



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

ESTUDIO DE TENDENCIAS DE CAUDALES EXTREMOS EN CUENCAS EN RÉGIMEN NATURAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.

DANIEL ALEJANDRO OSORIO ÁLVAREZ.

PROFESOR GUÍA:
Miguel Lagos Zúñiga.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Pablo Mendoza Zúñiga
Ximena Vargas Mesa

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: DANIEL ALEJANDRO OSORIO ÁLVAREZ.
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: Miguel Lagos Zúñiga

ESTUDIO DE TENDENCIAS DE CAUDALES EXTREMOS EN CUENCAS EN RÉGIMEN NATURAL

Ante los recientes cambios observados en las precipitaciones extremas a lo largo del país, junto con una tendencia al alza de temperaturas debido al cambio climático, es necesario revisar la existencia de cambios en caudales para periodos de otoño/invierno y primavera/verano, y su estacionalidad en cuencas con baja intervención humana para el periodo 1978-2018.

En un comienzo, se realizó una base de datos de caudales medios diarios para 158 estaciones con régimen natural. Luego, se realizó un análisis y cuantificación de tendencias de caudales máximos medios diarios para los meses de invierno y verano. Posteriormente, para el estudio de cambios en la estacionalidad, se estudió el centro de gravedad del hidrograma promedio como también cambios de índices hidrológicos como el DOYMIN, DOYMAX (correspondiente al día donde ocurre el mínimo y máximo caudal en el año, respectivamente) y el índice de GINI. Con el fin de identificar puntos de cambio en las series de caudales medios diarios máximos, se realizó el test de *Change Point Analysis*. Finalmente, para aquellas cuencas que mostraron una tendencia significativa ($p_{valor} \leq 0.05$) se realizó un análisis de frecuencia considerando cinco modelos estacionarios: Gamma, Lognormal, Normal, Weibull y Valor Extremo Generalizado (GEV por sus siglas en inglés); y tres modelos no estacionarios basados en la distribución GEV, considerando como covariable el tiempo.

Los resultados mostraron que 25 estaciones presentaron tendencias significativas durante el invierno: 15 estaciones con tendencias negativas, con pendientes de Sen estandarizadas entre -0.02 y -0.17 [-/año] y 10 estaciones registraron tendencias positivas con magnitudes estandarizadas de 0.03 hasta los 0.23 [-/año]. Para el caso de verano, 12 estaciones presentaron cambios significativos, de las cuales 10 presentan tendencias negativas (-0.01 a -0.05 [-/año]) y 2 estaciones presentan tendencias positivas (0.07 a 0.1 [-/año]). La zona central (30- 40°S) presentó tendencias decrecientes tanto para el invierno como verano, en cambio, la zona sur y austral (40- 55°S) presentaron aumento en sus caudales para ambos periodos. Para el estudio de cambios de estacionalidad, se detectó un adelantamiento de 10 a 15 días en cuencas ubicadas entre 30°- 35°S y un atraso entre 14 y 20 días en cuencas ubicadas en el sur (45- 55° S). El análisis de frecuencia entregó en algunos casos diferencias positivas (de hasta 400 %) y diferencias negativas (de magnitudes cercanas al -80 %) para la comparación entre modelos estacionarios y no estacionarios.

Se concluye que se han presentado cambios en las tendencias de caudales extremos, que estarían asociados a los recientes reportes de cambios en las tendencias de precipitaciones extremas, como también variación en la estacionalidad de las cuencas debido a cambios de la disponibilidad de lluvias y nieve. Finalmente, la incorporación del enfoque no estacionario en el análisis de las series puede determinar diseños más conservadores u holgados, que los que se obtendrían desde un enfoque estacionario tradicional.

Nada es imposible,

.....

Nicolás Massú

Agradecimientos

A mi madre por su apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida y por su cariño en el día a día.

A mi padre, por apoyarme en cada decisión y por sus enseñanzas que me acompañarán toda la vida.

A mis hermanos, mi familia y la tía Carmen, por cada una de las vivencias, experiencias y recuerdos.

A Bárbara a quién agradezco infinitamente el cariño, apoyo y comprensión.

A los Civiperros, porque con ellos la experiencia universitaria se volvió una época dorada.

A los mosqueteros, Nico y Diego, por ser mis hermanos de distinta sangre.

A mi profesor guía Miguel Lagos, por su ayuda incondicional para la realización de este trabajo. Gracias por compartir su calidad profesional y humana. A los amigos de la salita hidráulica, por los buenos momentos que vivimos este año. A Eduardo por siempre estar dispuesto para ayudar. A los profesores de la comisión, Pablo Mendoza y Ximena Vargas por sus valiosos comentarios.

Finalmente, agradecer a cada una de las personas que conocí en esta etapa universitaria.

Tabla de Contenido

1. Introducción.	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General.	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances.	2
2. Marco Teórico.	3
2.1. Herramientas para detectar y cuantificar tendencias.	5
2.2. Análisis de Frecuencias.	8
3. Metodología Experimental	11
3.1. Recopilación de datos, estudio de tendencias, cambios hidrológicos y análisis de frecuencia.	12
3.1.1. Estaciones seleccionadas	12
3.1.2. Generación de serie de datos ponderados	13
3.1.3. Datos de eventos extremos (Caudales medios diarios extremos estacionales)	16
3.1.4. Datos Estacionales	17
3.1.5. Análisis de Frecuencia.	17
4. Resultados	19
4.1. Resultados de estudio de tendencias	19
4.2. Resultados de estudio de estacionalidad	23
5. Análisis de frecuencias con enfoque estacionario y no estacionario.	43
5.1. Análisis de Frecuencia Periodo Otoño/Invierno	43
5.2. Análisis de Frecuencia Periodo Primavera/Verano.	48
6. Discusión.	53
6.1. Análisis de tendencias de caudales extremos.	53
6.2. Cambios de estacionalidad y change point analysis	55
6.3. Análisis de Frecuencia.	56
7. Conclusiones.	61
Bibliografía	63

Anexos	66
Anexo A. Estudio de tendencias	66
A.1. Estaciones seleccionadas	66
Anexo B. Análisis de Frecuencia	69
B.1. Métricas de modelos estacionarios y no estacionarios periodo de invierno. . .	69
B.2. Métricas de modelos estacionarios y no estacionarios periodo de verano. . .	77

Índice de Tablas

2.1.	Resumen de distribuciones utilizadas para modelar serie de caudales extremos en este estudio.	9
4.1.	Estaciones con tendencias estadísticamente significativas en periodo otoño/invierno.	22
4.2.	Estaciones con tendencias estadísticamente significativas en periodo primavera/verano.	23
4.3.	Tabla resumen cambios de CG. Descripción de periodos 1 y 2 para cada cuenca y la diferencia en días del cambio del CG entre cada periodo.	25
4.4.	Resultados Change Point Analysis periodo otoño/invierno.	37
4.5.	Resultados Change Point Analysis periodo primavera/verano.	37
A.1.	Estaciones seleccionadas	66
B.1.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Estero Derecho en Alcohuaz.	69
B.2.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Estero Culebrón en el Sifón.	69
B.3.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Mostazal en Carén	70
B.4.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Rapel en Junta	70
B.5.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Alicahue en Colliguay .	70
B.6.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Palos en Junta con Colorado	71
B.7.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Perquilauquén en San Manuel	71
B.8.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Longaví en El Castillo .	71
B.9.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Putagán en Yervas Buenas	72
B.10.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Estero Los Puercos en puente Los Puercos	72
B.11.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Itata en Balsa Nueva Aldea	72
B.12.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Andalién camino a Penco	73
B.13.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Duqueco en Villucura .	73
B.14.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Mininco en Longitudinal	73
B.15.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Cholchol en Cholchol . .	74
B.16.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Ibañez en Desembocadura	74
B.17.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Murta en Desembocadura	74
B.18.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Paine En Parque Nacional 2	75
B.19.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Baguales en Cerro Guido	75
B.20.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Las Chinas en Cerro Guido	75
B.21.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Grey antes Junta Serrano	76
B.22.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río San Juan En Desembocadura	76

B.23.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Tres Brazos antes Bt. Sencos	76
B.24.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Rubens en Ruta N 9 . .	77
B.25.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Grande en Tierra Del Fuego	77
B.26.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Alicahue en Colliguay .	77
B.27.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Estero Arrayan en La Montosa	78
B.28.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Estero Yerba Loca antes Junta San Francisco	78
B.29.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Estero Puangue en Boquerón	78
B.30.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Palos en junta con Colorado	79
B.31.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Lirquén en cerro El Padre	79
B.32.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Mulchén en Mulchén . .	79
B.33.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Renaico en Longitudinal	80
B.34.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Cautín En Almagro . . .	80
B.35.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Allipén en Los Laureles	80
B.36.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Ibañez en Desembocadura	81
B.37.	Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Murta en Desembocadura	81

Índice de Ilustraciones

2.1.	Resumen de cambios observados en la frecuencia y/o intensidad de precipitaciones extremas. Fuente: Fowler et al. (2021)	3
2.2.	Resultados de la prueba de Sen; en azul (rojo) se presentan las cuencas con una tendencia al aumento (decrecimiento) en la serie de precipitaciones máximas diarias. Fuente: Paredes et al, 2021.	4
2.3.	Ejemplo de serie de tiempo estacionaria y no estacionaria. Fuente: Bauer, André. (2021)	6
3.1.	Diagrama de trabajo realizado.	12
3.2.	Estaciones seleccionadas para estudio de tendencias. 71 estaciones que cumplen con 30 años de registro, índice de intervención humana $\leq 1\%$ y sin presencia de grandes embalses.	13
3.3.	Serie de caudales medios diarios obtenidos de base de datos CR2 (azul) y serie ponderada (rojo), estación río Emperador Guillermo antes Junta Mañihuales.	14
3.4.	Ejemplo de pérdida de información (circulo en rojo) a partir de ponderar la serie de tiempo. En rojo: caudal medio diario extraído del CR2. En azul: caudal ponderado.	15
3.5.	Put your sub-caption here	16
3.6.	Put your sub-caption here	16
3.7.	Caudales medios diarios máximos observados y corregidos para periodos otoño/invierno y primavera/verano para la estación Río Emperador ante juntas Mañihuales.	16
4.1.	Resultados test de Mann-Kendall. Panel a) periodo otoño/invierno. Panel b) primavera/verano	20
4.2.	Pendiente de sen estandarizado ($Z = \frac{X-\mu}{\sigma}$) para: a) periodo de otoño/invierno; b) periodo de primavera/verano.	21
4.3.	Resultados de pendiente de sen de tendencias de cambio en centro de gravedad del hidrograma promedio.	24
4.4.	10 cuencas que presentan cambios en el centro de gravedad del hidrograma medio (≥ 10 días). Punto azul: retraso del centro de gravedad, punto rojo: adelanto del centro de gravedad. En hidrogramas: línea roja corresponde a periodo 1, línea verde corresponde a periodo 2 (Notación en Tabla 4.3)	25
4.5.	Tendencias de factor Doymín y Doymax.	26
4.6.	Coefficientes de Pardé y coeficientes de GINI Estación Río Rapel en Junta.	27
4.7.	Coefficientes de Pardé y coeficientes de GINI Estación río Cogotí entrada embalse cogotí.	28
4.8.	Coefficientes de Pardé y coeficientes de GINI en río Claro en el valle.	29
4.9.	Coefficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación Estero Los Puercos en Puente los Puercos	30

4.10.	Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación Río Putagán en Yerbas Buenas.	31
4.11.	Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación río Andalien camino a Penco.	32
4.12.	Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación río Emperador Guillermo ante Junta Mañiguales.	33
4.13.	Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación río Simpson bajo junta Coyhaique.	34
4.14.	Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación río Murta en Desembocadura.	35
4.15.	Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación río Las Chinas en Cerro Guido.	36
4.16.	Change point analysis estación Río Rapel en junta. Panel A: invierno. Panel B: verano.	37
4.17.	Change point analysis estación Río Cogotí entrada embalse Cogotí. Panel A: invierno. Panel B: verano.	38
4.18.	Change point analysis estación Río Claro en el valle. Panel A: invierno. Panel B: verano.	38
4.19.	Change point analysis estación Estero Los Puercos en puente Los Puercos. Panel A: invierno. Panel B: verano.	39
4.20.	Change point analysis estación Río Putagán en Yerbas Buenas. Panel A: invierno. Panel B: verano.	39
4.21.	Change point analysis estación Río Andalien camino a Penco. Panel A: invierno. Panel B: verano.	40
4.22.	Change point analysis estación Río Emperador Guillermo ante junta Mañiguales. Panel A: invierno. Panel B: verano.	40
4.23.	Change point analysis estación Río Simpson bajo junta Coyhaique. Panel A: invierno. Panel B: verano.	41
4.24.	Change point analysis estación Río Murta en Desembocadura. Panel A: invierno. Panel B: verano.	41
4.25.	Change point analysis estación Río Las Chinas en cerro Guido. Panel A: invierno. Panel B: verano.	42
5.1.	Distribución de los mejores modelos no estacionarios para las cuencas con tendencia significativa. Panel a: Modelos elegidos bajo criterio K-S. Panel b: Modelos elegidos bajo criterio BIC.	44
5.2.	Distribución de los mejores modelos estacionarios para las cuencas con tendencia significativa. Panel a: Modelos elegidos bajo criterio K-S. Panel b: Modelos elegidos bajo criterio BIC.	45
5.3.	Diferencia porcentual de caudales medios diarios máximos esperados para los periodos de retorno de 10, 100, 500 años entre el estimado por el mejor modelo no estacionario (NE) y el mejor modelo estacionario (E), bajo el criterio K-S. Las cuencas con tonos rojizos indican que el modelo no estacionario entrega una disminución en la magnitud del evento, mientras que los tonos azules son un aumento respecto al estimado por el análisis de frecuencia estacionario.	47

5.4.	Diferencia porcentual de caudales medios diarios máximos esperados para los periodos de retorno de 10, 100, 500 años entre el estimado por el mejor modelo no estacionario (NE) y el mejor modelo estacionario (E), bajo el criterio BIC. Las cuencas con tonos rojizos indican que el modelo no estacionario entrega una disminución en la magnitud del evento, mientras que los tonos azules son un aumento respecto al estimado por el análisis de frecuencia estacionario.	48
5.5.	Distribución de los mejores modelos no estacionarios para las cuencas con tendencia significativa. Panel a: Modelos elegidos bajo criterio K-S. Panel b: Modelos elegidos bajo criterio BIC.	49
5.6.	Distribución de los mejores modelos estacionarios para las cuencas con tendencia significativa. Panel a: Modelos elegidos bajo criterio K-S. Panel b: Modelos elegidos bajo criterio BIC.	50
5.7.	Diferencia porcentual de caudales medios diarios máximos esperados para los periodos de retorno de 10, 100, 500 años entre el estimado por el mejor modelo no estacionario (NE) y el mejor modelo estacionario (E), bajo el criterio K-S. Las cuencas con tonos rojizos indican que el modelo no estacionario entrega una disminución en la magnitud del evento, mientras que los tonos azules son un aumento respecto al estimado por el análisis de frecuencia estacionario.	51
5.8.	Diferencia porcentual de caudales medios diarios máximos esperados para los periodos de retorno de 10, 100, 500 años entre el estimado por el mejor modelo no estacionario (NE) y el mejor modelo estacionario (E), bajo el criterio BIC. Las cuencas con tonos rojizos indican que el modelo no estacionario entrega una disminución en la magnitud del evento, mientras que los tonos azules son un aumento respecto al estimado por el análisis de frecuencia estacionario.	52
6.1.	Boxplot de test de Sen realizado para 100.000 simulaciones, considerando la extracción de 10, 15, 20 y 30 datos de la serie de caudales máximos. En línea roja: valor test de Sen de la serie original = -0.072	54
6.2.	p-valor de test de Sen realizado para 100.000 simulaciones, considerando la extracción de 10, 15, 20 y 30 datos de la serie de caudales máximos.	55
6.3.	Análisis de frecuencia para los caudales medios diarios máximos en el periodo de invierno de la cuenca Río Andalien camino a Penco.	57
6.4.	Análisis de frecuencia para Río Andalien camino a Penco usando una GEV para tres modelos no estacionarios: promedio dependiente del tiempo (superior), desviación estándar dependiente del tiempo (medio) y ambos estadísticos dependientes del tiempo (inferior). La zona gris corresponde al intervalo de confianza de la estimación.	58
6.5.	Análisis de frecuencia para los caudales medios diarios máximos en el periodo de invierno de la cuenca Río Ibañez en desembocadura.	59
6.6.	Análisis de frecuencia para Río Ibañez en desembocadura usando una GEV para tres modelos no estacionarios: promedio dependiente del tiempo (superior), desviación estándar dependiente del tiempo (medio) y ambos estadísticos dependientes del tiempo (inferior). La zona gris corresponde al intervalo de confianza de la estimación	60

Capítulo 1

Introducción.

1.1. Motivación

Existe evidencia de que la frecuencia de eventos extremos hidrológicos ha ido cambiando y que esta continuará creciendo en el futuro cercano debido al calentamiento global, producido principalmente por la acumulación de gases de efecto invernadero, como es el caso del CO_2 (IPCC, 2021). Producto de la acumulación de estos gases en la atmósfera, la temperatura del planeta ha aumentado desde el periodo preindustrial (1850–1900) al presente (2010–2019) entre $+0.8^{\circ}C$ a $+1.3^{\circ}C$ (IPCC, 2021) lo que ha influido en el aumento de precipitaciones extremas (Fowler et al., 2021), produciendo una no-estacionariedad en las series de datos. Esto fue corroborado en territorio nacional en el estudio de Lagos et al. (2021) donde se encontró una acelerada intensificación de precipitaciones extremas en las zonas costeras del norte y sur del país y en gran parte de la zona Austral.

Existe la concepción de que el aumento de las precipitaciones produce un aumento en los caudales de los ríos. Sin embargo, estudios recientes indicaron que no existe una relación proporcional e incluso se han registrado disminuciones de los caudales (Archfield et al., 2016; Do et al., 2017). Considerando lo anterior, es necesario realizar un estudio de tendencias de caudales ya que, si se identifican tendencias significativas, podría verse afectada la hipótesis de comportamiento estacionario, muy utilizada para diseño hidrológico de obras.

Dado el contexto anterior, la finalidad de esta memoria de Título es estudiar los cambios en las tendencias de caudales extremos en cuencas en régimen natural ante los cambios ocurridos en las tendencias de extremos de precipitaciones en territorio nacional. Para cumplir con este objetivo se evalúa la estacionariedad de las series de caudales máximos estacionales (Otoño/Invierno: Abril-Septiembre, Primavera/Verano: Octubre-Marzo) en las diferentes cuencas y se verifica la existencia de cambios de régimen hidrológico en el periodo histórico (1978-2018).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General.

El objetivo general de esta memoria es estudiar el potencial cambio en la serie de caudales extremos, así como su estacionalidad en cuencas en régimen cercano al natural ante recientes reportes de cambios en los extremos de precipitación.

1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este estudio son:

- Testear la hipótesis de estacionariedad de las series de caudales máximos estacionales en las diferentes cuencas.
- Verificar si existen cambios de régimen hidrológico en el periodo histórico como respuesta al cambio climático local. Comprobando tanto coeficientes de Pardé para la estacionariedad, como el tiempo del centro de gravedad del ciclo anual del hidrograma promedio y analizando coeficientes de momento de ocurrencia de caudales máximos y mínimos (DOYMAX y DOYMIN, respectivamente), como también analizando el coeficiente de GINI de las series de tiempo.
- Realizar un análisis de frecuencia con enfoque estacionario y no estacionario, comprobando su desempeño en las cuencas con tendencias estadísticamente significativas.

1.3. Alcances.

Para el presente estudio se utilizó la base de datos del repositorio CAMELS-CR2, el cual cuenta con datos de caudal medio diario para 516 estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) a lo largo del territorio nacional. En específico, se utilizó el compilado de caudales medios diarios para el periodo 1978-2018. Asimismo, producto de la complejidad de accesibilidad y falta de datos de caudales instantáneos, es que el estudio se centró en el análisis de caudales extremos a nivel de caudal medio diario para periodos de verano e invierno.

Las cuencas consideradas para este estudio son aquellas que cuentan con un grado de intervención antrópica $\leq 1\%$, de acuerdo al atributo “*human intervention degree*” de la base de datos de CAMELS-CL. Con esto se asegura que la cuenca no cuente con infraestructura que altere el régimen registrado. Además, se consideraron estaciones cuyo registro fuese mayor o igual que 30 años para asegurar que los datos sean robustos para su análisis.

Capítulo 2

Marco Teórico.

Existe evidencia de que las series de precipitaciones y caudales han presentado cambios de comportamiento, por ejemplo,. Fowler et al., (2021) mostraron a partir de una revisión de diferentes estudios, modelos y observaciones un aumento en la intensificación y/o frecuencia de precipitaciones extremas de corta duración (las cuales pueden producir crecidas, al menos en escala local) en Australia, Sudeste Asiático, Europa y Norteamérica, tal como se observa en la Figura (2.1).

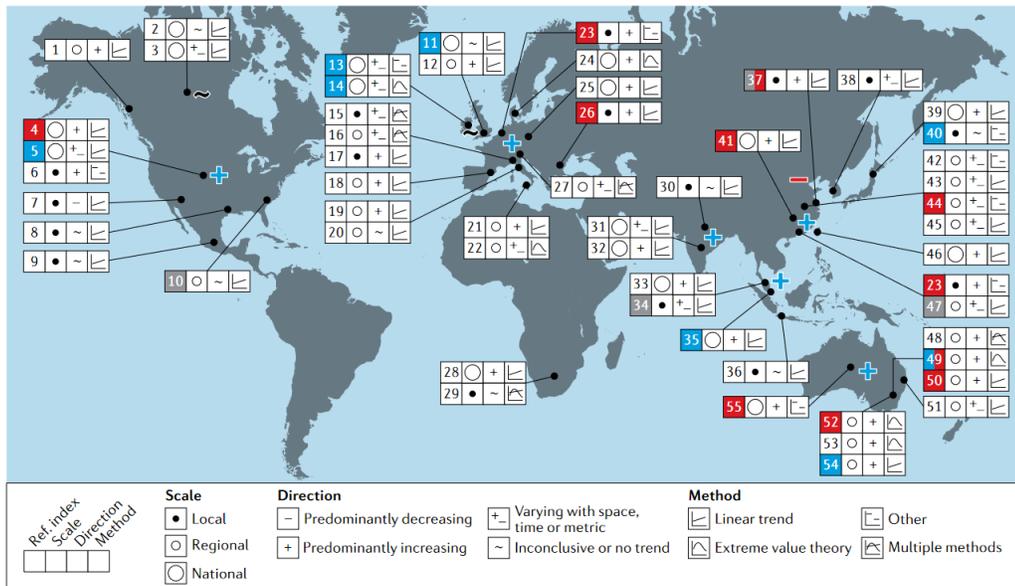


Figura 2.1: Resumen de cambios observados en la frecuencia y/o intensidad de precipitaciones extremas. Fuente: Fowler et al. (2021)

Complementariamente, Do et al., (2017) investigaron la presencia de tendencias en los datos de caudal máximo diario anual a partir de registros de 9213 estaciones en todo el mundo. Los resultados fueron más consistentes a escala continental, con tendencias decrecientes para un gran número de estaciones en el oeste de América del Norte y algunas regiones de Australia y África central, y tendencias crecientes en partes de Europa, el este de América del Norte, partes de América del Sur y el sur de África. Sin embargo, hubo más estaciones con tendencias decrecientes que tendencias crecientes en todos los conjuntos de datos analizados

En el caso nacional, existen estudios que analizan la presencia de tendencias en las series de tiempos. De acuerdo al informe realizado por CONAMA (2006), se demostró la presencia de tendencias negativas en las series de precipitaciones para las estaciones de Chile central. Resultados similares reportan los estudios realizados por Ricchetti (2018), donde para eventos extremos de precipitación en cuencas de Chile central se identificaron tendencias a la baja en las medias registradas y un alza en la desviación estándar. Asimismo, se concluyó que el clima de las estaciones de Chile central analizadas, presentaban un comportamiento no estacionario.

En este mismo sentido, Paredes et al., (2021) analizaron la estacionariedad de las precipitaciones extremas en Chile, donde concluyó que existe una acelerada intensificación en la zona costera del norte y sur del país y en gran parte de la zona Austral. En cambio, para la zona centro y sur del país la tendencia es a la disminución para la precordillera y valle central (Figura 2.2).

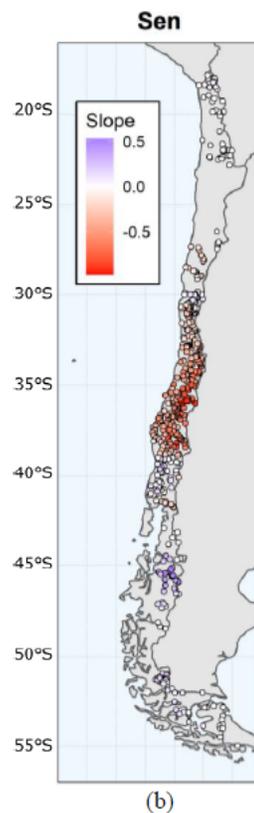


Figura 2.2: Resultados de la prueba de Sen; en azul (rojo) se presentan las cuencas con una tendencia al aumento (decrecimiento) en la serie de precipitaciones máximas diarias. Fuente: Paredes et al, 2021.

Estudios recientes realizaron incorporaron la no estacionariedad en estudio de series de precipitaciones (Ricchetti (2018) y en la estimación de precipitación de diseño (Paredes et al. 2021), donde en ambos casos se concluyó que al adoptar un enfoque no estacionario es posible obtener una mejor estimación de precipitaciones extremas con su respectivo periodo de retorno. Asimismo, Carreño et al., (2021) demostraron que al incorporar un análisis de frecuencia no estacionario para las series de precipitaciones máximas diarias anuales, se obtiene

una menor estimación de la precipitación para cuencas de la zona centro y zona sur (Cuenca del Maipo y El Tepual, respectivamente), lo que se traduce en que las obras hidráulicas ya construidas están sub o sobre dimensionadas, dependiendo del periodo de retorno de diseño.

Debido a lo anterior, se hace imperante un análisis de las tendencias de series de caudales en territorio nacional, ya que de identificarse tendencias en algunas cuencas se podría estar subestimando un riesgo de crecida, poniendo en riesgo la integridad de alguna obra hidráulica, caudal de diseño de riego, etc.

2.1. Herramientas para detectar y cuantificar tendencias.

Una forma de identificar cambios en las tendencias de los caudales es detectar la existencia de estacionariedad en la serie de tiempo. Se entiende que un proceso es estacionario si dado un proceso aleatorio X_1, X_2 , considerando un conjunto de enteros $\{i_1, \dots, i_k\}$ y un entero m , la distribución conjunta de $\{X_{i_1}, \dots, X_{i_k}\}$ y $\{X_{i_1+m}, \dots, X_{i_k+m}\}$ son idénticas. Simplificando, se puede considerar una serie como *estacionaria*, si sus propiedades estadísticas (distribución de probabilidad y parámetros como el promedio y la desviación estándar) no varían en el tiempo (Figura 2.3). Caso contrario, cuando las series son inestables (sus parámetros y distribuciones varían con el tiempo) se está en un estado no estacionario. Considerando esto es que, para estudiar la estacionariedad de la serie de tiempo para caudales extremos, estudios han utilizado los métodos de Mann Kendall, test de Sen y el Change Point Analysis (Douglas et al., 2000; Du et al., 2015; Ricchetti, 2018).

El test de Mann-Kendall (Mann, H.B. 1945; Kendall, M. G. 1975) compara los signos entre la diferencia de un punto de la serie de tiempo y todos los puntos siguientes. A partir de esto, la prueba considera que la esperanza de la suma de los cambios de signo es nula y la varianza queda en función del número de datos, el cual debe ser mayor a 10. Luego, se calcula el test normal estadístico y se compara con un nivel de significancia determinado por el usuario. Así, se tendrá tendencia si el valor absoluto del estadístico calculado por el test es mayor que el asociado al nivel de significancia determinado.

El test de Sen (1968) permite estimar la magnitud de la tendencia en la serie de tiempo, obtenido a partir de la mediana de todas las pendientes calculadas para dos puntos (x_i, x_j) en dos tiempos dados (t_i, t_j) (Du et al., 2015; Hong et al., 2017). La pendiente de Sen está definida por la mediana de todas las pendientes calculadas mediante la ecuación (2.1):

$$m_i = \frac{x_j - x_i}{t_j - t_i} \quad (2.1)$$

Por otro lado, el Change Point Analysis es un método que permite detectar cambios en las series temporales, la cual se basa en la teoría del cálculo diferencial, donde en la discontinuidad, la derivada de la izquierda no coincide con la derivada de la derecha. Esta diferencia se expresa en un cambio delta cuadrático:

$$\Delta^2 = \left(\frac{d(Q)^+}{dt} - \frac{d(Q)^-}{dt} \right)^2 \quad (2.2)$$

Donde:

- $\Delta[(m^3)^2/s^2]$: Diferencia entre derivadas por distintos límites.
- $d(Q)/dt^{(+,-)}[m^3/s]$: Derivada definida por los límites derecho e izquierdo.

