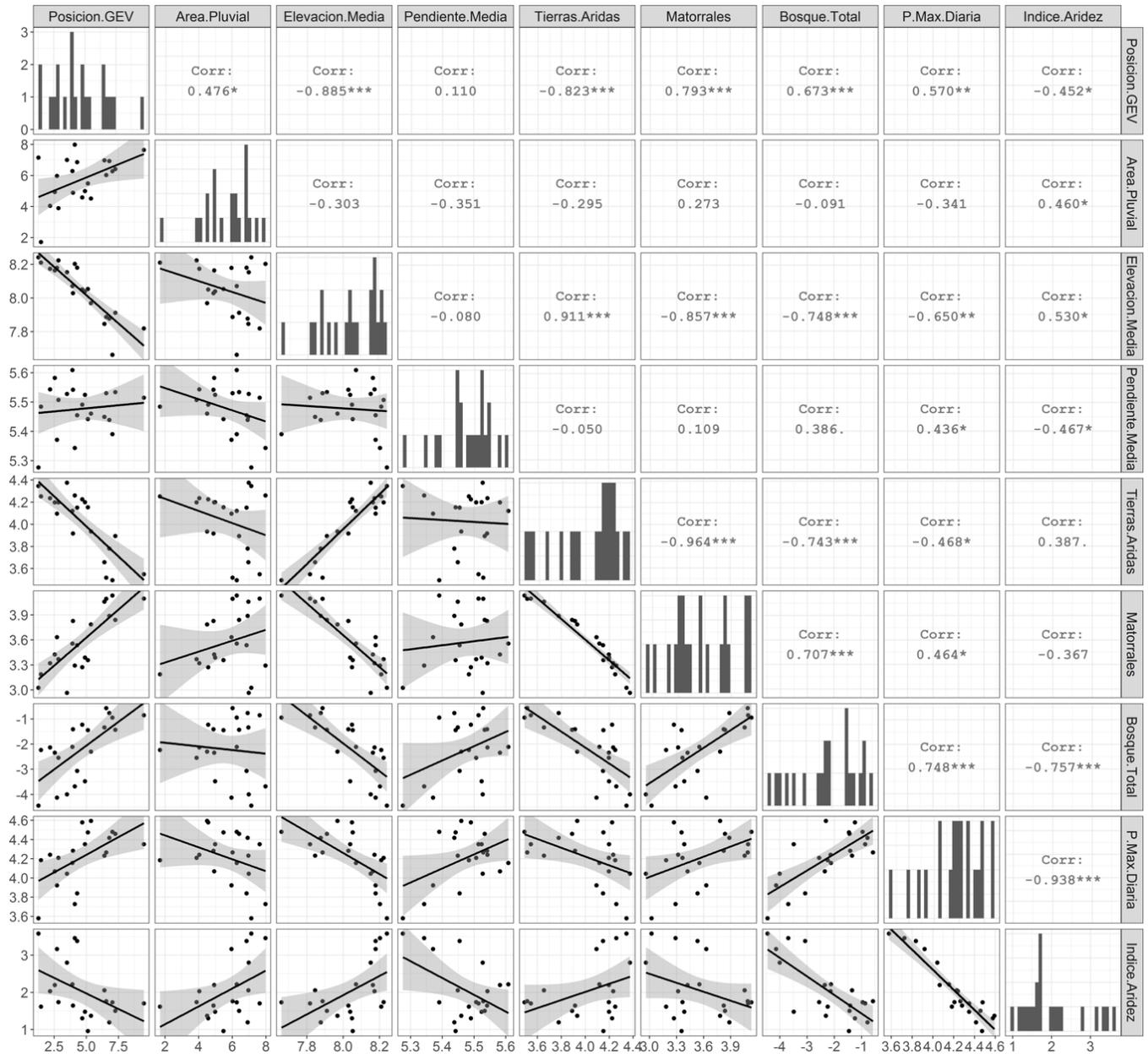


Figura B.1.2: Análisis exploratorio Parámetro de Posición μ de la GEV (escala logarítmica), para la Región 1 según zonas del método DGA-AC
 *p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

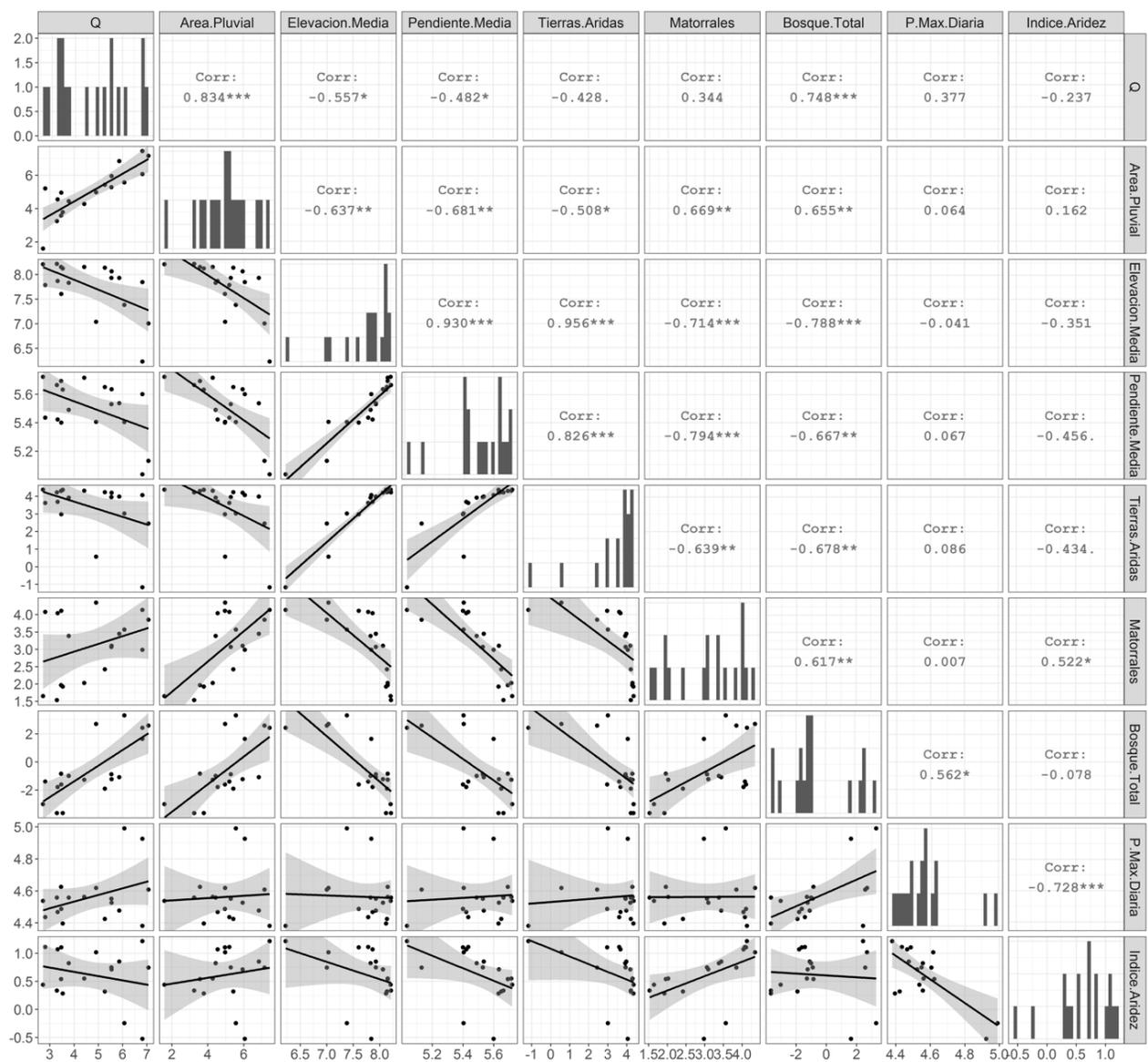


Figura B.1.3: Análisis exploratorio Q_{10} (escala logarítmica), para la Región 2 según zonas del método DGA-AC
 *p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

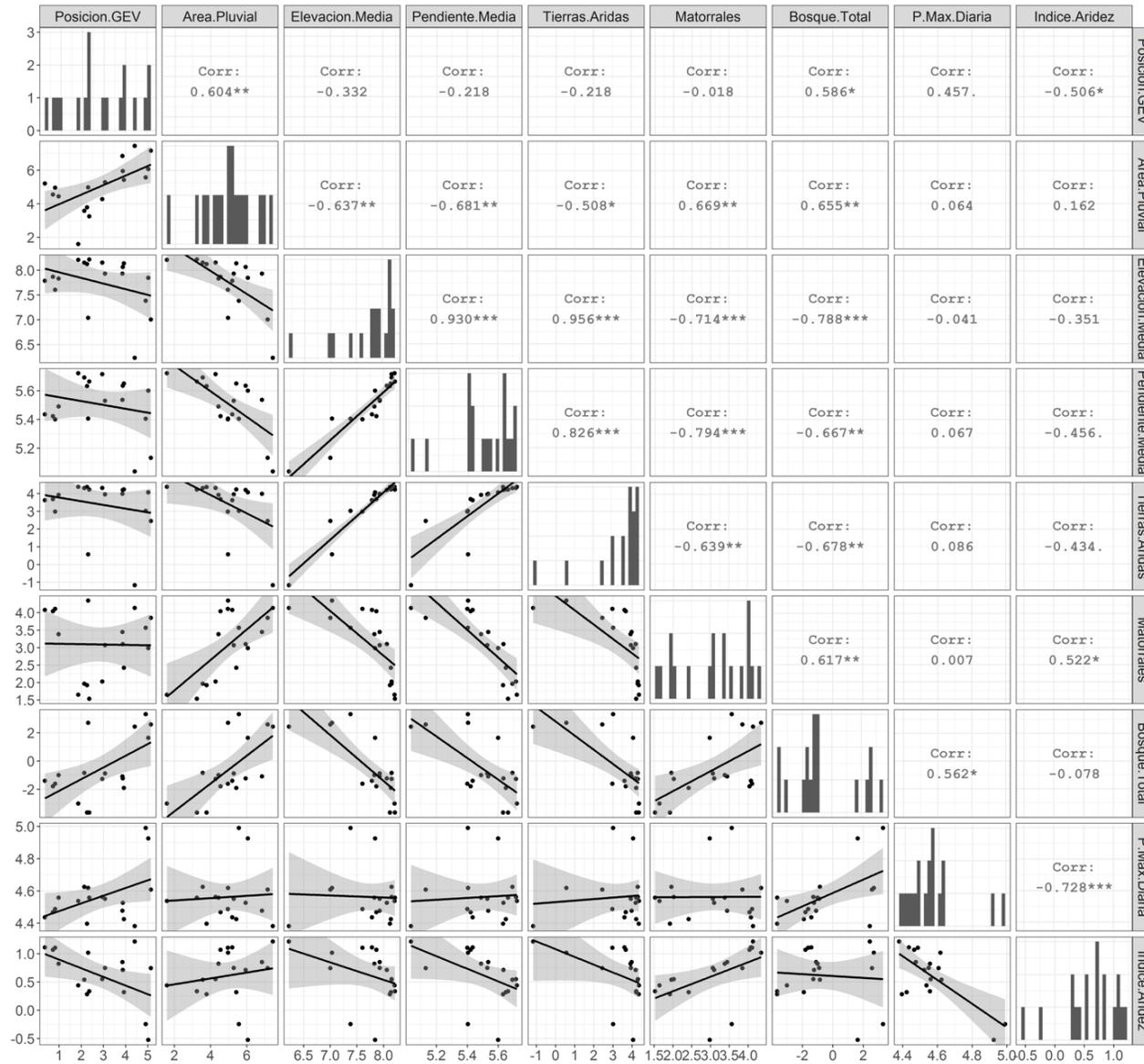


Figura B.1.4: Análisis exploratorio Parámetro de Posición μ de la GEV (escala logarítmica), para la Región 2 según zonas del método DGA-AC

*p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

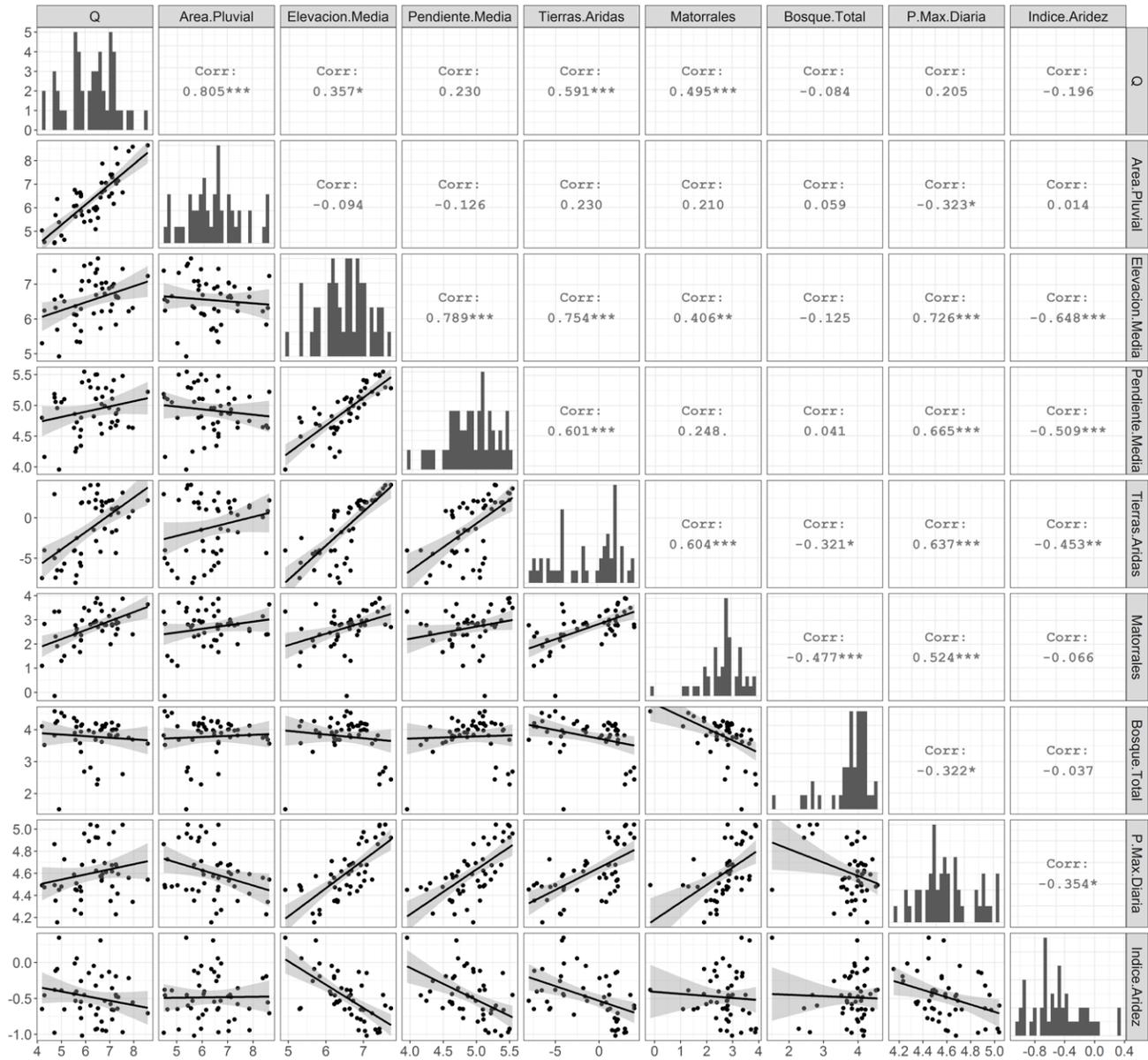


Figura B.1.5: Análisis exploratorio Q₁₀ (escala logarítmica), para la Región 3 según zonas del método DGA-AC.
 *p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

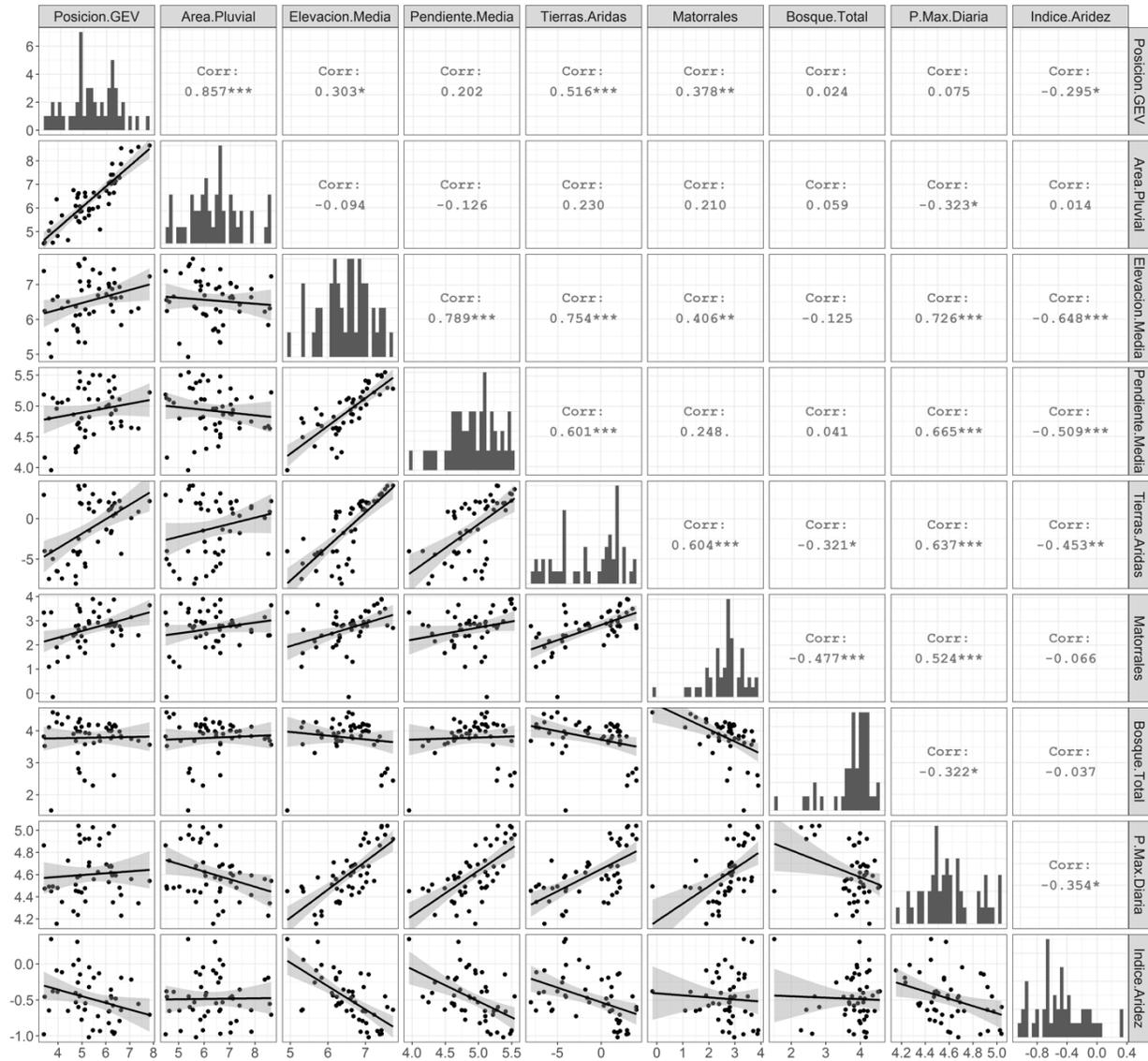


Figura B.1.6: Análisis exploratorio Parámetro de Posición μ de la GEV (escala logarítmica), para la Región 3 según zonas del método DGA-AC.

*p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

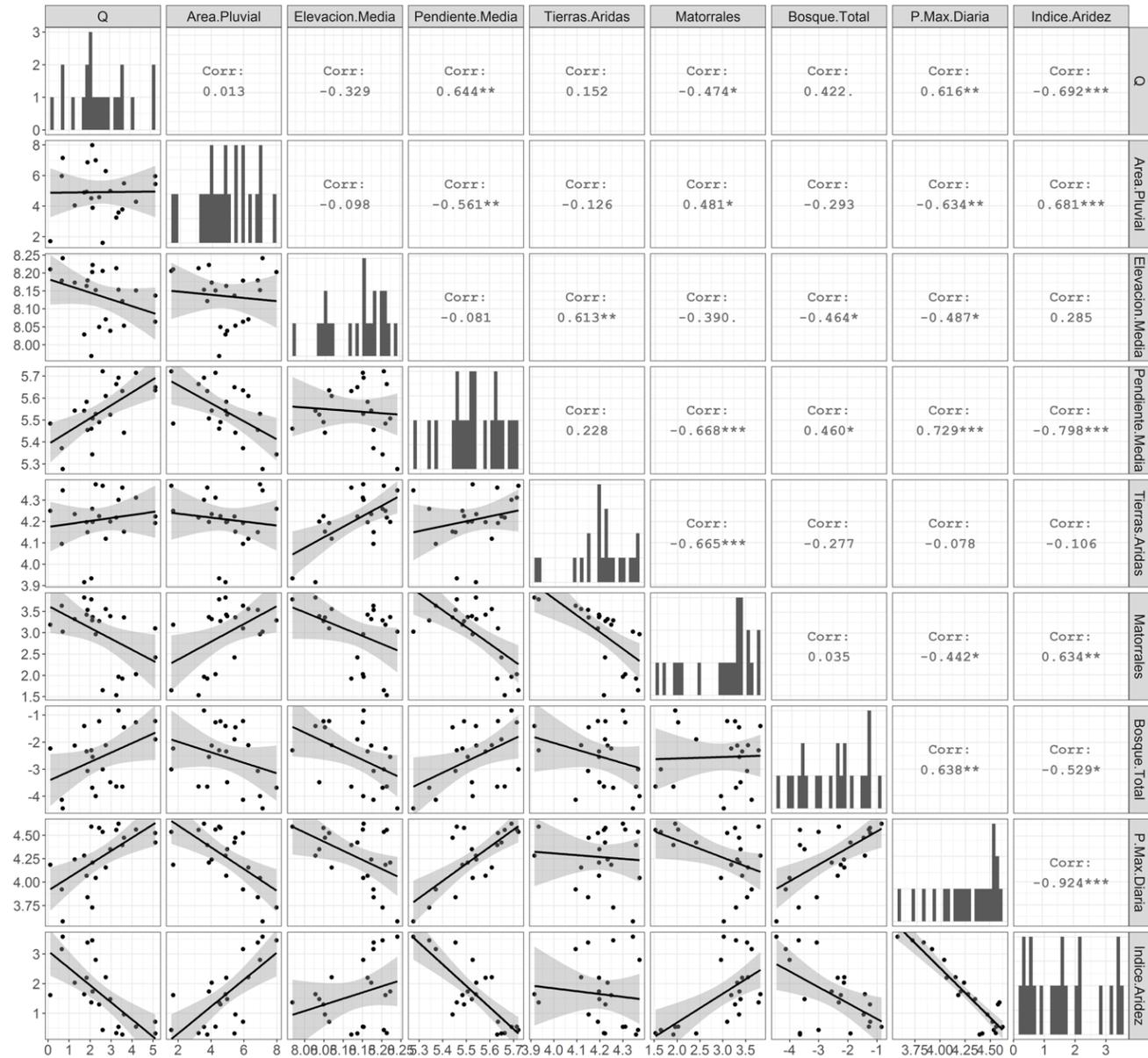


Figura B.1.7: Análisis exploratorio Q_{10} (escala logarítmica), para la Región 1 según zonas definidas mediante agrupación
 *p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