Esta metodología puede ser aplicada a las medias de los caudales máximos, con lo cual se podría detectar el cambio en las medias de las series, tanto para los periodos de invierno como verano.

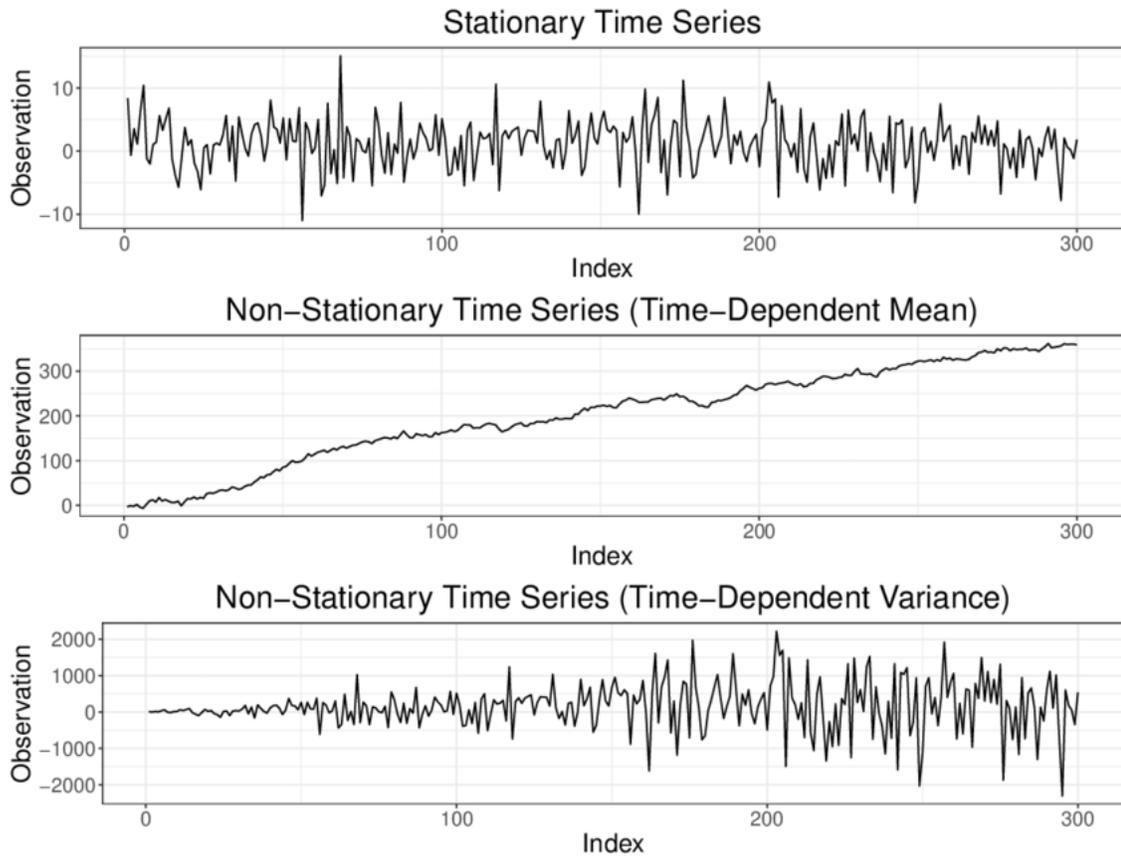


Figura 2.3: Ejemplo de serie de tiempo estacionaria y no estacionaria. Fuente: Bauer, André. (2021)

Uno de los métodos utilizados para medir la estacionalidad (variación periódica y predecible de la serie de tiempo con un periodo inferior o igual a un año) es el coeficiente de Pardé (Pardé, 1933), el cuál está definido por:

$$P_{n,m} = \frac{\mu_{n,m}}{\sum_{n=1}^{12} \mu_{n,m}} \quad (2.3)$$

Donde:

- $\mu_{n,m}[m^3/s]$: Media de la variable n en el mes m .
- $P_{n,m}[-]$: Coeficiente de Pardé ara la variable n en el mes m .

Asimismo, Gudmundsson et al. (2018) propone un conjunto de índices de series de tiempo de caudal que están diseñados para facilitar el análisis de cambios en el balance hídrico regional, cambios en el ciclo estacional, inundaciones y caudales bajos. Para efectos de este trabajo, se consideraron los índices de DOYMAX, DOYMIN y GINI para poder precisar la ocurrencia de una cambio en la estacionalidad como también cuantificar la variabilidad de los datos.

Los índices DOYMAX y DOYMIN son indicadores del momento en que ocurre el máximo y mínimo caudal medio diario, respectivamente. Estos indicadores pueden variar según el tipo de región que se esté estudiando. Por ejemplo, para el caso de DOYMIN en regiones nivales el caudal mínimo se puede generar durante los meses de invierno, mientras que en otras el caudal mínimo puede ocurrir en los meses de baja precipitación y alta demanda del recurso. Para el caso de caudales máximos, en regiones frías el máximo caudal viene asociado al derretimiento de nieve, mientras que en otras regiones viene asociado con precipitaciones convectivas durante estaciones cálidas o la humedad del suelo. Este parámetro puede entregar información acerca del proceso de generación de inundaciones y se ha utilizado para evaluar las tendencias de ocurrencia de las inundaciones en Europa (Blöschl et al., 2017).

El índice GINI es una medida de dispersión de los datos que es independiente del valor absoluto de la variable considerada y se puede considerar como una medida de la variabilidad implícita en la curva de duración del flujo. El coeficiente de GINI se encuentra entre el rango 0 y 1, donde el mínimo valor indica una distribución uniforme de los caudales durante el periodo de tiempo (año, estación, etc.), en cambio, el valor máximo indica que todo el flujo ocurre en un solo día. Para un caudal medio diario q_i , que se encuentran ordenados de manera creciente tal que $q_i \neq q_{i+1}$, el coeficiente GINI viene definido por:

$$\frac{1}{n} \left(n + 1 - 2 \left(\frac{\sum_{i=1}^n (n + 1 - i) q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \right) \right) \quad (2.4)$$

Donde n es el número de datos disponibles para ese año hidrológico.

Por otro lado, el centro de gravedad del hidrograma medio (CG) se utiliza como indicador del régimen de flujo y como indicador indirecto de la distribución del caudal a lo largo del año. El CG de cada río está correlacionado con variables climáticas locales, como la temperatura y la precipitación estacional, y con índices de circulación a gran escala (Cortés et al., 2011). La ocurrencia del CG del hidrograma está controlada en gran medida por el aumento de la temperatura, que da como resultado una línea de nieve más alta durante las tormentas de invierno y un deshielo más temprano y más rápido durante primavera verano. La disminución general de la precipitación también contribuye a una reducción temprana de deshielo y, por lo tanto, cambio de la ocurrencia del CG del hidrograma. El CG del hidrograma promedio

es calculado como:

$$CG = \frac{\sum_{i=1}^{12} Q_i t_i}{\sum_{i=1}^{12} Q_i} \quad (2.5)$$

Donde Q_i es el caudal medio mensual, t es el día juliano desde el inicio del año hidrológico y $i \in [1,12]$ es el mes del año hidrológico.

Musselman et al., (2017) demostraron a partir de observaciones del manto nival del oeste de Norte América que las capas de nieve poco profundas se derriten antes y a una menor tasa que la nieve más profunda y tardía. Mediante modelos hidrológicas con proyecciones a escenarios más cálidos se obtuvo que la fracción del volumen de agua de deshielo producido a altas tasas se reduce considerablemente. Esta reducción se debe a una contracción de la temporada de deshielo hacia un periodo de menor energía disponible, lo que reduce en un 64 % el área cubierta de nieve expuesta a energía suficiente que permita impulsar altas tasas de deshielo.

2.2. Análisis de Frecuencias.

Debido al carácter estocástico que presentan las variables que influyen en la ocurrencia de crecidas tal como la precipitación, típicamente se plantea la realización de un análisis de frecuencia de las variables hidrometereológicas basado en estadígrafos estacionarios (Chow et al., 1988). Así, las variables asociadas a un periodo de retorno o probabilidad de excedencia, viene definido por la ecuación (2.6):

$$X(P_{exc}) = \mu + \sigma \cdot K_T(P_{exc}) \quad (2.6)$$

Donde:

- X : Variable hidrometereológica.
- μ : Media de la serie analizada.
- σ : Desviación estándar de la serie.
- $K_t[-]$: Factor de frecuencia asociado a una determinada probabilidad de excedencia.

Tanto Richetti (2018) como Paredes (2021), consideran un análisis de frecuencia no estacionario para el territorio nacional, el cual se basa en las tendencias presentadas por los datos observados. Este análisis se basa en una parametrización dependiente del tiempo de los estadísticos, lo cual queda expresado por la ecuación (2.7):

$$X(P_{exc}, t) = \mu(t) + \sigma(t) \cdot K_T(P_{exc}) \quad (2.7)$$

En este caso, la media y la desviación estándar dependen explícitamente del tiempo. Esto puede significar un cambio en los periodos de retorno estimados, ya que, si los estadígrafos presentan alguna tendencia creciente, los periodos de retornos asociados a un valor constante

de caudal, por ejemplo, disminuyen. Asimismo, para una probabilidad de excedencia constante, los valores de caudales aumentan. Evidentemente, para el caso en que los dos estadísticos disminuyen, se produce un aumento de los periodos de retorno o una disminución de los valores extremos. Así, también es posible realizar un análisis considerando como covariables la temperatura y la precipitación (Du et al, 2015), puesto que ambas juegan un rol importante en el fenómeno de crecidas.

La probabilidad de excedencia de un evento de determinada magnitud o mayor durante un período de tiempo es:

$$p_{exc} = P(X \geq x_t) \quad (2.8)$$

Así, el periodo de retorno viene determinado como $T = 1/p_{exc}$. Así, obtenidos los periodos de retorno es necesario considerar la función cuantil asociada con la función de distribución de la variable, la cual indica el valor de la variable aleatoria para el cual la probabilidad de que esa variable sea menor o igual a dicho valor sea la probabilidad de excedencia dada.

Para llevar a cabo el análisis de frecuencia, en estudios como los realizados por Khaliq, et al., (2006) y Panagoulia, et al., (2013), consideran la distribución general de valores extremos (GEV por sus siglas en inglés). La distribución GEV posee tres parámetros de probabilidad: localización (μ), escala (σ) y forma (ξ). Considerando que el factor de forma de la distribución GEV es sensible y difícil de estimar, es que se suele considerar constante (Du et al., 2015). Así, los enfoques adoptados para esta función consideran tres opciones en la modelación de sus estadísticos:

- Variación lineal de la media con respecto al tiempo $\mu(t) = \mu_0 + \mu \cdot t$.
- Una variación lineal de la desviación estándar con respecto al tiempo $\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma \cdot t$
- Una variación lineal de la media y desviación estándar respecto al tiempo $(\mu(t), \sigma(t))$

Donde μ_0 y σ_0 son obtenidos a partir de los datos observados.

Tabla 2.1: Resumen de distribuciones utilizadas para modelar serie de caudales extremos en este estudio.

Modelo	Función densidad de probabilidad
Gamma	$f_z(z \mu, \sigma) = \frac{1}{(\mu\sigma^2)^{1/\sigma^2}} \frac{z^{(1/\sigma^2)-1} e^{-z/(\mu\sigma^2)}}{\Gamma(1/\sigma^2)}, z > 0, \mu > 0, \sigma > 0$
Weibull	$f_z(z \mu, \sigma) = \frac{\sigma z^{\sigma-1}}{\mu^\sigma} \exp\left[-\left(\frac{z}{\mu}\right)^\sigma\right], z > 0, \mu > 0, \sigma > 0$
Gumbel	$f_z(z \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right) \exp\left[-\frac{z-\mu}{\sigma}\right], -\infty < z < \infty, \infty < \mu < \infty, \sigma > 0$
Lognormal	$f_z(z \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma z} \exp\left(-\frac{(\log(z)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), z > 0, \mu > 0, \sigma > 0$
Normal	$f_z(z \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), z > 0, \mu > 0,$
GEV	$f_z(z \mu, \sigma, \kappa) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \kappa \left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]^{(-1/\kappa)-1} \exp\left(-\left[1 + \kappa \left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\kappa}\right), -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0, -\infty < \kappa < \infty$

Los modelos óptimos se seleccionan a partir de diversas métricas y test de bondad de ajuste, entre ellos el criterio bayesiano de información (BIC) el cual penaliza modelos más complejos (mayor número de parámetros) y se calcula como::

$$BIC = k \ln(n) - 2 \ln(\hat{L}) \quad (2.9)$$

Donde k corresponde al número de parámetros estimados por el modelo, n el número de observaciones y \hat{L} corresponde al valor maximizado de la función de verosimilitud. Así, el modelo seleccionado será aquel que minimice la ecuación (2.9). Si bien el valor de BIC identifica el modelo óptimo, éste no es una medida de desempeño del modelo sino más bien una medida de calidad relativa. Otros estudios (Du et al., 2015) utilizan como factor de decisión los resultados de test de bondad de ajustes, entre ellos el de Kolmogorov-Smirnov (K-S), el cuál es calculado como:

$$KS = \max(F_n(x) - F(x)) \quad (2.10)$$

Donde $F_n(x)$ corresponden a probabilidades acumuladas de los datos observados y $F(x)$ corresponde a la probabilidad acumulada de la distribución teórica propuesta. Así, bajo la hipótesis nula de que la distribución de probabilidad propuesta es igual a la distribución de los datos, se tiene que el cociente $\frac{F(x)}{F_n(x)} = 1$ para un nivel de significancia del 95 %.

Para evaluar otras métricas y test de bondad de ajuste, se puede calcular el criterio de información Akaike (AIC), test χ^2 , R^2 , el error cuadrático medio estandarizado (RMSE) y el logaritmo de verosimilitud (Loglikelihood). El AIC, al igual que BIC es un estimador de calidad relativa, el cual evalúa el desempeño del modelo basado en el criterio de la parsimonia, es decir, penaliza al modelo diagnosticado según el desempeño basado en la cantidad de parámetros que posea. Así, el modelo a seleccionar es aquel que minimice $AIC = 2k - 2l(\hat{\theta})$, donde k es la cantidad de parámetros y $l(\hat{\theta})$ es el máximo valor del logaritmo de la verosimilitud del modelo.

Por otro lado, el test χ^2 es un test de bondad de ajuste al igual que el test de Kolmogorv-Smirnov. Sin embargo, esta prueba no paramétrica testea si los datos provienen de una distribución específica comparando los valores teóricos y muestrales (i.e., observados) de frecuencia relativa para cada intervalo de clase. Finalmente, para el cálculo de bondad de ajuste de chi-cuadrado, los datos se dividen en c intervalos y el estadístico de prueba se define como:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^c (O_i - E_i)^2 / E_i \quad (2.11)$$

donde O_i es la frecuencia observada del intervalo i y E_i es la frecuencia esperada para el intervalo i . La frecuencia esperada es calculada como:

$$E_i = M(F(Y_u) - F(Y_l)) \quad (2.12)$$

donde F es la función distribución acumulada para la distribución que está siendo testada, Y_u es el límite superior de la clase i y Y_l corresponde al límite inferior. El estadístico de prueba sigue, aproximadamente, una distribución de chi-cuadrado con $(c-p)$ grados de libertad donde c es el número de intervalos y p es el número de parámetros estimados (incluidos los parámetros de ubicación, escala y los parámetros de forma) para la distribución testada. Por lo tanto, la hipótesis de que los datos son de una población con la distribución especificada si $\frac{\chi_{calculado}^2}{\chi_{c-p}^2} \leq 1$.

Capítulo 3

Metodología Experimental

Para realizar el estudio de tendencias de caudales medios diarios extremos se utiliza la base de datos de la Plataforma CAMELS y los datos de caudales medios anuales y estacionales obtenidos por Quevedo (2021), se seleccionaron cuencas que cuenten con un bajo grado de intervención. Esto es posible a través del atributo “human intervention degree” (porcentaje del caudal anual de derechos de aguas superficiales consuntivo permanente continuo). Asimismo, mediante el índice “*dam*” es posible determinar la presencia de grandes embalses. Diversos estudios han demostrado el impacto que generan en las tasas de flujo a nivel horario, diario, mensual y estacional. Aguas abajo, generalmente se sabe que los impactos de las represas dan como resultado una disminución considerable en el cambio de tasa de flujo anualmente debido a un flujo máximo más bajo y un flujo mínimo más alto (Delisle, F, 2021). Luego, se genera una rutina que permita extraer la serie de caudales máximos medios diarios anuales por estación del año. Esto se debe hacer considerando cuencas que cuenten con un mínimo de 30 años de registro.

Con los datos de caudales máximos estacionales, se procede a realizar un análisis estadístico y test a la serie de tiempo, para determinar si existe cambio de estacionariedad y de régimen en el periodo histórico. Para esto se utilizará el test de Sen, el método de Change Point Analysis (la cual permite estudiar discontinuidades en la serie) y Test de Mann-Kendall el cual ha sido utilizado en diversos estudios (Du et al., 2015; Douglas et al., 2000; Richetti, 2018; Paredes et al., 2021) para estudiar cambios de tendencias en las series de tiempo. Así, la metodología experimental de esta memoria, se encuentra en la Figura 3.1.

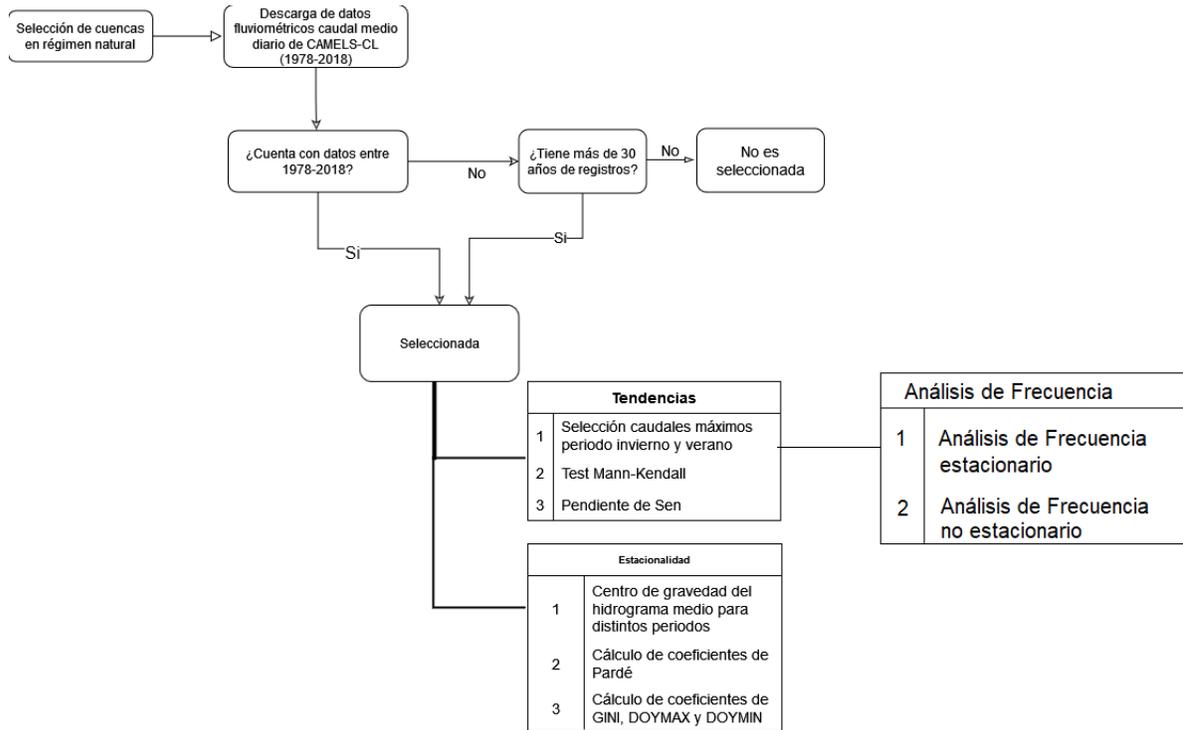


Figura 3.1: Diagrama de trabajo realizado.

3.1. Recopilación de datos, estudio de tendencias, cambios hidrológicos y análisis de frecuencia.

3.1.1. Estaciones seleccionadas

El presente estudio utiliza la base de datos contenida en la plataforma CAMELS-CL, que se compone de los valores medios de caudal registrados a escala diaria, media y mensual a partir de estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) a lo largo del territorio nacional. Además, CAMELS-CL presenta a modo de resumen una serie de atributos característicos de la cuenca, en especial los atributos (1) índice de intervención humana ($\leq 1\%$), (2) que la cuenca no cuente con embalses de grandes dimensiones, puesto que puede distorsionar los procesos hidrológicos de la cuenca (Hidalgo, 2009), impidiendo así estudiar los procesos de crecidas en régimen natural. Cabe destacar que, de acuerdo con los autores, el índice de intervención humana sólo considera los derechos consuntivos permanentes otorgados dentro de la cuenca, lo que no reflejaría el grado de intervención (i.e canales, construcciones civiles, etc.) a la cual estaría sometida realmente. Bajo las condiciones anteriormente expuestas, se seleccionaron 71 cuencas (Figura 3.2 y Tabla 3.2 en Anexo A.1).

Estaciones seleccionadas

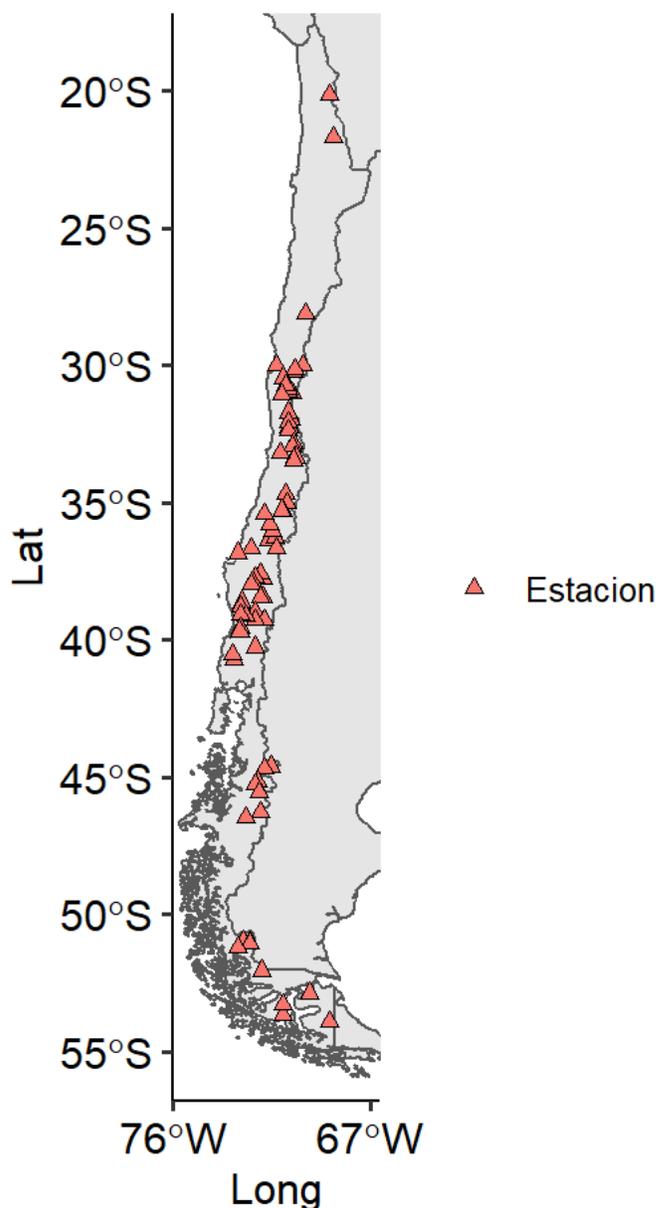


Figura 3.2: Estaciones seleccionadas para estudio de tendencias. 71 estaciones que cumplen con 30 años de registro, índice de intervención humana $\leq 1\%$ y sin presencia de grandes embalses.

3.1.2. Generación de serie de datos ponderados

Para trabajar con datos consistentes, se considera el trabajo realizado por Quevedo (2021) ($Q_{medio\ mensual\ corregido}$), el cual contiene datos rellenos de caudales medios mensuales para 158 cuencas cercanas al régimen natural para el periodo 1979-2018. Esta base de datos fue construida a partir del relleno de datos fluviométricos faltantes, a partir de árboles de decisión y regresiones lineales con estaciones vecinas (distancia menor a 200 km) considerando siete criterios para establecer similitud y escoger una cuenca donante. La metodología se utilizó

para relleno de datos a escala anual, estacional y mensual. Este producto es utilizado para crear un caudal ponderado a partir de los datos diarios obtenidos a partir de los datos de la DGA, recopilados por el CR_2 ($Q_{medio\ diario\ observado}$) tal que:

$$Q_{pond} = Q_{medio\ diario\ Observado} \cdot k \quad (3.1)$$

Donde k es un adimensional obtenido a partir de:

$$k = \frac{Q_{medio\ mensual\ corregido}}{Q_{medio\ mensual\ Observado}} \quad (3.2)$$

Así, se obtiene un nuevo set de datos, tal como se observa en la Figura (3.3):

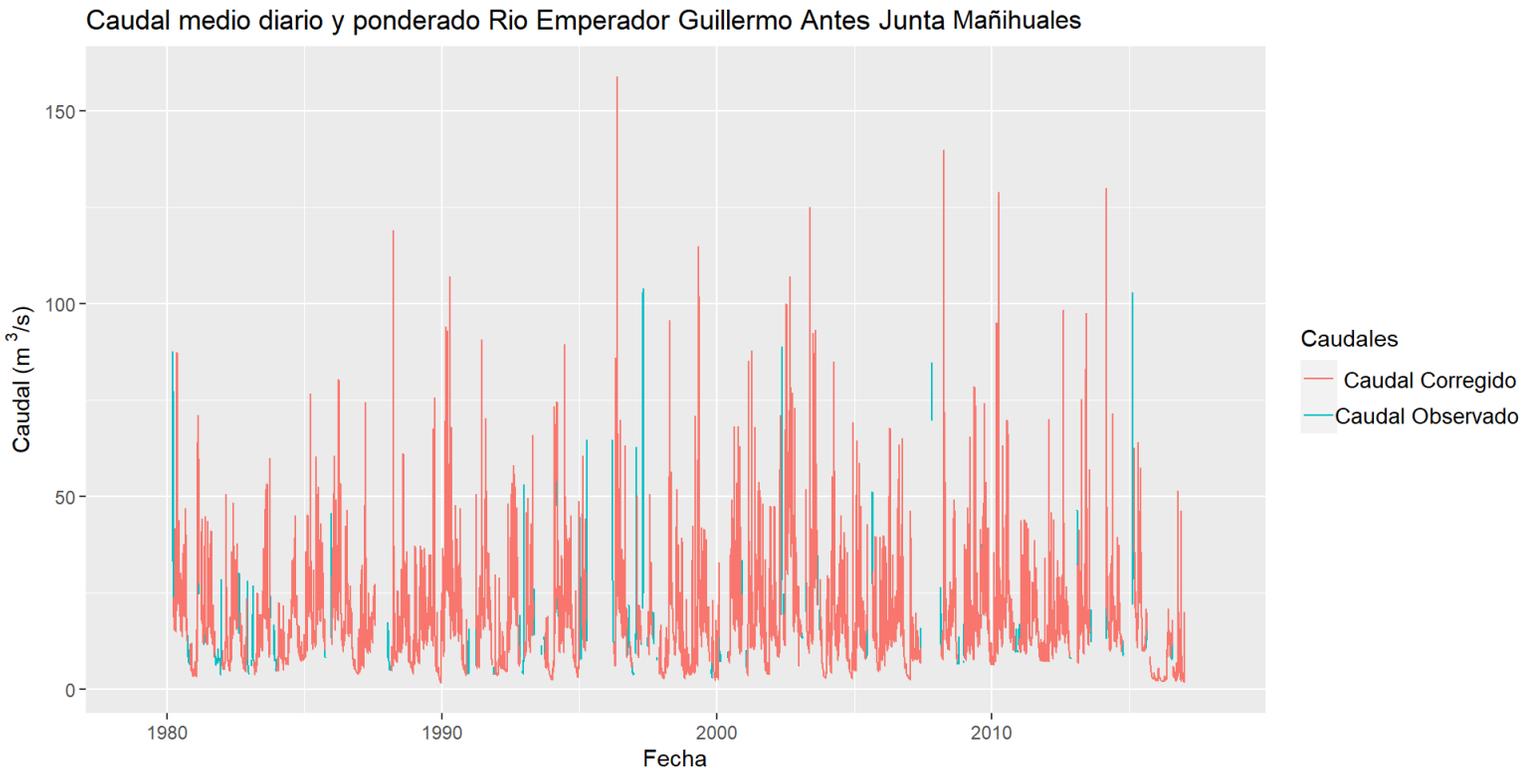


Figura 3.3: Serie de caudales medios diarios obtenidos de base de datos CR2 (azul) y serie ponderada (rojo), estación río Emperador Guillermo antes Junta Mañihuales.