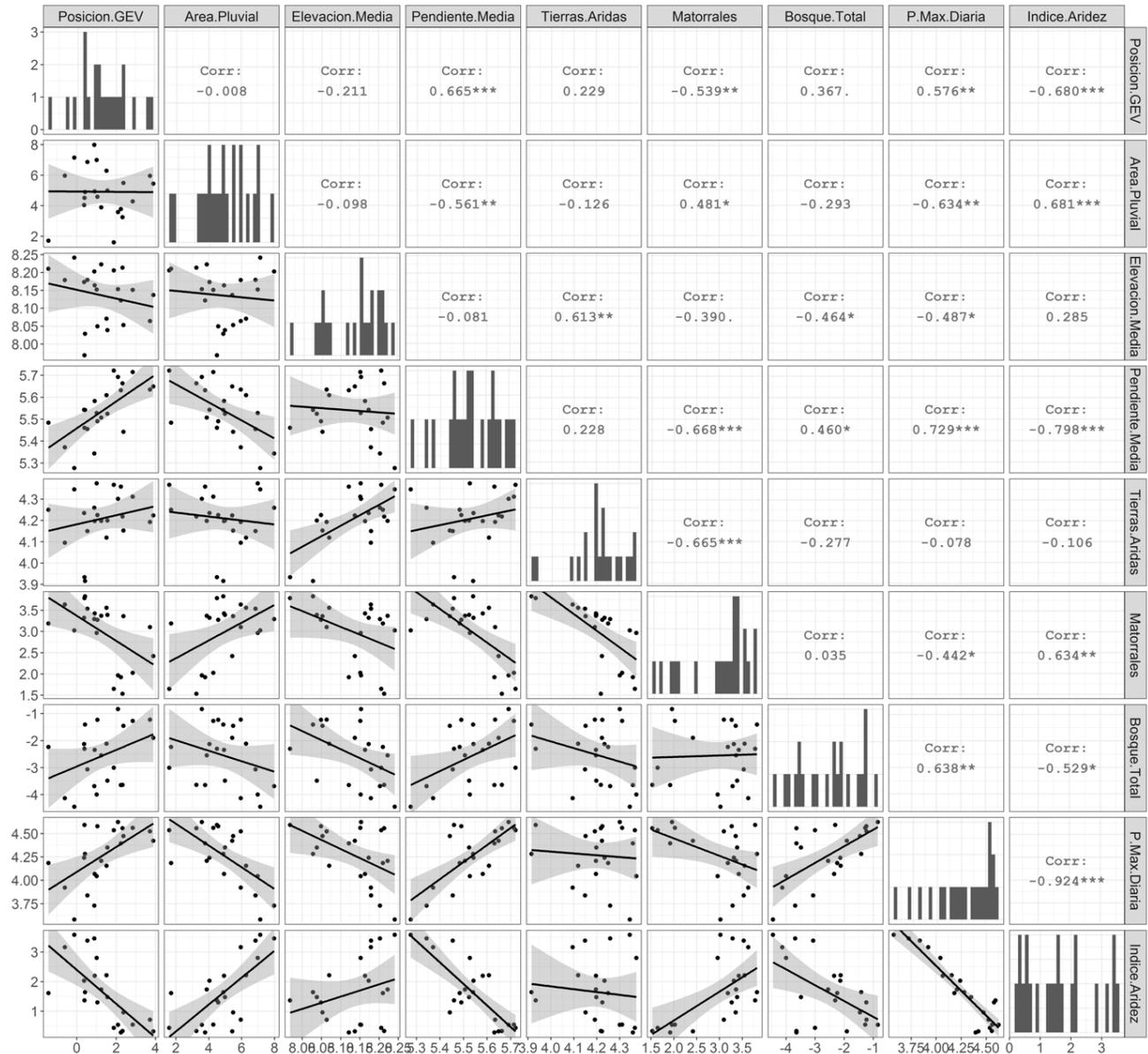


Figura B.1.8: Análisis exploratorio Parámetro de Posición μ de la GEV (escala logarítmica), para la Región 1 según zonas definidas mediante agrupación

***p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001**

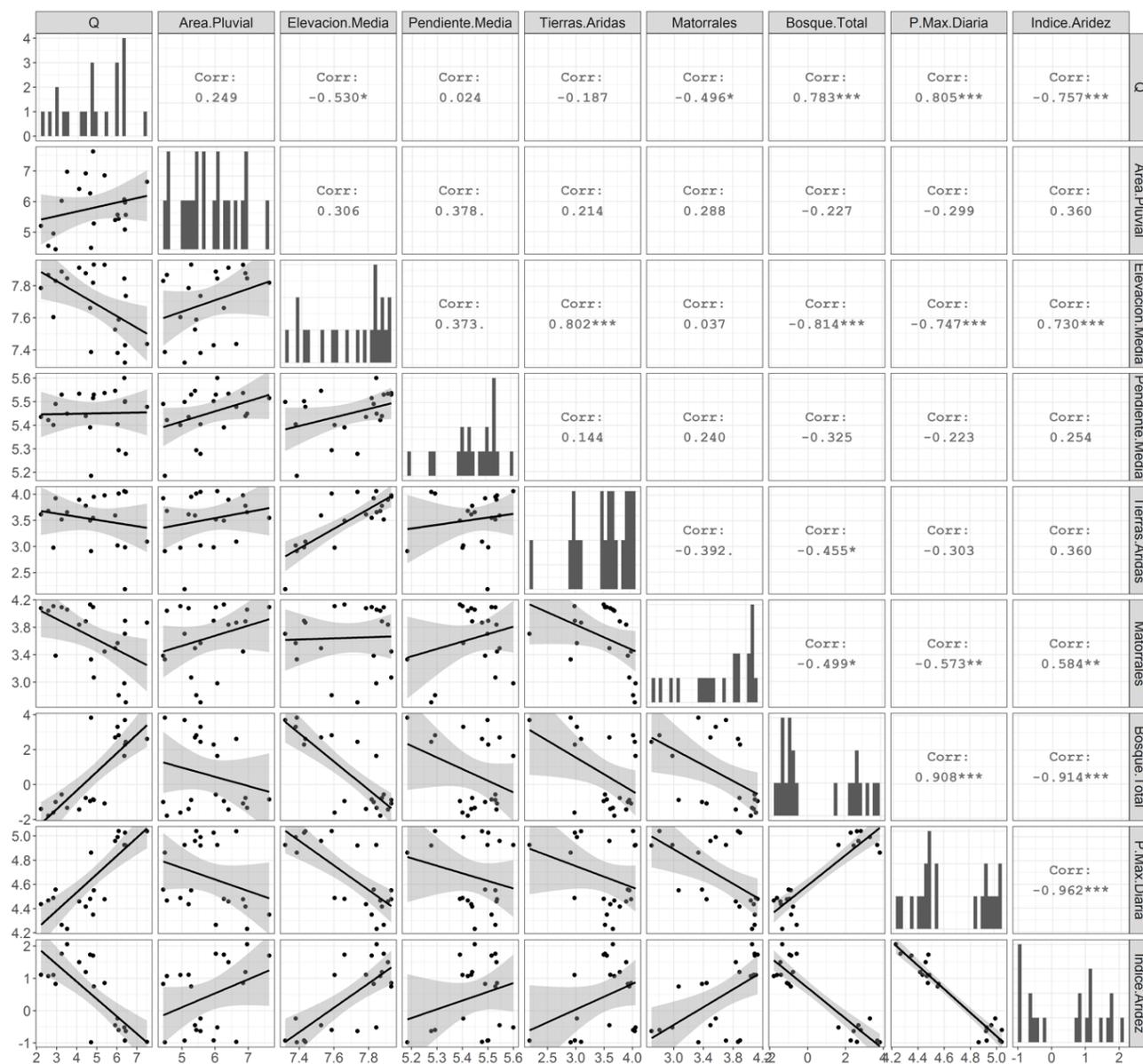


Figura B.1.9: Análisis exploratorio Q_{10} (escala logarítmica), para la Región 2 según zonas definidas mediante agrupación
 *p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

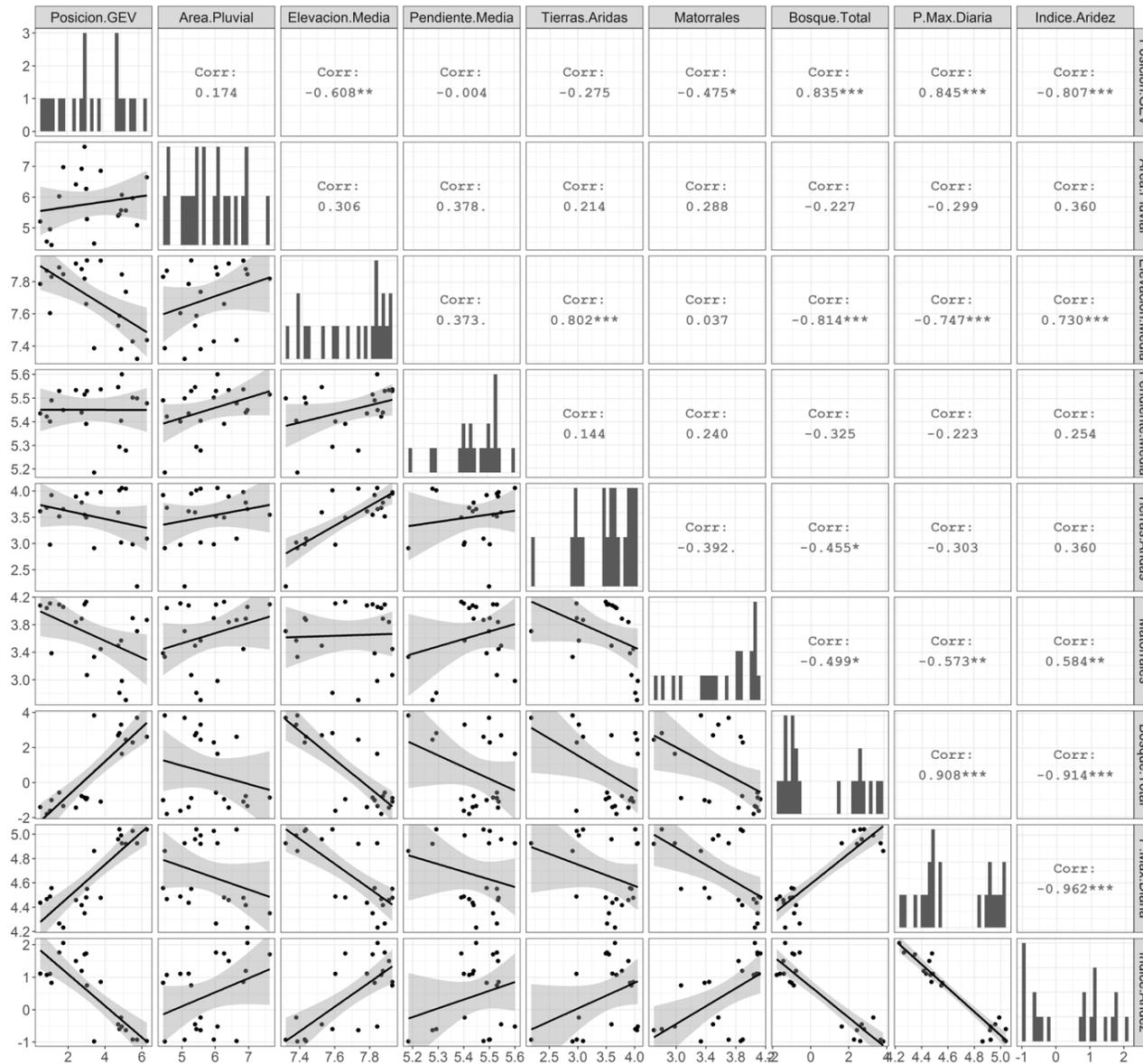


Figura B.1.10: Análisis exploratorio Parámetro de Posición μ de la GEV (escala logarítmica), para la Región 2 según zonas definidas mediante agrupación.

*p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

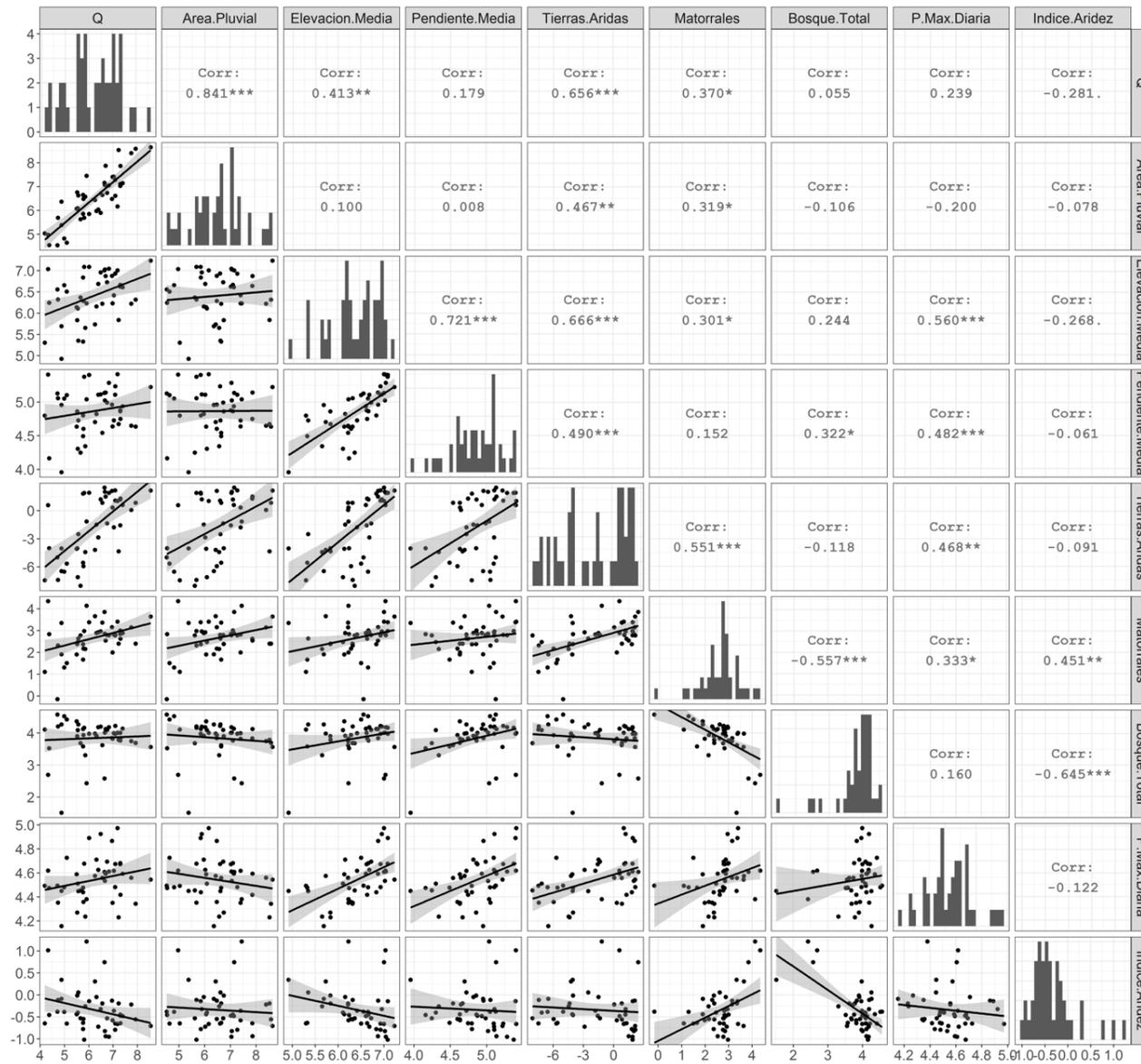


Figura B.1.11: Análisis exploratorio Q_{10} (escala logarítmica), para la Región 3 según zonas definidas mediante agrupación
 *p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

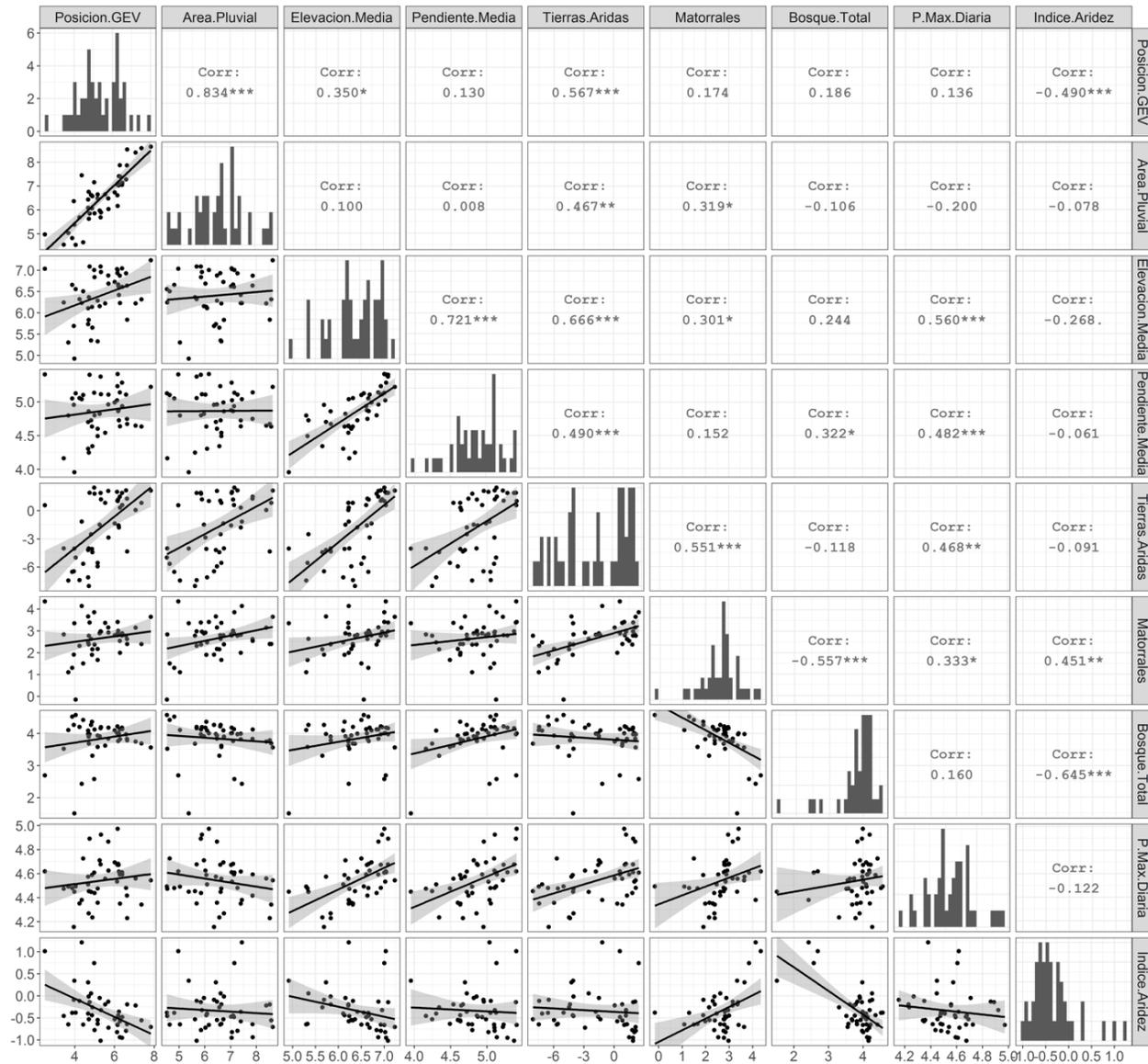


Figura B.1.12: Análisis exploratorio Parámetro de Posición μ de la GEV (escala logarítmica), para la Región 3 según zonas definidas mediante agrupación

*p-value < 0,05, **p-value < 0,01, ***p-value < 0,001

ANEXO C: MODELOS DE REGIONALIZACIÓN

Anexo C.1: Selección de variables explicativas según número de predictores

Tabla C.1.1: Q_{10} según número de predictores, para la Región 1 según zonas del método DGA-AC

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	X	✓	X	X	X	X	X	X
2	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	X
3	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	✓
4	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	✓
5	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓
6	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla C.1.2: Parámetro de Posición μ de la GEV, según número de predictores, para la Región 1 según zonas del método DGA-AC

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	X	✓	X	X	X	X	X	X
2	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	X
3	✓	✓	✓	X	X	X	X	✓	X
4	✓	✓	✓	X	✓	X	X	✓	X
5	✓	✓	✓	X	✓	X	X	✓	✓
6	✓	✓	✓	X	✓	X	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla C.1.3: Q_{10} , según número de predictores, para la Región 2 según zonas del método DGA-AC

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	✓	X	X	X	X	X	X	X
2	✓	✓	X	X	X	X	X	X	✓
3	✓	✓	X	X	X	X	✓	X	✓
4	✓	✓	X	X	X	✓	✓	X	✓
5	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	X	✓
6	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla C.1.4: Parámetro de Posición μ de la GEV, según número de predictores, para la Región 2 según zonas del método DGA-AC

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	✓	X	X	X	X	X	X	X
2	✓	✓	X	X	X	X	✓	X	X
3	✓	✓	X	✓	X	X	✓	X	X
4	✓	✓	X	✓	X	X	✓	✓	X
5	✓	✓	X	✓	X	✓	✓	✓	X
6	✓	✓	X	✓	X	✓	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla C.1.5: Q_{10} , según número de predictores, para la Región 3 según zonas del método DGA-AC.

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	✓	X	X	X	X	X	X	X
2	✓	✓	X	X	X	X	X	✓	X
3	✓	✓	✓	X	X	X	X	✓	X
4	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X
5	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla C.1.6: Parámetro de Posición μ de la GEV, según número de predictores, para la Región 3 según zonas del método DGA-AC.

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	✓	X	X	X	X	X	X	X
2	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	X
3	✓	✓	✓	X	X	X	X	✓	X
4	✓	✓	✓	X	X	X	X	✓	✓
5	✓	✓	✓	X	X	X	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla C.1.7: Q_{10} , según número de predictores, para la Región 1 según zonas del método de agrupación.

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	X	X	X	X	X	X	X	✓
2	✓	✓	X	X	X	X	X	X	✓
3	✓	✓	X	✓	X	X	X	X	✓
4	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	✓
5	✓	✓	✓	✓	X	✓	X	X	✓
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla C.1.8: Parámetro de Posición μ de la GEV, según número de predictores, para la Región 1 según zonas del método de agrupación.

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	X	X	X	X	X	X	X	✓
2	✓	✓	X	X	X	X	X	X	✓
3	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	✓
4	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	✓
5	✓	✓	✓	✓	X	✓	X	X	✓
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla C.1.9: Q_{10} , según número de predictores, para la Región 2 según zonas del método de agrupación.

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	X	X	X	X	X	X	✓	X
2	✓	✓	X	X	X	X	X	✓	X
3	✓	✓	X	X	X	✓	X	✓	X
4	✓	✓	X	X	✓	✓	X	✓	X
5	✓	✓	X	✓	✓	✓	X	✓	X
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	X
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla C.1.10: Parámetro de Posición μ de la GEV, según número de predictores, para la Región 2 según zonas del método de agrupación.

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	X	X	X	X	X	X	✓	X
2	✓	✓	X	X	X	X	X	✓	X
3	✓	✓	X	X	X	X	✓	✓	X
4	✓	✓	X	✓	X	X	✓	✓	X
5	✓	✓	X	✓	X	✓	✓	✓	X
6	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	X
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla C.1.11: Q_{10} , según número de predictores, para la Región 3 según zonas del método de agrupación.

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	✓	X	X	X	X	X	X	X
2	✓	✓	X	X	X	X	X	✓	X
3	✓	✓	X	X	X	X	X	✓	✓
4	✓	✓	✓	X	X	X	X	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓	X	✓	X	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla C.1.12: Parámetro de Posición μ de la GEV, según número de predictores, para la Región 3 según zonas del método de agrupación.