Es necesario notar que, al momento de realizar la ponderación se puede producir pérdidas de información de caudales extremos, ya que producto de una crecida, la estación puede presentar fallas, por lo que sólo se registra el número de días que funcionó la estación para ese mes. Debido a que si para ese mes, el número de registros es menor a 15 días, el caudal medio mensual no es considerado, obteniendo así un ponderado $k = 0$, eliminando así posibles crecidas, tal como se observa en la Figura (3.4). Los efectos que pueden producir la falta de

estos datos en la tendencia se analizan en el capítulo de **Discusión**. En la Figura (3.7), se presenta un ejemplo de caudales medios diarios máximos observados y ponderados para la estación río Emperador ante junta Mañihuales.

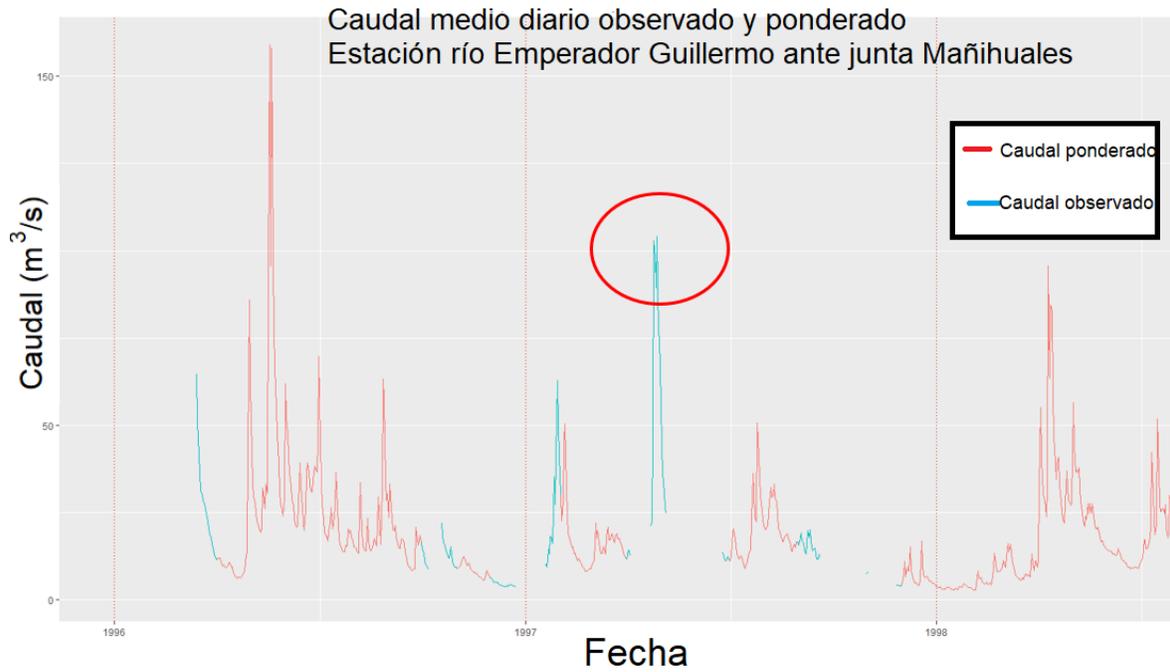


Figura 3.4: Ejemplo de pérdida de información (circulo en rojo) a partir de ponderar la serie de tiempo. En rojo: caudal medio diario extraído del CR2. En azul: caudal ponderado.

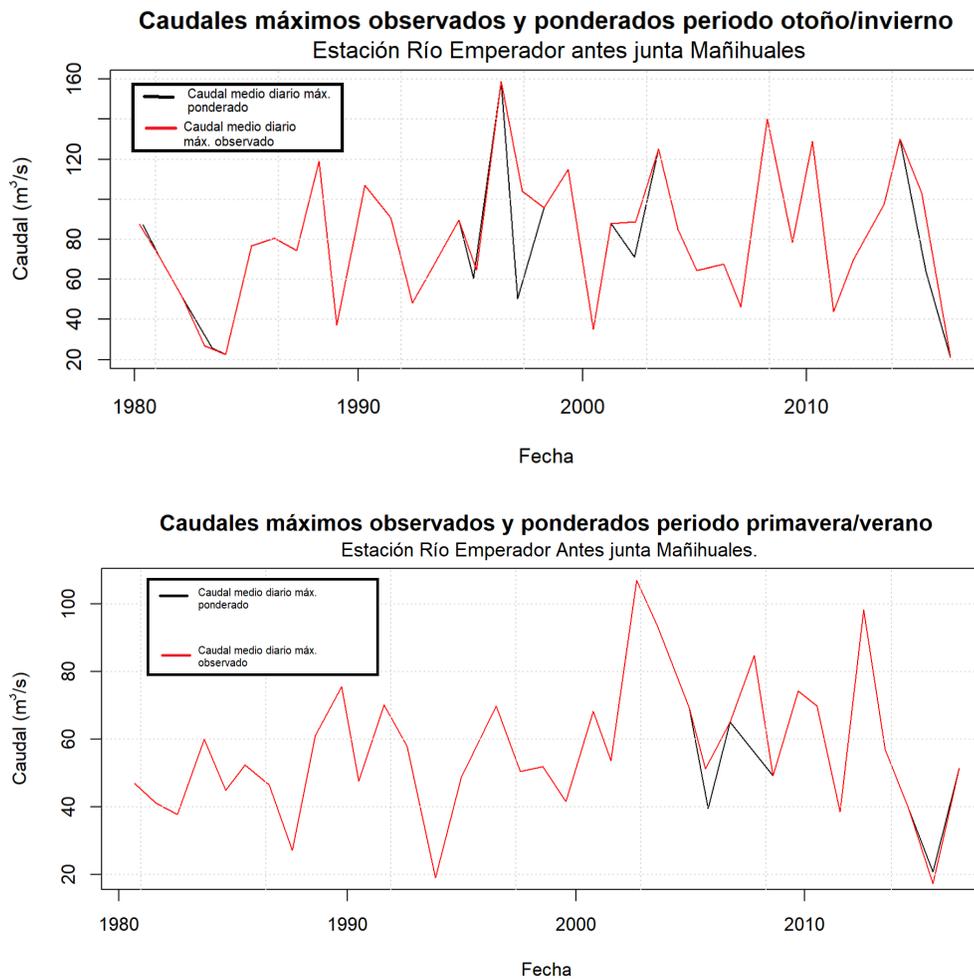


Figura 3.7: Caudales medios diarios máximos observados y corregidos para periodos otoño/invierno y primavera/verano para la estación Río Emperador ante juntas Mañihuales.

3.1.3. Datos de eventos extremos (Caudales medios diarios extremos estacionales)

Obtenida la serie de caudales medios diarios para la cuenca en estudio, se procede a extraer los caudales máximos medios diarios para ventanas temporales de seis meses para cada año, donde se consideran los periodos de otoño/invierno (abril-septiembre) y primavera/verano (octubre-marzo). Lo anterior tiene por objetivo estudiar y analizar el comportamiento de la cuenca de acuerdo al tipo de régimen hidrológico que presenta. Así, una cuenca que presente un régimen nival, presentará su caudal máximo en el periodo de primavera/verano, debido a los procesos de deshielo y derretimiento de nieve. En cambio, es esperable que aquellas cuencas que presenten régimen pluvial tengan un aumento en su caudal en los meses de invierno, ya que es cuando se presentan las lluvias que alimentan el caudal del río. Finalmente, se obtuvo como producto final una matriz de valores extremos de caudal medio diario para cada periodo por año hidrológico en el periodo 1979-2018.

Es necesario mencionar que se seleccionan valores extremos de caudales medios diarios

y no instantáneos (que reflejan de mejor manera el evento de crecida) debido a que dicha información no se encuentra procesada ni disponible para todas las cuencas como en el caso de la base de datos de CAMELS-CL.

3.1.4. Datos Estacionales

Para estudiar los posibles cambios en la estacionalidad de la cuenca, se analizó la serie de datos a nivel diario y a nivel mensual para cada año. Considerando la serie obtenida de caudales ponderados se analizaron los cambios en el centro de gravedad del hidrograma promedio, los coeficientes de Pardé y los coeficientes de GINI, DOYMIN y DOYMAX, considerando las fórmulas y procedimientos descritos previamente.

El análisis del cambio de centro de gravedad (CG) del hidrograma promedio se realizó a partir del cálculo del día juliano en el cual se encuentra el CG, obteniendo el valor del día para cada año y luego realizó la prueba de la pendiente de Sen, para cuantificar la tendencia y verificar si estos valores son significativos estadísticamente, con un nivel de confianza de 95 %. Para aquellas cuencas que presentaron una tendencia significativa se muestran los hidrogramas con un Δt del cambio del centro de gravedad para los periodos del inicio de las mediciones hasta el año 2000 y luego del periodo 2000 al 2017, en caso de contar con datos hasta el final de periodo; de lo contrario, se genera hasta el año en que se encuentre el último valor observado.

El régimen de escorrentía describe la estacionalidad promedio del caudal del río, influenciado por las características de la cuenca tales como las características climáticas o la topografía de la zona. El ciclo estacional característico determinado por el régimen hidrológico existe debido a los mecanismos dominantes de aporte de ríos: lluvia (régimen pluvial), derretimiento nival (nieve) y derretimiento glacial (régimen glacial). Dependiendo de la ocurrencia temporal de los máximos estacionales, los tipos de régimen pueden distinguirse aún más con respecto a las diferencias climáticas y topográficas entre las cuencas. Tal como se mencionó anteriormente, uno de los modelos de clasificación más utilizados son los coeficientes de Pardé. Dependiendo del número de máximos presentes en el Pardé mensual a lo largo del año, es posible observar entre un régimen de caudal dominante (un valor máximo) y mixto (ej: dos valores máximos). En el caso que la cuenca presente un régimen complejo, se supone una combinación de dos o tres mecanismo de abastecimiento.

3.1.5. Análisis de Frecuencia.

Para aquellas cuencas que presenten marcadas tendencias en el periodo de invierno y verano a partir de los resultados del test de Mann-Kendall, se procede a realizar el análisis de frecuencia considerando cinco distribuciones de probabilidades para el enfoque estacionario: (1) Normal, Lognormal, (3) Weibull, (4) Gamma y (5) Gumbel. En cambio, para el caso del análisis no estacionario, se consideró la distribución general de valores extremos. Asimismo, se efectuaron diversas métricas y test de bondad de ajuste: test χ^2 , test de Kolmogorov-Smirnoff, AIC, BIC, R^2 , RMSE y el logaritmo de máxima verosimilitud.

De acuerdo a lo mencionado en la metodología, se seleccionaron los modelos estacionarios y no estacionarios que mejor ajuste presentaban de acuerdo a los resultados del test K-S y

el criterio de información bayesiano. Posteriormente, se obtienen los caudales asociados a los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años, comparando el sesgo entre los mejores modelos estacionarios y no estacionarios a partir de la fórmula:

$$\Delta Q = \frac{Q_{NE}^T - Q_E^T}{Q_E^T} \quad (3.3)$$

Donde Q_{NE}^T y Q_E^T son los valores de caudal estimado para el periodo de retorno T bajo un enfoque no estacionario y estacionario, respectivamente. Así, valores positivos (negativos) de ΔQ indican que el enfoque estacionario estima un aumento (disminución) en la magnitud del evento extremo para el periodo de retorno de T años respecto al modelo estacionario.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Resultados de estudio de tendencias

Al realizar el test de Mann-Kendall a las series de caudales medios diarios máximos para cada cuenca, se obtuvo que para el periodo de invierno, 25 (71 % del total de estaciones con tendencias significativas) de éstas presentaron tendencias con un p-valor menor al 5 %. En cambio, para el periodo de verano, 12 (cuenca) presentaron tendencias significativas.

De la Figura (4.1), en el panel a), es posible observar que gran parte de las cuencas de la zona central (30-40°S) presentan tendencias negativas en el estadístico calculado. Asimismo, es posible observar que las cuencas de la zona sur (38-54°S) presentan tendencia al aumento en los caudales medios diarios máximos anuales para el periodo de otoño/invierno. Por otro lado, en la Figura (4.1), en el panel b), es posible observar que para el periodo de verano en la zona central, los caudales máximos presentan tendencias negativas (10 estaciones) y solo dos estaciones en la zona sur presentan un aumento en sus eventos extremos. En las Tablas (4.1) y (4.2) se presentan un resumen de las tendencias de cada estación fluviométrica con su respectivo p-valor.

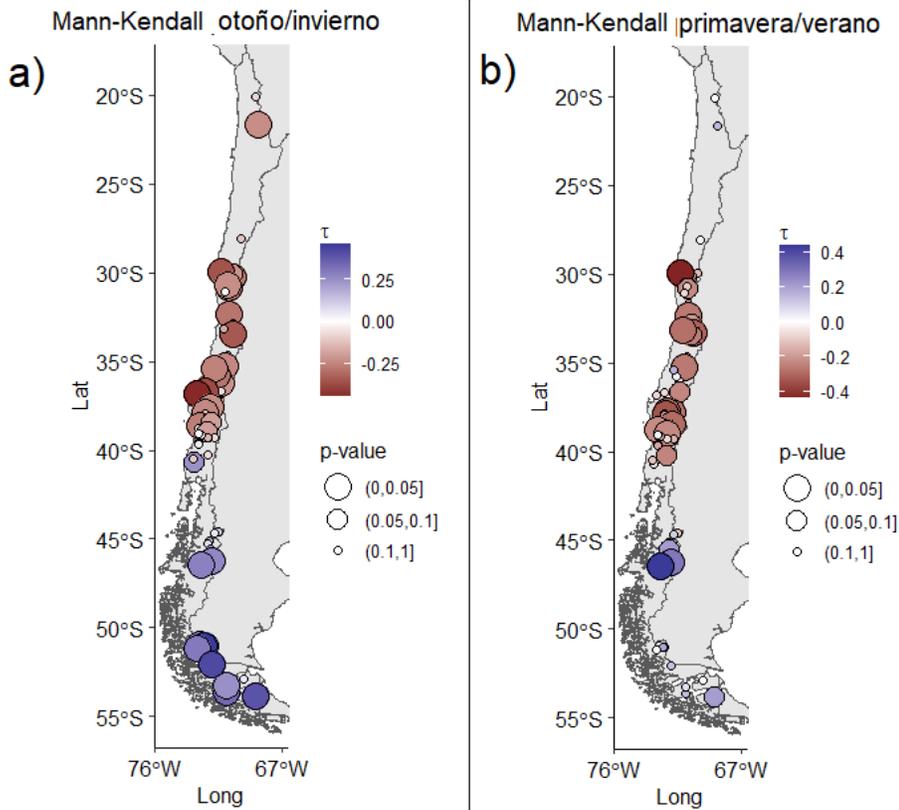
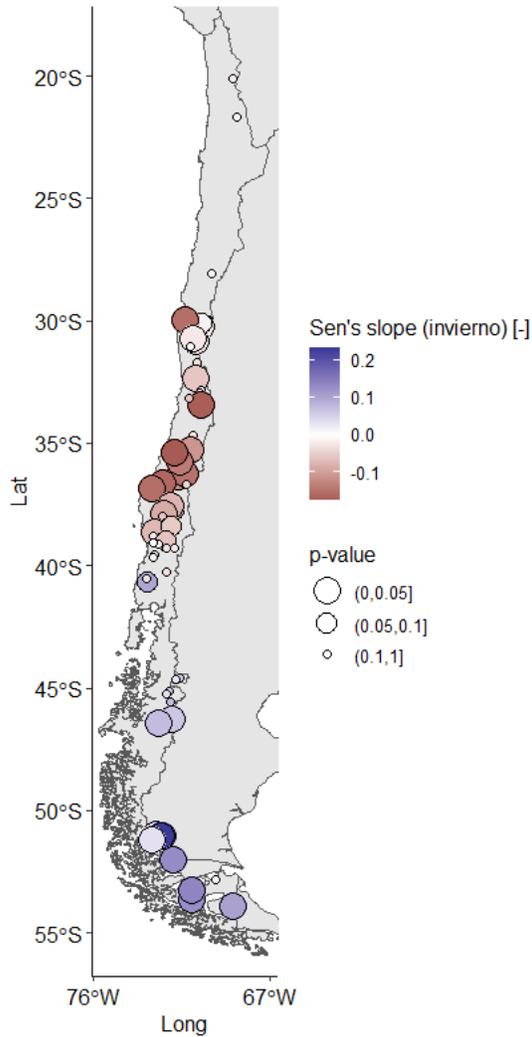


Figura 4.1: Resultados test de Mann-Kendall. Panel a) periodo otoño/invierno. Panel b) primavera/verano

De los resultados de la pendiente de Sen estandarizado como $Z = \frac{X-\mu}{\sigma}$ para estimar la magnitud de las tendencias, donde se aprecia que, en caso de las tendencias en otoño/invierno (Figura 4.2 a)), las magnitudes son negativas entre las Latitudes 30°S y 39°S. De estas cuencas, la gran mayoría se encuentra en zona cordillerana y pre-cordillerana, a excepción de las cuencas de las estaciones estero Culebrón en el sifón (IV región) y río Andalién camino a Penco (XIII región), las cuales son cuencas costeras. Por otro lado, las cuencas de las estaciones estero Los Puercos en puente Los Puercos (VII región), río Itata en balsa Nueva Aldea (XVI región) y río Mininco en Longitudinal (VIII región) son cuencas pluviales ubicadas en el valle central que presentan disminución en sus eventos extremos.

Pendiente de Sen caudal estandarizado otoño/invierno

a)



Pendiente de Sen caudal estandarizado primavera/verano

b)

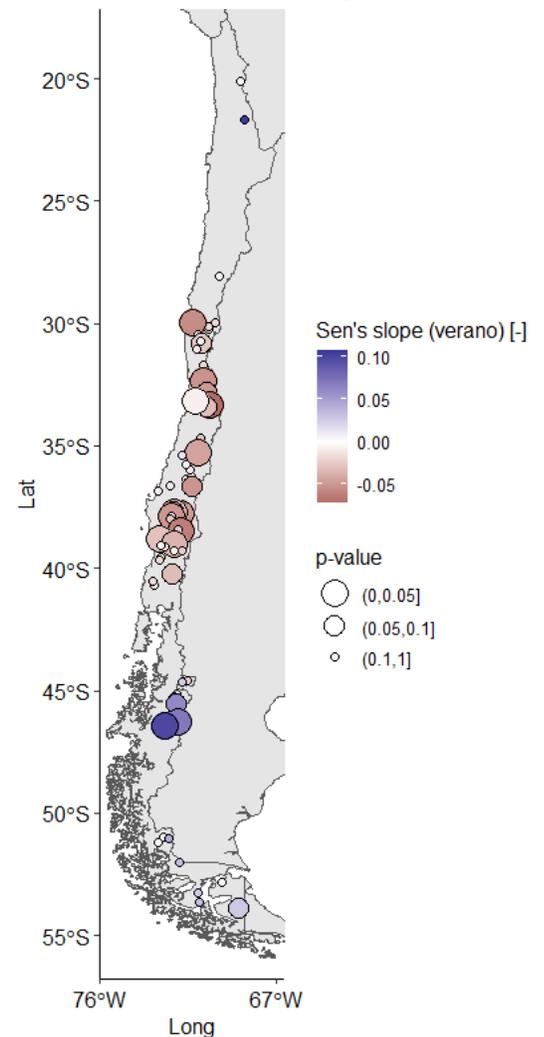


Figura 4.2: Pendiente de sen estandarizado ($Z = \frac{X-\mu}{\sigma}$) para: a) periodo de otoño/invierno; b) periodo de primavera/verano.

De manera análoga, para el caso de las pendientes de la prueba de Sen estandarizada para el periodo de primavera/verano (Figura 4.2 b)) muestran un comportamiento similar: el aumento de los caudales medios diarios máximos anuales se da en la zona sur y austral del país (45-55°S), en cambio, las zonas centro y sur presentan una disminución de los eventos extremos. Las cuencas con tendencias en este periodo se concentran en la cordillera y pre cordillera, a excepción de las cuencas del río Mulchén en Mulchén, río Renaico en Longitudinal y río Cautín en Almagro, cuencas que se encuentran en el valle de la VIII región, con un régimen pluvial.

Tabla 4.1: Estaciones con tendencias estadísticamente significativas en periodo otoño/invierno.

Estación	Lat [°]	Long [°]	Pendiente de Sen estandarizado[-]	p valor [-]
Estero Derecho En Alcohuz	-30.22	-70.49	-0.02	0.02
Estero Culebron En El Sifon	-29.98	-71.29	-0.15	0.00
Rio Mostazal En Caren	-30.84	-70.77	-0.03	0.01
Rio Rapel En Junta	-30.71	-70.87	-0.02	0.04
Rio Alicahue En Colliguay	-32.33	-70.74	-0.06	0.01
Rio Palos En Junta Con Colorado	-35.27	-71.02	-0.11	0.03
Rio Perquilauquen En San Manuel	-36.38	-71.62	-0.11	0.02
Rio Longavi En El Castillo	-36.26	-71.34	-0.15	0.05
Rio Putagan En Yervas Buenas	-35.77	-71.59	-0.14	0.01
Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	-35.37	-71.83	-0.17	0.04
Rio Itata En Balsa Nueva Aldea	-36.65	-72.45	-0.16	0.00
Rio Andalien Camino A Penco	-36.82	-73.03	-0.15	0.00
Rio Duqueco En Villucura	-37.55	-72.03	-0.08	0.04
Rio Mininco En Longitudinal	-37.86	-72.39	-0.09	0.03
Rio Cholchol En Cholchol	-38.61	-72.85	-0.07	0.02
Rio Ibañez En Desembocadura	-46.27	-71.99	0.06	0.03
Rio Murta En Desembocadura	-46.43	-72.70	0.07	0.03
Rio Paine En Parque Nacional 2	-50.96	-72.79	0.05	0.04
Rio Baguales En Cerro Guido	-51.02	-72.48	0.13	0.01
Rio Las Chinas En Cerro Guido	-51.05	-72.52	0.23	0.00
Rio Grey Antes Junta Serrano	-51.18	-73.02	0.03	0.01
Rio San Juan En Desembocadura	-53.65	-70.97	0.13	0.00
Rio Tres Brazos Antes Bt. Sendos	-53.28	-70.98	0.14	0.04
Rio Rubens En Ruta N 9	-52.03	-71.94	0.13	0.00
Rio Grande En Tierra Del Fuego	-53.89	-68.88	0.11	0.00

Tabla 4.2: Estaciones con tendencias estadísticamente significativas en periodo primavera/verano.

Estación	Lat [°]	Long [°]	Pendiente de Sen estandarizado[-]	p valor [-]
Rio Alicahue En Colliguay	-32.33	-70.74	-0.05	0.02
Estero Arrayan En La Montosa	-33.33	-70.46	-0.05	0.05
Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco	-33.34	-70.36	-0.01	0.04
Estero Puangue En Boqueron	-33.17	-71.13	-0.01	0.01
Rio Palos En Junta Con Colorado	-35.27	-71.02	-0.04	0.02
Rio Lirquen En Cerro El Padre	-37.78	-71.86	-0.05	0.01
Rio Mulchen En Mulchen	-37.72	-72.25	-0.03	0.02
Rio Renaico En Longitudinal	-37.85	-72.38	-0.05	0.00
Rio Cautin En Almagro	-38.78	-72.95	-0.03	0.05
Rio Allipen En Los Laureles	-38.98	-72.23	-0.04	0.04
Rio Ibaez En Desembocadura	-46.27	-71.99	0.07	0.02
Rio Murta En Desembocadura	-46.43	-72.70	0.10	0.00

4.2. Resultados de estudio de estacionalidad

En la Figura (4.3) se muestra la pendiente de Sen de los cambios del centro de gravedad del hidrograma medio para todo el territorio nacional. Es posible presenciar un adelanto en la estacionalidad de los caudales en cuencas de la zona cordillerana de la zona centro. Este comportamiento también es posible observarlo en la zona austral, donde se aprecia que existen cuencas con un adelantamiento de su centro de gravedad de hasta -1 día/año.

En la Figura 4.4 se observan cuencas que presentan un adelantamiento (retraso) en su hidrograma de caudales medios diarios. Aquellas cuencas que presentan un retraso en su estacionalidad (13 a 20 días), se encuentran en la zona centro (30-35°S), en zonas cordilleranas y precordilleranas, como también en la zona sur y austral del país, en áreas cordilleranas, cuya escorrentía está típicamente afectada por el aporte nival. Por otro lado, en las zonas centro y sur, principalmente en áreas costeras y de valle se detectan adelantamiento en la estacionalidad de los caudales entre 10 y 15 días. De estas cuencas se destaca el régimen pluvial que presentan y en el caso de las cuencas de Río Emperador Guillermo y Río Simpson, donde además se destaca el aporte nival.

Pendiente de Sen cambio en CG del hidrograma medio

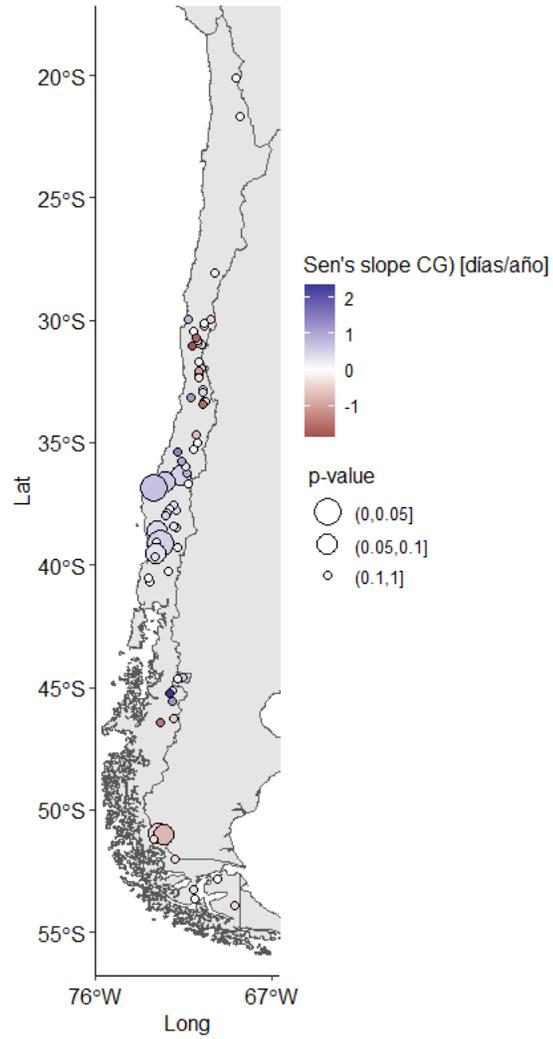


Figura 4.3: Resultados de pendiente de sen de tendencias de cambio en centro de gravedad del hidrograma promedio.

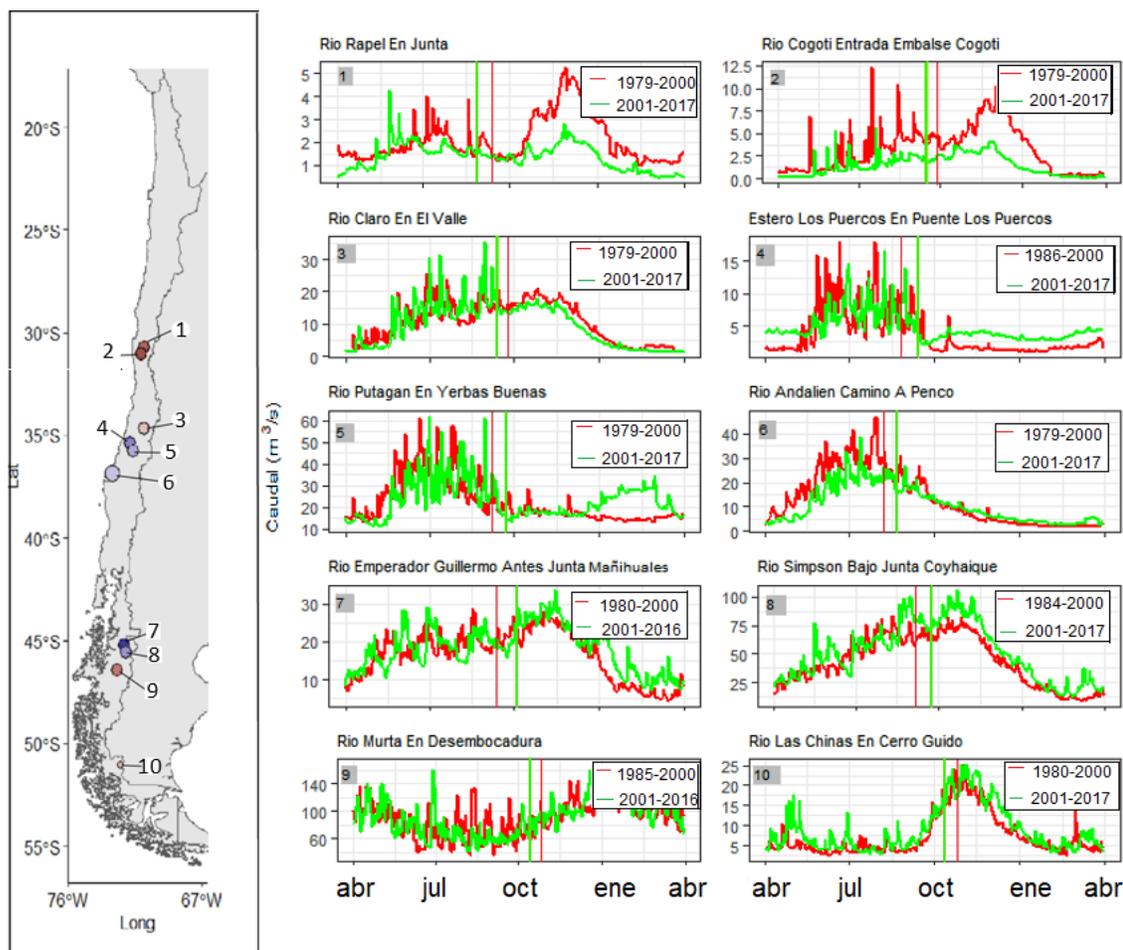


Figura 4.4: 10 cuencas que presentan cambios en el centro de gravedad del hidrograma medio (≥ 10 días). Punto azul: retraso del centro de gravedad, punto rojo: adelanto del centro de gravedad. En hidrogramas: línea roja corresponde a periodo 1, línea verde corresponde a periodo 2 (Notación en Tabla 4.3)

Tabla 4.3: Tabla resumen cambios de CG. Descripción de periodos 1 y 2 para cada cuenca y la diferencia en días del cambio del CG entre cada periodo.

Cuenca	Periodo 1	Periodo 2	Diferencia (días)
Rio Rapel En Junta	1979-2000	2001-2017	-15
Rio Cogoti Entrada Embalse Cogoti	1979-2000	2001-2017	-10
Rio Claro En El Valle	1979-2000	2001-2017	-10
Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	1986-2000	2001-2017	17
Rio Putagan En Yervas Buenas	1979-2000	2001-2015	13
Rio Andalien Camino A Penco	1979-2000	2001-2017	14
Rio Emperador Guillermo Antes Junta Mañihuales	1980-2000	2001-2016	20
Rio Simpson Bajo Junta Coyhaique	1984-2000	2001-2017	14
Rio Murta En Desembocadura	1985-2000	2001-2016	-10
Rio Las Chinas En Cerro Guido	1980-2000	2001-2017	-12

En las Figura (4.5) se presentan los resultados del test de Sen para el Doymín y Doymax, donde se observa un comportamiento generalizado al adelantamiento del día donde ocurre el mínimo flujo, donde para la cuenca del río Putagán en Yerbas Buenas presenta un adelantamiento de casi dos días por año. Por otro lado, de los resultados de la pendiente de Sen del índice Doymax, se observan tendencias de adelantamiento de casi 4 días en el sur austral, en específico para las cuencas río Baguales en Cerro Guido y río Las Chinas en Cerro Guido.

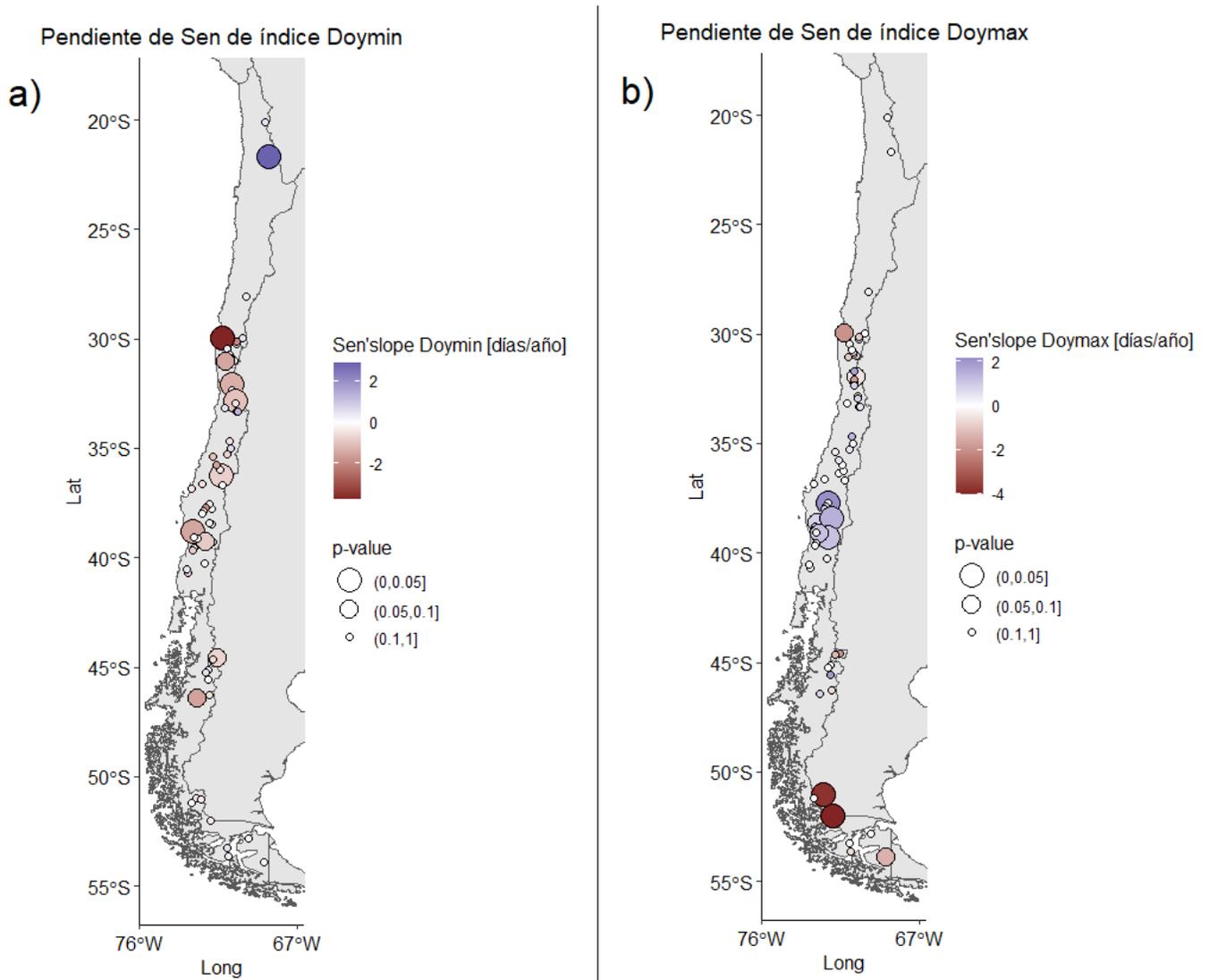


Figura 4.5: Tendencias de factor Doymín y Doymax.

Asimismo, al analizar los resultados obtenidos en los mapas de calor de los coeficientes de Pardé y de GINI para cada una de las cuencas seleccionadas en la Figura 4.4, es posible observar que tanto las cuencas del Río Rapel, Río Cogotí, Río Claro, Río Simpson y Río Murta presentan un alza en sus coeficientes de GINI, lo cual también se ve reflejado con los mapas de calor de los coeficientes de Pardé (Figuras (4.6 a 4.15), lo que podría reflejar cambios en la variabilidad interanual del ciclo hidrológico, generando una concentración del caudal en los meses de mayor flujo.

Por otro lado, las cuencas del estero Los Puercos, río Putagán y río Andalien presentan

una disminución en los coeficientes GINI, lo cual se ve reflejado en los valores de los coeficientes de Pardé, los cuáles han presentado bajas en los valores máximos, en especial en la última década registrada, indicando una homogenización de los caudales medios mensuales. Asimismo, los valores mínimos de los coeficientes de Pardé han aumentado, lo que también contribuye a la homogenización de los caudales registrados y así contribuir a la disminución de la dispersividad de los datos, reflejados en los valores de GINI (Figuras 4.6 a 4.15).

Coefficiente de Pardé Estación Río Rapel en Junta

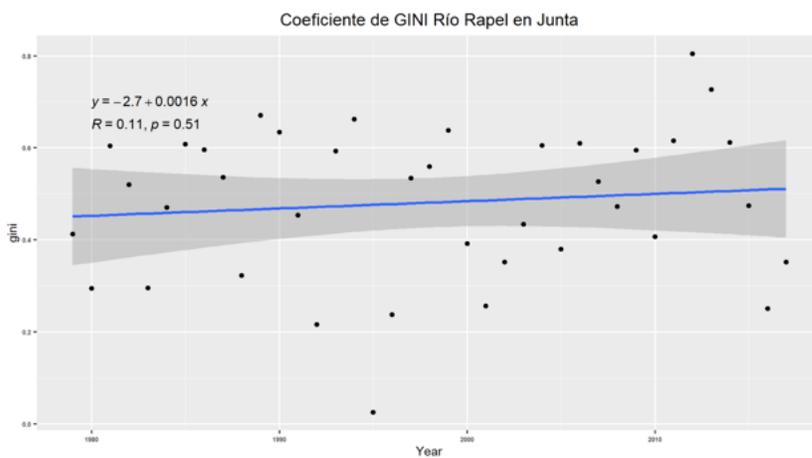
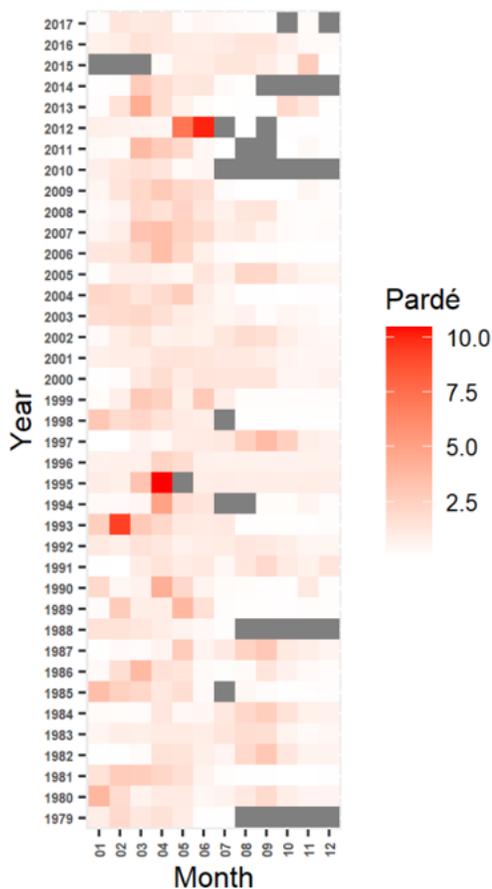


Figura 4.6: Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI Estación Río Rapel en Junta.

Coefficiente de Pardé Estación Río Cogotí entrada embalse Cogotí

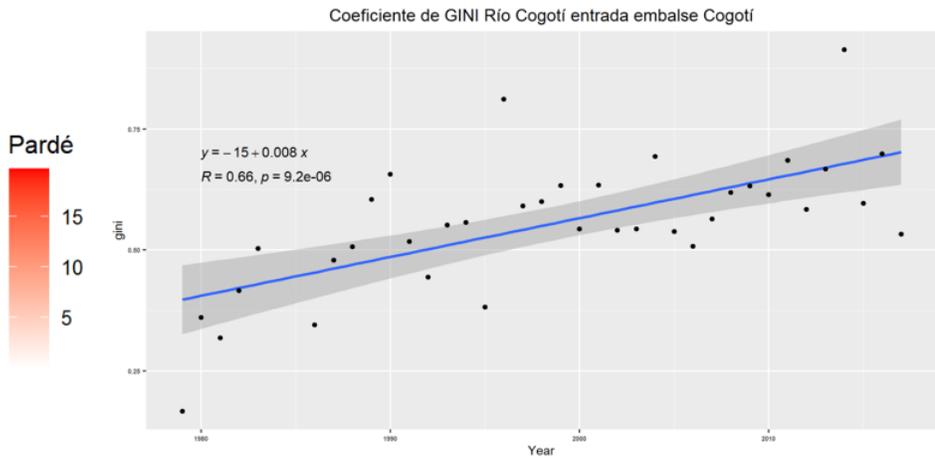
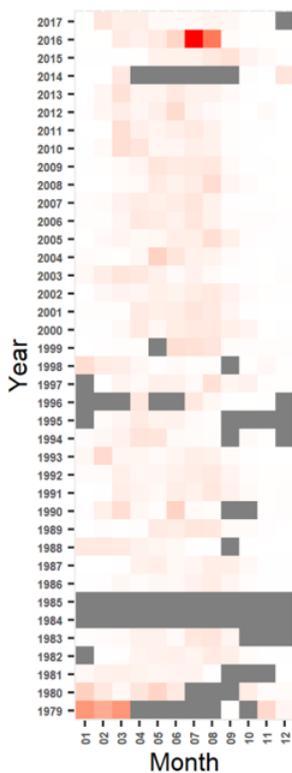


Figura 4.7: Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI Estación río Cogotí entrada embalse cogotí.

Coefficiente de Pardé Estación Río Claro en el Valle

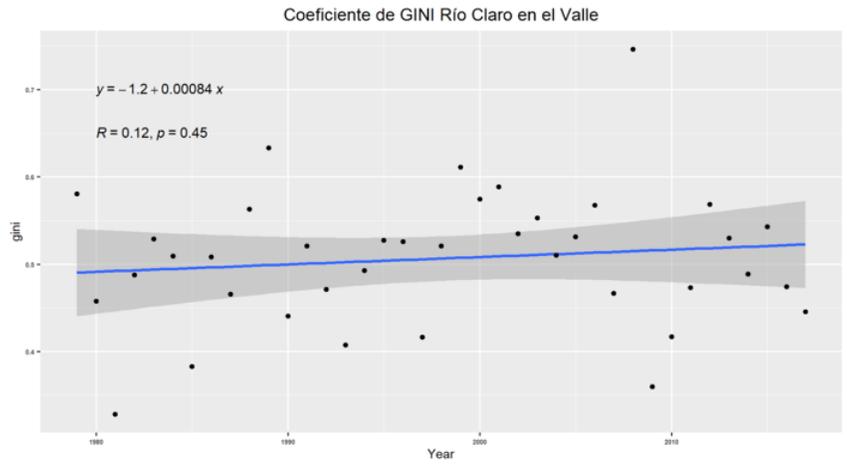
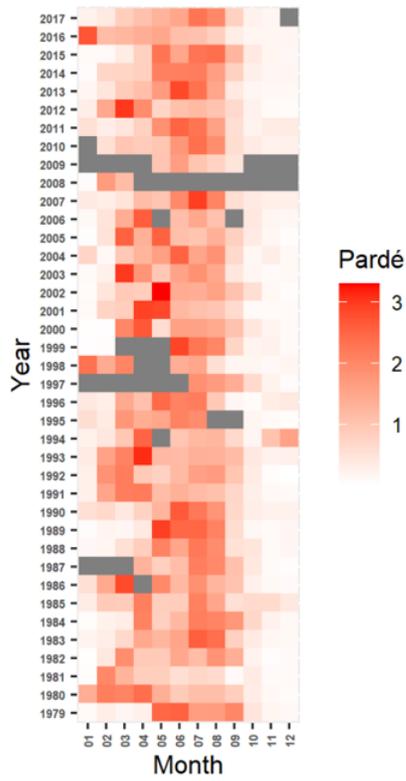


Figura 4.8: Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI en río Claro en el valle.

Coefficiente de Pardé Estación Estero Los Puercos en Puente Los Puercos

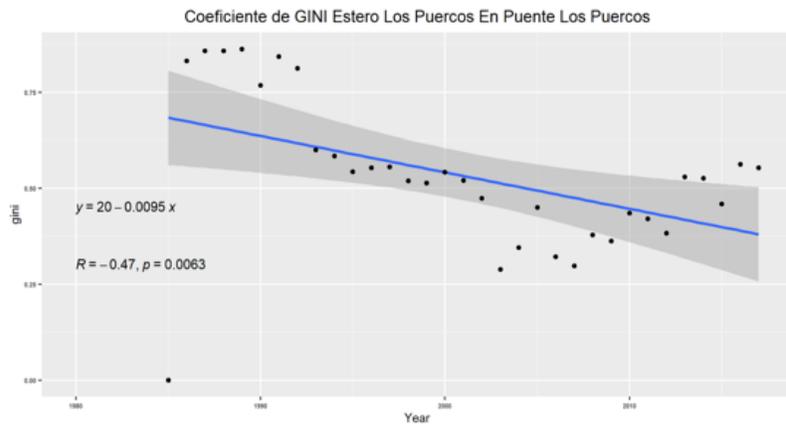
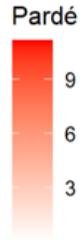
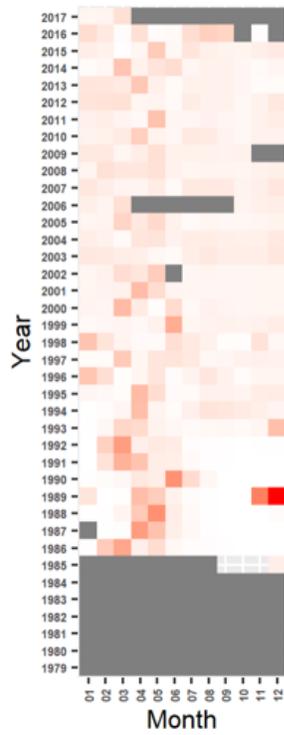


Figura 4.9: Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación Estero Los Puercos en Puente los Puercos

Coeficiente de Pardé Estación Río Putagan en Yervas Buenas

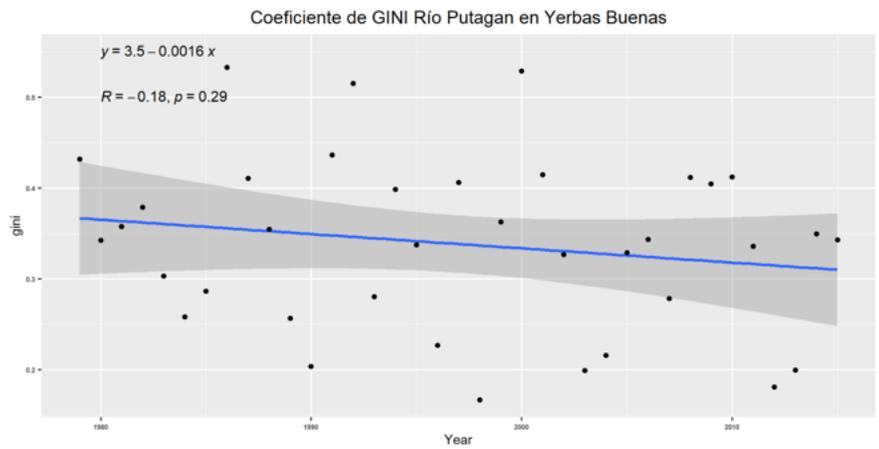
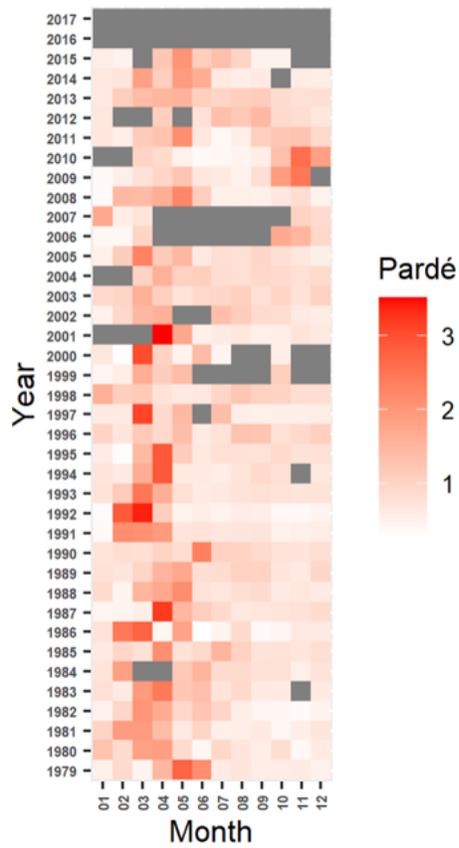


Figura 4.10: Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación Río Putagán en Yervas Buenas.

Coefficiente de Pardé Estación Río Andalien camino a Penco

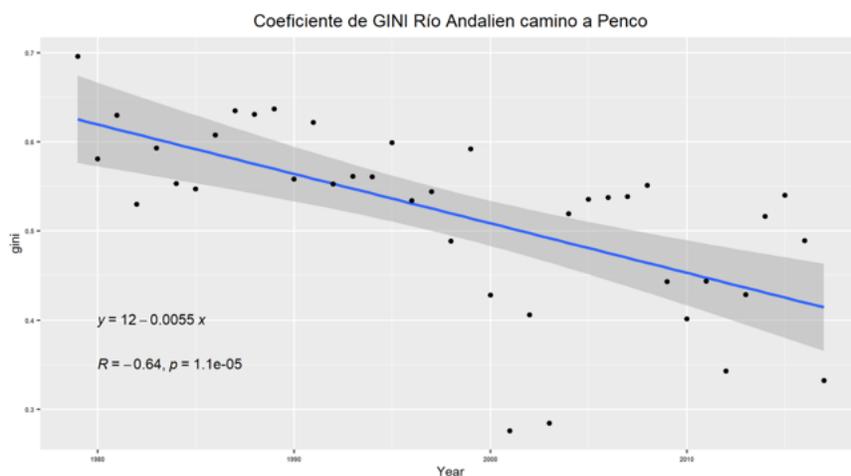
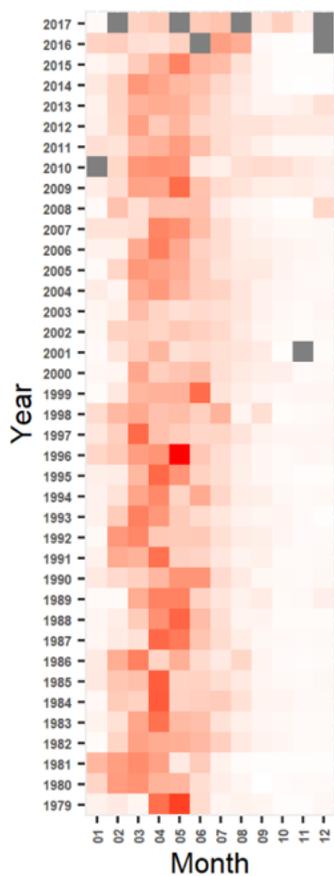


Figura 4.11: Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación río Andalien camino a Penco.

Coefficiente de Pardé Estación Río Emperador Guillermo Antes Junta Mañihuales

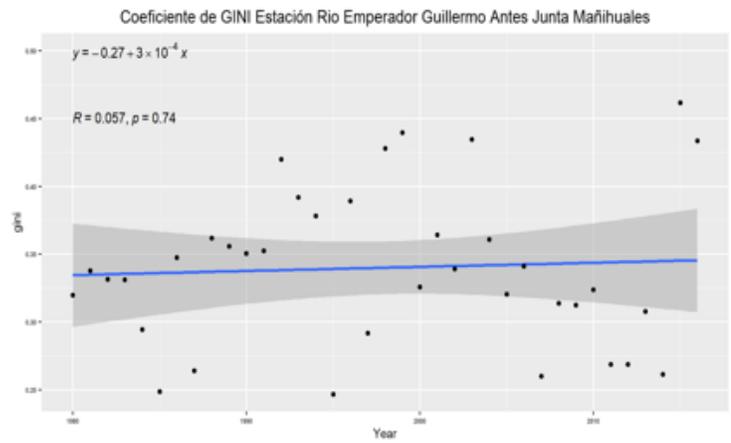
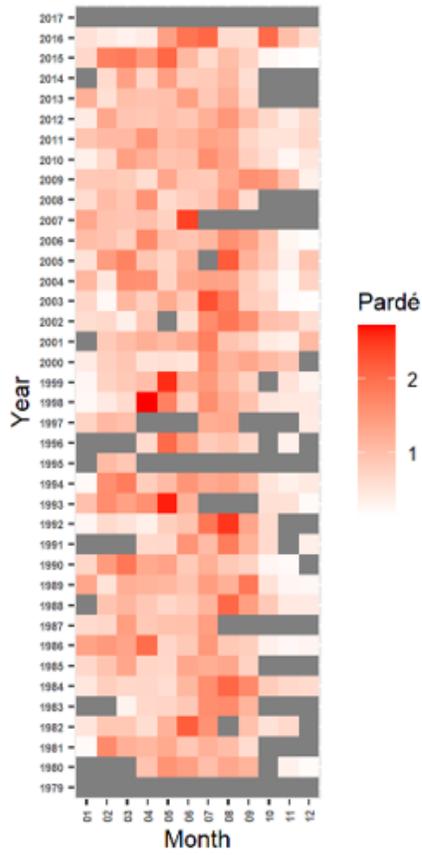


Figura 4.12: Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación río Emperador Guillermo ante Junta Mañihuales.

Coeficiente de Pardé Estación Río Simpson bajo junta Coyhaique

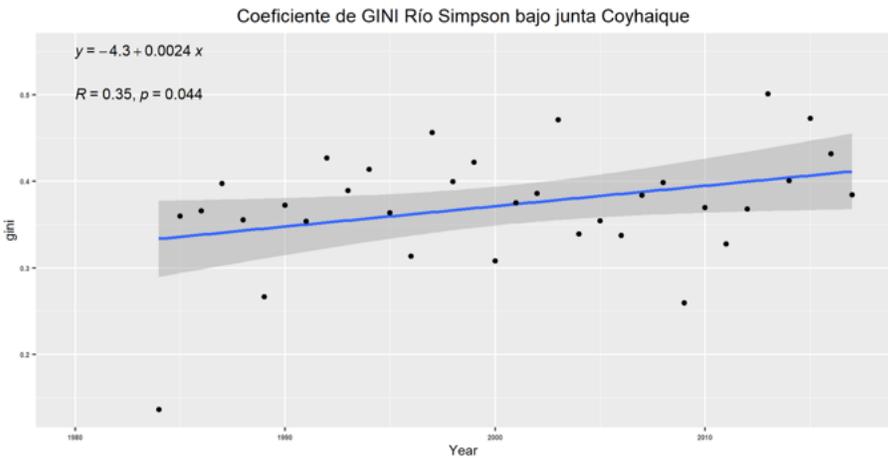
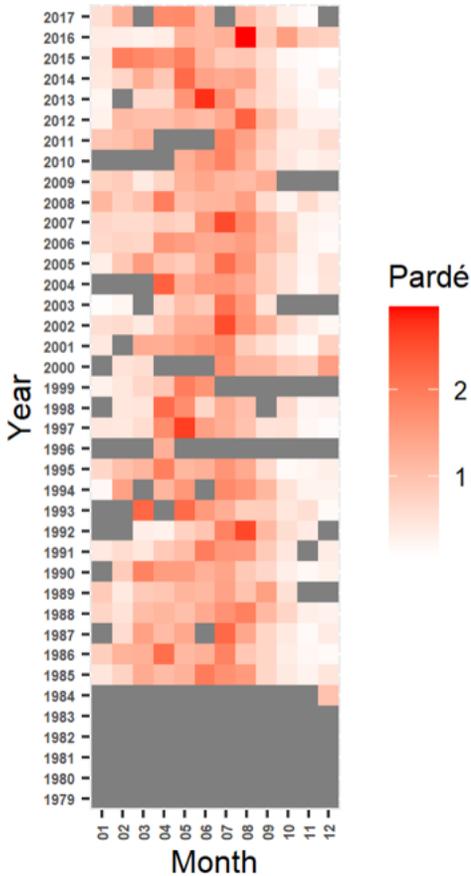


Figura 4.13: Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación río Simpson bajo junta Coyhaique.