Modelo de regresión [número de predictores]	Const.	Área	Elevación Media	Pend. Media	Tierras Áridas	Matorrales	Bosque Total	P. Max Diaria	Índice Aridez
		[km ²]	[msnm]	[m/km]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[-]
1	✓	✓	X	X	X	X	X	X	X
2	✓	✓	X	X	X	X	X	X	✓
3	✓	✓	X	X	X	X	X	✓	✓
4	✓	✓	X	✓	✓	X	X	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓	X	✓	X	✓	✓
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Anexo C.2: Evaluación Modelos de Regionalización

Tabla C.2.1: Mejores modelos de regionalización, según número de predictores, para la región definida por dominio completo

Modelo de regresión	Parámetros de evaluación del modelo	Modelo de regresión (número de predictores)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Parámetros de la GEV									
Parámetro de ubicación μ	CV_k	1,32	1,16	0,36	0,36	0,36	0,34	0,35	0,35
	$R^2_{ajust.}$	0,73	0,80	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,93
	BIC	-106	-128	-217	-217	-218	-216	-213	-208
Parámetro de escala σ	CV_k	1,27	0,99	0,43	0,31	0,33	0,34	0,33	0,32
	$R^2_{ajust.}$	0,70	0,77	0,90	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
	BIC	-98	-120	-190	-217	-214	-211	-208	-204
Parámetro de forma ε	CV_k	0,78	0,66	0,63	0,60	0,60	0,60	0,59	0,60
	$R^2_{ajust.}$	0,30	0,42	0,43	0,44	0,44	0,44	0,43	0,43
	BIC	-23	-37	-34	-33	-30	-26	-22	-17
Cuantiles de crecidas									
Q T= 2 Años	CV_k	1,28	0,99	0,34	0,32	0,30	0,30	0,31	0,31
	$R^2_{ajust.}$	0,72	0,80	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
	BIC	-105	-128	-217	-223	-224	-223	-219	-215
Q T= 5 Años	CV_k	1,24	0,93	0,45	0,26	0,26	0,28	0,26	0,27
	$R^2_{ajust.}$	0,69	0,78	0,92	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
	BIC	-94	-120	-203	-229	-227	-223	-219	-215
Q T= 10 Años	CV_k	1,30	0,96	0,42	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33
	$R^2_{ajust.}$	0,64	0,74	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
	BIC	-81	-107	-179	-204	-201	-197	-193	-188
Q T= 20 Años	CV_k	1,43	1,07	0,70	0,45	0,46	0,46	0,45	0,46
	$R^2_{ajust.}$	0,56	0,69	0,83	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88
	BIC	-65	-90	-141	-164	-162	-159	-156	-151
Q T= 50 Años	CV_k	1,99	1,23	1,14	0,77	0,73	0,75	0,72	0,73
	$R^2_{ajust.}$	0,44	0,58	0,70	0,77	0,78	0,78	0,79	0,79
	BIC	-43	-65	-92	-110	-114	-110	-108	-104
Q T= 100 Años	CV_k	2,46	1,72	1,39	1,07	1,01	0,97	0,99	1,00
	$R^2_{ajust.}$	0,34	0,49	0,58	0,66	0,70	0,70	0,71	0,70
	BIC	-28	-47	-62	-76	-84	-80	-79	-75

Tabla C.2.2: Mejores modelos de regionalización, según número de predictores, para la Región 1 según zonas del método DGA-AC – selección libre

Modelo de regresión	Parámetros de evaluación del modelo	Modelo de regresión (número de predictores)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Parámetros de la GEV									
Parámetro de ubicación μ	CV_k	1,27	1,04	0,95	0,95	1,00	1,06	1,23	1,23
	$R^2_{ajust.}$	0,77	0,81	0,87	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87
	BIC	-26	-28	-33	-38	-35	-32	-29	-27
Parámetro de escala σ	CV_k	0,50	0,58	0,28	0,36	0,48	0,50	0,51	0,58
	$R^2_{ajust.}$	0,71	0,74	0,88	0,88	0,88	0,88	0,87	0,86
	BIC	-21	-21	-35	-34	-32	-30	-27	-24
Parámetro de forma ε	CV_k	0,23	0,30	0,27	0,26	0,33	0,37	0,40	0,41
	$R^2_{ajust.}$	0,49	0,49	0,57	0,57	0,56	0,55	0,52	0,49
	BIC	-9	-7	-9	-7	-5	-3	0	3
Cuantiles de crecidas									
Q T= 2 Años	CV_k	0,59	0,72	0,47	0,57	0,83	0,84	0,87	0,89
	$R^2_{ajust.}$	0,72	0,80	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
	BIC	-105	-128	-217	-223	-224	-223	-219	-215
Q T= 5 Años	CV_k	0,55	0,64	0,25	0,31	0,44	0,45	0,50	0,56
	$R^2_{ajust.}$	0,71	0,76	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87
	BIC	-21	-23	-39	-38	-35	-32	-29	-26
Q T= 10 Años	CV_k	0,61	0,63	0,25	0,27	0,36	0,42	0,44	0,53
	$R^2_{ajust.}$	0,76	0,80	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,89
	BIC	-25	-27	-42	-41	-39	-36	-34	-31
Q T= 20 Años	CV_k	0,73	0,73	0,32	0,38	0,41	0,48	0,53	0,61
	$R^2_{ajust.}$	0,78	0,82	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90
	BIC	-26	-29	-41	-40	-38	-37	-35	-32
Q T= 50 Años	CV_k	0,99	0,80	0,53	0,60	0,62	0,67	0,78	0,89
	$R^2_{ajust.}$	0,78	0,82	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90	0,89
	BIC	-27	-29	-37	-36	-36	-35	-33	-30
Q T= 100 Años	CV_k	1,27	1,04	1,07	1,00	1,06	0,87	1,07	1,24
	$R^2_{ajust.}$	0,77	0,81	0,86	0,88	0,89	0,89	0,89	0,88
	BIC	-26	-28	-33	-33	-34	-33	-31	-28

Tabla C.2.3: Mejores modelos de regionalización, según número de predictores, para la Región 2 según zonas del método DGA-AC

Modelo de regresión	Parámetros de evaluación del modelo	Modelo de regresión (número de predictores)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Parámetros de la GEV									
Parámetro de ubicación μ	CV_k	3,11	1,58	0,79	0,41	0,57	0,72	0,77	0,82
	$R^2_{ajust.}$	0,32	0,71	0,77	0,88	0,88	0,87	0,85	0,84
	BIC	-2	-16	-19	-29	-27	-24	-21	-18
Parámetro de escala σ	CV_k	1,52	1,05	0,57	0,47	0,47	0,65	0,71	0,73
	$R^2_{ajust.}$	0,53	0,79	0,82	0,92	0,92	0,91	0,90	0,89
	BIC	-9	-22	-23	-37	-34	-31	-29	-26
Parámetro de forma ε	CV_k	2,41	2,32	2,91	3,68	3,28	5,43	5,76	6,09
	$R^2_{ajust.}$	0,28	0,29	0,26	0,34	0,40	0,51	0,60	0,56
	BIC	-1	0	3	2	2	0	-3	0
Cuantiles de crecidas									
Q T= 2 Años	CV_k	2,02	1,57	0,68	0,49	0,53	0,65	0,72	0,76
	$R^2_{ajust.}$	0,38	0,72	0,78	0,89	0,89	0,88	0,86	0,85
	BIC	-4	-17	-19	-30	-28	-25	-22	-20
Q T= 5 Años	CV_k	1,34	0,85	0,60	0,69	0,60	0,47	0,52	0,56
	$R^2_{ajust.}$	0,57	0,79	0,81	0,86	0,90	0,89	0,88	0,87
	BIC	-10	-22	-22	-26	-31	-28	-25	-22
Q T= 10 Años	CV_k	0,80	0,48	0,55	0,57	0,55	0,44	0,44	0,48
	$R^2_{ajust.}$	0,68	0,82	0,84	0,90	0,90	0,89	0,88	0,86
	BIC	-16	-24	-25	-32	-30	-27	-24	-21
Q T= 20 Años	CV_k	0,61	0,57	0,38	0,37	0,37	0,42	0,48	0,51
	$R^2_{ajust.}$	0,76	0,83	0,86	0,89	0,88	0,87	0,85	0,84
	BIC	-21	-25	-28	-29	-27	-24	-21	-18
Q T= 50 Años	CV_k	0,54	0,50	0,56	0,55	0,63	0,68	0,70	0,76
	$R^2_{ajust.}$	0,80	0,85	0,86	0,85	0,84	0,83	0,81	0,79
	BIC	-25	-28	-27	-24	-22	-19	-16	-14
Q T= 100 Años	CV_k	0,60	0,59	0,70	0,83	0,97	1,09	1,06	1,14
	$R^2_{ajust.}$	0,80	0,84	0,83	0,82	0,81	0,79	0,77	0,75
	BIC	-24	-26	-24	-21	-18	-16	-13	-10

Tabla C.2.4: Mejores modelos de regionalización, según número de predictores, para la Región 3 según zonas del método DGA-AC.

Modelo de regresión	Parámetros de evaluación del modelo	Modelo de regresión (número de predictores)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Parámetros de la GEV									
Parámetro de ubicación μ	CV_k	0,31	0,16	0,14	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15
	$R^2_{ajust.}$	0,73	0,88	0,89	0,90	0,91	0,90	0,90	0,90
	BIC	-57	-94	-97	-99	-97	-94	-91	-87
Parámetro de escala σ	CV_k	0,38	0,13	0,12	0,12	0,14	0,14	0,15	0,15
	$R^2_{ajust.}$	0,63	0,88	0,89	0,90	0,89	0,89	0,89	0,89
	BIC	-42	-96	-96	-95	-92	-89	-85	-82
Parámetro de forma ε	CV_k	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04
	$R^2_{ajust.}$	0,12	0,36	0,38	0,38	0,38	0,40	0,39	0,37
	BIC	1	-12	-11	-9	-6	-4	0	3
Cuantiles de crecidas									
Q T= 2 Años	CV_k	0,31	0,12	0,13	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14
	$R^2_{ajust.}$	0,72	0,90	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
	BIC	-56	-105	-105	-104	-100	-97	-93	-89
Q T= 5 Años	CV_k	0,34	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13
	$R^2_{ajust.}$	0,68	0,90	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90
	BIC	-49	-102	-103	-101	-98	-94	-90	-87
Q T= 10 Años	CV_k	0,38	0,13	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14
	$R^2_{ajust.}$	0,64	0,88	0,89	0,90	0,90	0,89	0,89	0,89
	BIC	-43	-96	-97	-96	-93	-89	-86	-82
Q T= 20 Años	CV_k	0,43	0,15	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16
	$R^2_{ajust.}$	0,60	0,86	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88	0,87
	BIC	-38	-88	-89	-88	-87	-83	-80	-76
Q T= 50 Años	CV_k	0,51	0,19	0,19	0,19	0,17	0,19	0,20	0,20
	$R^2_{ajust.}$	0,53	0,83	0,84	0,85	0,86	0,85	0,85	0,85
	BIC	-31	-77	-77	-78	-78	-74	-70	-66
Q T= 100 Años	CV_k	0,58	0,23	0,26	0,27	0,22	0,23	0,24	0,24
	$R^2_{ajust.}$	0,48	0,80	0,81	0,83	0,84	0,83	0,83	0,82
	BIC	-26	-69	-69	-71	-71	-67	-63	-59

Tabla C.2.5: Mejores modelos de regionalización, según número de predictores, para la Región 1 según zonas mediante agrupación

Modelo de regresión	Parámetros de evaluación del modelo	Modelo de regresión (número de predictores)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Parámetros de la GEV									
Parámetro de ubicación μ	CV_k	1,34	0,67	0,24	0,16	0,22	0,24	0,26	0,22
	$R^2_{ajust.}$	0,44	0,83	0,90	0,93	0,94	0,94	0,93	0,93
	BIC	-7	-32	-43	-49	-48	-46	-44	-43
Parámetro de escala σ	CV_k	1,25	0,36	0,15	0,08	0,09	0,10	0,12	0,10
	$R^2_{ajust.}$	0,49	0,92	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97
	BIC	-10	-48	-56	-63	-62	-60	-59	-58
Parámetro de forma ε	CV_k	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
	$R^2_{ajust.}$	0,23	0,39	0,41	0,38	0,41	0,40	0,41	0,39
	BIC	-1	-4	-3	0	1	3	4	6
Cuantiles de crecidas									
Q T= 2 Años	CV_k	1,26	0,50	0,24	0,12	0,18	0,21	0,21	0,18
	$R^2_{ajust.}$	0,45	0,86	0,92	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95
	BIC	-8	-36	-46	-53	-52	-51	-49	-48
Q T= 5 Años	CV_k	1,25	0,41	0,22	0,12	0,16	0,17	0,14	0,13
	$R^2_{ajust.}$	0,46	0,90	0,93	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96
	BIC	-9	-43	-50	-56	-56	-55	-53	-52
Q T= 10 Años	CV_k	1,29	0,40	0,18	0,14	0,17	0,18	0,17	0,15
	$R^2_{ajust.}$	0,45	0,91	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	BIC	-8	-45	-52	-54	-53	-52	-51	-49
Q T= 20 Años	CV_k	1,34	0,41	0,20	0,17	0,20	0,22	0,20	0,19
	$R^2_{ajust.}$	0,44	0,91	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
	BIC	-8	-45	-51	-50	-49	-48	-47	-45
Q T= 50 Años	CV_k	1,42	0,44	0,24	0,23	0,25	0,30	0,28	0,26
	$R^2_{ajust.}$	0,41	0,90	0,92	0,92	0,92	0,92	0,93	0,92
	BIC	-6	-44	-47	-45	-44	-42	-41	-38
Q T= 100 Años	CV_k	1,50	0,48	0,28	0,30	0,31	0,35	0,35	0,33
	$R^2_{ajust.}$	0,39	0,89	0,91	0,91	0,90	0,91	0,91	0,90
	BIC	-6	-41	-43	-41	-39	-38	-37	-34

Tabla C.2.6: Mejores modelos de regionalización, según número de predictores, para la Región 2 según zonas mediante agrupación

Modelo de regresión	Parámetros de evaluación del modelo	Modelo de regresión (número de predictores)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Parámetros de la GEV									
Parámetro de ubicación μ	CV_k	1,44	0,56	0,55	0,42	0,41	0,43	0,41	0,44
	R²_{ajust.}	0,70	0,90	0,91	0,92	0,92	0,94	0,94	0,94
	BIC	-20	-42	-43	-42	-41	-46	-44	-41
Parámetro de escala σ	CV_k	1,24	0,42	0,44	0,36	0,36	0,41	0,40	0,42
	R²_{ajust.}	0,67	0,90	0,91	0,91	0,93	0,93	0,93	0,92
	BIC	-18	-42	-41	-40	-44	-43	-40	-37
Parámetro de forma ε	CV_k	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	R²_{ajust.}	0,60	0,65	0,66	0,68	0,67	0,66	0,64	0,61
	BIC	-14	-15	-14	-13	-11	-9	-6	-3
Cuantiles de crecidas									
Q T= 2 Años	CV_k	1,40	0,72	0,46	0,46	0,53	0,49	0,52	0,57
	R²_{ajust.}	0,67	0,81	0,91	0,91	0,91	0,92	0,92	0,91
	BIC	-18	-28	-42	-41	-38	-40	-37	-34
Q T= 5 Años	CV_k	1,49	0,58	0,34	0,30	0,40	0,37	0,35	0,40
	R²_{ajust.}	0,63	0,91	0,91	0,91	0,93	0,93	0,93	0,93
	BIC	-16	-43	-42	-41	-44	-43	-40	-38
Q T= 10 Años	CV_k	1,21	0,38	0,31	0,26	0,25	0,30	0,31	0,33
	R²_{ajust.}	0,63	0,90	0,91	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93
	BIC	-16	-42	-42	-48	-48	-45	-43	-40
Q T= 20 Años	CV_k	1,13	0,38	0,28	0,22	0,25	0,26	0,28	0,28
	R²_{ajust.}	0,62	0,88	0,91	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93
	BIC	-15	-37	-42	-47	-48	-46	-43	-40
Q T= 50 Años	CV_k	0,90	0,39	0,28	0,25	0,28	0,27	0,25	0,26
	R²_{ajust.}	0,58	0,81	0,89	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93
	BIC	-13	-28	-38	-43	-44	-42	-41	-38
Q T= 100 Años	CV_k	0,92	0,52	0,32	0,26	0,26	0,21	0,22	0,26
	R²_{ajust.}	0,53	0,73	0,87	0,90	0,91	0,92	0,92	0,91
	BIC	-11	-20	-33	-39	-38	-39	-38	-35

Tabla C.2.7: Mejores modelos de regionalización, según número de predictores, para la Región 3 según zonas mediante agrupación

Modelo de regresión	Parámetros de evaluación del modelo	Modelo de regresión (número de predictores)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Parámetros de la GEV									
Parámetro de ubicación μ	CV_k	0,41	0,17	0,09	0,12	0,14	0,14	0,14	0,14
	$R^2_{ajust.}$	0,69	0,87	0,94	0,93	0,94	0,94	0,93	0,93
	BIC	-46	-83	-111	-108	-106	-103	-100	-96
Parámetro de escala σ	CV_k	0,35	0,17	0,13	0,16	0,15	0,17	0,17	0,18
	$R^2_{ajust.}$	0,70	0,86	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
	BIC	-47	-79	-88	-87	-88	-85	-82	-78
Parámetro de forma ϵ	CV_k	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06
	$R^2_{ajust.}$	0,28	0,37	0,38	0,38	0,37	0,37	0,36	0,34
	BIC	-8	-11	-9	-7	-4	-1	3	6
Cuantiles de crecidas									
Q T= 2 Años	CV_k	0,38	0,14	0,08	0,10	0,12	0,13	0,12	0,12
	$R^2_{ajust.}$	0,70	0,89	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93
	BIC	-48	-90	-113	-110	-107	-105	-101	-97
Q T= 5 Años	CV_k	0,33	0,13	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13
	$R^2_{ajust.}$	0,71	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
	BIC	-50	-88	-101	-99	-99	-96	-92	-88
Q T= 10 Años	CV_k	0,33	0,14	0,14	0,15	0,12	0,14	0,14	0,14
	$R^2_{ajust.}$	0,70	0,87	0,90	0,90	0,91	0,91	0,91	0,90
	BIC	-48	-84	-90	-89	-91	-87	-84	-80
Q T= 20 Años	CV_k	0,35	0,16	0,17	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16
	$R^2_{ajust.}$	0,67	0,85	0,87	0,89	0,89	0,89	0,88	0,88
	BIC	-44	-78	-79	-83	-82	-78	-75	-71
Q T= 50 Años	CV_k	0,42	0,21	0,19	0,17	0,19	0,21	0,21	0,21
	$R^2_{ajust.}$	0,62	0,82	0,84	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84
	BIC	-37	-67	-70	-73	-70	-66	-62	-58
Q T= 100 Años	CV_k	0,50	0,26	0,24	0,22	0,24	0,26	0,26	0,26
	$R^2_{ajust.}$	0,57	0,78	0,80	0,83	0,82	0,82	0,82	0,81
	BIC	-31	-59	-61	-64	-60	-57	-53	-50

ANEXO D: REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS SEGÚN ZONAS DEL MÉTODO DGA-AC (DGA, 1994)

Anexo D.1: Regionalización de Crecidas Según Zonas del Método DGA-AC (DGA, 1994)

Región 1: Regiones de Atacama y Coquimbo

Análisis exploratorio

Del análisis exploratorio para la Región Homogénea 1 (norte de Chile) cuyos coeficientes de correlación de Spearman se presentan en la Figura D.1.1, se desprende que:

- Los predictores que presentaron una buena correlación ($> 0,60$) con Q_{10} fueron: elevación media (-0,67), tierras áridas (-0,66), matorrales (0,65) y bosque total (0,61). Por otro lado, dentro de los que presentaron una correlación baja ($< 0,40$) se incluyen P_d^{10} (0,34), índice de aridez (-0,29) y pendiente media (0,04). Los demás predictores presentaron correlaciones moderadas.
- Dentro de los predictores que presentaron una buena correlación ($> 0,60$) con μ_{GEV} se destacan: elevación media (-0,87), tierras áridas (-0,76), bosque total (0,69) y P_d^{10} (0,68). Por otro lado, dentro de los que presentaron una correlación baja ($< 0,40$) se destacan: área (0,34) y pendiente media (-0,07).
- Para las dos variables dependientes analizadas, se evidencia una importante correlación lineal entre los predictores: elevación media, tierras áridas, bosque total, matorrales y P_d^{10} .

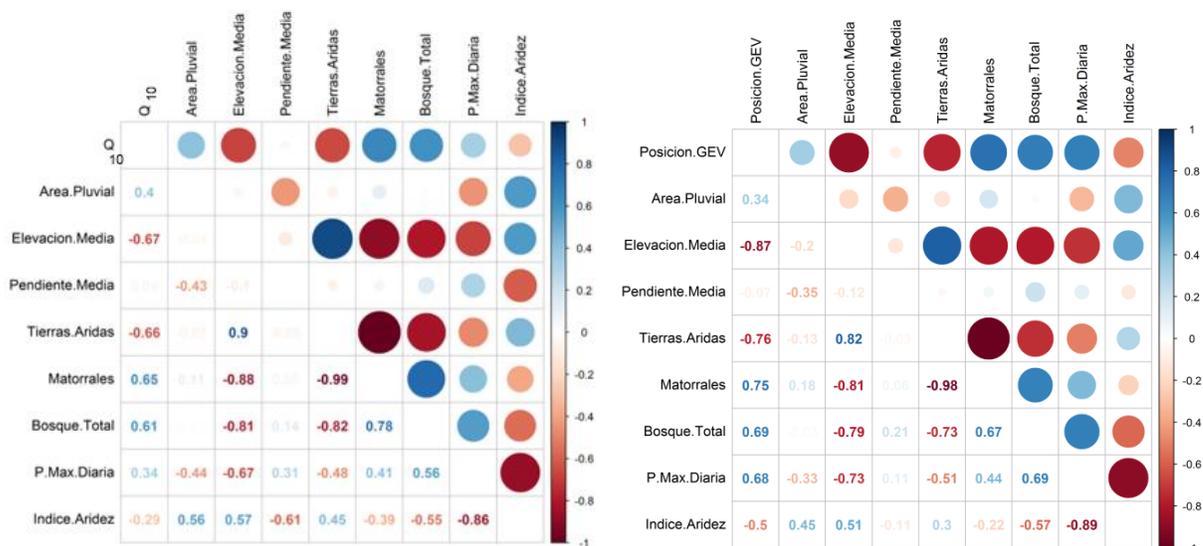


Figura D.1.1 Coeficientes de correlación de Spearman para Q₁₀ (panel izquierdo) y el parámetro de ubicación μ de la GEV (panel derecho) vs predictores, para la Región 1 según las zonas del método DGA-AC

Modelos de regionalización

Evaluación modelos de regionalización

En la Figura D.1.2 y Figura D.1.3 se presentan los estadísticos de evaluación de los modelos de regresión en función del número de predictores empleados para el caso de Q_{10} y μ_{GEV} , respectivamente. Los valores de $R^2_{ajustado}$ varían entre 0,76 y 0,91 para Q_{10} , y entre 0,77 y 0,90 para μ_{GEV} , y los valores de BIC son menores que cero con máximos de -25 y -26, respectivamente. Finalmente, los valores del test error CV_k obtenidos mediante validación cruzada, se encuentran entre 0,63 y 0,25 para Q_{10} y entre 1,27 y 0,95 para μ_{GEV} .