Coefficiente de Pardé Estación Río Murta en Desembocadura

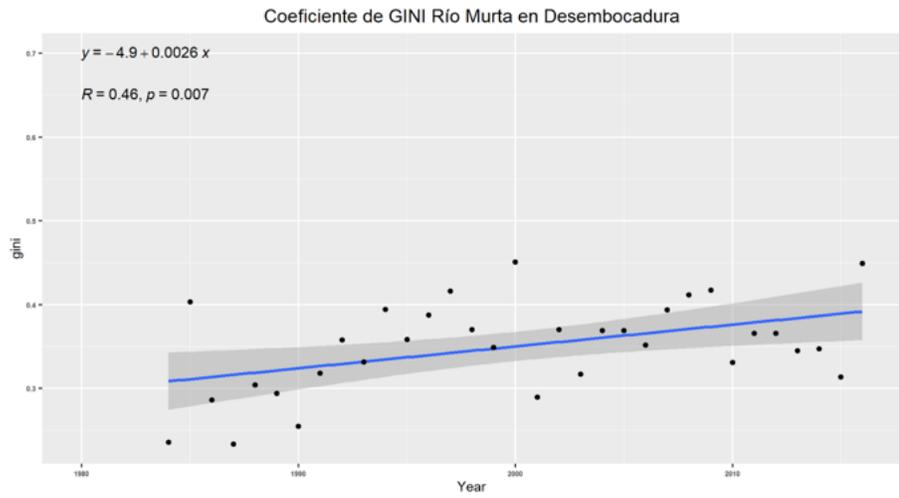
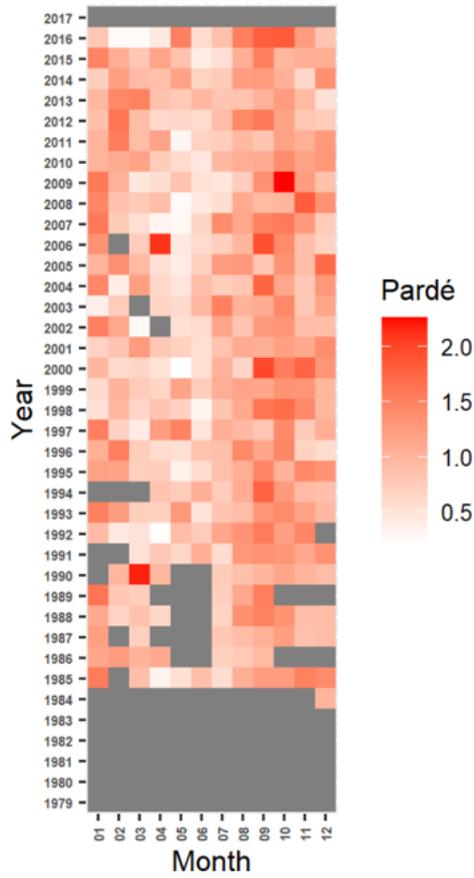


Figura 4.14: Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación río Murta en Desembocadura.

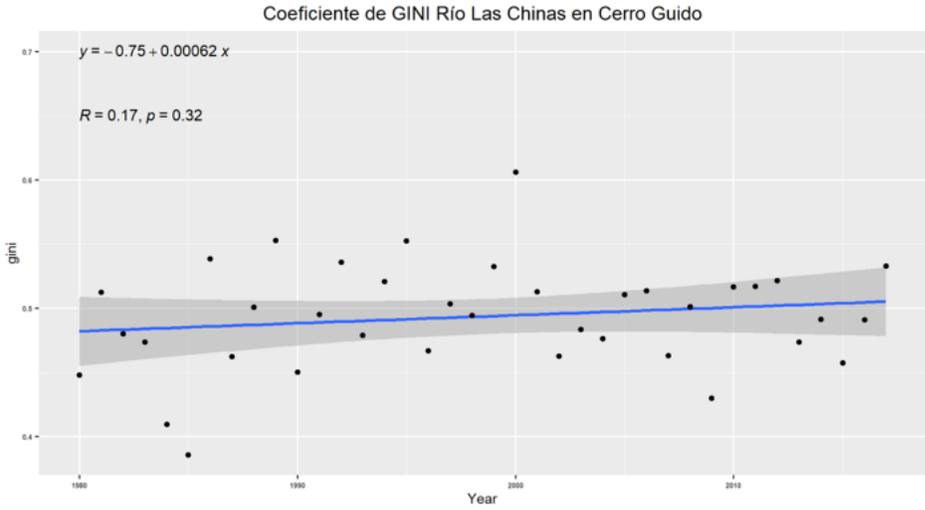
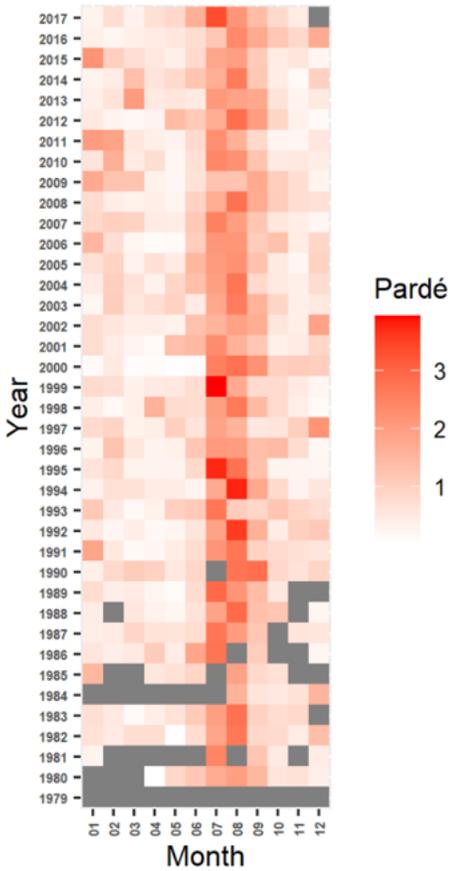


Figura 4.15: Coeficientes de Pardé y coeficientes de GINI estación río Las Chinas en Cerro Guido.

Por otro lado, los resultados del Change Point Analysis (Figuras 4.16 a 4.25) para las cuencas en estudio, indican que a mediados de la década del año 2000 se produce una disminución del promedio de caudales medios diarios máximos anuales, para el periodo de otoño/invierno en los ríos de Rapel, Cogotí, Río Claro, Río Putagán y Río Andalien. En el caso de los ríos Simpson, Murta y las Chinas, han presentado un aumento en la media de caudales extremos en la última década.

En el caso de análisis del Change Point Analysis en el periodo de primavera/verano, se observa que seis de las diez cuencas analizadas presentan un aumento de sus caudales extremos diarios, presentando su punto de cambio entre la década de los 80 y 90'. Por el contrario, las cuencas del río Rapel, río Cogotí, río Claro, río Andalien y el estero Los Puercos presentan una disminución del promedio de caudal medio diario máximo, presentando momento de cambio principalmente a finales de la década de los 80'. A continuación, en las Tablas 4.4 y 4.5 se presentan los caudales promedios de los distintos momentos, la diferencia entre estos valores y el año en que se detecta el cambio de la media de la serie, para los periodos de otoño/invierno y primavera/verano, respectivamente:

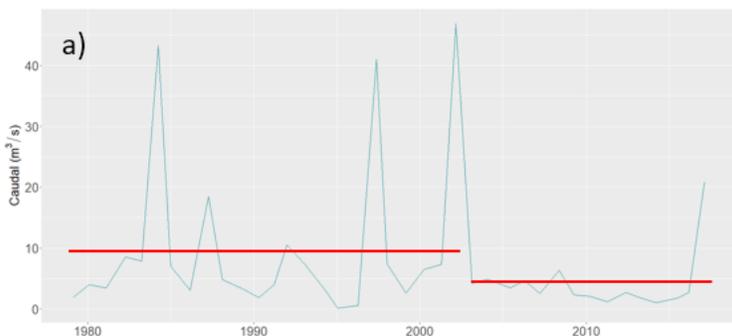
Tabla 4.4: Resultados Change Point Analysis periodo otoño/invierno.

Cuenca	Periodo otoño/invierno			
	Caudal Promedio 1 (m3/s)	Caudal Promedio (m3/s)	Diferencia (m3/s)	Momento de cambio
Río Rapel En Junta	10.2	4.2	-6	2003
Río Cogoti Entrada Embalse Cogoti	34.9	13.6	-21.3	2000
Río Claro En El Valle	124.6	63.5	-61.1	2009
Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	125	60.6	-64.4	1988
Río Putagan En Yerbas Buenas	237.8	132.6	-105.3	2002
Río Andalién Camino A Penco	135.9	54	-81.8	2010
Río Emperador Guillermo Antes Junta Mañihuales	51.5	82.1	30.6	1985
Río Simpson Bajo Junta Coyhaique	193.7	294.3	100.7	2012
Río Murta En Desembocadura	372.4	518.8	146.4	2005
Río Las Chinas En Cerro Guido	44.7	105.6	60.8	2008

Tabla 4.5: Resultados Change Point Analysis periodo primavera/verano.

Cuenca	Periodo primavera/verano			
	Caudal Promedio 1 (m3/s)	Caudal Promedio 2 (m3/s)	Diferencia (m3/s)	Momento de cambio
Río Rapel En Junta	9.4	3.4	-6.1	1988
Río Cogoti Entrada Embalse Cogoti	10.9	3.8	-7.1	2001
Río Claro En El Valle	47.9	27.5	-20.4	1988
Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	4.8	10.5	5.7	1994
Río Putagan En Yerbas Buenas	39.4	59.2	19.8	1985
Río Andalién Camino A Penco	43.4	21.7	-21.8	1987
Río Emperador Guillermo Antes Junta Mañihuales	50.1	62.2	12.1	1999
Río Simpson Bajo Junta Coyhaique	126.4	212.6	86.2	1998
Río Murta En Desembocadura	267.5	453.1	185.6	1997
Río Las Chinas En Cerro Guido	38.8	61.8	23	1986

Change point analysis Río Rapel en Junta (Periodo Invierno)



Change point analysis Río Rapel en Junta (Periodo Verano)

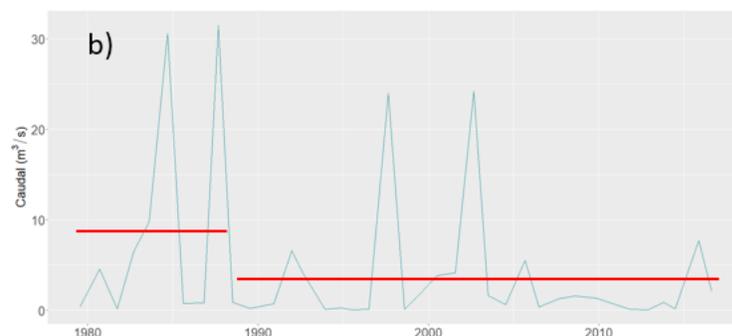
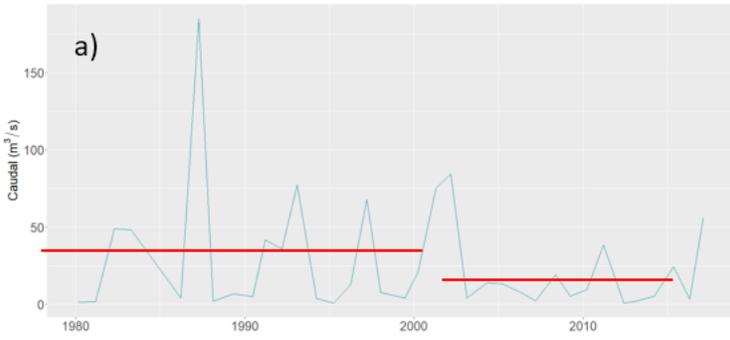


Figura 4.16: Change point analysis estación Río Rapel en junta. Panel A: invierno. Panel B: verano.

Change point analysis Río Cogotí entrada embalse Cogotí (Periodo Invierno)



Change point analysis Río Cogotí entrada embalse Cogotí (Periodo Verano)

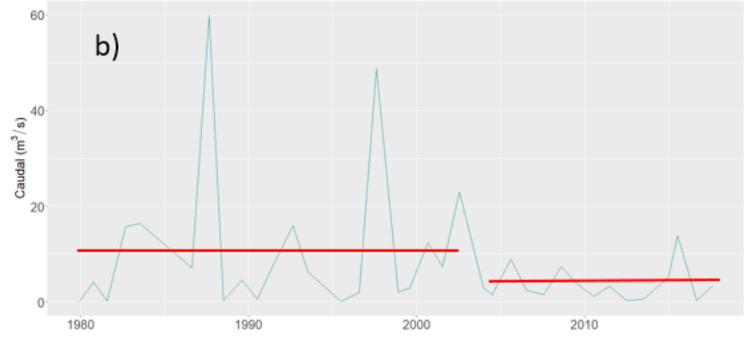
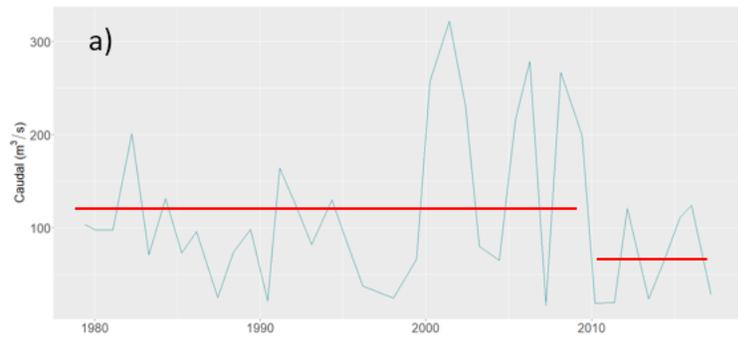


Figura 4.17: Change point analysis estación Río Cogotí entrada embalse Cogotí. Panel A: invierno. Panel B: verano.

Change point analysis Río Claro en el Valle (Periodo Invierno)



Change point analysis Río Claro en el Valle(Periodo Verano)

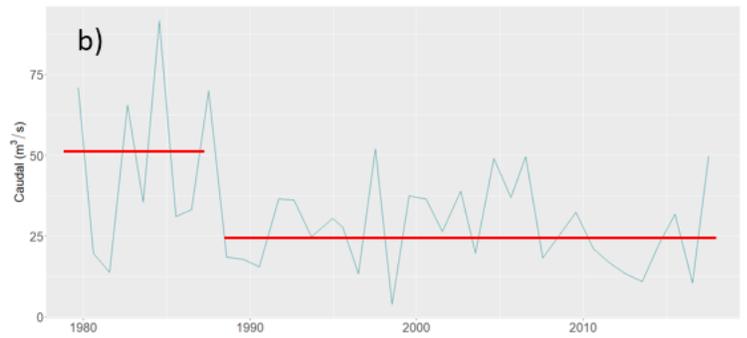


Figura 4.18: Change point analysis estación Río Claro en el valle. Panel A: invierno. Panel B: verano.

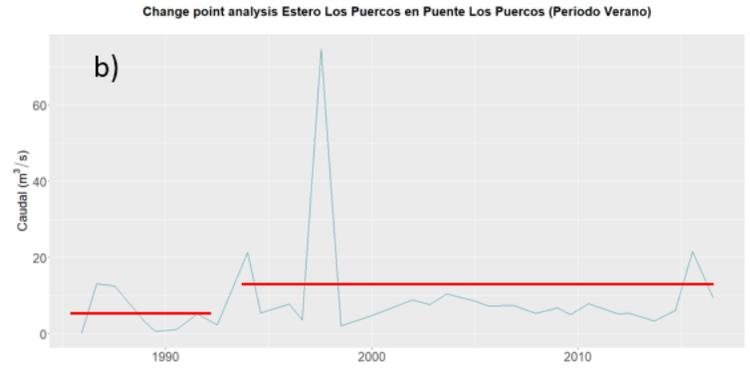
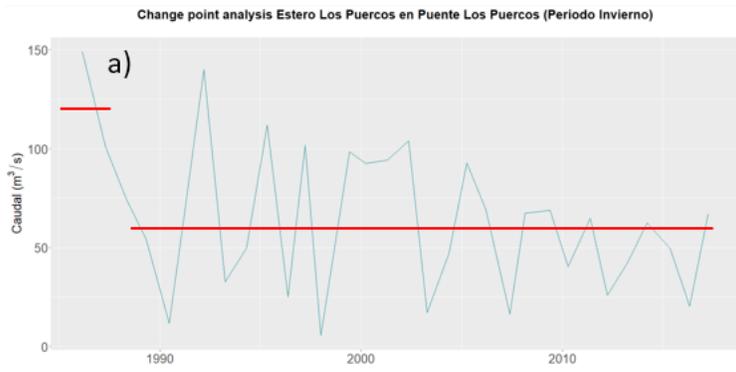


Figura 4.19: Change point analysis estación Estero Los Puercos en puente Los Puercos. Panel A: invierno. Panel B: verano.

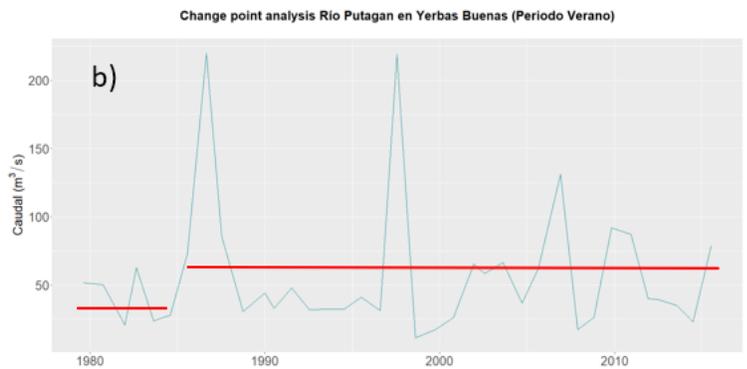
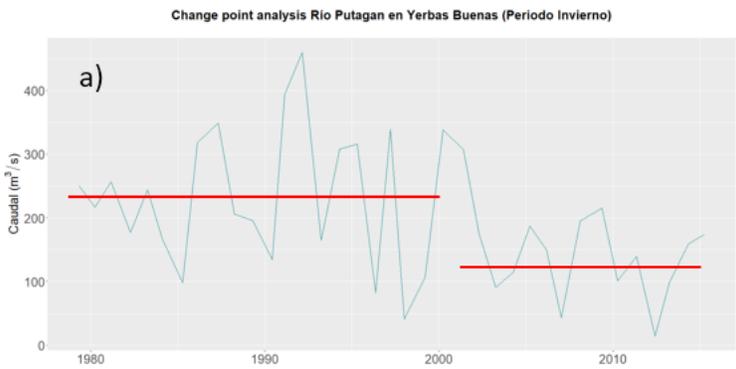


Figura 4.20: Change point analysis estación Río Putagán en Yervas Buenas. Panel A: invierno. Panel B: verano.

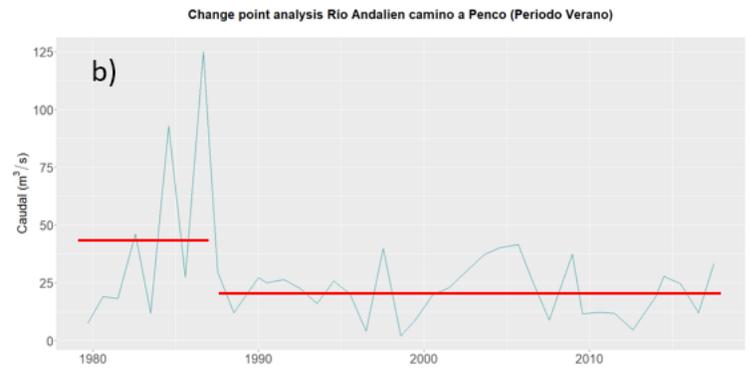
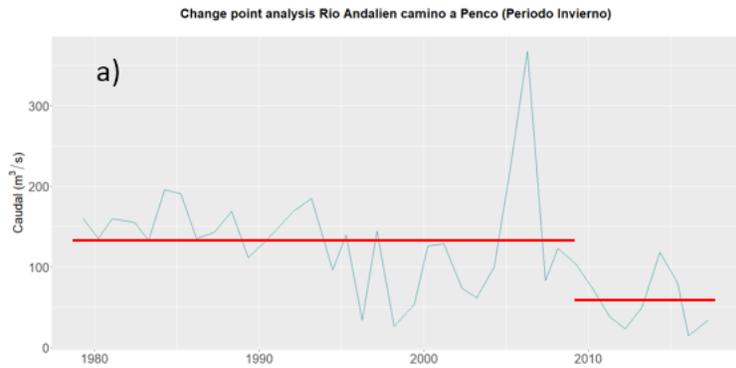


Figura 4.21: Change point analysis estación Río Andalien camino a Penco. Panel A: invierno. Panel B: verano.

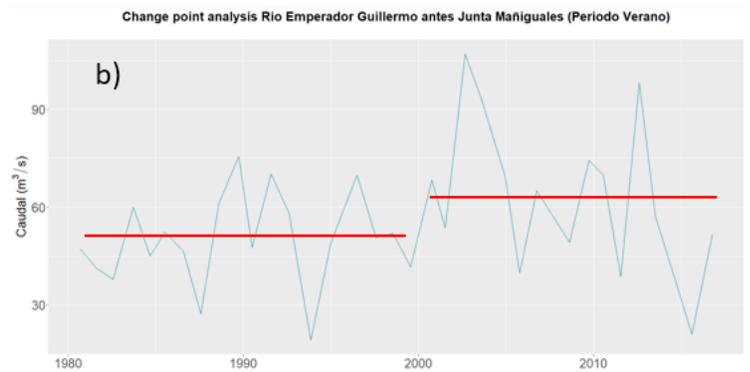
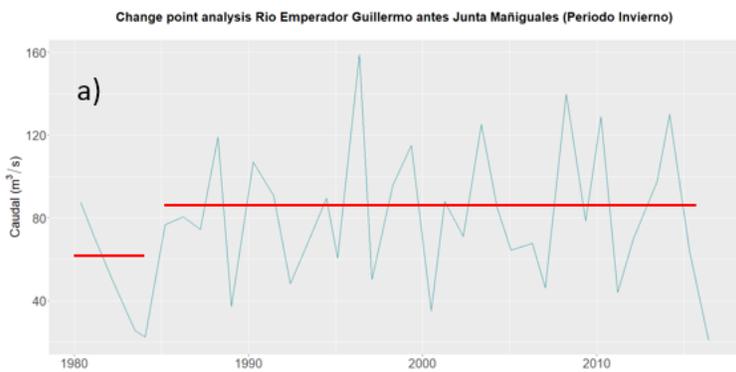


Figura 4.22: Change point analysis estación Río Emperador Guillermo ante junta Mañiguales. Panel A: invierno. Panel B: verano.

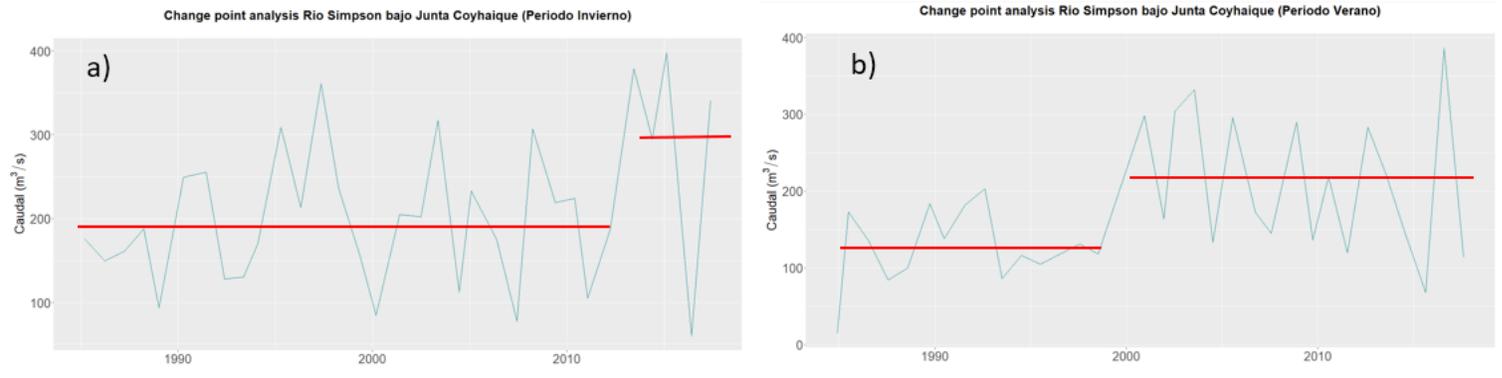


Figura 4.23: Change point analysis estación Río Simpson bajo junta Coyhaique. Panel A: invierno. Panel B: verano.

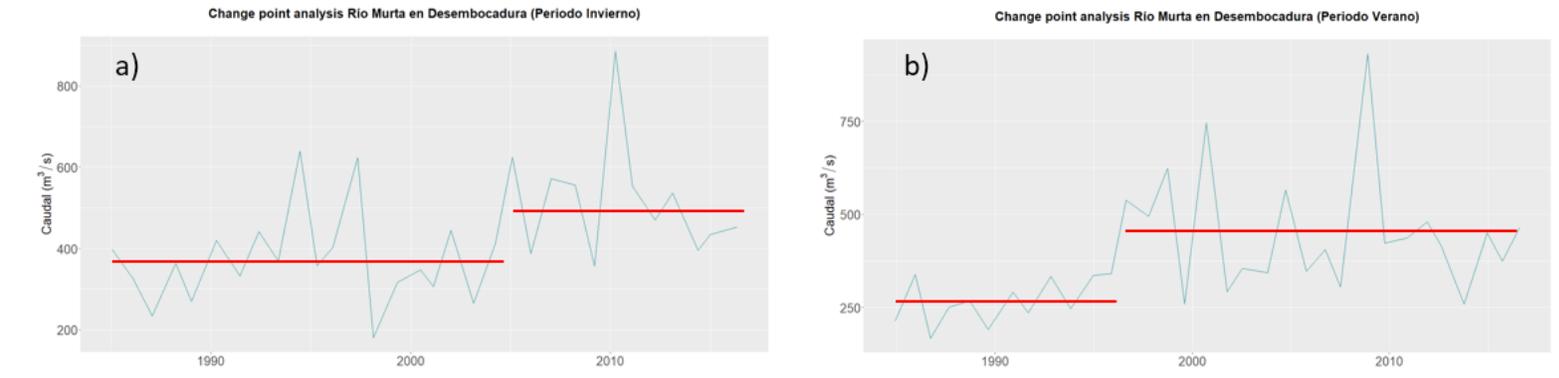


Figura 4.24: Change point analysis estación Río Murta en Desembocadura. Panel A: invierno. Panel B: verano.

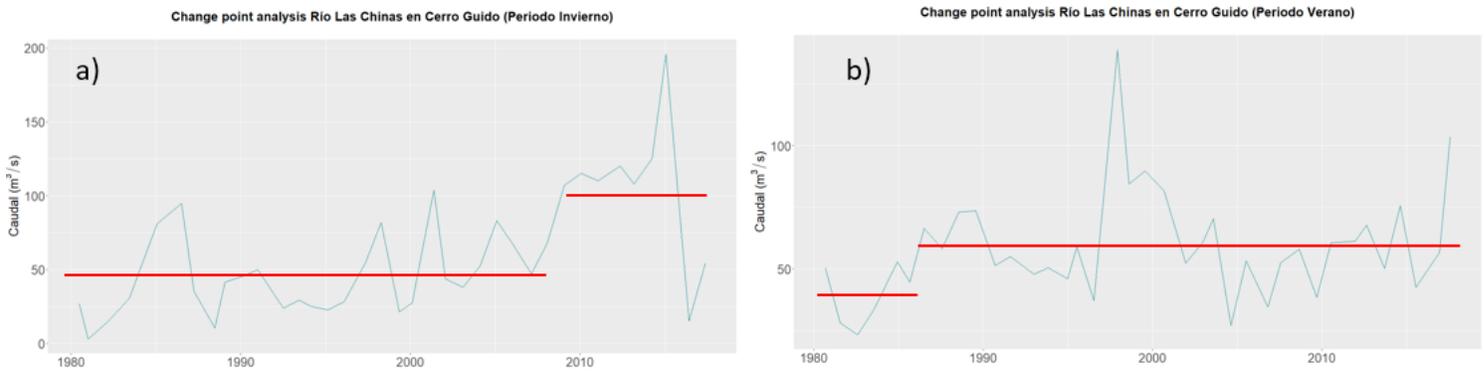


Figura 4.25: Change point analysis estación Río Las Chinas en cerro Guido.
 Panel A: invierno. Panel B: verano.

Capítulo 5

Análisis de frecuencias con enfoque estacionario y no estacionario.

5.1. Análisis de Frecuencia Periodo Otoño/Invierno

En la Figura 5.1 se presenta la selección de los modelos no estacionarios evaluados en aquellas cuencas con tendencias significativas, donde para la consideración de los modelos con mejor rendimiento en la prueba de Kolmogorov-Smirnof (Figura 5.1 a)) se observa una mejora al incorporar temporalidad da la desviación estándar de la serie, seguido por la incorporación de la temporalidad del promedio. Asimismo, bajo el criterio de rendimiento del test Kolmogorov-Smirnof, el modelo estacionario con mejor desempeño es aquel que sigue la distribución Gamma (11 estaciones), distribuidas entre las Latitudes 35°S-40°S y en la zona austral del país (Figura 5.2 a)).

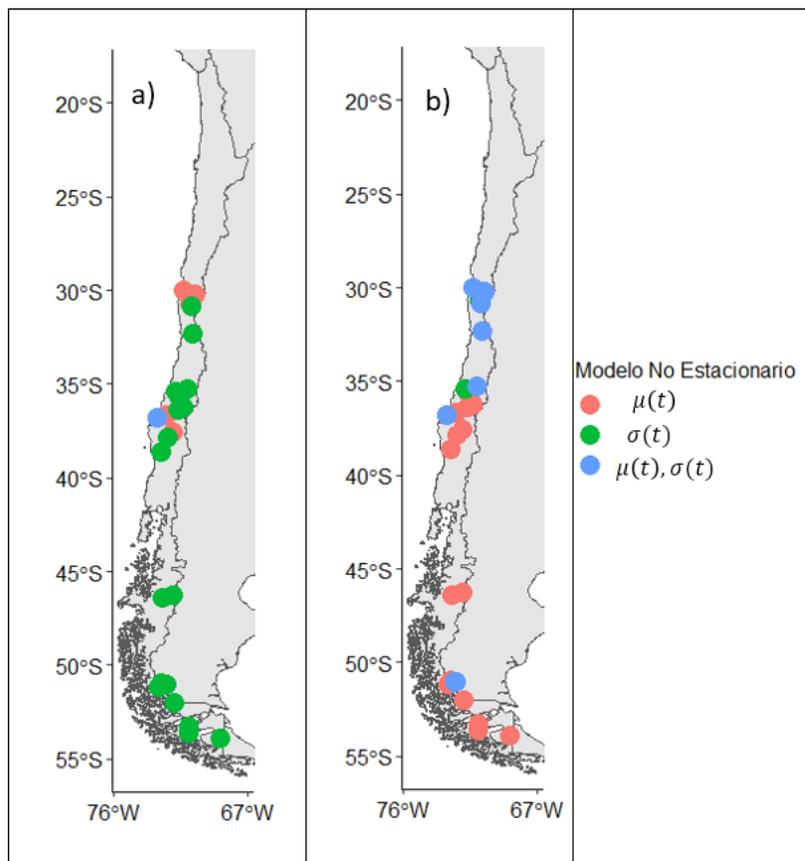


Figura 5.1: Distribución de los mejores modelos no estacionarios para las cuencas con tendencia significativa. Panel a: Modelos elegidos bajo criterio K-S. Panel b: Modelos elegidos bajo criterio BIC.

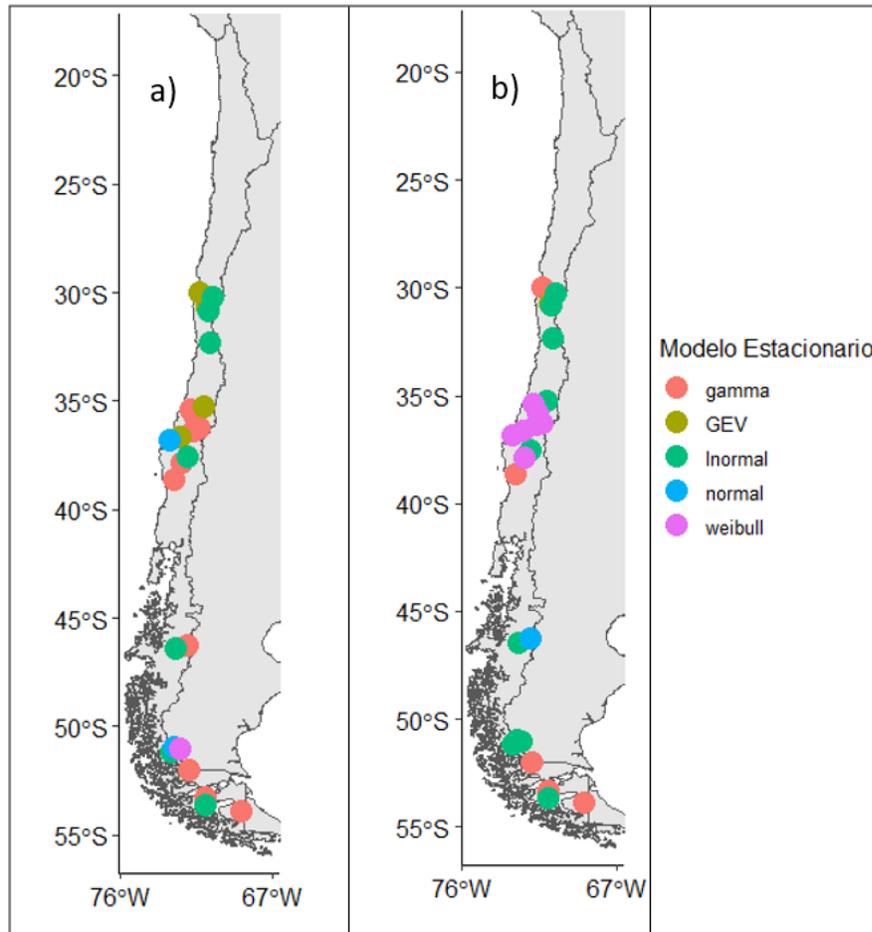


Figura 5.2: Distribución de los mejores modelos estacionarios para las cuencas con tendencia significativa. Panel a: Modelos elegidos bajo criterio K-S. Panel b: Modelos elegidos bajo criterio BIC.

Al clasificar los mejores modelos no estacionario que minimizan su BIC, es posible observar una mejora en el rendimiento al incorporar la temporalidad en el promedio, seguido por la incorporación del tiempo de manera conjunta en el promedio y desviación estándar. Para el primer caso, ésto se produce en cuencas ubicadas entre la Latitud 35°S-50°S, como también en la zona austral del país, mientras que para el segundo caso, las cuencas con esta configuración se encuentran principalmente entre las latitudes 30°S-35°S.

De manera análoga, los modelos que minimizan su BIC para el caso de análisis de frecuencia de modelos estacionarios son en primer lugar la distribución Lognormal (10 estaciones), seguido por la distribución Weibull (7 estaciones) y Gamma (6 estaciones), como se observa en la Figura 5.2 (b). Así en las zonas centro-sur y austral, el modelo que mejor desempeño obtiene es la distribución Lognormal.

La inclusión de criterios estadísticos como el BIC y test de bondad de ajuste como el test K-S permite una selección sistemática de los mejores modelos ajustados, tanto bajo un enfoque estacionario como no estacionario. Considerando esto, se realizó una comparación entre las magnitudes de los caudales extremos estimados por el mejor ajuste estacionario y el mejor ajuste no estacionario. En cada panel se presenta la diferencia porcentual por cuenca

del caudal estimado para tres periodos de retorno (10, 100 y 500 años), calculados a partir de la ecuación (3.3).

Así, considerando los mejores modelos a partir del test de bondad de ajuste K-S, se observa que en la Figura (5.3), las cuencas ubicadas entre la latitud 30°S y 35°S presentan una marcada diferencia positiva al considerar un enfoque no estacionario. Por otro lado, para las cuencas ubicadas entre las latitudes 35°S - 40°S , las diferencias pueden ser positivas (en el caso de aquellas cuencas ubicadas en zonas costeras y cordilleranas), como negativas, en el caso de las estaciones estero Los Puercos en puente Los Puercos y río Duqueco en Villucura, donde las diferencias pueden diferir en hasta -72% , para periodos de retorno de 500 años. Finalmente, en las zonas al sur de la latitud 40°S , los sesgos son positivos, acrecentándose hasta 20% de diferencia en la cuenca del río Baguales en cerro Guido, la cual incrementa para los periodos de 100 y 500 años hasta diferencias de 200% más caudal con respecto al enfoque estacionario.

Por otro lado, en la Figura (5.4) se observa la diferencia porcentual de los modelos con enfoque estacionario y no estacionarios elegidos a partir del criterio BIC. Así, es posible observar que en la zona central se produce principalmente un delta negativo entre los modelos no estacionarios y estacionarios, llegando a diferencias de -80% hasta -98% para las cuencas río Mostazal en Carén y estero Culebrón en el Sifón, respectivamente. Caso contrario, en la zona sur y austral las diferencias son positivas, en especial para aquellos periodos de retorno superiores a los 100 años.

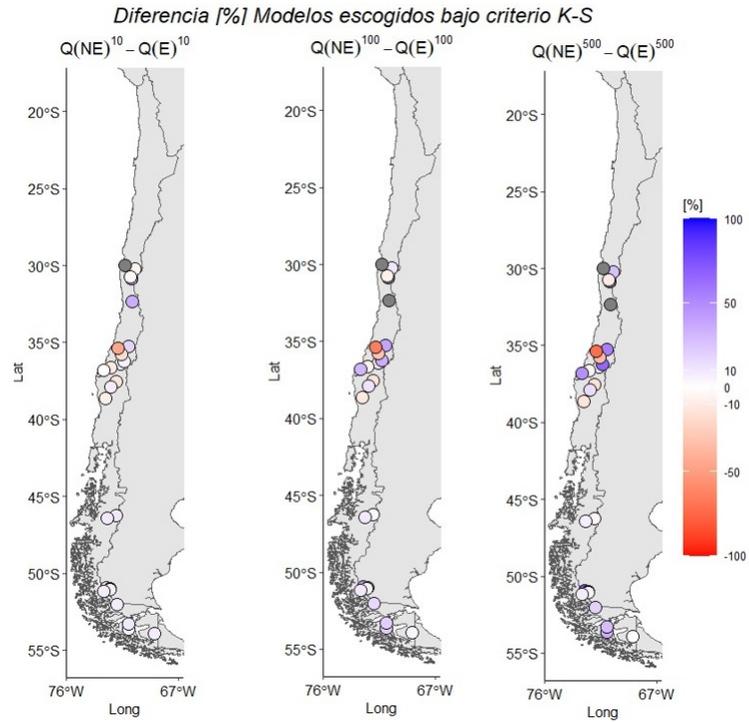


Figura 5.3: Diferencia porcentual de caudales medios diarios máximos esperados para los periodos de retorno de 10, 100, 500 años entre el estimado por el mejor modelo no estacionario (NE) y el mejor modelo estacionario (E), bajo el criterio K-S. Las cuencas con tonos rojizos indican que el modelo no estacionario entrega una disminución en la magnitud del evento, mientras que los tonos azules son un aumento respecto al estimado por el análisis de frecuencia estacionario.

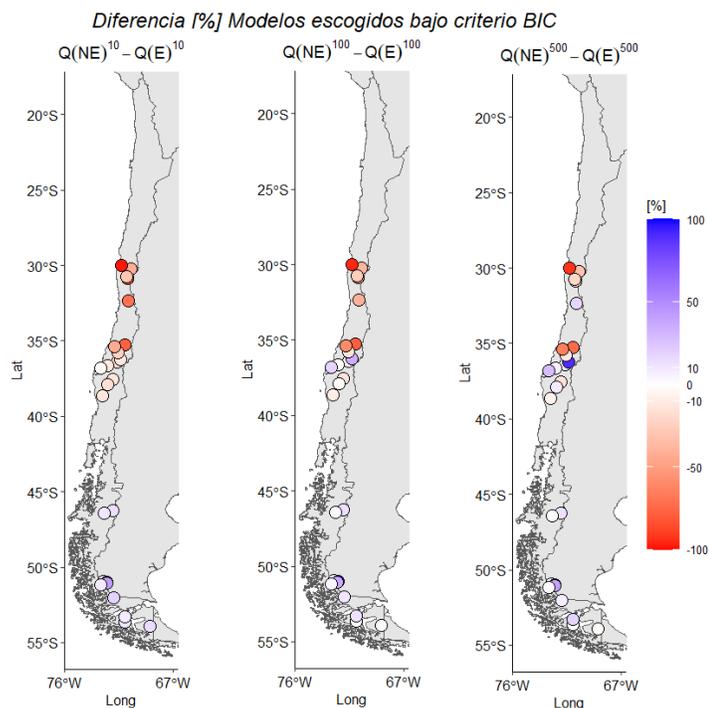


Figura 5.4: Diferencia porcentual de caudales medios diarios máximos esperados para los periodos de retorno de 10, 100, 500 años entre el estimado por el mejor modelo no estacionario (NE) y el mejor modelo estacionario (E), bajo el criterio BIC. Las cuencas con tonos rojizos indican que el modelo no estacionario entrega una disminución en la magnitud del evento, mientras que los tonos azules son un aumento respecto al estimado por el análisis de frecuencia estacionario.

5.2. Análisis de Frecuencia Periodo Primavera/Verano.

En la Figura 5.5 se presenta la selección de los modelos no estacionarios en el periodo de primavera/verano evaluados en aquellas cuencas con tendencias significativas, donde para la consideración de los modelos con mejor rendimiento en la prueba de Kolmogorov-Smirnof (Figura 5.5 (a)) se observa una mejora al incorporar temporalidad a la desviación estándar de la serie, seguido por la incorporación de la temporalidad del promedio. Asimismo, bajo el criterio de rendimiento del test Kolmogorov-Smirnof, el modelo estacionario con mejor desempeño es aquel que sigue la distribución GEV (7 estaciones), distribuidas entre las Latitudes 35°S-40°S y en la zona austral del país (Figura 5.6 (a)).

Al clasificar los mejores modelos no estacionario que minimizan su BIC, es posible observar una mejora en el rendimiento al incorporar la temporalidad en el promedio, seguido por la incorporación del tiempo de manera conjunta en el promedio y desviación estándar. Para el primer caso, esto se produce en cuencas ubicadas entre la Latitud 35°S-50°S, como también en la zona austral del país, mientras que para el segundo caso, las cuencas con esta configuración se encuentran principalmente entre las latitudes 30°S-35°S.

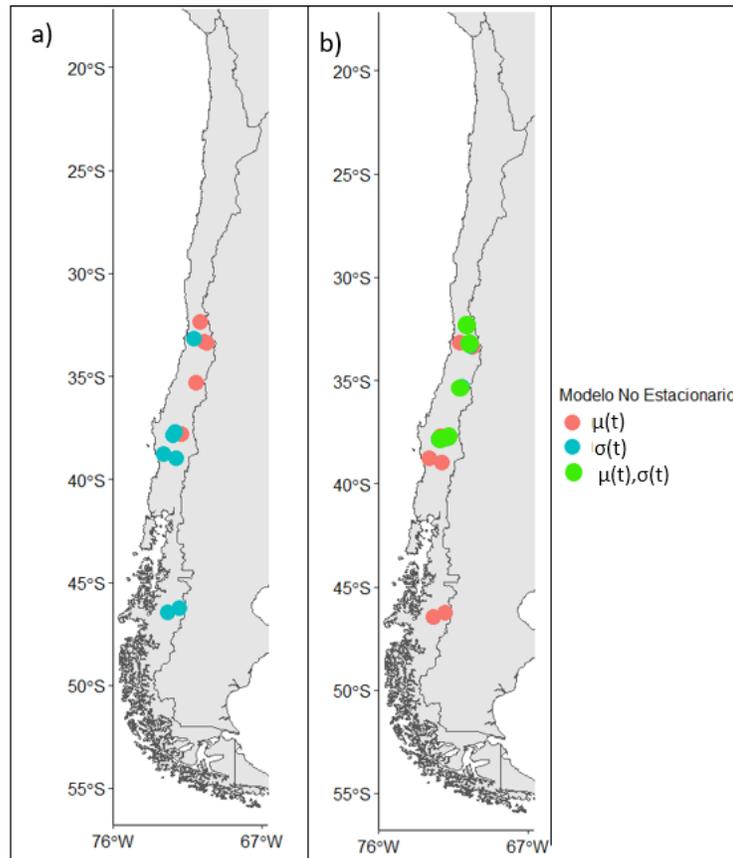


Figura 5.5: Distribución de los mejores modelos no estacionarios para las cuencas con tendencia significativa. Panel a: Modelos elegidos bajo criterio K-S. Panel b: Modelos elegidos bajo criterio BIC.

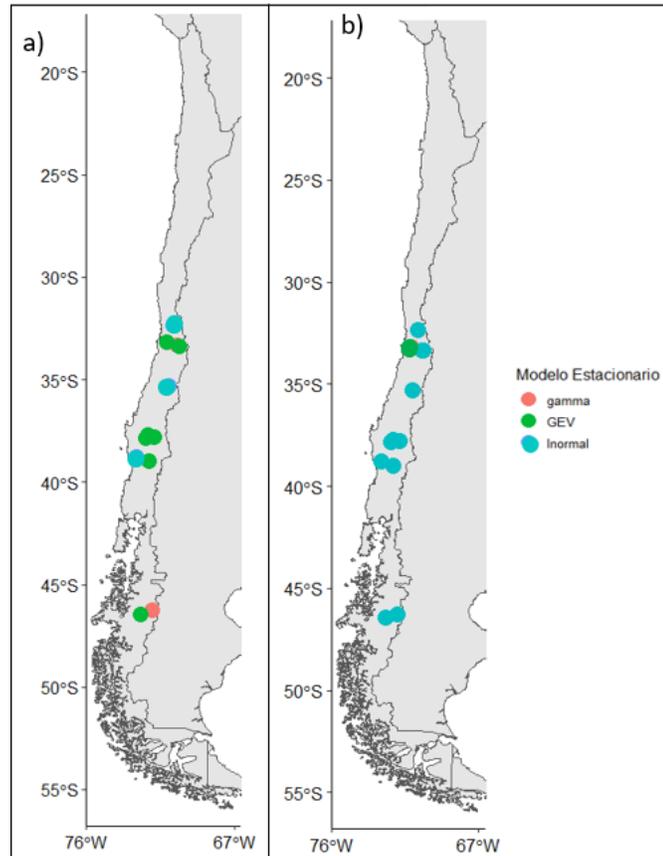


Figura 5.6: Distribución de los mejores modelos estacionarios para las cuencas con tendencia significativa. Panel a: Modelos elegidos bajo criterio K-S. Panel b: Modelos elegidos bajo criterio BIC.

Los modelos que minimizan su BIC para el caso de análisis de frecuencia de modelos estacionarios son los modelos de distribución Lognormal (11 estaciones) y una cuenca que sigue una distribución GEV.

Al comparar las diferencias entre las magnitudes de los caudales extremos estimados por el mejor ajuste estacionario y el no estacionario bajo el criterio del test de bondad K-S, se observa en la Figura (5.7) que el comportamiento es a generar un delta positivo en la zona ubicada entre las latitudes 30°S-40°S. Asimismo, es posible encontrar en esta zona que las diferencias son despreciables, caso que se repite en la zona austral del país.

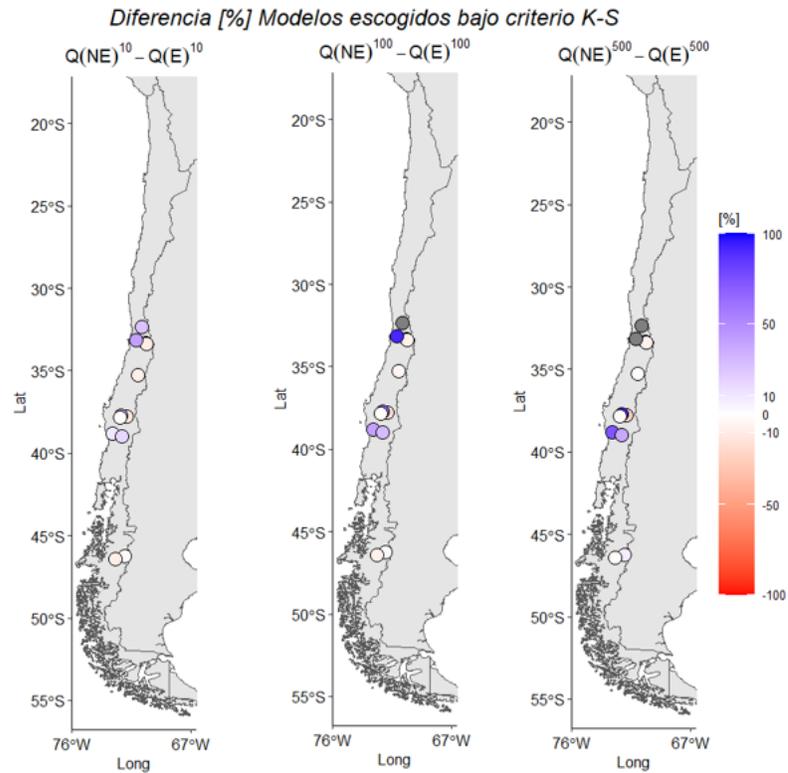


Figura 5.7: Diferencia porcentual de caudales medios diarios máximos esperados para los periodos de retorno de 10, 100, 500 años entre el estimado por el mejor modelo no estacionario (NE) y el mejor modelo estacionario (E), bajo el criterio K-S. Las cuencas con tonos rojizos indican que el modelo no estacionario entrega una disminución en la magnitud del evento, mientras que los tonos azules son un aumento respecto al estimado por el análisis de frecuencia estacionario.

La selección de modelos bajo el criterio de información bayesiano (Figura 5.8) genera diferencias positivas y negativas en la zona centro y sur del país, cuyos valores aumentan al aumentar el periodo de retorno. Por otro lado, en la zona sur es posible observar un delta positivo, el cual alcanza hasta un 50% de diferencia para periodos de retorno de 500 años.

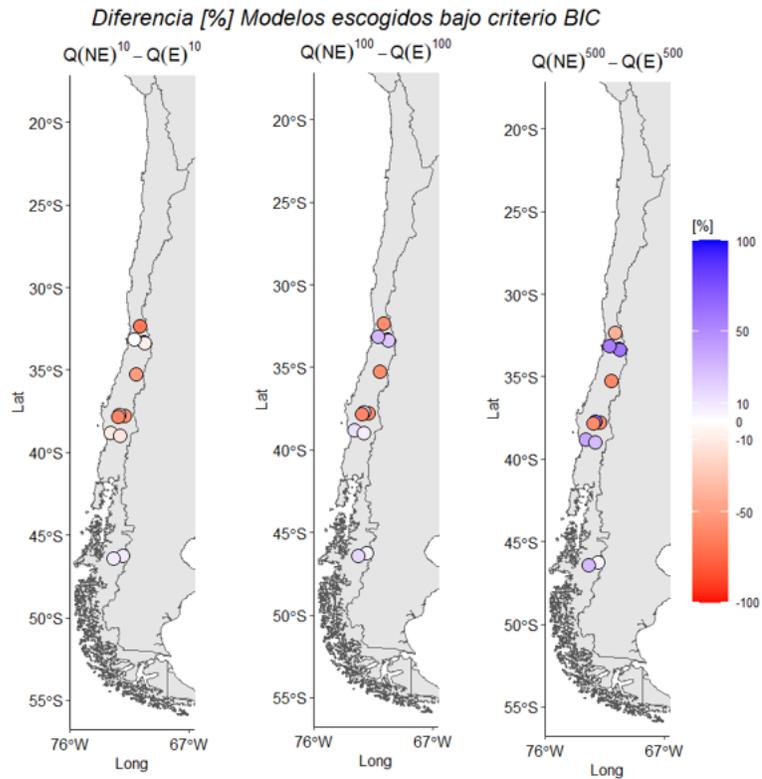


Figura 5.8: Diferencia porcentual de caudales medios diarios máximos esperados para los periodos de retorno de 10, 100, 500 años entre el estimado por el mejor modelo no estacionario (NE) y el mejor modelo estacionario (E), bajo el criterio BIC. Las cuencas con tonos rojizos indican que el modelo no estacionario entrega una disminución en la magnitud del evento, mientras que los tonos azules son un aumento respecto al estimado por el análisis de frecuencia estacionario.

Capítulo 6

Discusión.

6.1. Análisis de tendencias de caudales extremos.

De los resultados obtenidos en el estudio de tendencias de caudales máximos medios diarios estacionales se observa un comportamiento generalizado a la baja en la magnitud de las series en las cuencas ubicadas entre las latitudes 30°S-40°S. Las 15 (de 25) estaciones que presentan tendencias significativas a la baja, corresponden a cuencas con un régimen pluvial. Por otro lado, las cuencas de la zona sur que presentan un aumento de sus caudales máximos durante el periodo de invierno son principalmente cuencas con un importante aporte nival en su régimen. Asimismo, las cuencas que presentan tendencias al alza en la zona sur durante el periodo estival corresponden a cuencas que presentan aporte nival y/o glacial. Del mismo modo, para el periodo de verano, las cuencas que presentan un aumento en sus tendencias corresponden a cuencas con aporte nival en su escorrentía.

Lo anterior es congruente con lo concluido en el estudio realizado por Paredes et al (2021), donde se identificaron tendencias negativas en la precipitación máximas diarias en la zona centro sur [Lat 20°S-38°S]. También se obtuvieron tendencias al aumento en cuencas ubicadas en la zona sur y austral del país (Figura 2.2). Lo anterior explica el que, para cuencas pluviales, al contar con una menor cantidad de lluvias extremas, los caudales medios diarios extremos disminuyan.

Los resultados del análisis de tendencias coinciden con los resultados obtenidos por Do et al., (2017), donde se analizaron datos de caudal máximo diario anual para 9.213 estaciones alrededor del mundo. Los resultados obtenidos indicaron una mayor cantidad de estaciones con tendencias decrecientes significativas que tendencias crecientes significativas en todos los conjuntos de datos analizados. Se detectaron tendencias decrecientes para un gran número de estaciones en el oeste América del Norte y las regiones cubiertas por los datos de Australia, y tendencias crecientes en partes de Europa, este de América del Norte, partes de América del Sur y el sur de África. Lo anterior indica que existe evidencia limitada para la hipótesis de que el riesgo de inundación está aumentando cuando se analizan los datos alrededor del globo.

Considerando que a partir de la metodología de obtener un caudal ponderado para tener datos consistentes se produce pérdida de información, es que se propuso un experimento que permita determinar el efecto que produce la no detección de caudales máximos en la obtención del estadístico τ del test de Mann-Kendall. Para este propósito, se consideró los

datos fluviométricos de la estación Río Cholchol en Cholchol, ubicada en IX región. Esta estación fue seleccionada, ya que cuenta con el 98 % de los datos en el periodo de estudio, además, es una cuenca que presentó un descenso en sus caudales máximos en el periodo de invierno, con un valor de la pendiente de Sen estandarizada = $-0.072[-/\text{año}]$. Así, tomando los caudales máximos para el periodo de invierno, se calcularon las pendientes de sen de la serie eliminando 10, 15, 20 y 30 datos. Se realizaron 100.000 simulaciones, obteniendo los resultados presentados en la Figura (6.1).

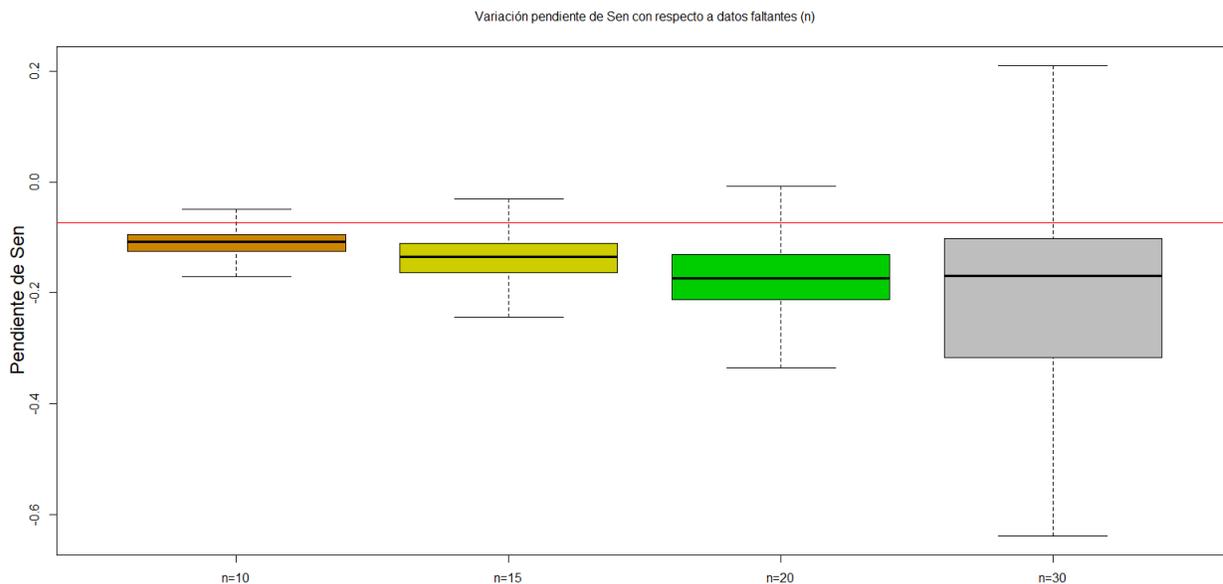


Figura 6.1: Boxplot de test de Sen realizado para 100.000 simulaciones, considerando la extracción de 10, 15, 20 y 30 datos de la serie de caudales máximos. En línea roja: valor test de Sen de la serie original = -0.072 .