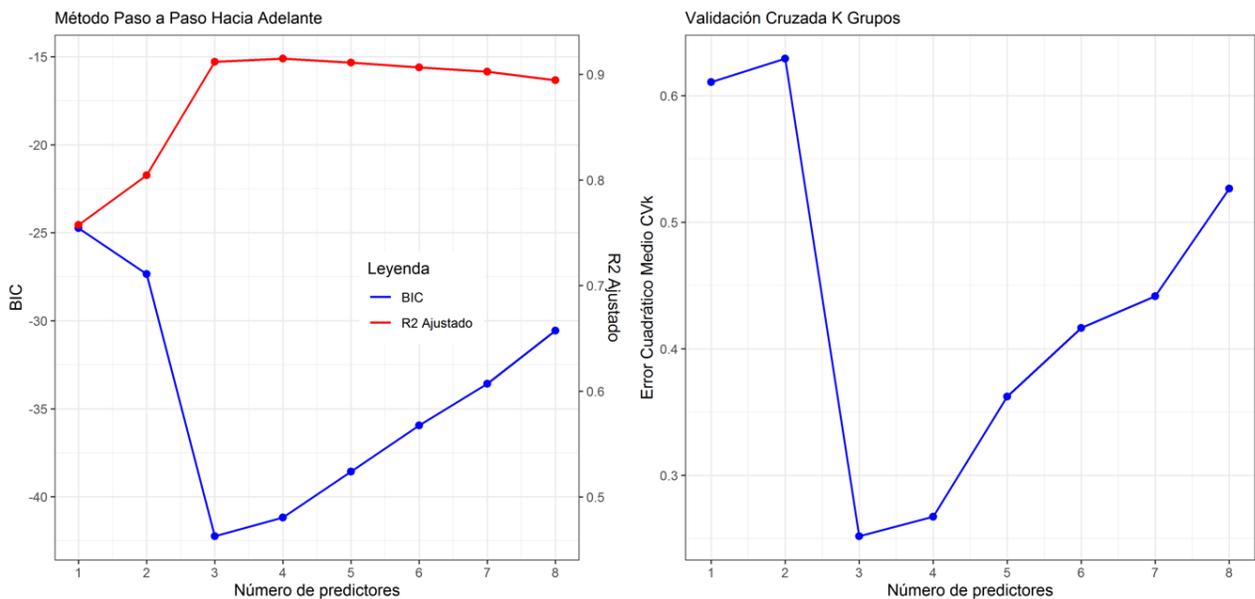


Figura D.1.2 Mejores modelos de regionalización de Q_{10} , según número de predictores, para la Región 1 según zonas del método DGA-AC

En estas Figuras es apreciable en los tres criterios de evaluación como mejoran sus resultados conforme aumenta el número de predictores, alcanzando su mejor valor para modelos en torno a tres y cuatro predictores, para después decaer considerablemente en sus resultados, dejando en evidencia que cualquier incorporación adicional de predictores al modelo perjudica la capacidad predictiva de este. Dado lo expuesto anteriormente, se seleccionan los modelos de tres predictores con valor de $R^2_{ajustado}$ de 0,91 en el caso de Q_{10} y de 0,87 para el de μ_{GEV} , indicando en ambos casos un buen ajuste lineal en los modelos de regresión. Finalmente, se indica que, para el resto de los cuantiles de crecida y parámetros de la GEV, los resultados fueron similares a los aquí presentados.

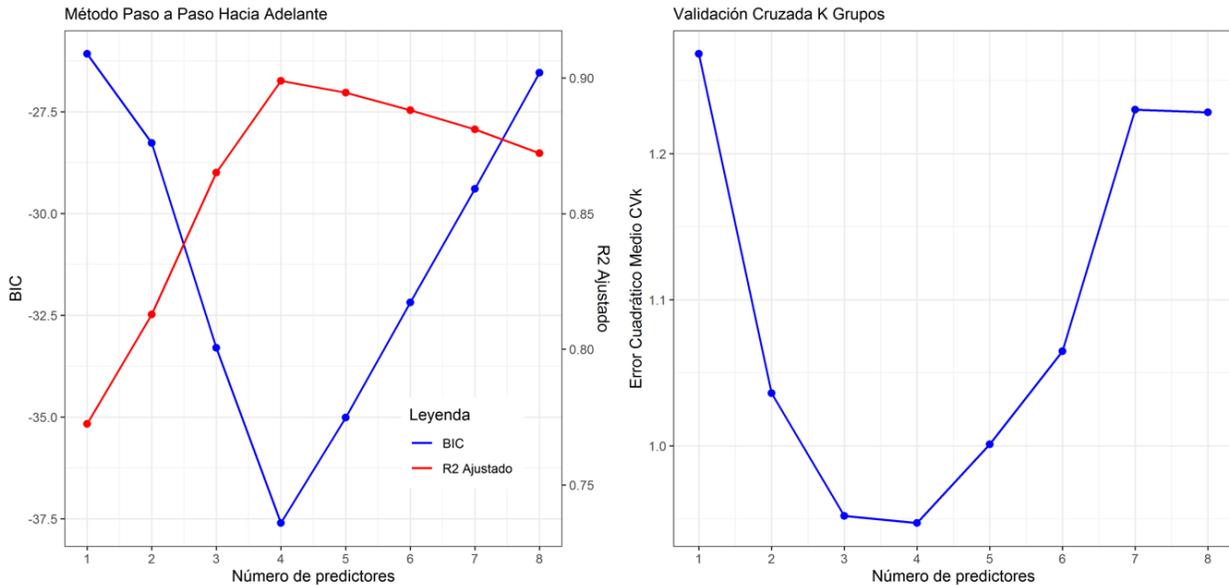


Figura D.1.3 Mejores modelos de regionalización del Parámetro de Ubicación μ de la GEV, según número de predictores, para la Región 1 según zonas del método DGA-AC

Selección de modelos de regionalización

En la Tabla D.1.1 se resumen los modelos de regresión de tres predictores seleccionados para todos los cuantiles de crecida y los parámetros de la GEV, incluyendo métricas de evaluación. En el caso de los cuantiles de crecida, a medida que aumenta el periodo de retorno, disminuye la calidad del ajuste de los modelos por ejemplo el $R^2_{ajustado}$ baja de 0,93 (T = 2 años) a 0,86 (T = 100 años).

Por otro lado, en el caso de los parámetros de la GEV se obtienen valores de $R^2_{ajustado}$ entre 0,57 y 0,87, y CV_k entre 0,27 y 0,95, obteniéndose un mejor ajuste para el caso de los parámetros de posición (μ) y escala (σ), respecto al parámetro de forma (ϵ).

Tabla D.1.1 Resumen modelos de regionalización seleccionados para la Región 1 según zonas del método DGA-AC (selección libre)

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV_k	$R^2_{ajust.}$	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 6,88^{13} * A^{0,71} * Em^{-5,75} * P_{10}^{3,55}$	0,95	0,87	-33
$\sigma = 1,40^8 * A^{0,58} * Em^{-2,35} * Ia^{-1,09}$	0,28	0,88	-35
$\epsilon = 6,04^7 * Mat^{0,89} * P_{10}^{2,22} * Ia^{0,64}$	0,27	0,57	-9
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 2341 * A^{0,62} * Em^{-0,94} * Ia^{-1,13}$	0,47	0,93	-217
$Q_5 = 1,48^9 * A^{0,63} * Em^{-2,50} * Ia^{-1,13}$	0,25	0,90	-39
$Q_{10} = 7,25^{12} * A^{0,65} * Em^{-3,50} * Ia^{-1,13}$	0,25	0,91	-42
$Q_{20} = 2,45^{16} * A^{0,68} * Em^{-4,46} * Ia^{-1,13}$	0,32	0,91	-41
$Q_{50} = 9,40^{20} * A^{0,71} * Em^{-5,71} * Ia^{-1,14}$	0,53	0,89	-37
$Q_{100} = 2,69^{24} * A^{0,73} * Em^{-6,65} * Ia^{-1,14}$	1,07	0,86	-33

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

Es importante destacar las diferencias obtenidas entre el análisis exploratorio de predictores, y aquéllos que finalmente integraron las ecuaciones de regresión. Predictores como el área e índice de aridez en el caso de los cuantiles de crecida, y P_d^{10} en el caso de los parámetros de la GEV, resultaron en las ecuaciones de regresión, a pesar de que el análisis exploratorio entregó una baja correlación de ellas. El único predictor del análisis exploratorio que arrojó una buena correlación con las variables dependientes y que hace parte de las ecuaciones de regresión es la elevación media, la que entregó valores de correlación de - 0,67 y - 0,87 para el caso de Q_{10} y para μ_{GEV} , respectivamente. Los resultados descritos anteriormente son explicados por la alta colinealidad existente entre predictores; además, su incorporación conjunta en los modelos de regresión aporta muy poco valor a la capacidad predictiva de los mismos, dejando de manifiesto que incluso predictores que en principio arrojaron una menor correlación con la variable dependiente, sean de mayor aporte y en conjunto con otros predictores generen un mayor poder predictivo

Por otro lado, se destaca que los cuantiles de crecida quedan explicados por descriptores físicos y climáticos que no dependen del periodo de retorno, lo que puede llevar a errores en la estimación de caudales de crecidas en cuencas que posean parámetros físico-climáticos similares, pero caracterizadas con eventos de precipitación máxima marcadamente diferentes. Con base a lo anterior, se generaron modelos de regresión de tres predictores en el caso de los cuantiles de crecida, garantizando esta vez la inclusión de la Precipitación diaria máxima como predictor, los cuales se presentan a continuación en la Tabla D.1.2.

Tabla D.1.2 Resumen modelos de regionalización seleccionados para la Región 1 según zonas del método DGA-AC (modelos con P Máx. Diaria)

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV_k	$R^2_{ajust.}$	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 6,88^{13} * A^{0,71} * Em^{-5,75} * P_{10}^{3,55}$	0,95	0,87	-33
$\sigma = 1,40^8 * A^{0,58} * Em^{-2,35} * Ia^{-1,09}$	0,28	0,88	-35
$\varepsilon = 6,04^7 * Mat^{0,89} * P_{10}^{2,22} * Ia^{0,64}$	0,27	0,57	-9
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 6,56^{-4} * A^{0,62} * Em^{-0,12} * P_2^{1,84}$	0,43	0,80	-25
$Q_5 = 54,2 * A^{0,60} * Em^{-1,88} * P_5^{2,56}$	0,26	0,87	-34
$Q_{10} = 1,02^6 * A^{0,57} * Em^{-3,34} * P_{10}^{3,01}$	0,29	0,88	-36
$Q_{20} = 2,27^{12} * A^{0,51} * Em^{-5,22} * P_{20}^{3,15}$	0,44	0,87	-34
$Q_{50} = 1,01^{24} * A^{0,40} * Em^{-8,14} * P_{50}^{2,53}$	0,74	0,83	-29
$Q_{100} = 4,98^{32} * A^{0,35} * Em^{-10,08} * P_{100}^{1,70}$	1,07	0,81	-36

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

Comparando los parámetros de evaluación para ambos escenarios (con y sin P Máx Diaria) se destaca que la mayor diferencia se aprecia en los valores de $R^2_{ajustado}$ pasando de un rango de 0,93 – 0,86 en el primer caso, a uno de 0,80 – 0,88 en el segundo, mientras que el BIC y el CV_k se mantienen relativamente similares. En síntesis, la inclusión de la Precipitación diaria máxima en las ecuaciones de regresión genera modelos hidrológicamente más consistentes, sin pérdida sustancial en la capacidad de las variables dependientes.

Con respecto a los exponentes de los predictores, se destaca el valor del Área, el cual en los casos tanto de los cuantiles de crecidas como parámetros de la GEV es menor que 1,0 (0,71 – 0,35) confirmando la reducción del rendimiento ($m^3/s/km^2$) conforme al aumento del área. Lo anterior es comparable con estudios similares donde se obtuvieron valores de 0,776 para el método DGA-AC en regiones de norte de Chile y de 0,88 para la fórmula de Verni & King Modificada que considera regiones a lo largo de la geografía chilena (DGA, 1995).

En cuanto a la precipitación diaria máxima es de notar la fuerte influencia del valor de las crecidas con ella, reflejado en exponentes mayores de 3,0, (3,55 máximo) para periodos de retorno de 10 y 20 años y también en el caso del parámetro de posición de la GEV; mientras que, para los demás periodos de retorno, esta dependencia es menor llegando a valores de 1,70 para el caso de 100 años de periodo de retorno.

En la Figura D.1.4 se presenta la comparación entre caudales observados y estimados, mediante las dos técnicas de regresión evaluadas. Adicionalmente, en la Tabla D.1.3 y Figura D.1.5 presenta el indicador raíz del error cuadrático medio normalizado (RMSNE), el cual crece para ambas técnicas de regresión en la medida que aumenta el periodo de retorno, y en mayor medida para la técnica de regresión de parámetros de la GEV.

Finalmente, en la Tabla D.1.3 y Figura D.1.6 se presenta la comparación en la estimación de caudales de crecida, bajo el escenario de modelos de regresión libre y con precipitación diaria máxima, mediante el indicador RMSNE. En ellas, se aprecia una similitud en la estimación para periodos de retorno bajos (2 años) con valores de RMSNE 0,511 y 0,581 respectivamente, diferencia que crece a medida que aumenta el periodo de retorno hasta un máximo de 0,839 y 1,537.

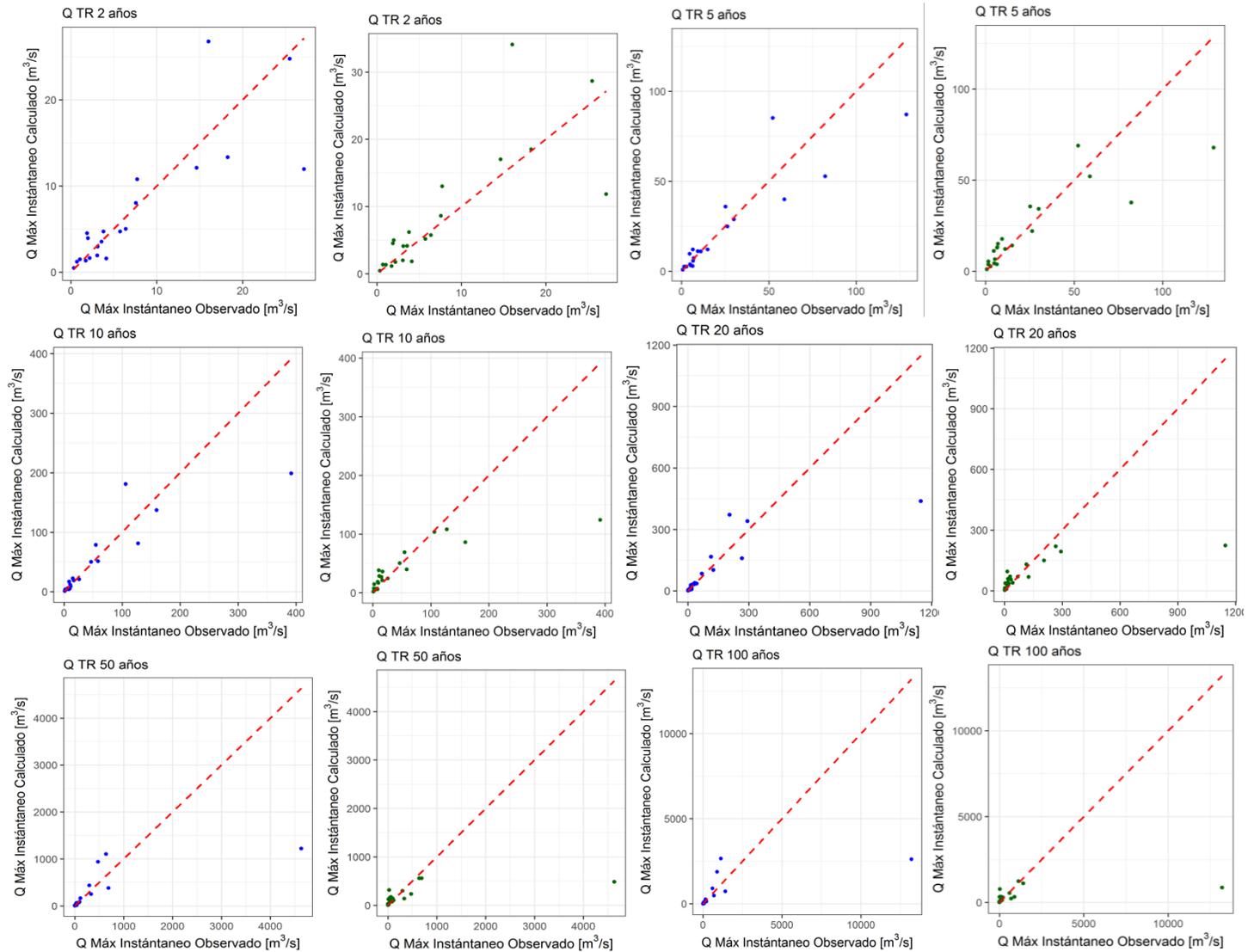


Figura D.1.4 Caudal modelado vs observado para los modelos de regionalización de cuantiles de crecida (paneles 1 y 3 en azul) y parámetros de la GEV (paneles 2 y 4 en verde), para la Región 1 según zonas del método DGA-AC

Tabla D.1.3 RMSNE modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la Región 1 según zonas del método DGA-AC

Modelo de regionalización	Periodo de Retorno (años)					
	2	5	10	20	50	100
Modelo Libre (3 parámetros)						
Cuantiles de crecidas	0,511	0,440	0,441	0,497	0,655	0,839
Parámetros de la GEV	0,637	0,836	1,359	2,275	4,460	7,407
Modelos con P Diaria Máxima (3 parámetros)						
Cuantiles de crecidas	0,581	0,534	0,525	0,595	0,992	1,537
Parámetros de la GEV	0,637	0,836	1,359	2,275	4,460	7,407

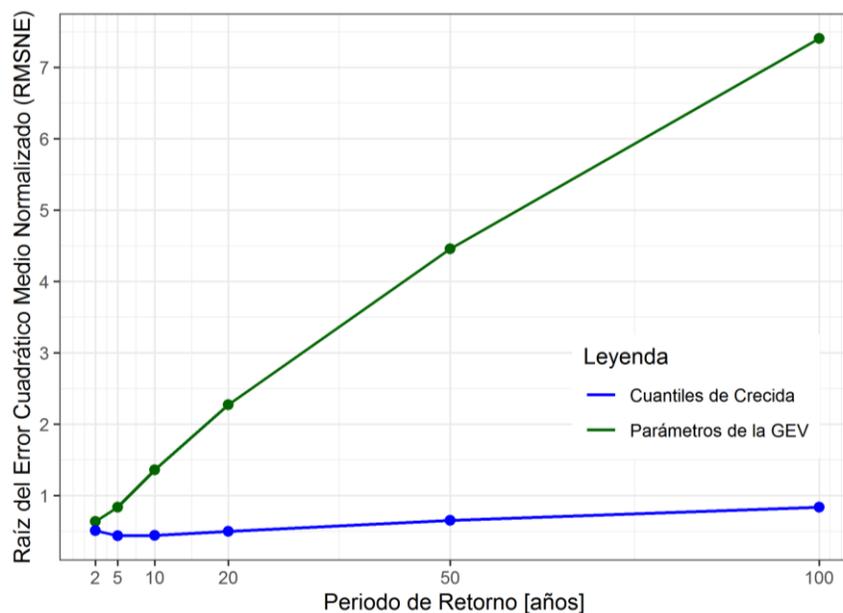


Figura D.1.5 RMSNE modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la Región 1 según zonas del método DGA-AC

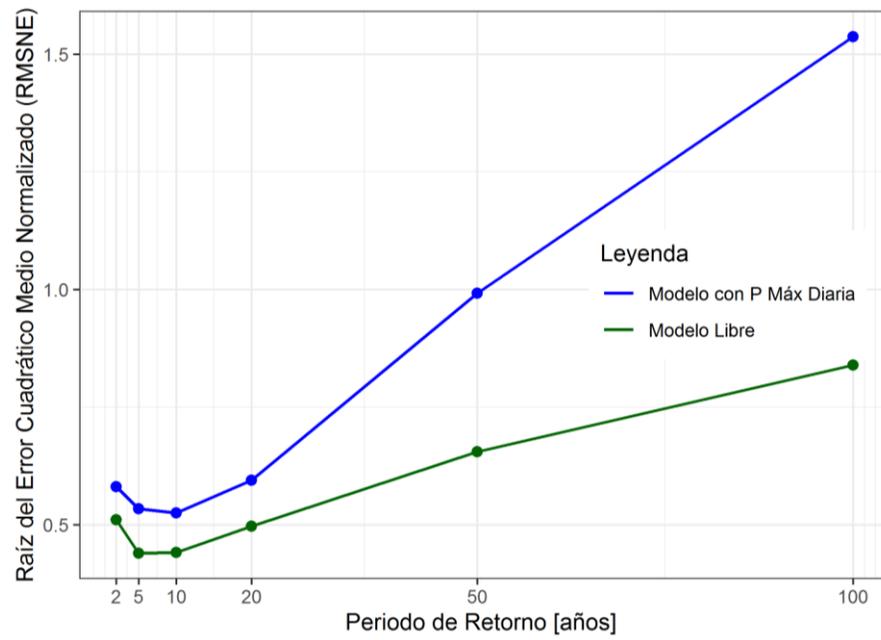


Figura D.1.6 RMSNE para modelos de regionalización de cuantiles de crecida de selección libre vs Precipitación Diaria Máxima, para la Región 1 según zonas del método DGA-AC

Anexo D.2: Región 2: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y Libertador Bernardo O'Higgins:

Análisis exploratorio

Del análisis exploratorio realizado para la Región Homogénea 2 (Chile central), presentado en la Figura D.2.1, se desprende que:

- Los predictores que presentaron una buena correlación ($> 0,60$) con Q_{10} , fueron: área (0,87) y cobertura de bosque total (0,70). Por otro lado, los que presentaron una correlación baja ($< 0,40$) fueron cobertura de matorrales (0,32), P_d^{10} (0,20) e índice de aridez (-0,09). Los demás predictores presentaron correlaciones moderadas.
- El predictor que presentó la mejor correlación ($> 0,60$) con μ_{GEV} fue el área (0,70). Por otro lado, dentro de los que presentaron una correlación baja ($< 0,40$) destacan P_d^{10} (0,28), elevación media (-0,22) y pendiente media (-0,13). Los demás predictores presentaron correlaciones moderadas.
- Para las dos variables dependientes analizadas, se evidencia una alta correlación entre los predictores ($> 0,90$): elevación media, pendiente media, tierras áridas y cobertura de matorrales.

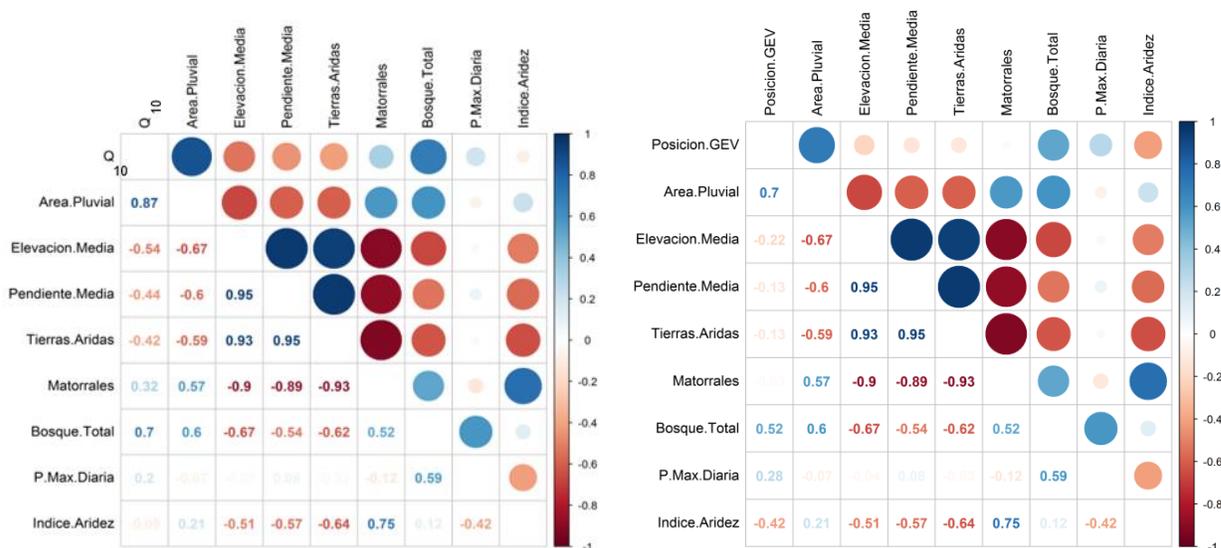


Figura D.2.1 Coeficientes de correlación de Spearman Q10 (izquierda) y Parámetro de Ubicación μ de la GEV (derecha) vs predictores, para la Región 2 según zonas del método DGA-AC

Modelos de regionalización

Evaluación modelos de regionalización

En la Figura D.2.2 y Figura D.2.3 se presentan los estadísticos de evaluación de los modelos de regresión en función del número de predictores para el caso de Q_{10} y para μ_{GEV} , respectivamente. Los valores de $R^2_{ajustado}$ varían entre 0,68 y 0,90 para Q_{10} y entre 0,32 y 0,88 para μ_{GEV} , y los valores de BIC son menores que cero con máximos de -16 y -2 respectivamente. Finalmente, los valores del test error CV_k obtenidos mediante validación cruzada, se encuentran entre 0,44 y 0,80 para Q_{10} y entre 0,41 y 3,11 para $GEV(\mu)$.