De la Figura (6.1) se desprende que al tener menos datos disponibles se produce una sobre-estimación en las magnitudes de la pendiente de sen reportada, es decir, se magnifica el fenómeno de tendencias negativas. Asimismo, observando la Figura (6.2), se verifica que al disminuir el número de datos, la significancia estadística disminuye, lo cual coincide con lo expuesto en Du el al. (2015), donde se expone que al contar con menos datos, las magnitudes pueden sobre estimarse.

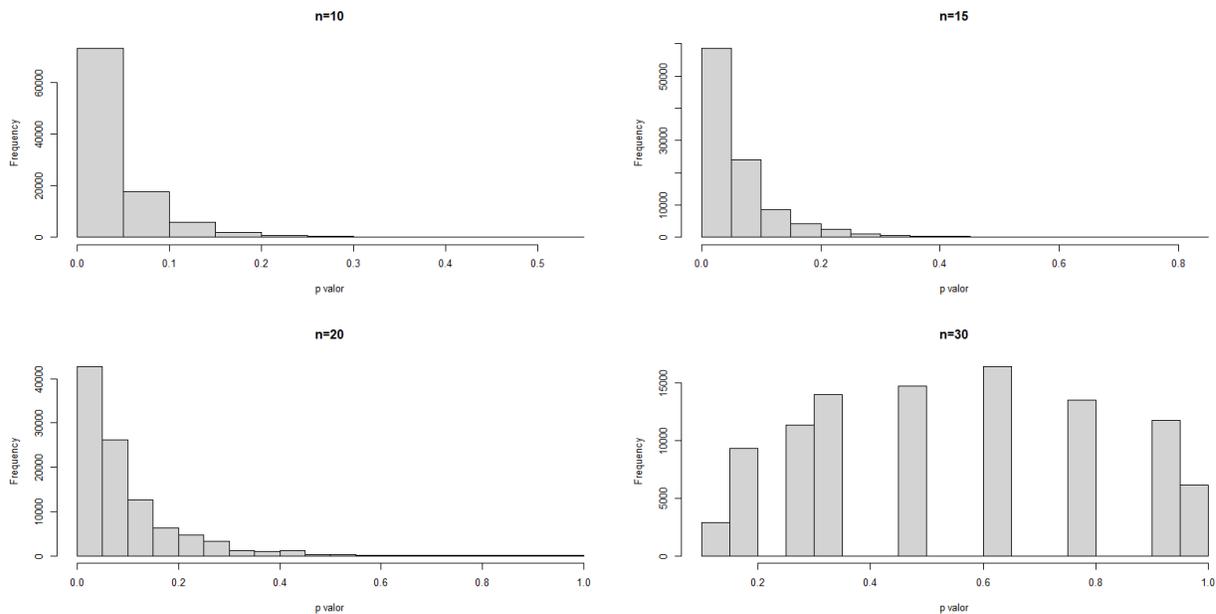


Figura 6.2: p-valor de test de Sen realizado para 100.000 simulaciones, considerando la extracción de 10, 15, 20 y 30 datos de la serie de caudales máximos.

6.2. Cambios de estacionalidad y change point analysis

De la Figura (4.4) se observa que las cuencas con aporte nival en sus caudales (cuencas del río Rapel en junta, río Gogotí, Río Claro), evidencian un adelanto en las ocurrencias del centro de gravedad en las últimas décadas, lo que coincide con los resultados obtenidos por Vicuña, S. et al (2011), para la cuenca del río Limarí. Estos cambios en el CG son un resultado típico del aumento de las temperaturas en cuencas dominadas por el deshielo, donde un aumento de la temperatura conduce a una reducción de la capa de nieve acumulada durante la temporada de lluvias y un proceso de deshielo más temprano y más rápido durante primavera y verano. El cambio en la ocurrencia del CG también puede ser consecuencia de la reducción de la acumulación de nieve durante el invierno. Con aumentos de las temperaturas, se puede producir una mayor sublimación de la capa de nieve estacional, lo que puede producir la reducción del caudal medio anual y menor disponibilidad de manto nival. Esto mantiene coherencia con los resultados obtenidos por Musselman et al., (2017) donde para escenarios climáticos más cálidos, las altas tasas de derretimiento pueden decrecer, debido a una contracción de la temporada de deshielo.

En la Figura (4.3) se observa que no existen tendencias significativas entre las latitudes 30°S y 40°S, lo que coincide con los resultados obtenidos por Cortés et al., (2011), donde los resultados generales para el período 1961–2006 muestran una tendencia negativa significativa para un nivel de confianza del 95 %, (fecha CG cambiando hacia principios de año) para 23 de las 40 series analizadas. Sin embargo, al estudiar ventanas de tiempo dentro de todo el período parece haber una ruptura en la tendencia a fines de la década de 1970, con cambios positivos o nulos para la segunda mitad del período de estudio para la mayoría de las

estaciones analizadas. A pesar de que el CG está significativamente correlacionado ($r > 0.5$) con los índices de temperatura en las cuencas alimentadas por nieve, no ha habido cambios significativos en el tiempo de CG para la mayoría de estas cuencas a pesar del calentamiento documentado en la región.

Por otro lado, con respecto al análisis de punto de cambio, se observan cambios en las medias de las 10 estaciones analizadas. De ellas, 6 presentan cambios a la baja durante el periodo de otoño/invierno, esto en cuencas ubicadas en las zona centro y centro-sur del país, durante la década del 00's. En cambio, las cuencas ubicadas en el sur y zona austral del país presentan un cambio al alza en sus promedios. Este comportamiento se repite para el verano, a excepción del Estero los Puercos y el río Putagán en Yervas Buenas, donde presentan un alza en sus promedio de 5.7 y 19.8 m^3/s , respectivamente.

Relacionar los cambios hidrológicos observados con el impacto humano directo o indirecto, o con causas naturales, como las tendencias en las precipitaciones, el deshielo, entre otros, es una tarea desafiante. Si bien es posible observar que el régimen de las distintas cuencas no han presentado cambios, si es posible observar un cambio en las características del régimen. Las cuencas del río Rapel, Cogotí, río Claro, en la zona centro-sur, y las cuencas del río Murta y Las Chinas, presentan adelantos en su centro de gravedad (entre 10 y 15 días), como también un aumento en sus coeficientes de Pardé y GINI. Estas cuencas presentan régimen mixto, algunas con un régimen donde prima el aporte nival, y otras con aporte principalmente pluvial. Este cambio puede ser debido a cambios en la precipitación, como también cambios en la acumulación de nieve, donde se ha observado decrecimientos de cobertura nival, como también de la duración del manto nival, en especial en la zona central andina (Malmros, J. et al. (2018)).

6.3. Análisis de Frecuencia.

La Figura 6.3 muestra como ejemplo el análisis de frecuencia de caudales máximos diarios para la cuenca Río Andalien camino a Penco (Lat:-36.82°S, Long:-73.03°E), ubicada en el sur de Chile (XIII región) y con tendencia decreciente en sus caudales en el periodo de invierno. Las curvas de las distribuciones estacionarias presentan un mejor ajuste visual para periodos de retorno menores a cinco años, sin embargo, la diferencia aumenta para periodos de retorno superiores. Este comportamiento se ve reflejado en la Figura 6.5, para la cuenca ubicada en la zona sur de Chile (Lat:-46.26°S, Long:-71.8°E), que presenta aumento en sus caudales, tanto para invierno como verano.

Al considerar las distribuciones no estacionarias (Figuras 6.4 y 6.6) se detecta una mejora para el ajuste de eventos con periodos de retorno cercano a los 40 años. Además, se puede notar que existe una compensación entre las opciones de dependencia temporal en los estadísticos: si bien para el caso del río Andalien la desviación temporal se ajusta mejor a los caudales de mayor periodo, la temporalidad conjunta de la media y desviación presenta un valor estimado más cercanos a los caudales con menor periodo de retorno. En el caso de estudio de la cuenca del río Ibañez en desembocadura, la temporalidad de la media se ajusta mejor a los caudales más altos, en cambio, para el caso de caudales asociados a menores periodos de retorno, la desviación temporal presenta una mayor similitud. Así, para el caso de la cuenca

del río Andalien camino a Penco, las distribuciones estacionarias y no estacionarias escogidas bajo el criterio K-S fueron distribución Normal y $GEV(\mu(t)\sigma(t))$. De manera análoga, para el caso del río Ibañez, los modelos escogidos fueron la distribución Gamma y $GEV(\sigma(t))$. Por otro lado, considerando el criterio de minimización del criterio BIC, se consideraron para el río Andalien las distribuciones Weibull y $GEV(\mu(t) \& \sigma(t))$ y en el caso del río Ibañez, los modelos seleccionados bajo el criterio BIC fueron la distribución Normal y $GEV(\mu(t))$.

Esta selección de mejores modelos se repitió para las 25 estaciones que presentaron tendencias significativas en invierno y las doce estaciones en el periodo de verano. Así, la selección de modelos estacionarios y no estacionarios basados en criterios de selección a partir del test K-S y BIC pueden generar caudales de diseños más alto o bajos, traducándose en diseños de obras hidráulicas más conservadores como en menos exigentes.

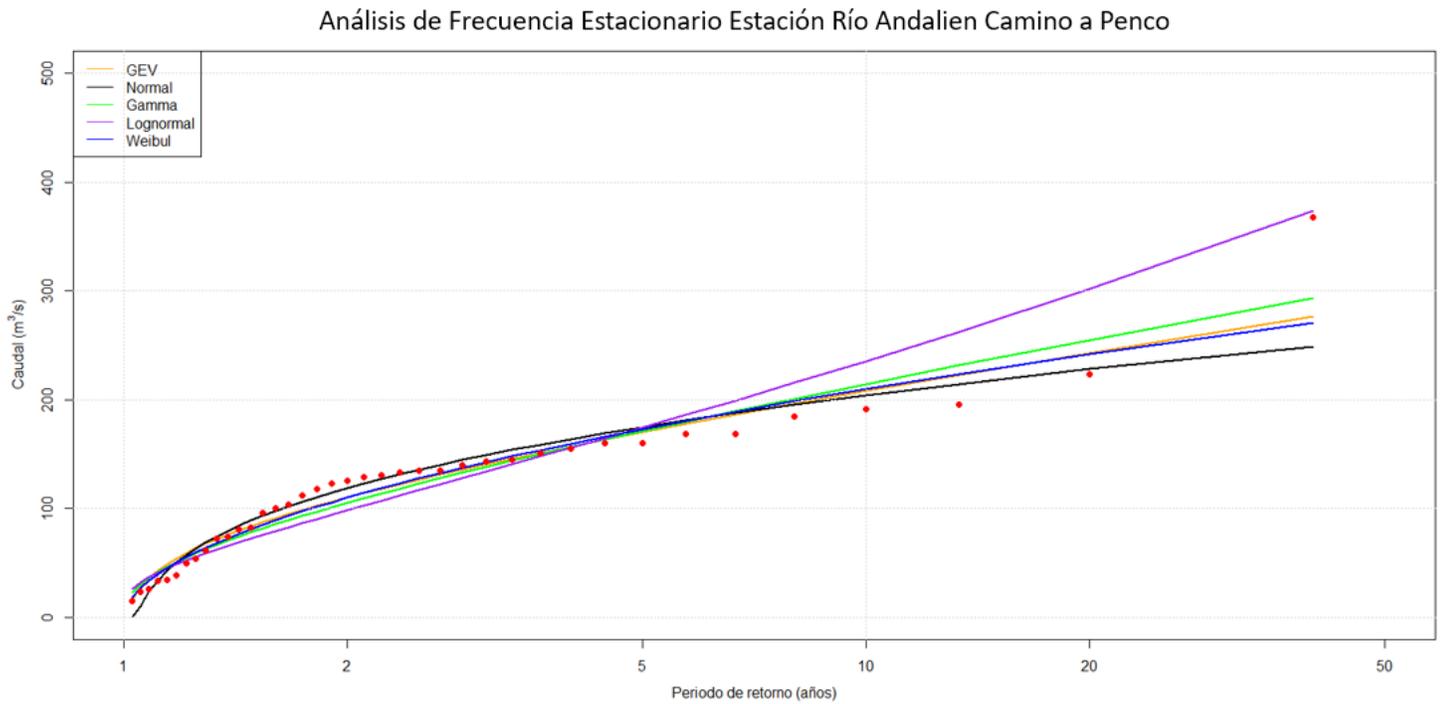


Figura 6.3: Análisis de frecuencia para los caudales medios diarios máximos en el periodo de invierno de la cuenca Río Andalien camino a Penco.

Análisis de frecuencia No estacionario Estación Río Andalien Camino a Penco

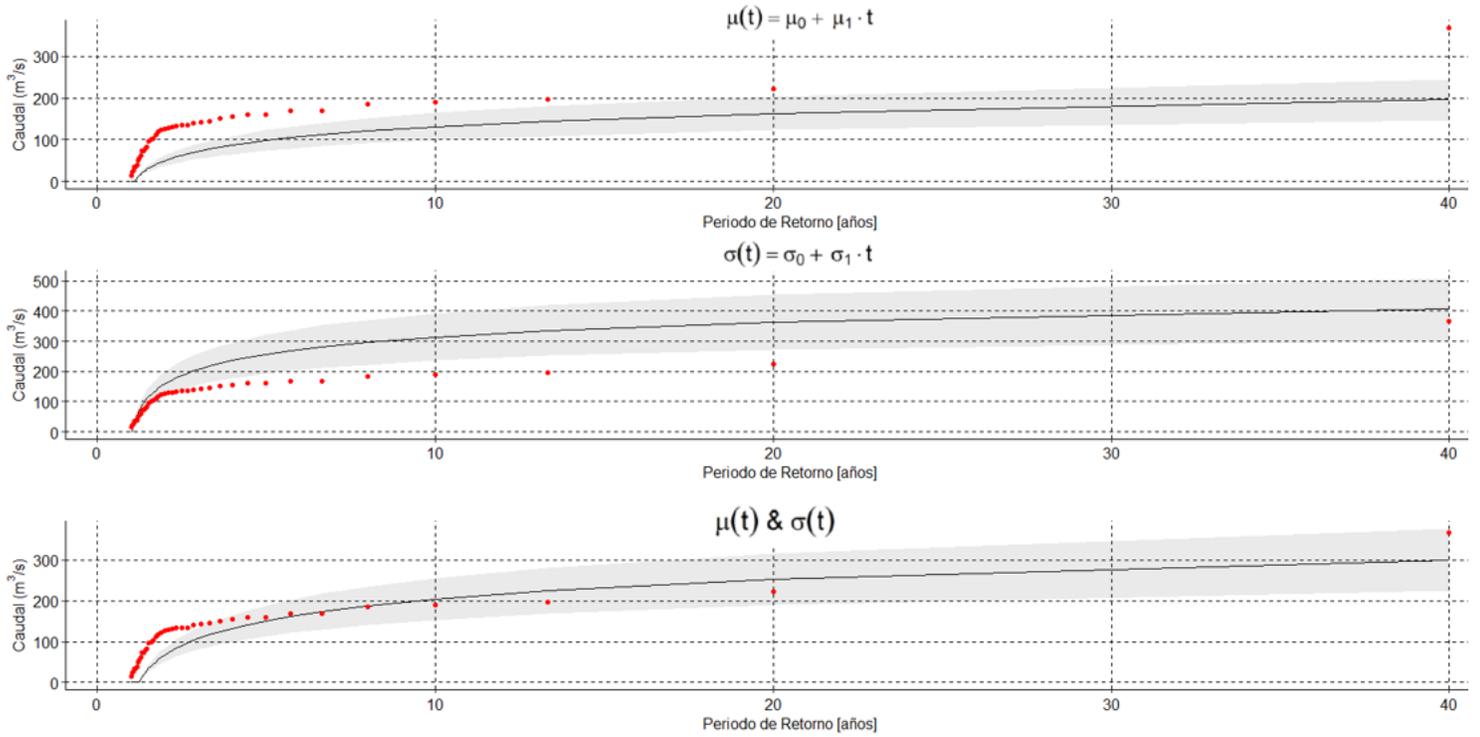


Figura 6.4: Análisis de frecuencia para Río Andalien camino a Penco usando una GEV para tres modelos no estacionarios: promedio dependiente del tiempo (superior), desviación estándar dependiente del tiempo (medio) y ambos estadísticos dependientes del tiempo (inferior). La zona gris corresponde al intervalo de confianza de la estimación.

Análisis de Frecuencia Estacionario Río Ibañez en Desembocadura

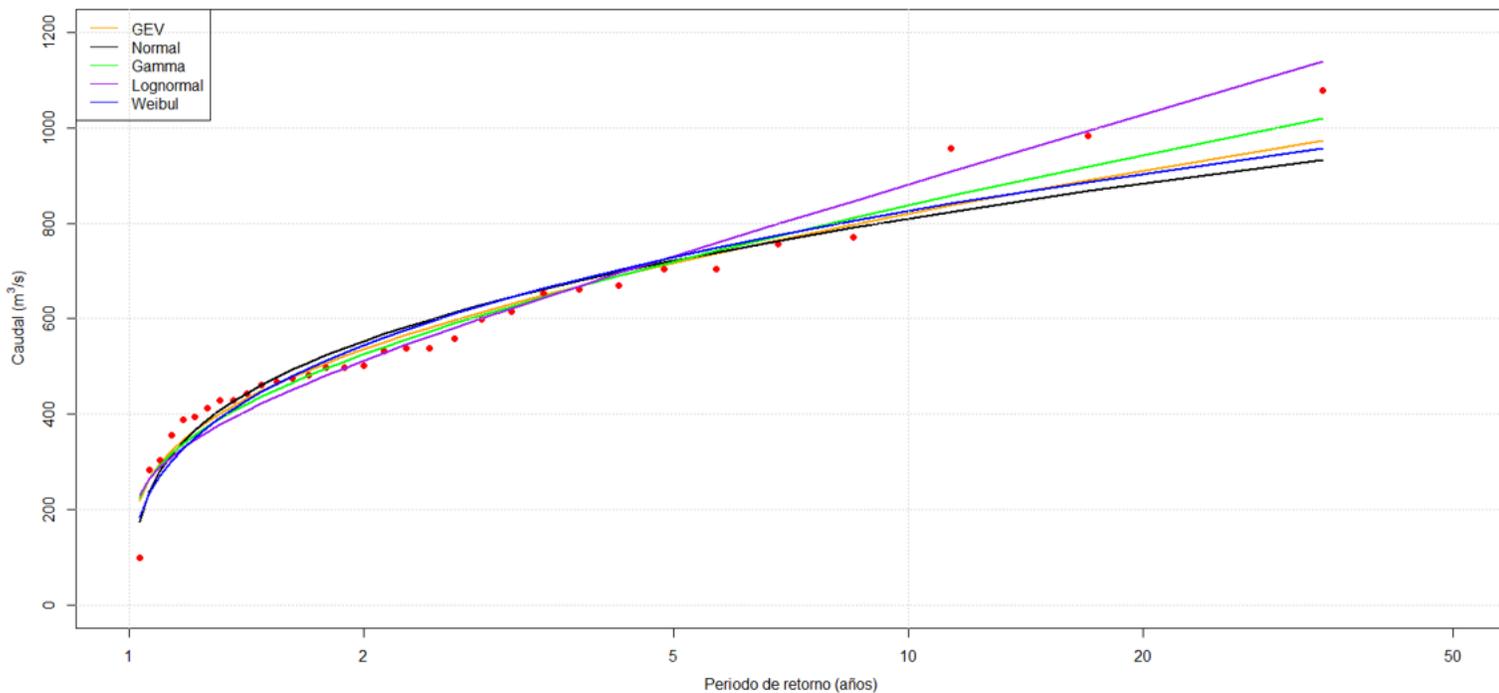


Figura 6.5: Análisis de frecuencia para los caudales medios diarios máximos en el periodo de invierno de la cuenca Río Ibañez en desembocadura.

Análisis de frecuencia No estacionario Estación Río Ibañez en Desembocadura

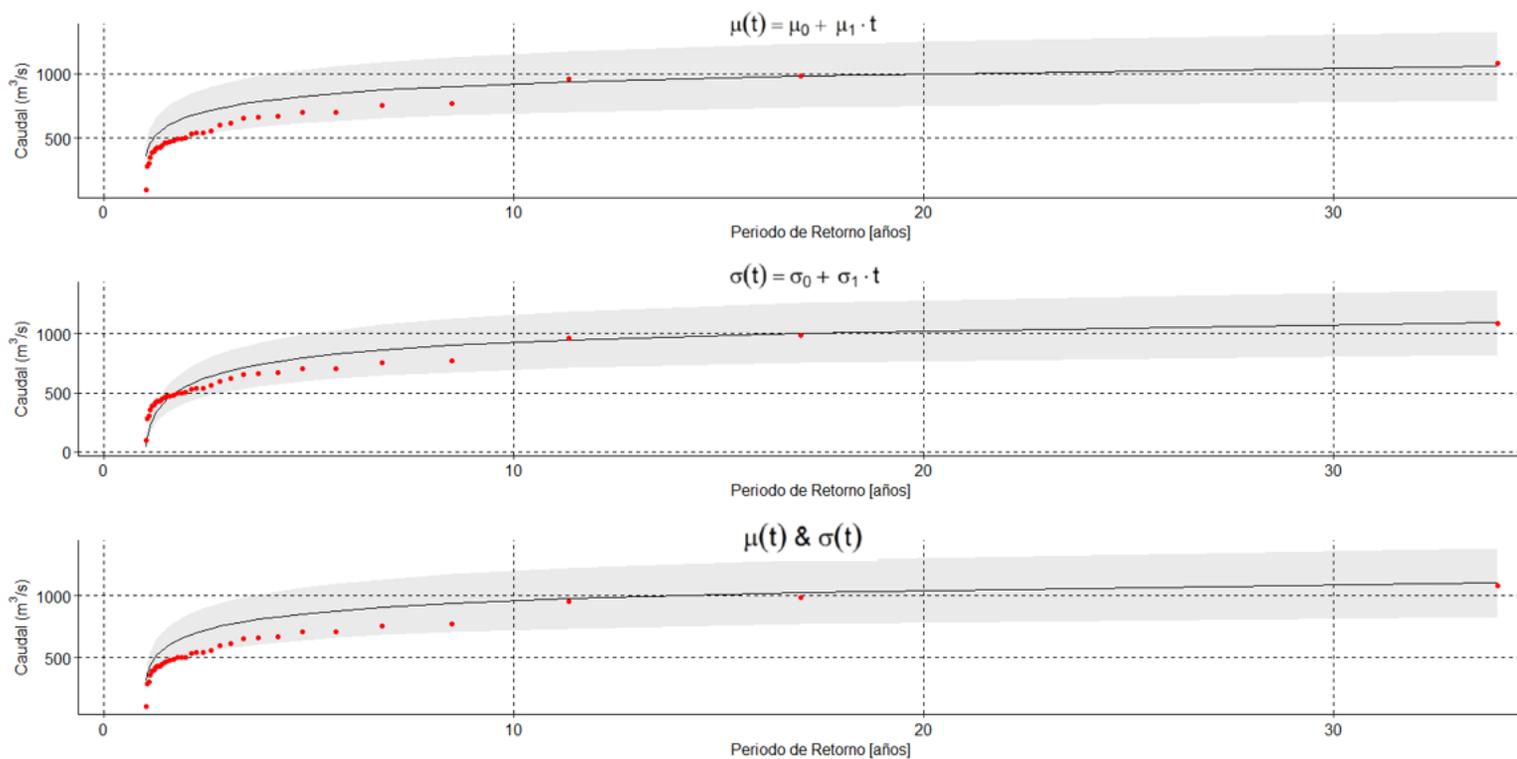


Figura 6.6: Análisis de frecuencia para Río Ibañez en desembocadura usando una GEV para tres modelos no estacionarios: promedio dependiente del tiempo (superior), desviación estándar dependiente del tiempo (medio) y ambos estadísticos dependientes del tiempo (inferior). La zona gris corresponde al intervalo de confianza de la estimación

Capítulo 7

Conclusiones.

En este trabajo, se estudió la existencia de tendencias de caudales medios diarios extremos en cuencas en régimen natural (71 cuencas), aplicando test de Mann-Kendall, pendiente de Sen e índices de cambios en la estacionalidad de diversas cuencas para el periodo 1978-2018. Además se realizó un análisis de frecuencia estacionario y no estacionario a aquellas cuencas que presentaron tendencias con un nivel de significancia $p_{valor} \leq 0.05$, seleccionando los mejores modelos a partir del criterio K-S y BIC. En este contexto, se extraen las siguientes conclusiones:

- En invierno (Abril-Septiembre) fue posible detectar tendencias a la baja en caudales medios diario extremos en 15 cuencas de la zona central, con magnitudes estandarizadas que van de los -0.02 hasta los -0.17 [-]. En cambio, la zona sur y austral, son 10 estaciones que presentan un alza en sus caudales extremos, donde las magnitudes de las pendientes de Sen estandarizadas van de los 0.03 hasta los 0.23[-]. El comportamiento es similar para el verano (Octubre-Marzo), donde 10 estaciones presentaron tendencias a la baja en sus pendientes de Sen, desde -0.01 a -0.05. Asimismo, en la zona sur, sólo dos cuencas presentaron alzas en sus caudales.
- Se estudió la existencia de cambios de régimen hidrológico en 10 cuencas, distribuidas en la zona centro y austral, a partir de estudio de cambio del tiempo del centro de gravedad del ciclo anual del hidrograma promedio, donde se presenciaron adelantos de hasta 15 días en la zona centro del país y retrasos de 20 días en cuencas ubicadas en la zona austral. Asimismo, se observaron cambios en los coeficientes de Pardé y GINI, lo que reflejaría una tendencia al cambio en la estacionalidad de algunas cuencas.
- Al realizar análisis de frecuencia bajo un enfoque estacionario y no estacionario, examinando las diferencias porcentuales entre el mejor modelo estacionario y no estacionario, se obtienen (a) diferencias positivas al considerar el criterio K-S, tanto para el invierno como para el verano, con deltas superiores al 100% en cuencas de la zona central en invierno. Asimismo, se presentan deltas principalmente positivos en la zona sur, con diferencias de hasta un 30%, aumentando la diferencia al incrementar el periodo de retorno., (b) Diferencias tanto negativas (de hasta un -90%) como positivas de hasta un 50% al considerar los criterios BIC como indicador del mejor modelo a escoger.

De acuerdo a lo anterior, existe cambio en las tendencias de caudales medios diarios extremos en cuencas ubicadas en la zona centro y sur del país, como también cambio en la

estacionalidad de diversas cuencas. Si bien es complejo atribuir la responsabilidad tan solo al cambio climático, puesto que el fenómeno de crecidas y estacionalidad también responden a cambios en uso de suelo, variabilidad climática, procesos naturales, entre otros. Sin embargo, resulta interesante el cómo el cambio de tendencias de precipitaciones puede estar afectando la hidrología de estas cuencas, junto con el aumento de las temperaturas, ya que el 70 % de las cuencas que presentan tendencias en invierno y el 60 % de cuencas con tendencias en verano, corresponden a cuencas con régimen pluvial.

Los resultados obtenidos sugieren que, previo a cualquier análisis de frecuencia con motivos de diseño hidrológico, se debe realizar un análisis de tendencias en la zona de estudio para poder decidir si realizar un análisis de frecuencia con enfoque estacionario o no estacionario, puesto que en manuales de estimación de crecidas o el Manual de Carreteras, aún contemplan análisis de frecuencia estacionarios para el diseño de obras.

Para un trabajo futuro, se propone considerar covariables meteorológicas como la precipitación y temperatura, para poder incluir variables físicas en la estimación de caudales de diseño, a través de análisis de frecuencia con enfoque no estacionario.

Finalmente, el informe entregado por el IPCC el año 2021 fue tajante; el cambio climático inducido por la actividad humana ya está afectando a muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones a nivel mundial, donde existe evidencia de cambios observados en extremos como olas de calor, fuertes precipitaciones, sequías e inundaciones. Por lo tanto, se hace necesario contar con herramientas y estudios que permitan evaluar un diseño hídrico adaptado a los nuevos escenarios.

Bibliografía

- [1] Álvarez-Garretón C, Mendoza PA, Boisier JP, Addor N, Galleguillos M, Zambrano-Bigiarini M, Lara A, Puelma C, Cortes G, Garreaud R, et al. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences* 22 (11): 5817–5846 <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>

- [2] Archfield, S. A., Hirsch, R. M., Viglione, A., and Blöschl, G. (2016), Fragmented patterns of flood change across the United States, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10,232– 10,239, doi:10.1002/2016GL070590.

- [3] Bauer, André. (2021). Automated Hybrid Time Series Forecasting: Design, Benchmarking, and Use Cases. 10.25972/OPUS-22025.

- [4] Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., v Canjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kohnová, S., Koskela, J. J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Sraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., and Zivković, N.: Changing climate shifts timing of European floods, *Science*, 357, 588–590, 2017.

- [5] Chow, V. T., D. R. Maidment L.W. Mays. (1988). “Applied Hydrology”. McGraw Hill.