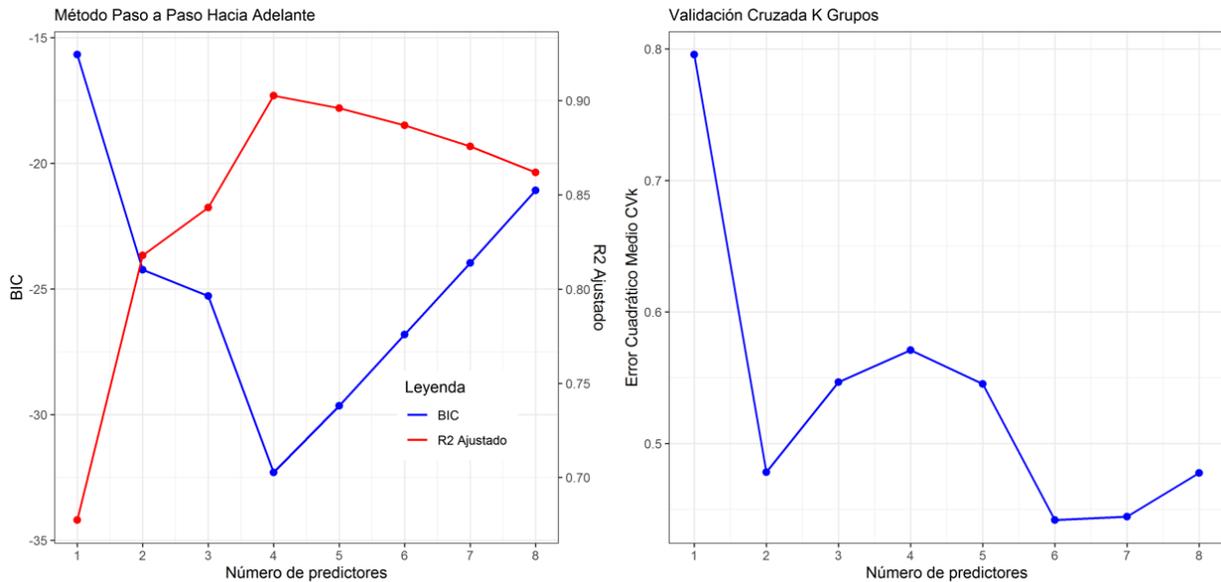


Figura D.2.2 Mejores modelos de regionalización de QT = 10 años, según número de predictores, para la Región 2 según zonas del método DGA-AC

En estas Figuras, se indica que según los tres criterios de evaluación los mejores modelos se obtienen entre dos y cuatro predictores según el criterio considerado, para después decaer en sus resultados, dejando en evidencia que en general cualquier incorporación adicional de predictores al modelo perjudica la capacidad predictiva de este. Por lo tanto, se seleccionan modelos de tres predictores con un valor de $R^2_{ajustado}$ de 0,84 y $CV_k = 0,55$ en el caso de Q_{10} , y $R^2_{ajustado}$ de 0,77 y $CV_k = 0,79$ para el caso de μ_{GEV} . Finalmente, se indica que, para el resto de los cuantiles de crecida y parámetros de la GEV, los resultados en cuanto a número de predictores fueron similares a los aquí presentados.

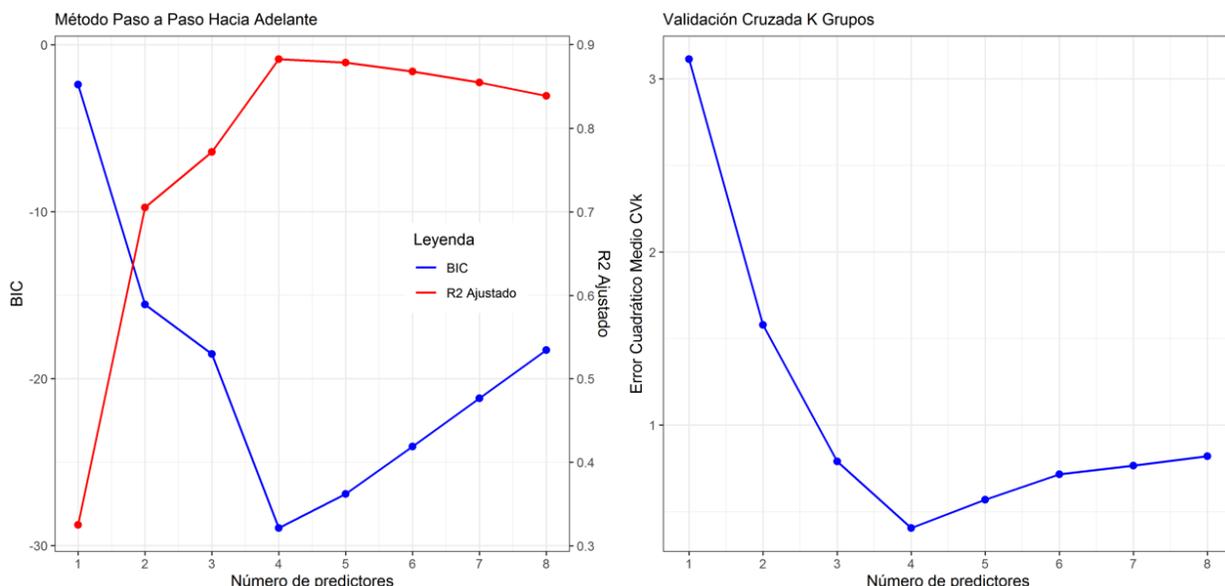


Figura D.2.3 Mejores modelos de regionalización del Parámetro de Ubicación μ de la GEV, según número de predictores, para la Región 2 según zonas del método DGA-AC

Selección de modelos de regionalización

En la Tabla D.2.1 se resumen los modelos de regresión de tres predictores seleccionados para todos los cuantiles de crecida y los parámetros de la GEV. Se destaca que, al igual que en el caso de la Región Homogénea 1, los modelos de los cuantiles de crecida fueron “forzados” a incluir como variable predictora a la precipitación diaria máxima de su periodo de retorno asociado. En el caso de los cuantiles de crecida, mejora la calidad del ajuste de los modelos de regresión para periodos de retorno mayores: el $R^2_{ajustado}$ sube de 0,58 a 0,83, para 2 a 100 años de periodo de retorno. Lo mismo sucede con los valores de CV_k los cuales disminuyen de 1,19 a 0,62.

En el caso de los parámetros de la GEV, para los parámetros de posición (μ) y de escala (σ) se obtienen valores de $R^2_{ajustado}$ de 0,77 y 0,82, y CV_k de 0,57 y 0,79, respectivamente. Siendo comparables con los alcanzados para los cuantiles de crecida. Por otro lado, se obtiene un pobre ajuste para el parámetro de forma (ϵ) con un $R^2_{ajustado}$ de 0,26 y CV_k de 2,91.

Tabla D.2.1 Resumen de modelos de regionalización seleccionados para la Región 2 según zonas del método DGA-AC (modelos con P Máx. Diaria)

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV_k	$R^2_{ajust.}$	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 2,15 * A^{1,03} * Mat^{-0,71} * Ia^{-1,44}$	0,79	0,77	-19
$\sigma = 0,76 * A^{1,08} * Mat^{-0,51} * Ia^{-1,26}$	0,57	0,82	-23
$\epsilon = 2,72^{-8} * Sm^{3,22} * Mat^{1,45} * P_{10}^{-1,26}$	2,91	0,26	3
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 6,09^{-8} * A^{0,69} * Bos^{-0,05} * P_2^{3,99}$	1,19	0,58	-8
$Q_5 = 1,04^{-6} * A^{0,74} * Bos^{0,01} * P_5^{3,23}$	0,79	0,69	-13
$Q_{10} = 4,22^{-5} * A^{0,75} * Bos^{0,07} * P_{10}^{2,42}$	0,61	0,76	-18
$Q_{20} = 3,97^{-3} * A^{0,76} * Bos^{0,13} * P_{20}^{1,50}$	0,52	0,82	-22

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV _k	R ² _{ajust.}	BIC
$Q_{50} = 2,45 * A^{0,77} * Bos^{0,21} * P_{50}^{0,28}$	0,51	0,84	-25
$Q_{100} = 212,96 * A^{0,78} * Bos^{0,25} * P_{100}^{-0,54}$	0,62	0,83	-24

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

Con respecto a los predictores que conforman las ecuaciones de regresión, se destaca que, en el caso de los cuantiles de crecida, destacan el área y cobertura de bosque total además de la precipitación diaria máxima. Se observa además cómo la influencia de la precipitación diaria máxima disminuye conforme crece el periodo de retorno, considerando los valores de los exponentes que se reducen de 3,99 a -0,54. En cuanto al área, sus exponentes son menores que 1 (0,69 a 0,78) confirmando la reducción del rendimiento (m³/s/km²) conforme al aumento de esta. En comparación con el método de la DGA-AC para esta zona del país (DGA, 1995) los exponentes del área y la Precipitación (10 años) obtenidos en este estudio fueron algo menores, siendo 0,75 vs 0,915 en el caso del área y 2,42 vs 3,432 en el caso de la Precipitación. Por último, los exponentes del predictor cobertura de bosque total son bajos (i.e., entre -0,05 y 0,26) indicando una menor influencia de las crecidas con este predictor.

En cuanto a los modelos de regresión para los parámetros de la GEV, incluyen aquellos predictores que evidenciaron buenas a moderadas correlaciones en el análisis exploratorio, obteniéndose una influencia similar con exponentes que se encuentran entre 0,5 y 1,5, salvo el valor de 3,22 obtenido para el caso de la elevación media en la regresión del parámetro de forma (ϵ). Se resalta que estas regresiones la conforman predictores de distinta clase, es decir uno físico (área y elevación media), uno climático (índice de aridez y precipitación) y uno de cobertura (matorrales).

La Figura D.2.4 presenta la comparación de los caudales observados y los estimados, estos últimos obtenidos mediante las dos técnicas de evaluación observándose resultados aceptables en el caso de los cuantiles de crecida, y una subestimación de los caudales en el caso de la regresión de los parámetros de la GEV. Adicionalmente, en la Tabla D.2.2 y Figura D.2.5 presenta el RMSNE, el cual crece para ambas técnicas de regresión en la medida que aumenta el periodo de retorno, pero en mayor medida para la técnica de regresión de parámetros de la GEV.

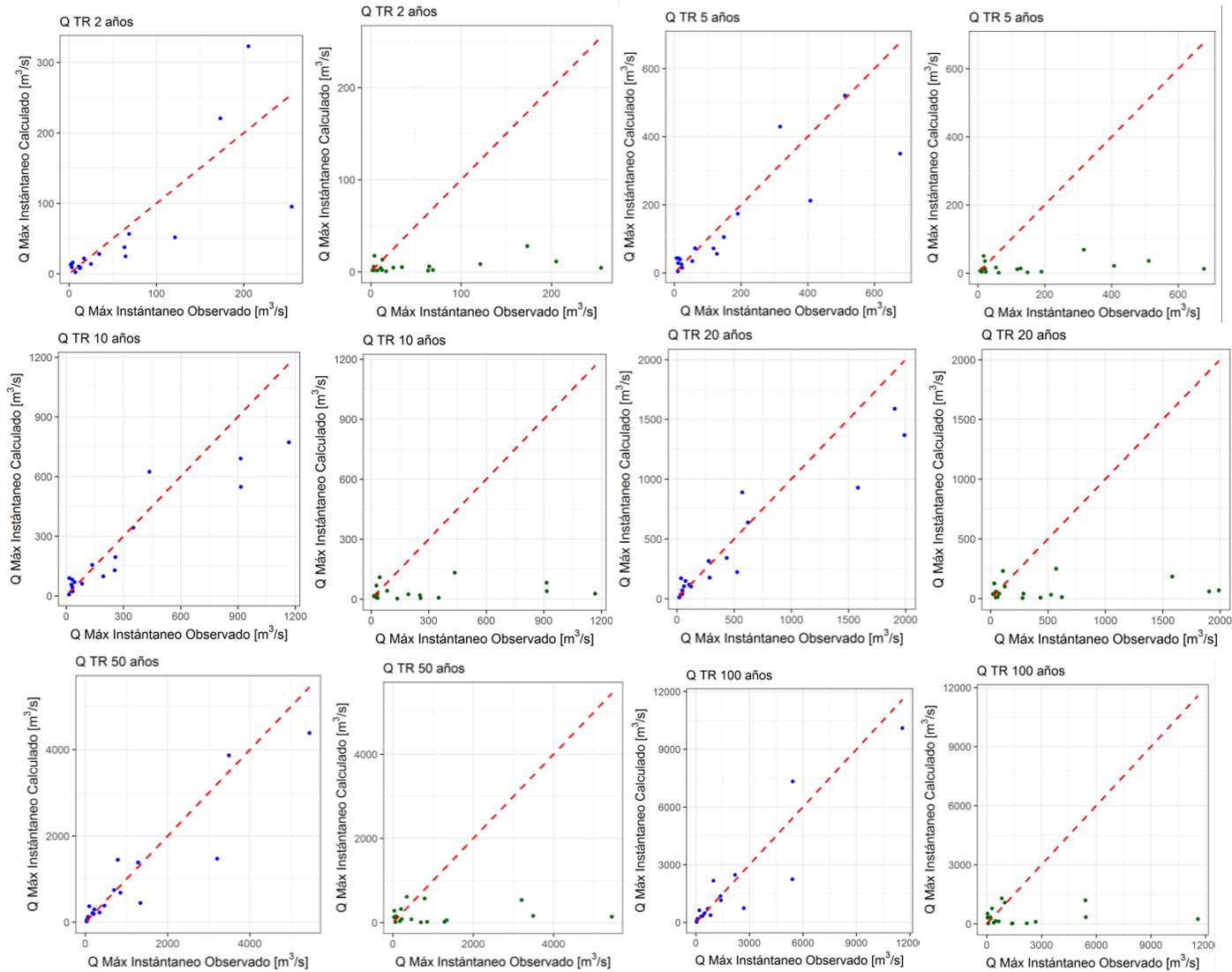


Figura D.2.4 Caudal calculado vs observado para los modelos seleccionados de regionalización de cuantiles de crecida (paneles 1 y 3 en azul) y parámetros de la GEV (paneles 2 y 4 en verde), para la Región 2 según zonas del método DGA-AC.

Tabla D.2.2 RMSNE obtenido de modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la Región 2 según zonas del método DGA-AC

Modelo de regionalización	Periodo de Retorno (años)					
	2	5	10	20	50	100
Cuantiles de crecidas	1,625	1,349	1,155	0,970	0,774	0,723
Parámetros de la GEV	1,062	0,885	0,872	1,027	1,744	2,913

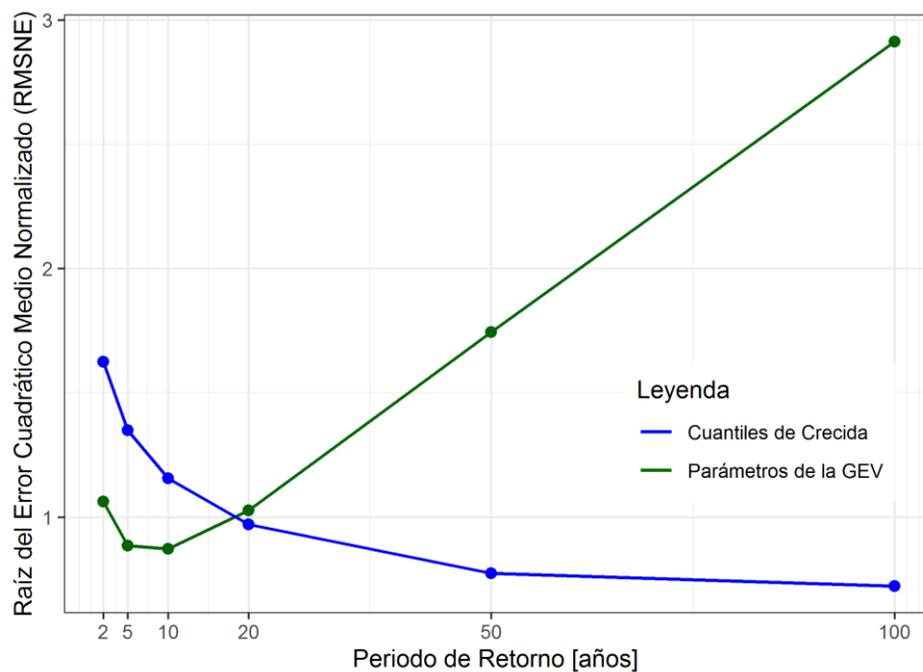


Figura D.2.5 RMSNE para modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la Región 2 según zonas del método DGA-AC

Anexo D.3: Región 3: Regiones de Maule, Biobío, Ñuble y Araucanía

Análisis exploratorio

Del análisis exploratorio realizado para la Región Homogénea 3 (Sur de Chile), cuyos coeficientes de correlación de Spearman se presentan en la Figura D.3.1 se desprende que:

- El predictor que presentó la mejor correlación ($> 0,60$) con Q_{10} , fue el área (0,78). Por otro lado, dentro de los que presentaron una correlación baja ($< 0,40$) destacan la elevación media (0,32), cobertura de bosque total (-0,23) y P_d^{10} (0,22). Los demás predictores presentaron correlaciones moderadas.
- El predictor que presentó la mejor correlación ($> 0,60$) con μ_{GEV} fue el área (0,82). Por otro lado, dentro de los que presentaron una correlación baja ($< 0,40$) destacan índice de aridez (-0,32), elevación media (0,29) y P_d^{10} (0,12). Los demás predictores presentaron correlaciones moderadas.
- Para ambas variables dependientes consideradas como ejemplo se evidencia una alta correlación entre los predictores ($> 0,80$): elevación media, pendiente media y tierras áridas.

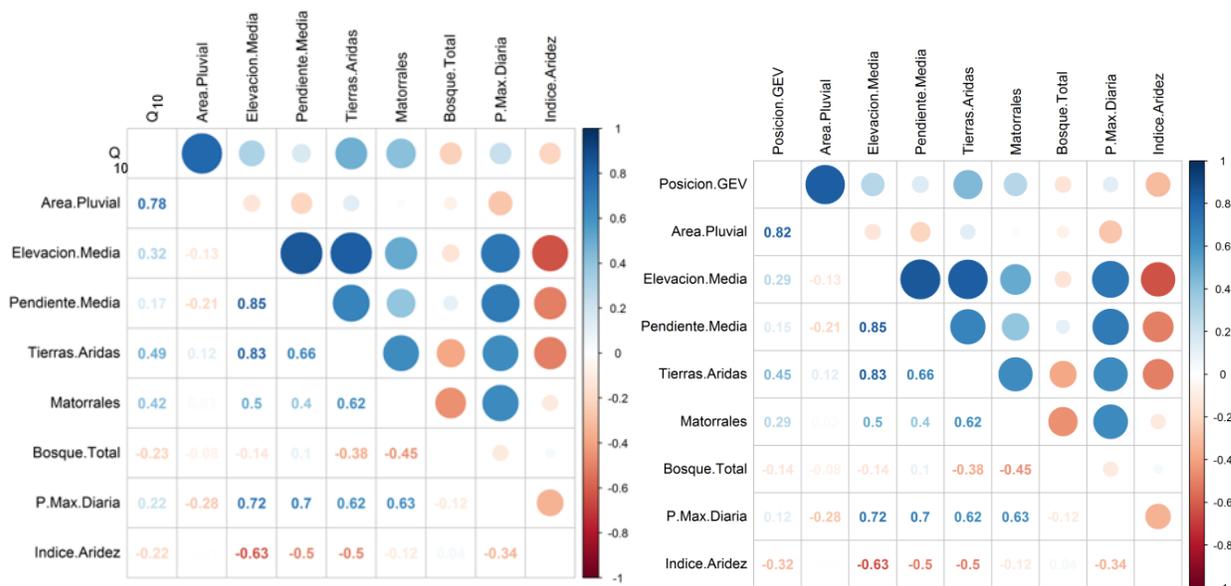


Figura D.3.1 Coeficientes de correlación de Spearman Q_{10} (izquierda) y Parámetro de Ubicación μ de la GEV (derecha) vs predictores, para la Región 3 según zonas del método DGA-AC.

Modelos de regionalización

Evaluación de modelos de regionalización

En la Figura D.3.2 y Figura D.3.3 se presentan las métricas de evaluación de los modelos de regresión según el número de predictores empleados para Q_{10} y μ_{GEV} , respectivamente. Los valores de $R^2_{ajustado}$ varían entre 0,64 y 0,90 para Q_{10} y entre 0,73 y 0,91 para μ_{GEV} ; mientras que los valores de BIC estos son menores que cero con máximos de -43 y -57 respectivamente. Finalmente, los valores del test error CV_k obtenidos mediante validación cruzada se encuentran entre 0,12 y 0,38 para Q_{10} y entre 0,13 y 0,31 para GEV (μ).

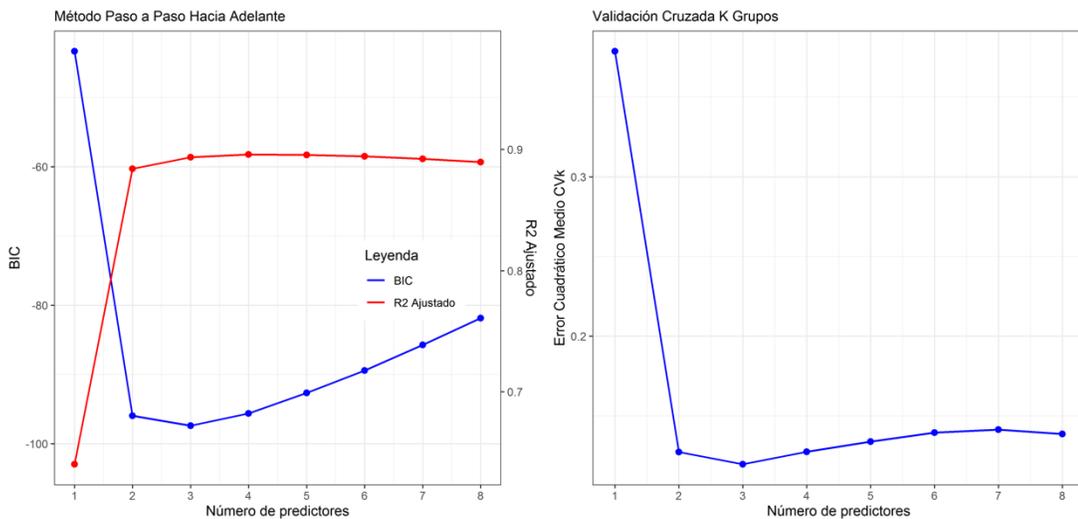


Figura D.3.2 Mejores modelos de regionalización de QT = 10 años, según número de predictores, para la Región 3 según zonas del método DGA-AC.

En las Figuras es apreciable en los tres criterios de evaluación como mejoran sus resultados conforme aumenta el número de predictores, alcanzando su mejor valor para modelos en torno a dos y tres predictores, para después decaer ligeramente en sus resultados, dejando en evidencia que en general cualquier incorporación adicional de predictores al modelo no mejora sustancialmente o incluso perjudica su capacidad predictiva. Por lo tanto, se seleccionan los modelos de tres predictores con un valor de $R^2_{ajustado}$ de 0,89 y $CV_k = 0,12$ en el caso de Q_{10} , y $R^2_{ajustado}$ de 0,89 y $CV_k = 0,14$ para el caso de μ_{GEV} .

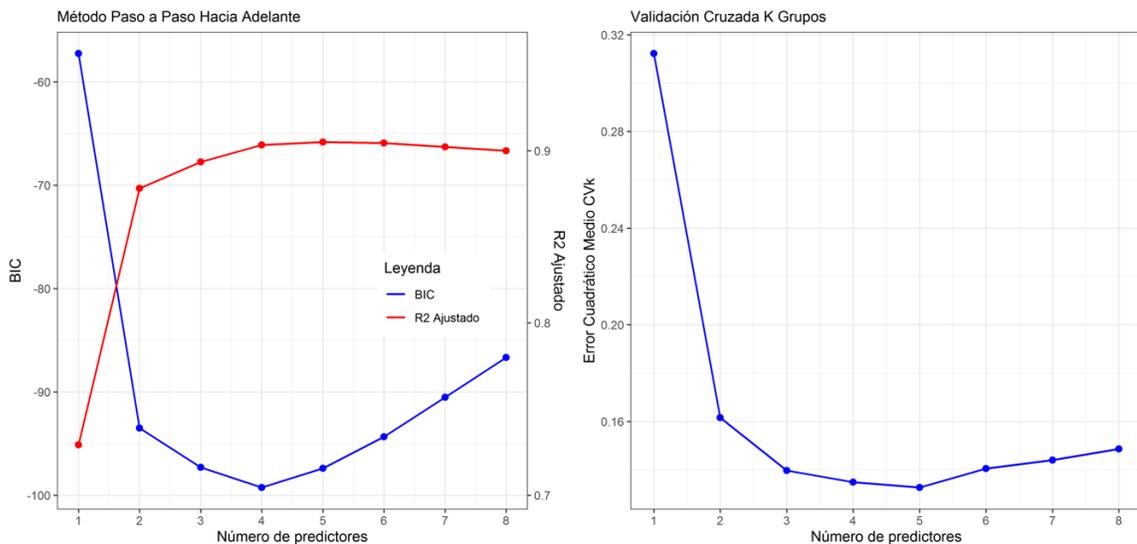


Figura D.3.3 Mejores modelos de regionalización del Parámetro de Ubicación μ de la GEV, según número de predictores, para la Región 3 según zonas del método DGA-AC.

Selección de modelos de regionalización

En la Tabla D.3.1 se resumen los modelos de regresión de tres predictores seleccionados para todos los cuantiles de crecida y los parámetros de la GEV. Los resultados indican que, en el caso de los cuantiles de crecida, a medida que aumenta el periodo de retorno disminuye la calidad del ajuste de los modelos de regresión; por ejemplo, $R^2_{ajustado}$ disminuye desde 0,91 ($T = 2$ años) a 0,81 ($T = 100$ años), al igual que los valores de CV_k los cuales aumentan de 0,13 a 0,26.

En el caso de los parámetros de la GEV, los ajustes para parámetros de posición (μ) y de escala (σ), entregan valores de $R^2_{ajustado}$ de 0,89, y CV_k entre 0,14 y 0,12, comparables a los alcanzados para los cuantiles de crecida. Finalmente, es apreciable el bajo ajuste y, por tanto, alta incertidumbre en el caso del parámetro de forma (ε) con un $R^2_{ajustado}$ de 0,38 y CV_k de 0,04.

Tabla D.3.1 Resumen de modelos de regionalización seleccionados para la Región 3 según zonas del método DGA-AC

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV_k	$R^2_{ajust.}$	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 6,07^{-4} * A^{0,93} * Em^{0,39} * P_{10}^{0,94}$	0,14	0,89	-97
$\sigma = 2,28^{-5} * A^{0,89} * Em^{0,22} * P_{10}^{1,83}$	0,12	0,89	-96
$\varepsilon = -0,58 + 0,0035 * Ta + 0,0031 * P_{10} + 0,455 * Ia$	0,04	0,38	-11
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 3,76^{-5} * A^{0,94} * Bos^{0,16} * P_2^{2,15}$	0,13	0,91	-105
$Q_5 = 1,89^{-4} * A^{0,90} * Em^{0,24} * P_5^{1,63}$	0,11	0,91	-103
$Q_{10} = 1,19^{-4} * A^{0,89} * Em^{0,25} * P_{10}^{1,74}$	0,12	0,89	-97
$Q_{20} = 7,16^{-5} * A^{0,88} * Em^{0,25} * P_{20}^{1,86}$	0,14	0,87	-89
$Q_{50} = 3,44^{-5} * A^{0,88} * Em^{0,25} * P_{50}^{2,02}$	0,19	0,84	-77
$Q_{100} = 1,89^{-5} * A^{0,87} * Em^{0,26} * P_{100}^{2,15}$	0,26	0,81	-69

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

En el caso de los cuantiles de crecida, los mejores predictores encontrados se encuentran dentro de los de mayor incidencia en su generación de acuerdo con la literatura (Blöschl et al., 2013): área, precipitación diaria máxima y elevación media. Se aprecia una mayor influencia de la precipitación diaria máxima, aunque sin grandes variaciones conforme varía el periodo de retorno, considerando los valores de los exponentes que se encuentran entre 1,63 y 2,15. En cuanto al área, sus exponentes son menores que 1 (0,89 a 0,94) y muestran poca variación con el periodo de retorno. En comparación con el método de la DGA-AC para esta zona del país (DGA, 1995) los exponentes del área y la precipitación (10 años) obtenidos en este análisis son algo menores, 0,89 vs 0,973 en el caso del área pluvial y algo mayor 1,74 vs 1,224 en el caso de la precipitación. Por último, los exponentes del predictor elevación media se encuentran entre 0,16 y 0,26, siendo más bajos y con poca variación.

En cuanto a las regresiones de los parámetros de la GEV, se resalta que los parámetros de posición (μ) y de escala (σ), presentan los mismos predictores y con exponentes similares a los obtenidos para el caso de los cuantiles de crecida. Con respecto a la regresión del parámetro de forma (ϵ), se ha obtenido una estructura conformada por el Índice de Aridez, el cual es un predictor de baja relevancia en las cuencas de la zona sur del país, con valores entre 0,4 y 1,4 en el caso del presente estudio (Tabla 3.2). A su vez, lo complementan la precipitación diaria máxima y cobertura de matorrales que, si bien son relevantes en las cuencas del sur de Chile, no logran generar una adecuada estimación de este parámetro.

Finalmente, en la Figura D.3.4 se comparan los caudales observados y los estimados mediante las dos técnicas de regresión consideradas. En esta Figura, se observan resultados adecuados en la reproducción de los caudales observados en el caso de los cuantiles de crecida y una subestimación de los caudales en el caso de la regresión de los parámetros de la GEV. Además, en la Tabla D.3.2 y Figura D.3.5 se presenta el indicador RMSNE, el cual aumenta con el periodo de retorno para ambas técnicas de regresión, pero en mayor medida para los parámetros de la GEV, indicando una menor calidad de predicción bajo esta técnica.

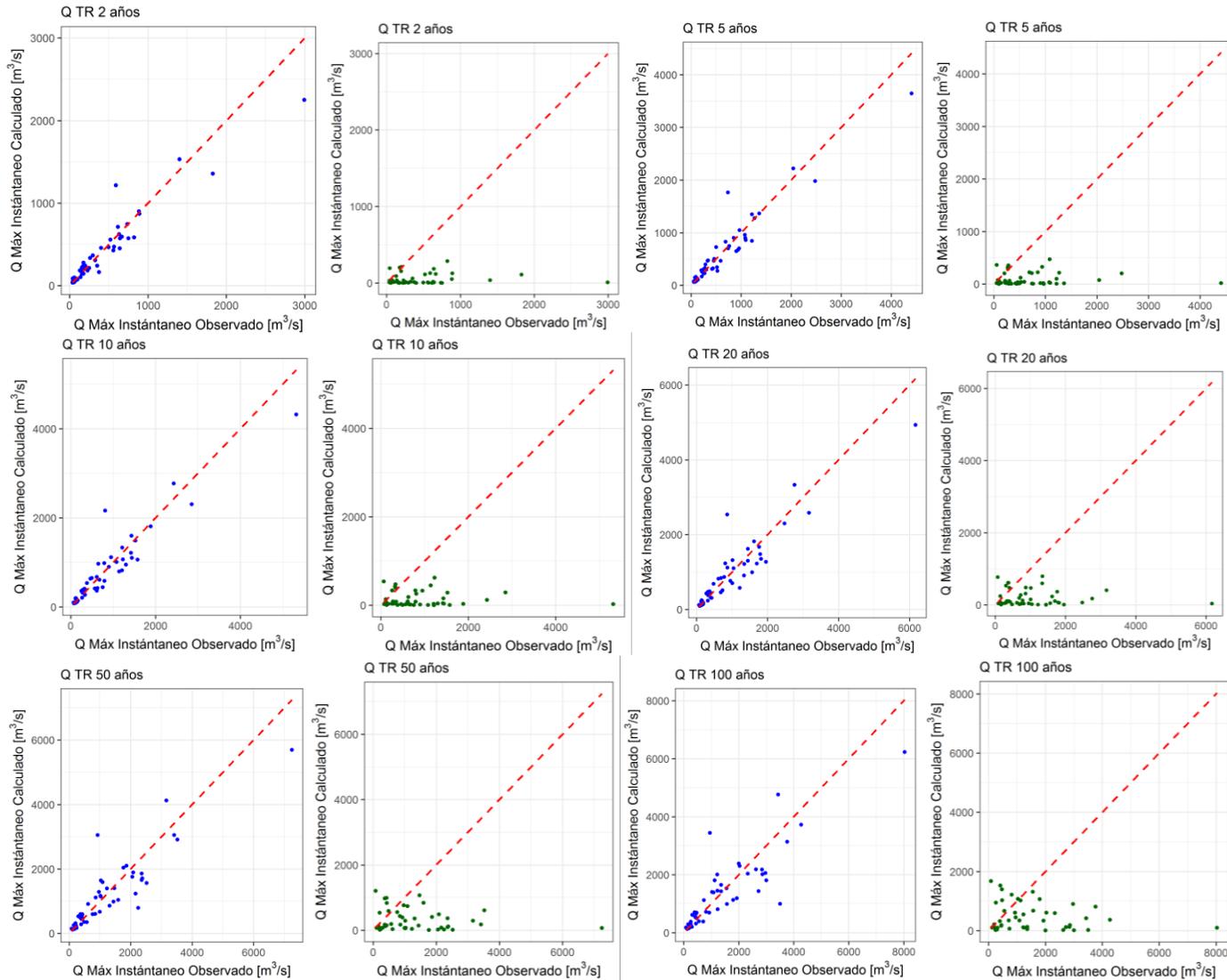


Figura D.3.4 Caudal modelado vs observado para los de regionalización de cuantiles de crecida (paneles 1 y 3 en azul) y parámetros de la GEV (paneles 2 y 4 en verde), para la Región 3 según zonas del método DGA-AC..

Tabla D.3.2 RMSNE modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la Región 3 según zonas del método DGA-AC.

Modelo de regionalización	Periodo de Retorno (años)					
	2	5	10	20	50	100
Cuantiles de crecidas	0,332	0,346	0,376	0,418	0,487	0,548
Parámetros de la GEV	0,992	1,126	1,301	1,568	2,118	2,742

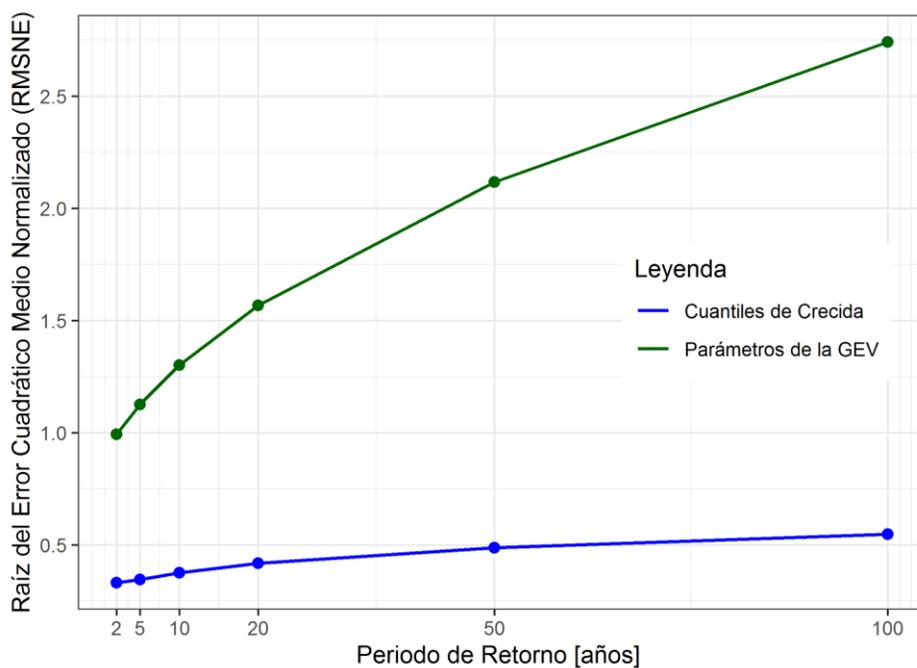


Figura D.3.5 RMSNE modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la Región 3 según zonas del método DGA-AC.

ANEXO E: RESULTADOS PARA CUENCAS AGRUPADAS MEDIANTE AGRUPACIÓN (CLUSTERING)

Anexo E.1: Grupo 1

Análisis exploratorio

Del análisis exploratorio realizado para la Región Clúster 1 cuyos coeficientes de correlación de Spearman para las variables dependientes se presentan en la Figura E.1.1 se desprende que:

- Los predictores que presentaron una buena correlación ($> 0,60$) con Q_{10} fueron el índice de aridez (-0,73), P_d^{10} y pendiente media (0,61). Por otro lado, dentro de los que presentaron una correlación baja ($< 0,40$) se destacan la elevación media (-0,38), tierras áridas (0,17) y área pluvial (-0,11).
- Los predictores que presentaron una buena correlación ($> 0,60$) con μ_{GEV} fueron el índice de aridez (-0,74) y pendiente media (0,67). Por otro lado, dentro de los que presentaron una correlación baja ($< 0,40$) se destacan: elevación media (-0,27), tierras áridas (0,17) y área pluvial (-0,17).
- Dentro de este clúster, se evidencia una alta correlación entre la precipitación diaria máxima e índice de aridez ($> 0,80$).

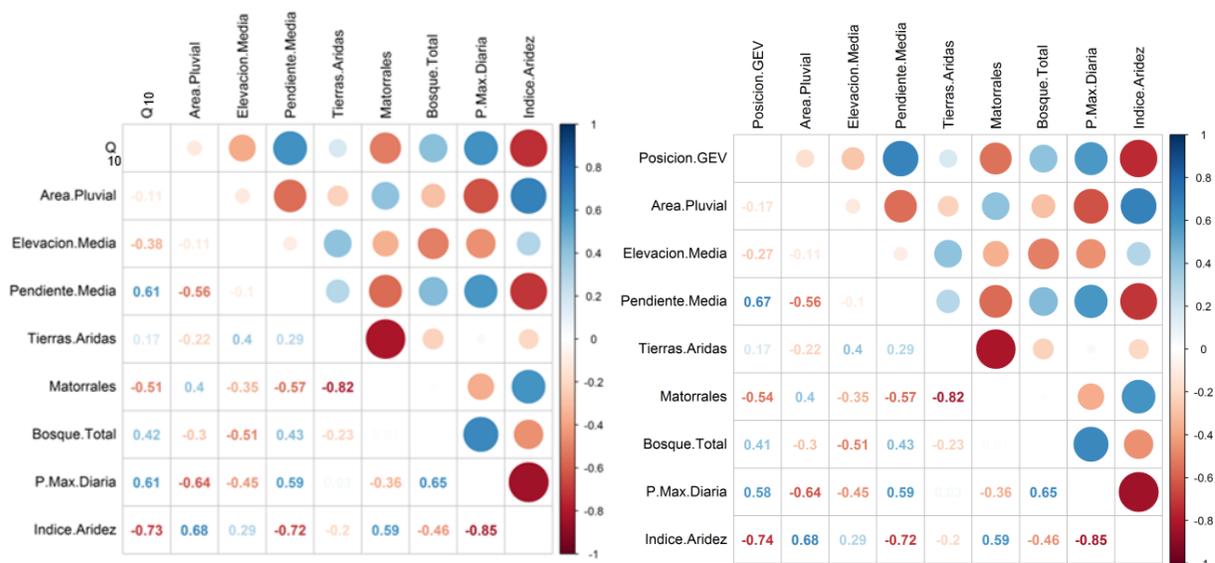


Figura E.1.1 Coeficientes de correlación de Spearman Q_{10} (izquierda) y Parámetro de Ubicación μ de la GEV (derecha) vs predictores, para la región Grupo 1.

Modelos de regionalización

Evaluación de modelos de regionalización

En la Figura E.1.2 y Figura E.1.3 se presentan los valores de los criterios de evaluación de los modelos de regresión según el número de predictores empleados para Q_{10} y μ_{GEV} , respectivamente. Los valores de $R^2_{ajustado}$ varían entre 0,45 y 0,95 para Q_{10} y entre 0,44 y 0,94 para μ_{GEV} , mientras que los valores de BIC son menores que cero, con máximos de -54 y -49 respectivamente. Finalmente, los valores del test error CV_k obtenidos mediante validación cruzada, se encuentran entre 0,14 y 1,29 para $Q_T = 10$ años y entre 0,16 y 1,34 para GEV (μ).

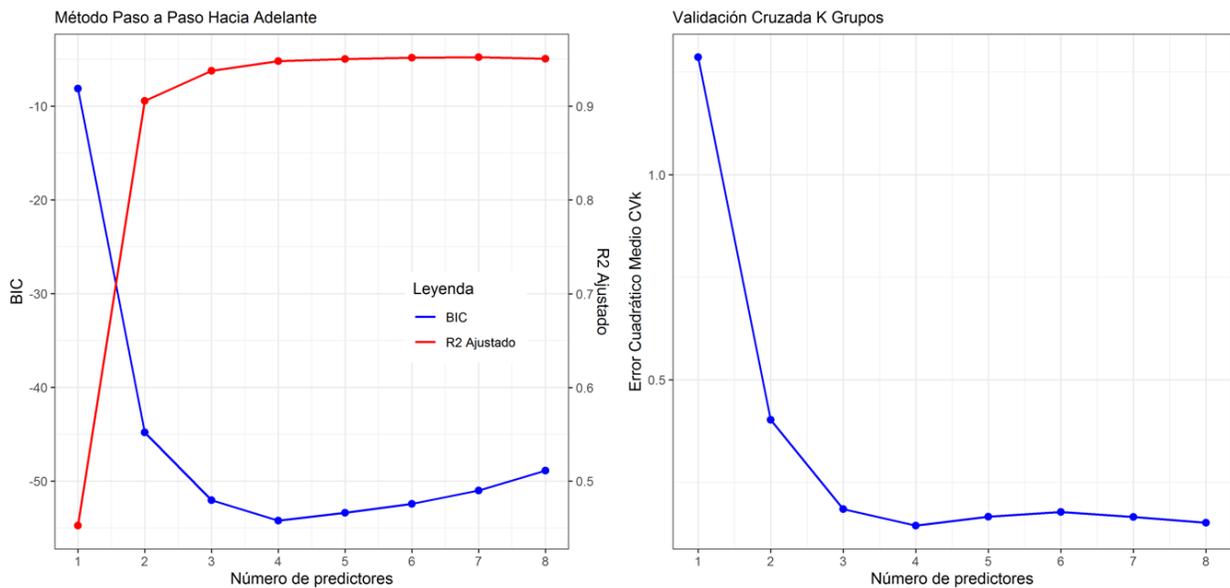


Figura E.1.2 Mejores modelos de regionalización de Q_{10} , según número de predictores, para la región Grupo 1

En estas Figuras es apreciable en los tres criterios de evaluación como mejoran sus resultados conforme aumenta el número de predictores, alcanzando su mejor valor para modelos de cuatro predictores, para después decaer ligeramente en sus resultados. Se seleccionan los modelos de tres predictores con un valor de $R^2_{ajustado}$ de 0,94 y $CV_k = 0,18$ en el caso de Q_{10} , y $R^2_{ajustado}$ de 0,90 y $CV_k = 0,24$ para el caso de GEV (μ). Finalmente, se indica que, para el resto de los cuantiles de crecida y parámetros de la GEV, los resultados fueron similares a los aquí presentados.

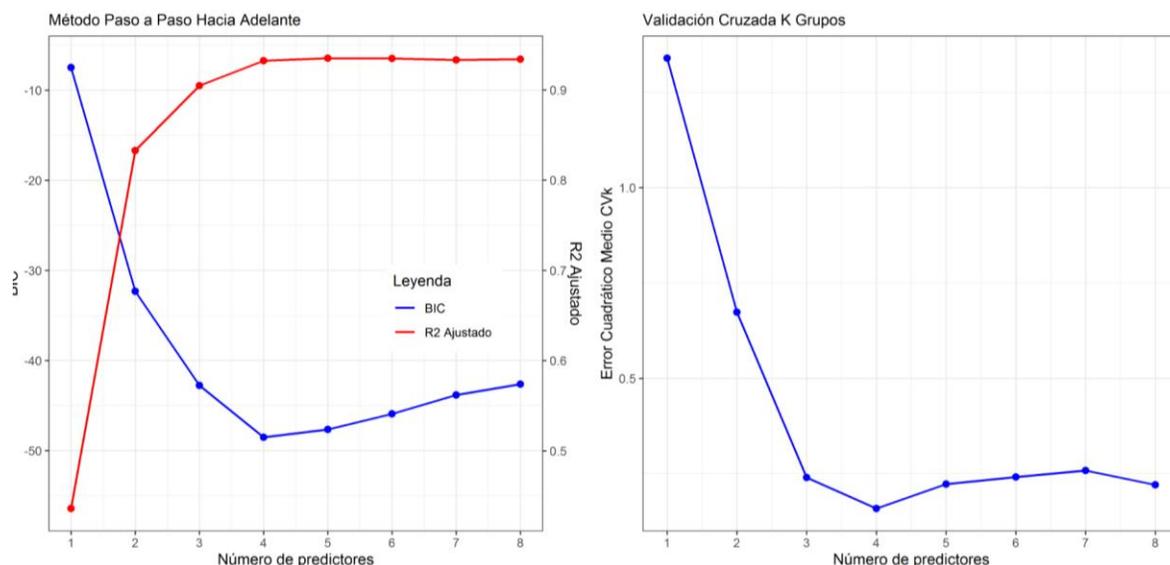


Figura E.1.3 Mejores modelos de regionalización del Parámetro de Ubicación μ de la GEV, según número de predictores, para la región Grupo 1

Selección de modelos de regionalización

En la Tabla E.1.1 se resumen los modelos de regresión de tres predictores seleccionados para todos los cuantiles de crecida y los parámetros de la GEV. Los resultados indican que, en el caso de los cuantiles de crecida, a medida que aumenta el periodo de retorno disminuye la calidad del ajuste de los modelos de regresión, por ejemplo, en el caso de $R^2_{ajustado}$ éste baja de 0,81 a 0,52, para 2 a 100 años de periodo de retorno respectivamente. Lo mismo sucede con los valores de CV_k , que aumentan de 0,38 a 1,05.

Por otro lado, para los parámetros de Posición (μ) y de Escala (σ) de la GEV, se obtienen valores de $R^2_{ajustado}$ de 0,90 y 0,92; y CV_k entre 0,15 y 0,24, comparables con los alcanzados para los cuantiles de crecida. Finalmente, es apreciable el bajo ajuste y, por tanto, alta incertidumbre en el caso del parámetro de Forma (ϵ) con un $R^2_{ajustado}$ de 0,41 y CV_k de 0,02.

Tabla E.1.1 Resumen modelos de regionalización seleccionados para la región Grupo 1 según método de agrupamiento

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV_k	$R^2_{ajust.}$	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 4,43^{-19} * A^{0,80} * Em^{5,22} * Ia^{0,94}$	0,24	0,90	-43
$\sigma = 1,71^{-8} * A^{0,72} * Sm^{3,13} * Ia^{-1,33}$	0,15	0,95	-56
$\epsilon = 1,49 + 0,00034 * Em + 0,2646 * Bos + 0,0068 * Ia$	0,02	0,41	-3
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 8,42^{-17} * A^{0,64} * Sm^{5,33} * P_2^{1,70}$	0,38	0,81	-28
$Q_5 = 6,17^{-19} * A^{0,63} * Sm^{5,62} * P_5^{2,47}$	0,37	0,81	-27
$Q_{10} = 1,48^{-21} * A^{0,61} * Sm^{6,29} * P_{10}^{2,97}$	0,43	0,77	-23
$Q_{20} = 9,27^{-25} * A^{0,58} * Sm^{7,42} * P_{20}^{3,18}$	0,56	0,70	-18
$Q_{50} = 7,75^{-28} * A^{0,51} * Sm^{9,29} * P_{50}^{2,48}$	0,84	0,59	-11
$Q_{100} = 3,94^{-27} * A^{0,49} * Sm^{10,17} * P_{100}^{1,15}$	1,05	0,52	-7

Los predictores que conforman las ecuaciones de regresión de los cuantiles de crecida se encuentran dentro de los de mayor incidencia en su generación (Blöschl et al., 2013), siendo estos el área, la precipitación máxima y la pendiente media. Se aprecia una alta influencia de la precipitación, con variaciones de sus exponentes entre 1,15 y 3,18. En cuanto al área sus exponentes se encuentran entre 0,64 y 0,49 reduciendo conforme aumenta el periodo de retorno acorde a lo expuesto en la literatura (Blösch & Sivapalan, 1997). Por último, los exponentes del predictor pendiente media entre 5,33 y 10,17 indicando una alta sensibilidad a este predictor.

En las regresiones de los parámetros de la GEV, se resalta que estos se encuentran conformados por los predictores que presentaron una mejor correlación con ellos (pendiente media y tierras áridas), complementándose con el área, que arrojó una negativa correlación; no obstante, en la ecuación de predicción su relación fue positiva, debido a la alta correlación que presentaron estos predictores entre sí.

Finalmente, en la Figura E.1.4 se presenta considerando como referencia la línea de 45°, la comparación de los caudales observados y los estimados. En esta Figura se observan resultados satisfactorios en la reproducción de los caudales observados bajo ambas técnicas de regresión. Adicionalmente, en la Tabla E.1.2 y Figura E.1.5 presenta el RMSNE, el cual crece para ambas técnicas de regresión en la medida que aumenta el periodo de retorno, pero en mayor medida para la técnica de regresión de cuantiles de crecida.

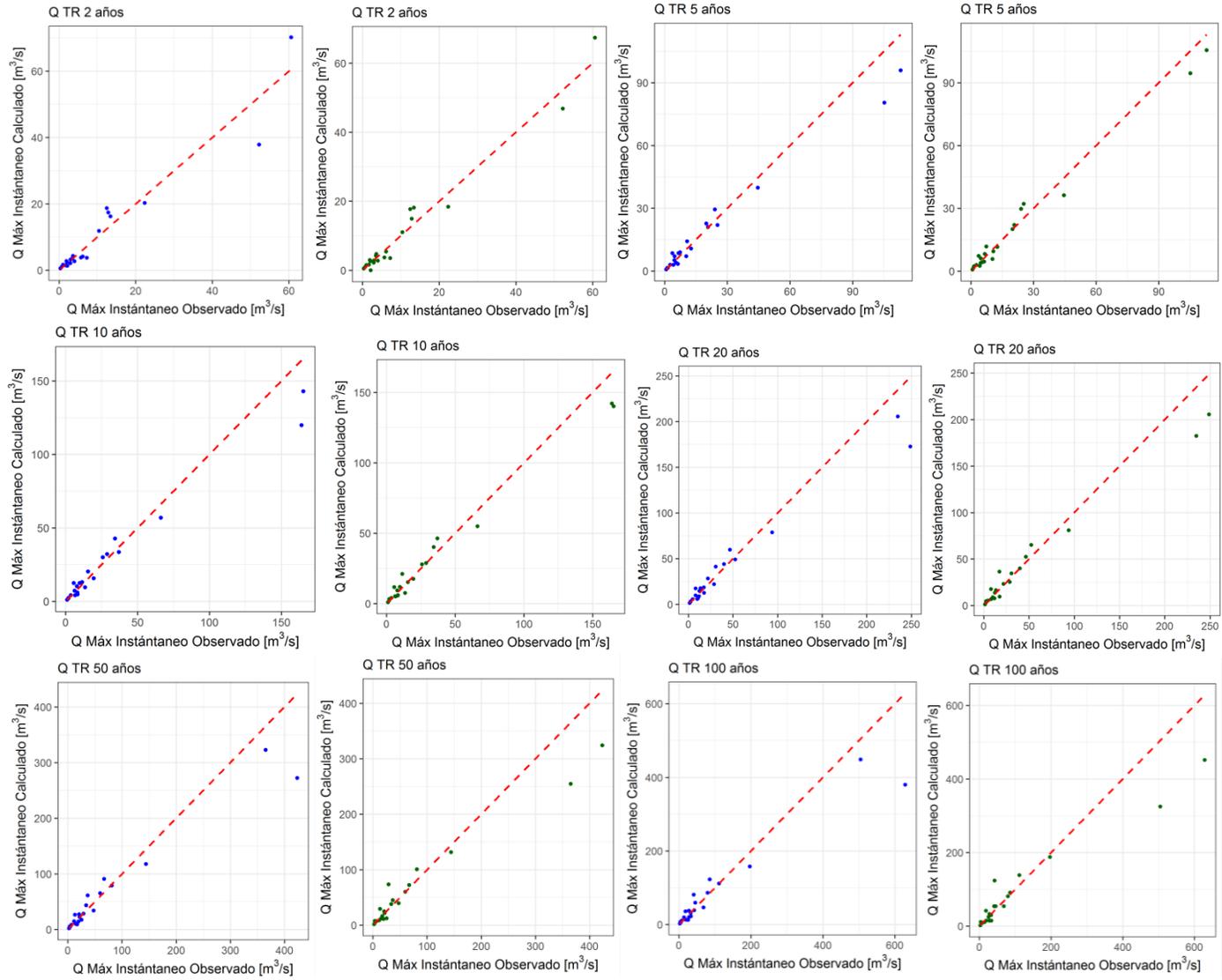


Figura E.1.4 Caudal calculado vs observado para los modelos seleccionados de regionalización de cuantiles de crecida (paneles 1 y 3 en azul) y parámetros de la GEV (paneles 2 y 4 en verde), para la región Grupo 1.

Tabla E.1.2 RMSNE modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la región Grupo 1

Modelo de regionalización	Periodo de Retorno (años)					
	2	5	10	20	50	100
Cuantiles de crecidas	0,629	0,615	0,649	0,741	0,954	1,084
Parámetros de la GEV	0,367	0,328	0,368	0,427	0,533	0,638

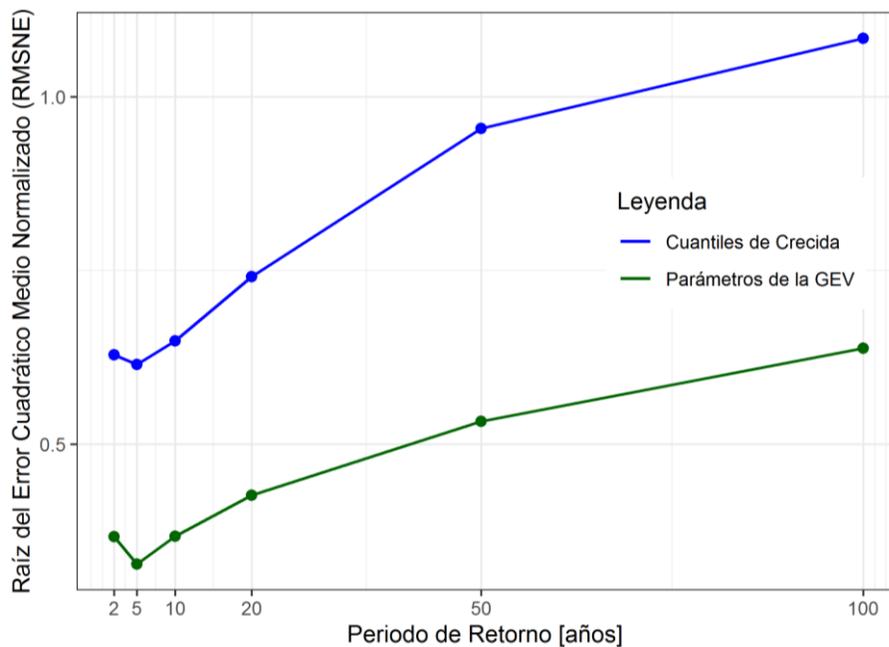


Figura E.1.5 RMSNE modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la región Grupo 1.

Anexo E.2: Grupo 2

Análisis exploratorio

Del análisis exploratorio realizado para la Región Grupo 2 y cuyos coeficientes de correlación de Spearman para las variables dependientes de ejemplo se presentan en la Figura E.2.1, se obtiene que:

- Los predictores que presentaron una buena correlación ($> 0,60$) con Q_{10} fueron P_d^{10} y cobertura de bosque total (0,74) e índice de aridez (-0,72). Por otro lado, dentro de los que presentaron una correlación baja ($< 0,40$) se destacan área pluvial (0,23) y pendiente media (0,12).
- Los predictores que presentaron una buena correlación ($> 0,60$) con μ_{GEV} fueron cobertura de bosque total (0,78), precipitación diaria máxima 10 años (0,77) e índice de aridez (-0,75). Por otro lado, dentro de los que presentaron una correlación baja ($< 0,40$) se destacan el área pluvial (0,18) y pendiente media (0,10).
- Para ambas variables dependientes consideradas como ejemplo, se evidencia una alta correlación entre los predictores ($> 0,80$): precipitación diaria máxima e índice de aridez.

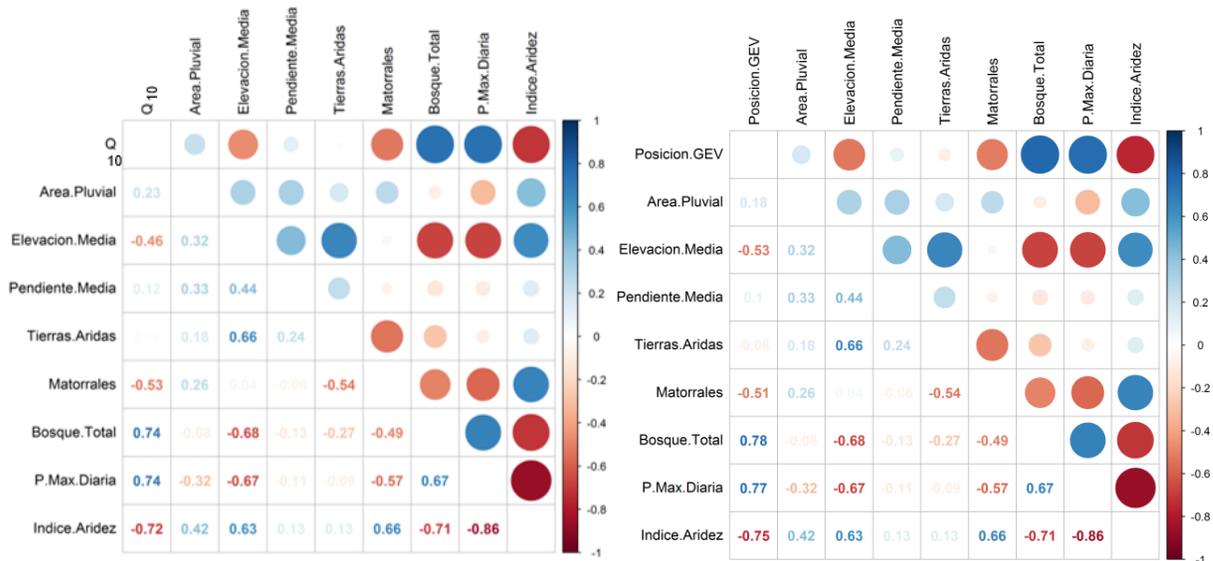


Figura E.2.1 Coeficientes de correlación de Spearman Q_{10} (izquierda) y Parámetro de Ubicación μ de la GEV (derecha) vs predictores, para la región Grupo 2.

Modelos de regionalización

Evaluación modelos de regionalización

En la Figura E.2.2 y Figura E.2.3 se presentan para el caso de Q_{10} y para μ_{GEV} , respectivamente, los valores de los criterios de evaluación de los modelos de regresión según el número de predictores empleados. Allí se presentan los valores de $R^2_{ajustado}$, los cuales varían entre 0,63 y 0,94 para Q_{10} y entre 0,70 y 0,94 para GEV (μ). Con respecto a los valores de BIC estos son menores que cero con máximos de -48 y -46 respectivamente. Finalmente, los valores del test error CV_k obtenidos mediante validación cruzada, se encuentran entre 0,25 y 1,21 para $Q_T = 10$ años y entre 0,41 y 1,44 para GEV (μ).

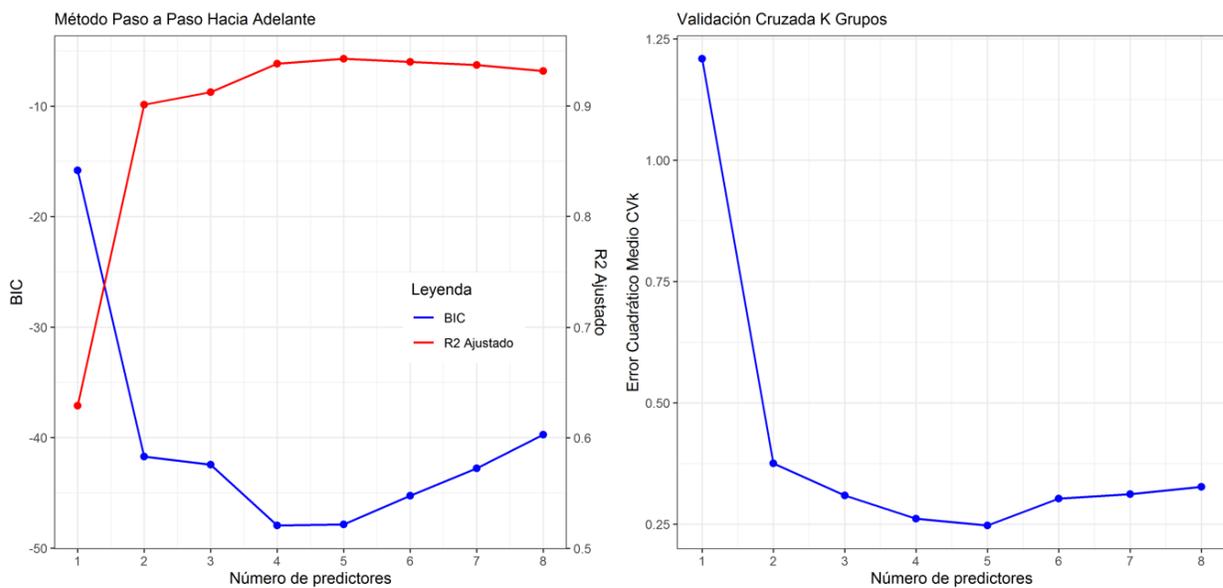


Figura E.2.2 Mejores modelos de regionalización de $Q_T = 10$ años, según número de predictores, para la Región 2 según método de agrupación

En estas Figuras es apreciable en los tres criterios de evaluación como mejoran sus resultados conforme aumenta el número de predictores, alcanzando su mejor valor para modelos de cuatro predictores, para después decaer ligeramente en sus resultados. Se seleccionan los modelos de tres predictores con un valor de $R^2_{ajustado}$ de 0,91 y $CV_k = 0,31$ en el caso de Q_{10} , y $R^2_{ajustado}$ de 0,91 y $CV_k = 0,55$ para el caso de μ_{GEV} , indicando en ambos casos un adecuado ajuste lineal en los modelos de regresión.

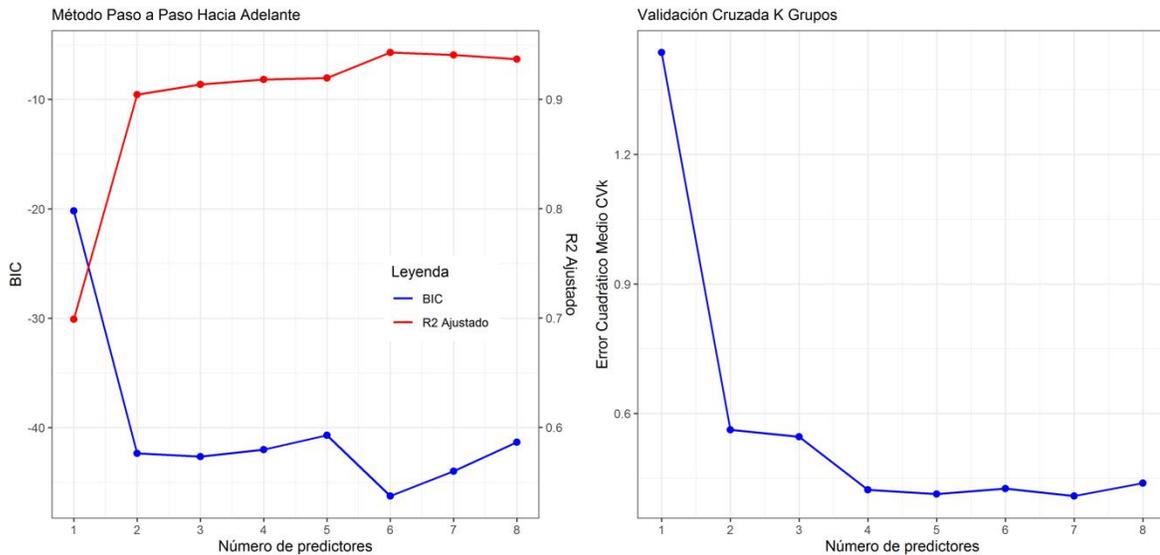


Figura E.2.3 Mejores modelos de regionalización del Parámetro de Ubicación μ de la GEV, según número de predictores, para la región Grupo 2.

Selección modelos de regionalización

En la Tabla E.2.1 se resumen los modelos de regresión de tres predictores seleccionados para todos los cuantiles de crecida y los parámetros de la GEV. Se indica que, en el caso del parámetro de escala de la GEV (ϵ) debido a que presenta valores negativos se probaron regresiones lineales con valores normalizados y valores naturales, obteniendo con esta última, mejores resultados en los criterios de evaluación.

En esta Tabla, se evidencia en el caso de los cuantiles de crecida que, a medida que aumenta el periodo de retorno, disminuye la calidad del ajuste de los modelos de regresión, aunque marginal. Por ejemplo, $R^2_{ajustado}$ baja de 0,91 a 0,87, al pasar de 2 a 100 años de periodo de retorno.

Por otro lado, en el caso de los parámetros de la GEV se nota la buena calidad de los ajustes para los parámetros de posición (μ) y de escala (σ), con valores de $R^2_{ajustado}$ en ambos casos de 0,91; y CV_k entre 0,44 y 0,55, resultados comparables con los alcanzados para los cuantiles de crecida. Finalmente, es apreciable el buen ajuste, aunque menor en el caso del parámetro de forma (ϵ) con un $R^2_{ajustado}$ de 0,66 y CV_k de 0,04.

Tabla E.2.1 Resumen modelos de regionalización seleccionados para la región Grupo 2.

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV _k	R ² _{ajust.}	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 5,82^{-11} * A^{0,91} * Bos^{0,23} * P_{10}^{4,61}$	0,55	0,91	-43
$\sigma = 6,97^{-9} * A^{0,96} * P_{10}^{3,58} * Ia^{-0,57}$	0,44	0,91	-41
$\varepsilon = 0,02112 + 0,00037 * Em - 0,00200 * Sm + 0,03116 * Ia$	0,04	0,66	-13
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 7,99^{-7} * A^{1,02} * Bos^{0,25} * P_2^{2,80}$	0,46	0,91	-42
$Q_5 = 1,29^{-8} * A^{0,96} * Bos^{0,16} * P_5^{3,77}$	0,34	0,91	-42
$Q_{10} = 8,41^{-10} * A^{0,95} * Mat^{-0,49} * P_{10}^{4,73}$	0,31	0,91	-42
$Q_{20} = 6,51^{-10} * A^{0,90} * Mat^{-0,68} * P_{20}^{4,93}$	0,28	0,91	-42
$Q_{50} = 1,39^{-9} * A^{0,84} * Mat^{-0,95} * P_{50}^{4,99}$	0,28	0,89	-38
$Q_{100} = 7,18^{-9} * A^{0,80} * Mat^{-1,16} * P_{100}^{4,82}$	0,32	0,87	-33

*Unidades y nomenclatura según Tabla 3.1

Los predictores que conforman las ecuaciones de regresión de los cuantiles de crecida lo conforman el área, la Precipitación diaria máxima y un parámetro de cobertura: bosque total para periodos de retorno menores o iguales a 5 años y cobertura de matorrales para mayores. Se aprecia una alta influencia de la precipitación, con variaciones de sus exponentes entre 2,80 y 4,99. En cuanto al área, sus exponentes se encuentran entre 1,02 y 0,80, reduciendo conforme aumenta el periodo de retorno.

En las regresiones de los parámetros de la GEV, se resalta que estos se encuentran conformados por los predictores que presentaron una mejor correlación con ellos, siendo estos P_d^{10} , cobertura de bosque total y el índice de aridez; sin embargo, se complementaron con el área, predictor que arrojó baja correlación.

Finalmente, en la Figura E.2.4 se comparan los caudales observados y los estimados con los modelos de regresión. En esta Figura se observan resultados aceptables en la reproducción de los caudales observados bajo ambas técnicas de regresión. Adicionalmente, en la Tabla E.2.2 y Figura E.2.5 presenta el indicador RMSNE, el cual alcanza un mínimo para el periodo de retorno de 20 años y posteriormente crece para ambas técnicas de regresión en la medida que aumenta el periodo de retorno, pero en mayor medida para la técnica de regresión de cuantiles de crecida.

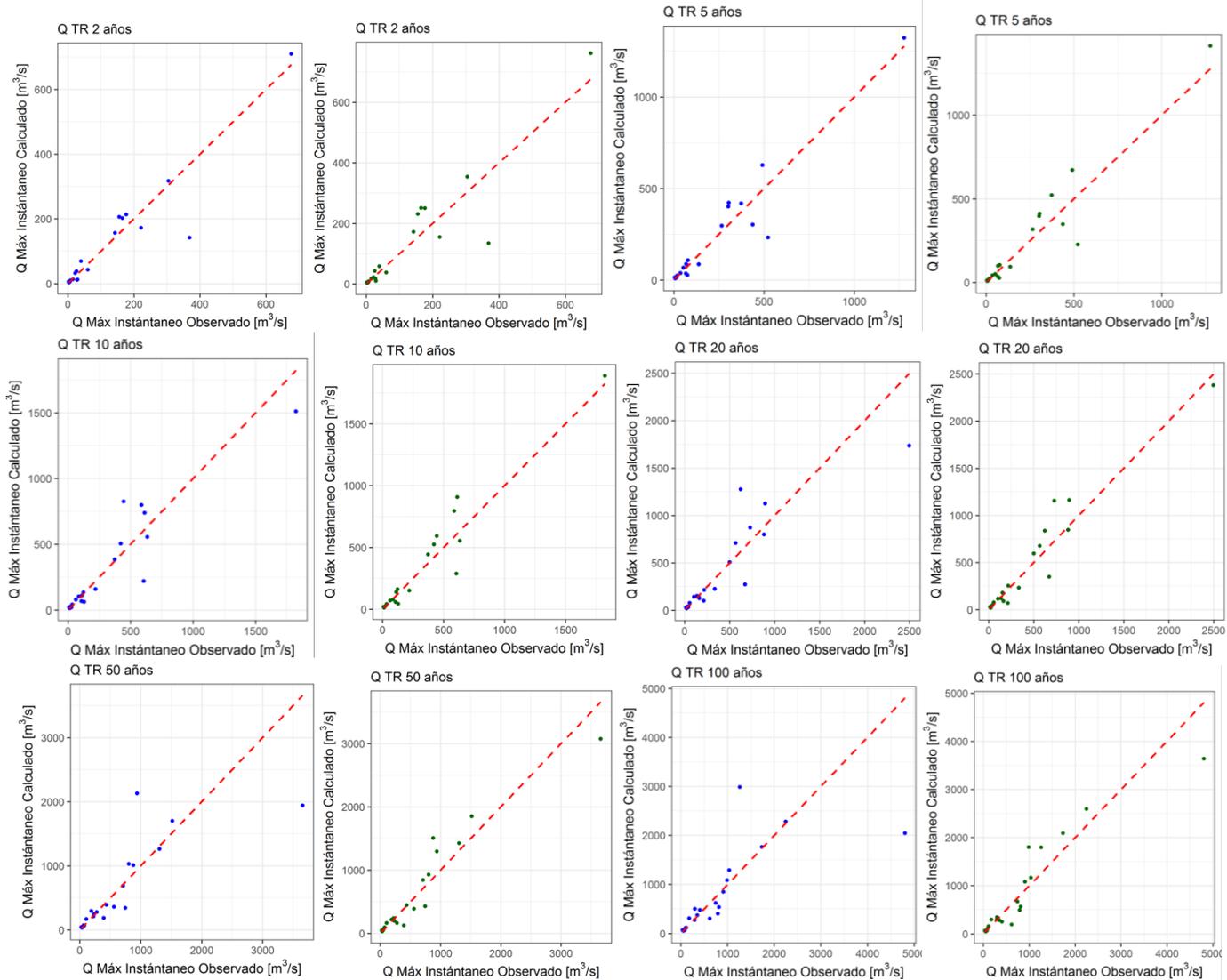


Figura E.2.4 Caudal calculado vs observado para los modelos seleccionados de regionalización de cuantiles de crecida (paneles 1 y 3 en azul) y parámetros de la GEV (paneles 2 y 4 en verde), para la región Grupo 2.

Tabla E.2.2 RMSNE modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la región Grupo 2.

Modelo de regionalización	Periodo de Retorno (años)					
	2	5	10	20	50	100
Cuantiles de crecidas	0,483	0,441	0,415	0,413	0,442	0,473
Parámetros de la GEV	0,458	0,411	0,384	0,368	0,371	0,393

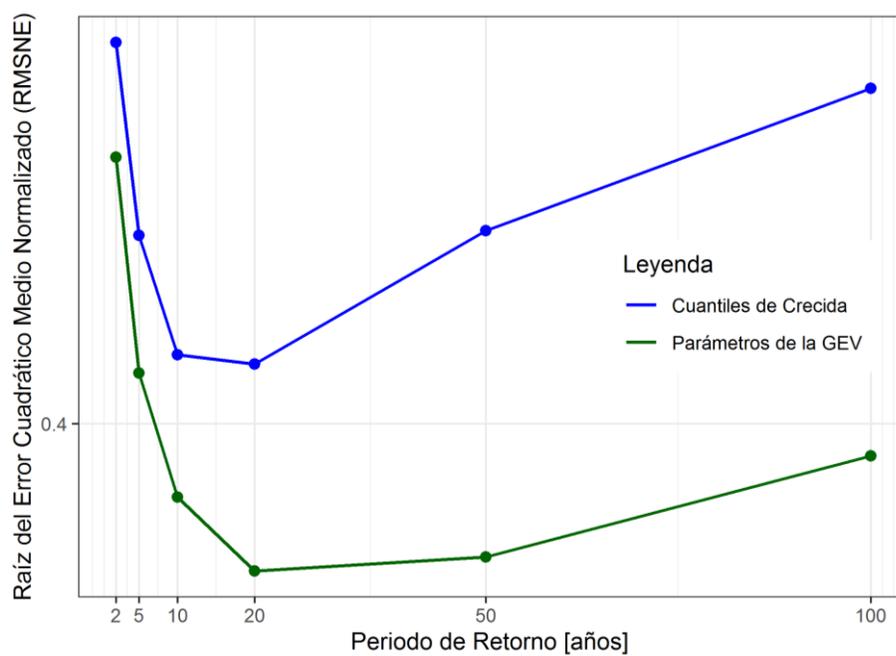


Figura E.2.5 RMSNE modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la región Grupo 2.

Anexo E.3: Grupo 3

Análisis exploratorio

Del análisis exploratorio realizado para la región homogénea Grupo 3, cuyos coeficientes de correlación de Spearman para las variables dependientes de ejemplo se presentan en la Figura E.3.1, se desprende que:

- Los predictores que presentaron una buena correlación ($> 0,60$) con Q_{10} fueron: área (0,80) y tierras áridas (0,62). Por otro lado, dentro de los que presentaron una correlación baja ($< 0,40$) se destacan: P_{10} (0,24), pendiente media (0,13) y cobertura bosque total (-0,20).
- El predictor que presentó una mejor correlación ($> 0,60$) con μ_{GEV} fue el área (0,80). Por otro lado, dentro de los que presentaron una correlación baja ($< 0,40$) se destacan P_{10} (0,16) y pendiente media (0,09).
- Para ambas variables dependientes consideradas como ejemplo se evidencia una alta correlación (0,79) entre los predictores elevación media y pendiente media.

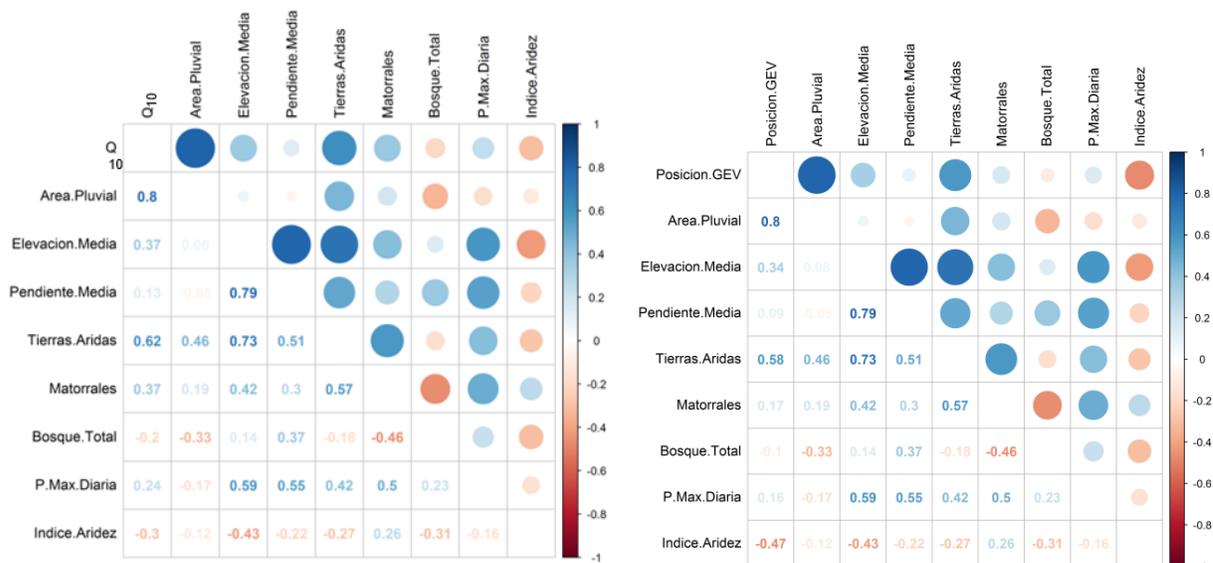


Figura E.3.1 Coeficientes de correlación de Spearman Q_{10} (izquierda) y Parámetro de Ubicación μ de la GEV (derecha) vs predictores, para la región Grupo 3.

Modelos de regionalización

Evaluación de modelos de regionalización

En la Figura E.3.2 y Figura E.3.3 se presentan para el caso de Q_{10} y μ_{GEV} , respectivamente, los valores de los criterios de evaluación de los modelos de regresión según el número de predictores. Allí se presentan los valores de $R^2_{ajustado}$, los cuales varían entre 0,70 y 0,91 para Q_{10} y entre 0,69 y 0,94 para μ_{GEV} . Con respecto a los valores de BIC estos son menores que cero con máximos de -48 y -46 respectivamente.

Finalmente, los valores del test error CV_k obtenidos mediante validación cruzada, se encuentran entre 0,12 y 0,33 para Q_{10} y entre 0,09 y 0,41 para μ_{GEV} .

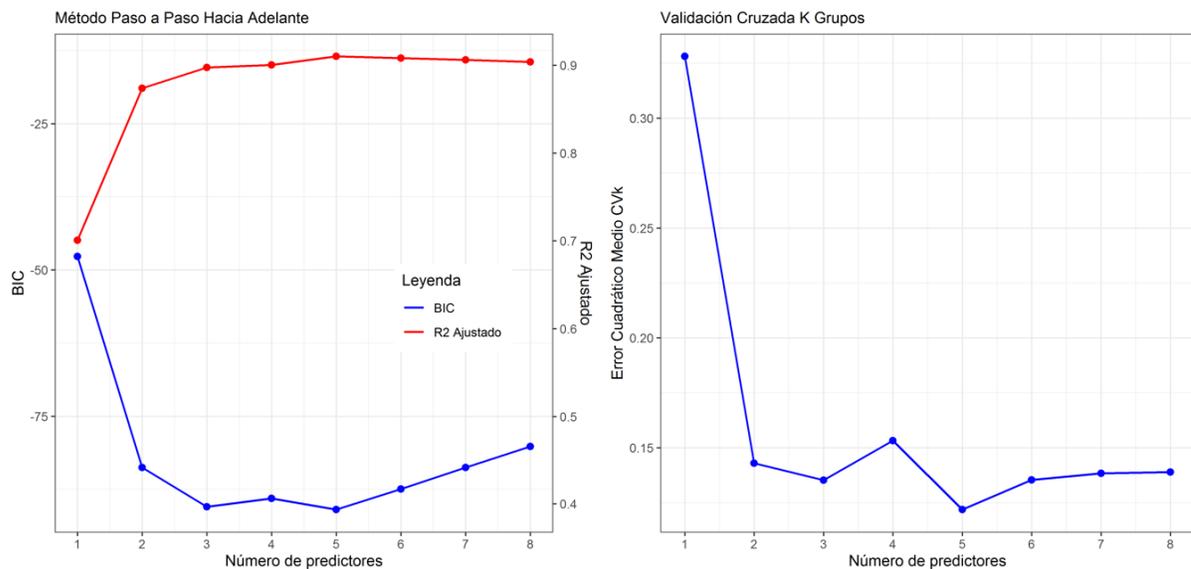


Figura E.3.2 Mejores modelos de regionalización de $Q_T = 10$ años, según número de predictores, para la Región 3 según método de agrupación

En estas Figuras es apreciable en los tres criterios de evaluación como mejoran sus resultados conforme aumenta el número de predictores, alcanzando su mejor valor para modelos en torno a tres y cinco predictores según el criterio considerado, para después decaer ligeramente en sus resultados. Se seleccionan los modelos de tres predictores con un valor de $R^2_{ajustado}$ de 0,90 y $CV_k = 0,14$ en el caso de Q_{10} y $R^2_{ajustado}$ de 0,94 y $CV_k = 0,09$ para el caso de μ_{GEV} , indicando en ambos casos un adecuado ajuste lineal en los modelos de regresión. Finalmente, se indica que, para el resto de los cuantiles de crecida y parámetros de la GEV, los resultados fueron similares a los aquí presentados.

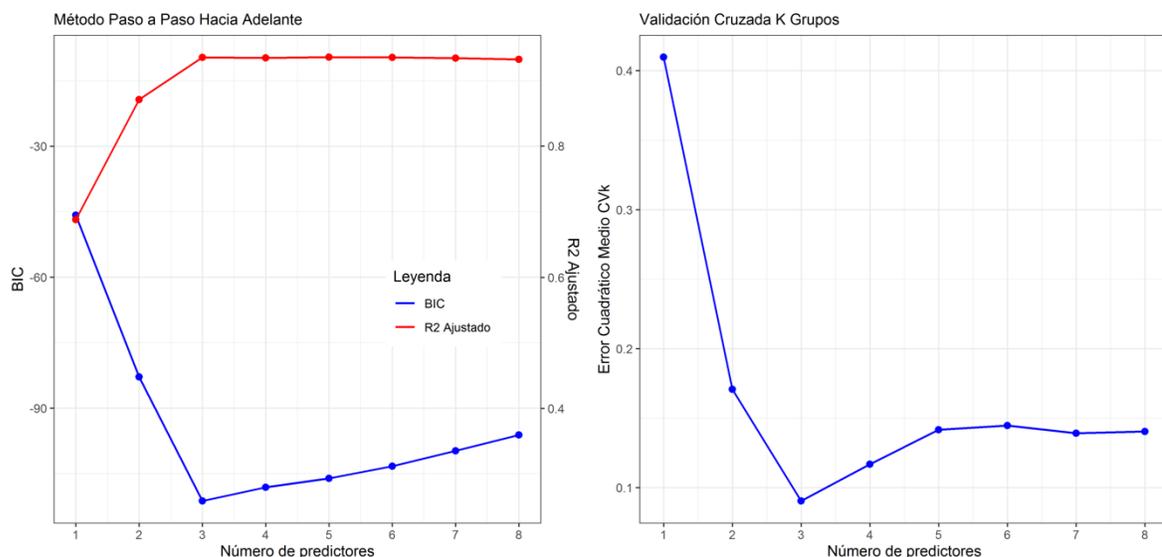


Figura E.3.3 Mejores modelos de regionalización del Parámetro de Ubicación μ de la GEV, según número de predictores, para la Región 3 según método de agrupación

Selección de modelos de regionalización

En la Tabla E.3.1 se resumen los modelos de regresión de tres predictores seleccionados para todos los cuantiles de crecida y los parámetros de la GEV. En esta Tabla, se muestra en el caso de los cuantiles de crecida que a medida que aumenta el periodo de retorno, disminuye la calidad del ajuste de los modelos de regresión, aunque marginal, por ejemplo, en el caso de $R^2_{ajustado}$ éste baja de 0,94 a 0,80, para 2 a 100 años de periodo de retorno respectivamente.

Por otro lado, en el caso de los parámetros de la GEV se nota la buena calidad de los ajustes para el caso de los parámetros de posición (μ) y de escala (σ), con valores de $R^2_{ajustado}$ de 0,94 y 0,89, respectivamente; y CV_k entre 0,09 y 0,13, resultados comparables con los alcanzados para los cuantiles de crecida. Finalmente, es apreciable el bajo ajuste y, por tanto, alta incertidumbre en el caso del parámetro de forma (ϵ) con un $R^2_{ajustado}$ de 0,38 y CV_k de 0,05.

Tabla E.3.1 Resumen modelos de regionalización seleccionados para la región Grupo 3.

Ecuación de Regresión	Estadísticos de evaluación del modelo		
	CV_k	$R^2_{ajust.}$	BIC
Parámetros de la GEV			
$\mu = 2,77^{-4} * A^{0,90} * P_{10}^{1,62} * Ia^{-0,93}$	0,09	0,94	-111
$\sigma = 9,50^{-6} * A^{0,89} * P_{10}^{2,28} * Ia^{-0,41}$	0,13	0,89	-88
$\epsilon = 0,49655 - 0,0003 * A + 0,00396 * P_{10} + 0,24922 * Ia$	0,05	0,38	-9
Cuantiles de crecidas			
$Q_2 = 1,56^{-4} * A^{0,89} * P_2^{1,98} * Ia^{-0,56}$	0,08	0,94	-113
$Q_5 = 6,17^{-5} * A^{0,89} * P_5^{2,20} * Ia^{-0,43}$	0,10	0,92	-101
$Q_{10} = 3,67^{-5} * A^{0,89} * P_5^{2,32} * Ia^{-0,35}$	0,14	0,90	-90
$Q_{20} = 4,03^{-5} * A^{0,86} * Em^{0,29} * P_{20}^{1,95}$	0,17	0,87	-79
$Q_{50} = 2,59^{-5} * A^{0,85} * Em^{0,33} * P_{50}^{2,01}$	0,19	0,84	-70
$Q_{100} = 1,46^{-5} * A^{0,84} * Em^{0,35} * P_{100}^{2,11}$	0,24	0,80	-64

Los predictores que componen las ecuaciones de regresión de los cuantiles de crecida, además del área y la P_{TR} , lo es la elevación media, para periodos de retorno mayores o iguales a 20 años, y el índice de aridez para menores. Se aprecia una mayor influencia de la precipitación, sin embargo, con pocas variaciones en los valores de sus exponentes, siendo estos entre 1,98 y 2,32. En cuanto al área sus exponentes presentan decrecimiento conforme aumenta el periodo de retorno y una poca variación con valores entre 0,84 y 0,89. Con respecto al tercer predictor que acompaña el modelo de regresión es de notar que presenta una mayor influencia con valores de exponentes que fluctúan entre 0,35 y - 0,56, siendo positiva la relación con la elevación media y negativa con el índice de aridez, comportamiento en general esperado de acuerdo la literatura.

En cuanto a las regresiones de los parámetros de la GEV se destaca la alta concordancia que estas presentan respecto a las regresiones de los cuantiles de crecida, en cuanto a los predictores y los valores de los exponentes de estos que las conforman, incluso para el parámetro de forma (ϵ). Además, se destaca que para este caso los mismos tres predictores predicen el comportamiento de los tres parámetros de la GEV (área, P_d^{10} e índice aridez).

Finalmente, en la Figura E.3.4 se comparan los caudales observados y los estimados. En esta Figura se observan resultados aceptables en la reproducción de los caudales observados bajo ambas técnicas de regresión. Adicionalmente, en la Tabla E.3.2 y Figura E.3.5 presenta el indicador RMSNE, los cuales presentan valores similares hasta periodos de retorno de 20 años y posteriormente crece para ambas técnicas de regresión en la medida que aumenta el periodo de retorno, pero en mayor medida para la técnica de regresión de los parámetros de la GEV.

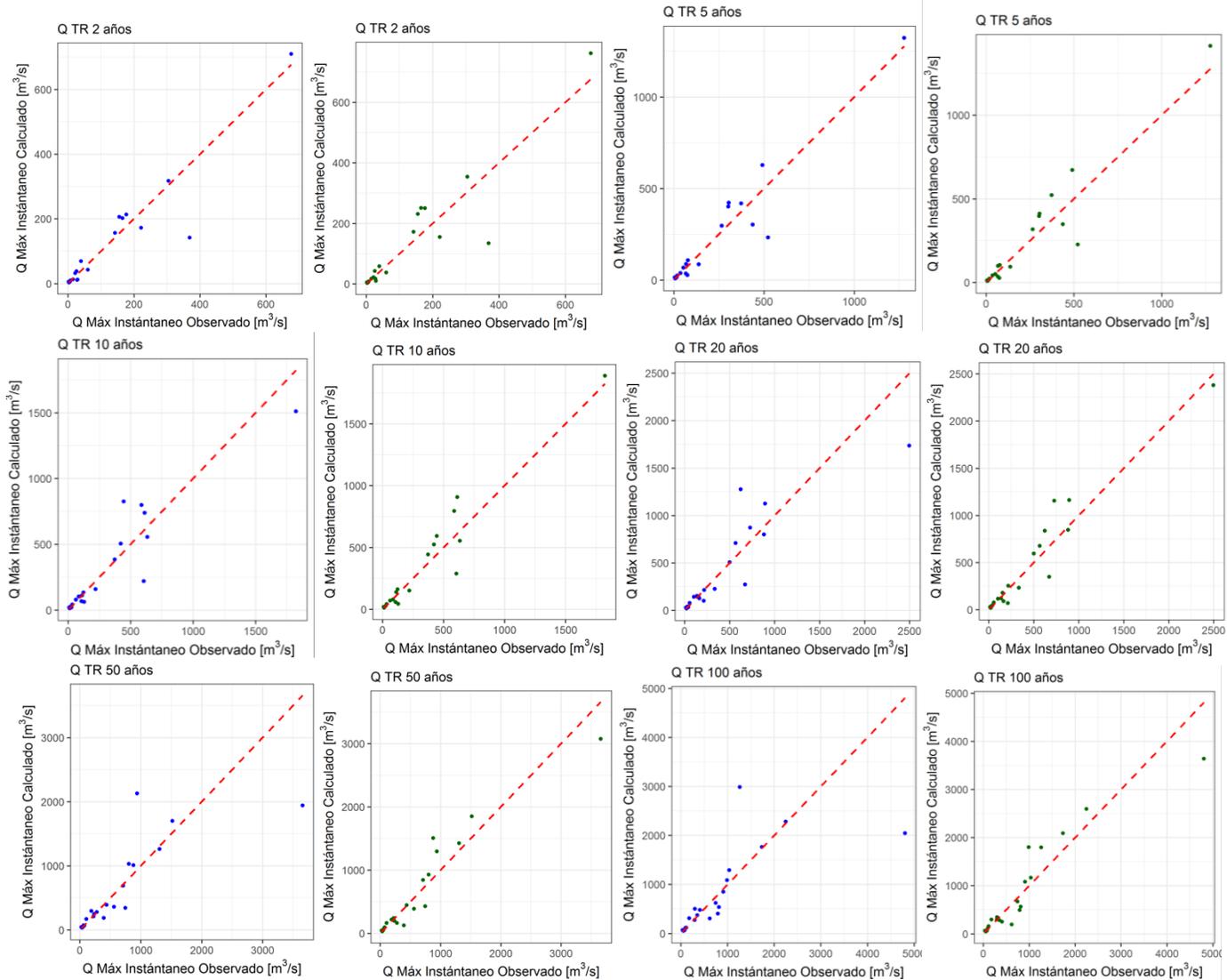


Figura E.3.4 Caudal calculado vs observado para los modelos seleccionados de regionalización de cuantiles de crecida (paneles 1 y 3 en azul) y parámetros de la GEV (paneles 2 y 4 en verde), para la región Grupo 3.

Tabla E.3.2 RMSNE modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la región Grupo 3.

Modelo de regionalización	Periodo de Retorno (años)					
	2	5	10	20	50	100
Cuantiles de crecidas	0,314	0,362	0,407	0,438	0,493	0,561
Parámetros de la GEV	0,328	0,367	0,408	0,459	0,542	0,616

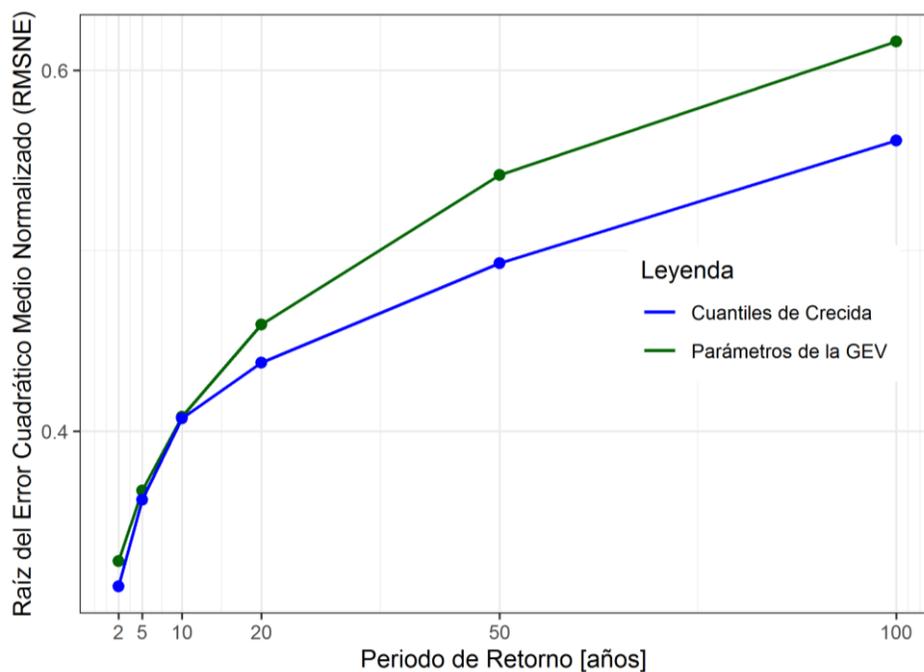


Figura E.3.5 RMSNE modelos de regionalización de cuantiles de crecida y de parámetros de la GEV, para la región Grupo 3.

ANEXO F: ANEXO DIGITAL

Anexo F.1: Gráficos de Dispersión y Correlación Para Todos los Periodos de Retorno y Parámetros de la GEV