- [6] Cortés, Gonzalo Vargas, Ximena Mcphee, James. (2011). Climate sensitivity of stream-flow timing in the extratropical western Andes Cordillera. *Journal of Hydrology*. 405. 93-109. 10.1016/j.jhydrol.2011.05.013.

- [7] Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN CHILE PARA EL SIGLO XXI INFORME FINAL Texto Realizado por: Departamento de Geofísica Facultad de Ciencias. Físicas y Matemáticas Universidad de Chile. Diciembre 2006.

- [8] Delisle, F.; Assani, A.A. Comparison of Seasonal Flow Rate Change Indices Downstream of Three Types of Dams in Southern Quebec (Canada). *Water* 2021, 13, 2555.

- [9] Douglas, Ellen Kroll, Charles. (2000). Trends in Floods and Low Flows in the United States: Impact of Spatial Correlation. *Journal of Hydrology*. 240. 90-105. 10.1016/S0022-1694(00)00336-X.
- [10] Du, T., Xiong, L., Xu, C.-Y., Gippel, C. J., Guo, S., Liu, P. (2015). Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change. *Journal of Hydrology*, 527, 234–250. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.04.041
- [11] Fowler, H.J., Lenderink, G., Prein, A.F. et al. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nat Rev Earth Environ* 2, 107–122 (2021).
<https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>
- [12] Gudmundsson, L., Do, H. X., Leonard, M., and Westra, S.: The Global Streamflow Indices and Metadata Archive (GSIM) – Part 2: Quality control, time-series indices and homogeneity assessment, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 787–804, <https://doi.org/10.5194/essd-10-787-2018>, 2018.
- [13] Hidalgo, H. G., Das, T., Dettinger, M. D., Cayan, D. R., Pierce, D. W., Barnett, T. P., ... Nozawa, T. (2009). Detection and Attribution of Streamflow Timing Changes to Climate Change in the Western United States. *Journal of Climate*, 22(13), 3838–3855. doi:10.1175/2009jcli2470.1
- [14] Hong X. Do, Seth Westra, Michael Leonard, A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow, *Journal of Hydrology*, Volume 552, 2017, Pages 28-43, ISSN 0022-1694.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.015>.
- [15] IPCC (2021). “Cambio climático 2021, informe de síntesis”. Informe del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.
- [16] Kendall, M. G., Gibbons, J. D. (1975). Rank correlation methods.
- [17] Khaliq, M. N., Ouarda, T. B. M. J., Ondo, J.-C., Gachon, P., Bobée, B. (2006). Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 534–552. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.03.004
- [18] Lagos, M., Pinto, D., Torrez, L., Rondanelli, R. (2021). ¿Son las precipitaciones extremas estacionarias en Chile?. XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile.
- [19] Malmros, J. K., Mernild, S. H., Wilson, R., Tagesson, T., Fensholt, R. (2018).

Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sensing of Environment*, 209, 240–252. doi:10.1016/j.rse.2018.02.072

- [20] Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245–259.
- [21] Musselman, K., Clark, M., Liu, C. et al. Slower snowmelt in a warmer world. *Nature Clim Change* 7, 214–219 (2017). <https://doi.org/10.1038/nclimate3225>
- [22] Paredes, M., Gateño, F., Lagos, M., Mendoza, P. (2021). Comparación entre enfoques estacionario y no estacionario para la estimación de precipitaciones de diseño en cuencas de Chile continental. XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile.
- [23] Panagoulia, D., Economou, P., Caroni, C. (2014). Stationary and nonstationary generalized extreme value modelling of extreme precipitation over a mountainous area under climate change. *Environmetrics*, 25(1), 29–43. <https://doi.org/10.1002/env.2252>
- [24] Pardé, m. (1933): *Fleuves et rivières*. Paris
- [25] Quevedo Leiva, M. (2021). Metodología para el relleno de registros fluviométricos diarios en cuencas chilenas cercanas al régimen natural. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180423>
- [26] Ricchetti Campos, F. (2018). 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. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168487>
- [27] Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. doi:10.1080/01621459.1968.10480934
- [28] Vicuña, S., Garreaud, R.D. McPhee, J. Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change* 105, 469–488 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9888-4>.

Anexo A

Estudio de tendencias

A.1. Estaciones seleccionadas

Tabla A.1: Estaciones seleccionadas

Nombres	Lat [°]	Long [°]	Area [km2]
Río Collacagua En Peñablanca	-20.1	-68.8	739.3
Río Loa Antes Represa Lequena	-21.7	-68.7	2053.3
Río Pulido En Vertedero	-28.1	-69.9	2021.8
Río Toro Antes Junta Río La Laguna	-30.0	-70.1	467.4
Estero Derecho En Alcohuz	-30.2	-70.5	338.2
Río Cochiguaz En El Peñón	-30.1	-70.4	675.3
Estero Culebron En El Sifon	-30.0	-71.3	190.4
Río Hurtado En Angostura De Pangué	-30.4	-71.0	1837.3
Río Grande En Las Ramadas	-31.0	-70.6	568.5
Río Grande En Cuyano	-30.9	-70.8	1286.6
Río Mostazal En Caren	-30.8	-70.8	640.2
Río Rapel En Junta	-30.7	-70.9	820.6
Río Cogoti Entrada Embalse Cogoti	-31.0	-71.0	753.1
Río Choapa En Cuncumen	-32.0	-70.6	1131.6
Río Chalinga En La Palmilla	-31.7	-70.7	243.9
Río Sobrante En Piadero	-32.2	-70.7	241.1
Río Pedernal En Tejada	-32.1	-70.8	81.1
Río Alicahue En Colliguay	-32.3	-70.7	348.0
Río Aconcagua En Chacabuquito	-32.9	-70.5	2113.4
Estero Pocuro En El Sifon	-32.9	-70.5	181.0
Estero Arrayan En La Montosa	-33.3	-70.5	216.5
Estero Yerba Loca Antes Junta San Francisco	-33.3	-70.4	110.0
Estero Puangué En Boqueron	-33.2	-71.1	144.2
Río Claro En El Valle	-34.7	-70.9	349.4

Río Claro En Los Queñes	-35.0	-70.8	354.4
Río Colorado En Junta Con Palos	-35.3	-71.0	877.9
Río Palos En Junta Con Colorado	-35.3	-71.0	490.0
Río Perquilauquen En San Manuel	-36.4	-71.6	502.4
Río Longavi En El Castillo	-36.3	-71.3	466.9
Río Achibueno En La Recova	-36.0	-71.4	894.3
Río Putagan En Yervas Buenas	-35.8	-71.6	390.5
Estero Los Puercos En Puente Los Puercos	-35.4	-71.8	558.8
Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	-36.7	-71.3	606.7
Río Itata En Balsa Nueva Aldea	-36.7	-72.5	4510.0
Río Andalien Camino A Penco	-36.8	-73.0	750.3
Río Lirquen En Cerro El Padre	-37.8	-71.9	103.4
Río Duqueco En Villucura	-37.6	-72.0	817.7
Río Mulchen En Mulchen	-37.7	-72.3	428.1
Río Bureo En Mulchen	-37.7	-72.2	540.8
Río Renaico En Longitudinal	-37.9	-72.4	688.2
Río Mininco En Longitudinal	-37.9	-72.4	440.2
Río Malleco En Collipulli	-38.0	-72.4	415.1
Río Cholchol En Cholchol	-38.6	-72.8	5047.6
Río Blanco En Curacautin	-38.5	-71.9	170.9
Río Cautin En Rari-Ruca	-38.4	-72.0	1306.1
Río Cautin En Almagro	-38.8	-72.9	5547.3
Río Allipen En Los Laureles	-39.0	-72.2	1675.1
Río Liucura En Liucura	-39.3	-71.8	349.0
Río Tolten En Villarica	-39.3	-72.2	2933.6
Río Donguil En Gorbea	-39.1	-72.7	769.7
Río Mahuidanche En Santa Ana	-39.1	-72.9	383.9
Río Cruces En Rucaco	-39.6	-72.9	1802.6
Río Inaque En Mafil	-39.7	-73.0	539.0
Río Calcurrupe En Desembocadura	-40.3	-72.3	1725.8
Río Negro En Chahuilco	-40.7	-73.2	2279.7
Río Rahue En Forrahue	-40.5	-73.3	5603.0
Río Cisnes En Estancia Río Cisnes	-44.6	-71.5	1105.6
Río Cisnes Antes Junta Río Moro	-44.7	-71.8	2258.4
Río Ñirehuao En Villa Mañihuales	-45.2	-72.1	1997.0
Río Emperador Guillermo Antes Junta Mañihuales	-45.2	-72.2	565.9
Río Simpson Bajo Junta Coyhaique	-45.6	-72.1	3323.6
Río Ibaez En Desembocadura	-46.3	-72.0	2404.7
Río Murta En Desembocadura	-46.4	-72.7	897.1

Río Paine En Parque Nacional 2	-51.0	-72.8	581.6
Río Baguales En Cerro Guido	-51.0	-72.5	564.3
Río Las Chinas En Cerro Guido	-51.1	-72.5	901.5
Río Grey Antes Junta Serrano	-51.2	-73.0	865.4
Río San Juan En Desembocadura	-53.7	-71.0	864.0
Río Tres Brazos Antes Bt. Sendos	-53.3	-71.0	100.0
Río Rubens En Ruta N 9	-52.0	-71.9	504.4
Río Oscar En Bahía San Felipe	-52.8	-69.8	559.6
Río Grande En Tierra Del Fuego	-53.9	-68.9	2841.0

Anexo B

Análisis de Frecuencia

B.1. Métricas de modelos estacionarios y no estacionarios periodo de invierno.

Tabla B.1: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Estero Derecho en Alcohuaz.

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.41	0.52	88.82	91.87	0.95	0.30	-42.41
GEV	0.69	0.39	87.81	92.39	0.99	0.14	-40.91
Lognormal	0.66	0.39	86.02	89.07	0.98	0.25	-41.01
$\mu(t)$	0.33	0.65	89.11	95.21	0.99	0.30	-40.55
$\sigma(t)$	1.07	0.91	87.56	93.66	0.99	0.56	-39.78
$\mu(t), \sigma(t)$	1.71	1.56	85.60	93.23	0.99	0.89	-37.80
Normal	1.80	0.65	102.61	105.66	0.86	0.39	-49.31
Weibull	1.06	0.39	92.82	95.87	0.92	0.30	-44.40

Tabla B.2: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Estero Culebrón en el Sifón.

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	1.29	0.67	94.48	97.41	0.93	0.40	-45.24
GEV	1.05	0.40	103.58	107.98	0.93	0.44	-48.79
Lognormal	3.46	1.07	112.55	115.48	0.79	3.53	-54.27
$\mu(t)$	5.92	1.47	90.09	95.96	0.87	0.76	-41.05
$\sigma(t)$	3.82	1.07	99.36	105.22	0.86	3.33	-45.68
$\mu(t), \sigma(t)$	6.15	3.62	80.02	87.35	0.81	2.11	-35.01
Normal	2.55	1.07	120.00	122.93	0.83	0.63	-58.00
Weibull	2.04	0.67	95.55	98.48	0.94	0.39	-45.77

Tabla B.3: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Mostazal en Carén

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.84	0.62	199.42	202.64	0.92	2.82	-97.71
GEV	0.49	0.37	195.59	200.42	0.91	2.39	-94.79
Lognormal	0.42	0.37	192.24	195.47	0.96	2.19	-94.12
$\mu(t)$	0.58	0.62	193.47	199.91	0.91	2.28	-92.73
$\sigma(t)$	0.55	0.37	196.69	203.13	0.88	4.88	-94.34
$\mu(t), \sigma(t)$	6.84	2.61	188.12	196.17	0.91	7.18	-89.06
Normal	4.33	1.37	253.62	256.85	0.76	3.64	-124.81
Weibull	0.83	0.62	198.23	201.45	0.93	2.61	-97.11

Tabla B.4: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Rapel en Junta

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	2.02	0.85	242.75	246.08	0.83	5.55	-119.38
GEV	0.74	0.36	234.25	239.24	0.90	5.02	-114.13
Lognormal	1.34	0.61	236.35	239.67	0.91	4.38	-116.17
$\mu(t)$	0.74	0.61	236.01	242.66	0.90	5.33	-114.00
$\sigma(t)$	1.14	0.61	234.63	241.28	0.90	7.19	-113.31
$\mu(t), \sigma(t)$	3.24	1.70	233.21	241.53	0.90	10.27	-111.60
Normal	8.94	1.58	302.97	306.29	0.67	6.59	-149.48
Weibull	3.07	0.73	241.66	244.99	0.85	5.22	-118.83

Tabla B.5: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Alicahue en Colliguay

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	1.71	0.62	183.69	186.91	0.95	1.35	-89.84
GEV	2.01	0.87	189.65	194.48	0.93	3.02	-91.82
Lognormal	1.11	0.87	183.20	186.42	0.98	0.70	-89.60
$\mu(t)$	3.12	1.00	189.27	195.71	0.92	3.35	-90.63
$\sigma(t)$	2.11	0.75	191.52	197.96	0.91	5.24	-91.76
$\mu(t), \sigma(t)$	5.73	2.11	186.14	194.19	0.94	4.10	-88.07
Normal	1.57	0.87	221.43	224.65	0.82	2.01	-108.71
Weibull	1.65	0.62	183.58	186.80	0.95	1.29	-89.79

Tabla B.6: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Palos en Junta con Colorado

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	1.20	0.85	459.67	463.00	0.96	26.53	-227.84
GEV	1.18	0.61	458.30	463.29	0.74	84.07	-226.15
Lognormal	0.72	0.73	456.62	459.95	0.93	29.54	-226.31
$\mu(t)$	1.14	0.73	457.47	464.13	0.71	92.58	-224.74
$\sigma(t)$	0.64	0.49	460.02	466.67	0.70	129.71	-226.01
$\mu(t), \sigma(t)$	4.64	3.04	452.52	460.84	0.86	134.49	-221.26
Normal	5.05	0.97	478.83	482.16	0.90	35.53	-237.42
Weibull	1.17	0.73	461.21	464.54	0.96	25.07	-228.61

Tabla B.7: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Perquilauquén en San Manuel

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.16	0.36	531.62	534.95	0.99	26.67	-263.81
GEV	0.27	0.36	533.93	538.92	0.99	31.50	-263.97
Lognormal	0.36	0.49	535.08	538.40	0.98	37.36	-265.54
$\mu(t)$	1.78	1.34	529.83	536.48	0.99	130.15	-260.91
$\sigma(t)$	1.01	0.73	535.26	541.91	0.99	49.85	-263.63
$\mu(t), \sigma(t)$	1.47	1.22	531.63	539.95	0.99	111.32	-260.82
Normal	0.72	0.49	536.49	539.82	0.95	49.88	-266.25
Weibull	0.43	0.36	531.53	534.86	0.98	34.59	-263.76

Tabla B.8: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Longaví en El Castillo

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.83	0.36	572.92	576.25	0.98	73.29	-284.46
GEV	0.81	0.49	574.18	579.17	0.98	71.48	-284.09
Lognormal	0.97	0.49	584.16	587.49	0.96	185.61	-290.08
$\mu(t)$	1.94	0.85	571.95	578.61	0.98	140.16	-281.98
$\sigma(t)$	0.43	0.49	575.87	582.52	0.98	59.33	-283.93
$\mu(t), \sigma(t)$	2.45	1.09	573.18	581.50	0.98	193.11	-281.59
Normal	2.28	0.73	586.16	589.49	0.89	141.35	-291.08
Weibull	0.93	0.36	572.49	575.81	0.97	87.31	-284.24

Tabla B.9: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Putagán en Yervas Buenas

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.64	0.37	451.81	455.03	0.98	14.97	-223.90
GEV	1.41	0.50	452.22	457.05	0.99	15.01	-223.11
Lognormal	1.37	0.62	459.43	462.65	0.93	40.81	-227.71
$\mu(t)$	2.29	1.49	447.07	453.52	0.99	70.52	-219.54
$\sigma(t)$	0.52	0.87	454.07	460.51	0.99	35.49	-223.03
$\mu(t), \sigma(t)$	1.44	1.62	448.81	456.87	0.99	83.69	-219.41
Normal	0.83	0.50	452.46	455.68	0.97	18.80	-224.23
Weibull	1.01	0.50	449.51	452.74	0.99	13.52	-222.76

Tabla B.10: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Estero Los Puercos en puente Los Puercos

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.71	0.54	323.43	326.36	0.97	6.77	-159.71
GEV	3.55	0.54	325.08	329.48	0.98	5.82	-159.54
Lognormal	1.42	0.67	329.37	332.30	0.91	15.90	-162.68
$\mu(t)$	3.16	2.14	318.96	324.82	0.93	38.95	-155.48
$\sigma(t)$	3.95	2.01	315.65	321.51	0.88	29.07	-153.82
$\mu(t), \sigma(t)$	3.88	2.14	315.36	322.69	0.89	29.70	-152.68
Normal	2.09	0.40	324.49	327.42	0.98	6.48	-160.24
Weibull	2.50	0.54	321.43	324.36	0.98	5.53	-158.72

Tabla B.11: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Itata en Balsa Nueva Aldea

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.67	0.49	618.17	621.50	0.98	107.21	-307.09
GEV	0.68	0.36	621.38	626.37	0.98	113.29	-307.69
Lognormal	0.79	0.61	620.98	624.31	0.96	140.52	-308.49
$\mu(t)$	1.24	0.97	620.12	626.77	0.98	261.03	-306.06
$\sigma(t)$	1.30	0.73	622.68	629.33	0.98	197.82	-307.34
$\mu(t), \sigma(t)$	3.05	1.82	619.75	628.06	0.98	528.46	-304.87
Normal	0.72	0.49	623.80	627.13	0.95	160.90	-309.90
Weibull	0.73	0.36	618.10	621.43	0.97	120.18	-307.05

Tabla B.12: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Andalién camino a Penco

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.93	0.73	437.15	440.00	0.92	18.62	-216.58
GEV	0.88	0.61	439.17	444.00	0.93	18.33	-216.59
Lognormal	1.80	0.85	442.62	446.00	0.91	24.05	-219.31
$\mu(t)$	8.52	2.19	422.29	429.00	0.92	65.32	-207.14
$\sigma(t)$	3.95	1.58	437.77	444.00	0.92	62.81	-214.88
$\mu(t), \sigma(t)$	4.30	1.46	419.18	427.00	0.90	43.83	-204.59
Normal	0.54	0.49	441.85	445.00	0.90	20.91	-218.92
Weibull	0.88	0.49	436.18	440.00	0.92	19.19	-216.09

Tabla B.13: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Duqueco en Villucura

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	1.13	0.74	502.27	505.55	0.97	38.94	-249.14
GEV	2.48	0.61	503.97	508.88	0.97	38.39	-248.98
Lognormal	0.88	0.61	502.10	505.37	0.97	35.50	-249.05
$\mu(t)$	2.05	0.98	503.17	509.72	0.97	83.89	-247.59
$\sigma(t)$	1.69	0.98	504.78	511.33	0.97	86.03	-248.39
$\mu(t), \sigma(t)$	1.74	1.60	502.86	511.05	0.97	154.20	-246.43
Normal	1.59	0.98	508.82	512.10	0.92	53.09	-252.41
Weibull	2.01	0.86	505.05	508.33	0.95	43.60	-250.52

Tabla B.14: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Mininco en Longitudinal

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	1.23	0.36	426.69	430.02	0.97	10.27	-211.35
GEV	1.11	0.49	429.25	434.24	0.97	11.10	-211.63
Lognormal	0.95	0.49	429.77	433.10	0.94	14.72	-212.88
$\mu(t)$	1.31	1.09	426.31	432.97	0.97	29.27	-209.16
$\sigma(t)$	0.74	0.61	431.05	437.70	0.97	11.93	-211.52
$\mu(t), \sigma(t)$	1.84	1.70	427.27	435.59	0.97	48.80	-208.64
Normal	1.05	0.73	431.48	434.81	0.95	13.67	-213.74
Weibull	0.97	0.49	426.57	429.90	0.97	10.50	-211.29

Tabla B.15: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Cholchol en Cholchol

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.31	0.24	569.45	572.78	0.99	49.62	-282.73
GEV	0.41	0.36	571.83	576.82	0.99	48.38	-282.91
Lognormal	0.84	0.36	570.18	573.51	0.99	42.52	-283.09
$\mu(t)$	1.21	1.09	569.53	576.19	0.99	173.30	-280.77
$\sigma(t)$	0.60	0.61	573.42	580.07	0.99	102.24	-282.71
$\mu(t), \sigma(t)$	2.37	1.70	569.66	577.98	0.99	273.68	-279.83
Normal	0.13	0.49	573.67	577.00	0.96	75.31	-284.84
Weibull	0.47	0.36	571.52	574.85	0.97	61.17	-283.76

Tabla B.16: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Ibañez en Desembocadura

modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
gamma	0.58	0.40	448.11	451.10	0.96	39.61	-222.05
GEV	0.72	0.40	447.98	452.47	0.96	43.64	-220.99
lnormal	0.71	0.53	452.63	455.63	0.96	41.25	-224.32
NE1	3.06	1.58	445.12	451.11	0.96	130.89	-218.56
NE11	2.22	0.66	448.74	454.72	0.94	79.48	-220.37
NE111	3.10	1.58	446.86	454.34	0.95	133.96	-218.43
normal	1.11	0.53	447.64	450.63	0.94	51.18	-221.82
weibull	1.96	0.53	447.66	450.66	0.94	48.87	-221.83

Tabla B.17: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Murta en Desembocadura

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.58	0.40	406.50	409.43	0.95	34.87	-201.25
GEV	0.53	0.40	407.93	412.32	0.96	31.18	-200.96
Lognormal	0.33	0.40	406.07	409.00	0.96	30.99	-201.04
$\mu(t)$	3.36	1.47	404.01	409.88	0.96	87.74	-198.01
$\sigma(t)$	1.78	0.54	408.95	414.82	0.95	39.59	-200.48
$\mu(t), \sigma(t)$	3.75	1.61	405.64	412.97	0.96	95.56	-197.82
Normal	0.63	0.67	410.94	413.88	0.91	41.58	-203.47
Weibull	2.30	0.67	411.31	414.24	0.92	40.65	-203.66

Tabla B.18: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Paine En Parque Nacional 2

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	1.31	0.66	348.74	351.73	0.98	9.08	-172.37
GEV	1.99	0.66	350.57	355.06	0.98	7.79	-172.29
Lognormal	1.31	0.66	347.90	350.89	0.99	7.77	-171.95
$\mu(t)$	0.58	1.05	349.89	355.87	0.98	17.60	-170.94
$\sigma(t)$	0.83	0.53	352.35	358.34	0.98	6.67	-172.18
$\mu(t), \sigma(t)$	1.01	1.05	350.34	357.82	0.98	27.53	-170.17
Normal	0.70	0.53	354.89	357.88	0.93	13.32	-175.45
Weibull	0.83	0.53	351.40	354.39	0.96	10.19	-173.70

Tabla B.19: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Baguales en Cerro Guido

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	2.23	0.75	264.87	268.09	0.93	3.29	-130.43
GEV	1.89	0.75	263.89	268.72	0.89	6.63	-128.94
Lognormal	1.58	0.75	261.90	265.13	0.96	2.69	-128.95
$\mu(t)$	2.58	0.75	265.71	272.16	0.90	5.95	-128.86
$\sigma(t)$	2.32	0.75	263.85	270.29	0.96	3.68	-127.92
$\mu(t), \sigma(t)$	4.75	1.24	260.96	269.02	0.96	7.99	-125.48
Normal	5.10	0.75	284.87	288.09	0.85	4.26	-140.43
Weibull	2.55	0.75	267.08	270.30	0.92	3.23	-131.54

Tabla B.20: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Las Chinas en Cerro Guido

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	1.00	0.37	372.29	375.51	0.97	7.93	-184.15
GEV	1.30	0.50	375.87	380.70	0.97	8.15	-184.93
Lognormal	0.42	0.37	376.43	379.65	0.95	11.30	-186.21
$\mu(t)$	1.91	1.99	370.87	377.31	0.96	25.95	-181.43
$\sigma(t)$	0.98	0.62	376.58	383.03	0.96	8.88	-184.29
$\mu(t), \sigma(t)$	3.75	1.99	364.31	372.37	0.97	37.07	-177.16
Normal	1.63	0.75	384.56	387.79	0.91	12.61	-190.28
Weibull	1.44	0.37	372.43	375.65	0.97	8.47	-184.21

Tabla B.21: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Grey antes Junta Serrano

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.52	0.63	415.87	419.04	0.96	18.45	-205.94
GEV	0.84	0.50	416.47	421.22	0.98	14.99	-205.24
Lognormal	0.52	0.50	414.67	417.84	0.97	16.42	-205.34
$\mu(t)$	1.94	1.64	413.13	419.47	0.97	42.79	-202.57
$\sigma(t)$	0.99	0.50	417.27	423.61	0.97	17.92	-204.64
$\mu(t), \sigma(t)$	4.05	1.64	411.78	419.70	0.97	58.65	-200.89
Normal	0.99	0.76	421.51	424.67	0.92	23.11	-208.75
Weibull	1.46	0.63	421.44	424.61	0.92	21.98	-208.72

Tabla B.22: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río San Juan En Desembocadura

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.68	0.50	399.48	402.71	0.98	10.95	-197.74
GEV	1.32	0.50	400.74	405.57	0.97	9.81	-197.37
Lognormal	0.72	0.50	398.28	401.50	0.98	9.62	-197.14
$\mu(t)$	1.68	1.49	398.52	404.97	0.98	25.33	-195.26
$\sigma(t)$	1.47	0.50	402.36	408.81	0.97	9.51	-197.18
$\mu(t), \sigma(t)$	2.01	1.37	397.00	405.06	0.96	49.34	-193.50
Normal	1.27	0.75	406.74	409.96	0.92	15.58	-201.37
Weibull	2.02	0.62	402.91	406.14	0.95	12.18	-199.46

Tabla B.23: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Tres Brazos antes Bt. Sendos

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.33	0.38	258.89	262.00	0.98	2.12	-127.45
GEV	0.49	0.38	261.45	266.12	0.99	1.75	-127.73
Lognormal	0.42	0.51	259.54	262.65	0.99	1.32	-127.77
$\mu(t)$	0.89	1.28	260.44	266.66	0.98	3.88	-126.22
$\sigma(t)$	1.60	0.51	262.79	269.01	0.98	1.69	-127.39
$\mu(t), \sigma(t)$	2.02	1.15	260.33	268.11	0.98	5.89	-125.17
Normal	2.09	0.51	269.09	272.20	0.91	3.32	-132.55
Weibull	0.75	0.38	260.52	263.63	0.96	2.35	-128.26

Tabla B.24: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Rubens en Ruta N 9

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.68	0.50	327.26	330.42	0.98	3.55	-161.63
GEV	1.45	0.50	329.81	334.56	0.98	3.77	-161.90
Lognormal	0.63	0.50	327.91	331.08	0.97	4.01	-161.96
$\mu(t)$	2.36	2.14	314.74	321.08	0.98	23.19	-153.37
$\sigma(t)$	1.97	0.50	331.37	337.71	0.98	5.17	-161.69
$\mu(t), \sigma(t)$	2.14	2.27	316.32	324.24	0.98	23.03	-153.16
Normal	1.02	0.50	329.76	332.93	0.97	4.42	-162.88
Weibull	1.95	0.50	328.02	331.19	0.98	3.75	-162.01

Tabla B.25: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Grande en Tierra Del Fuego

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.78	0.37	376.34	379.57	0.99	5.33	-186.17
GEV	1.22	0.50	378.83	383.66	0.99	5.68	-186.41
Lognormal	1.00	0.50	377.86	381.08	0.98	5.06	-186.93
$\mu(t)$	2.09	1.87	368.84	375.29	0.99	31.72	-180.42
$\sigma(t)$	2.25	0.62	379.74	386.18	0.98	9.05	-185.87
$\mu(t), \sigma(t)$	1.84	1.87	368.84	376.89	0.99	35.28	-179.42
Normal	0.47	0.50	380.87	384.09	0.95	8.79	-188.44
Weibull	1.32	0.37	377.35	380.57	0.98	6.52	-186.68

B.2. Métricas de modelos estacionarios y no estacionarios periodo de verano.

Tabla B.26: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Alicahue en Colliguay

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	1.39	0.74	184.93	188.20	0.90	1.96	-90.46
GEV	1.19	0.61	181.41	186.32	0.85	3.31	-87.70
Lognormal	0.70	0.61	178.45	181.72	0.94	1.56	-87.22
$\mu(t)$	1.02	0.61	182.93	189.48	0.83	3.89	-87.47
$\sigma(t)$	1.48	0.61	183.33	189.88	0.87	2.18	-87.66
$\mu(t), \sigma(t)$	3.46	1.84	180.59	188.78	0.93	4.55	-85.29
Normal	2.55	1.11	232.69	235.96	0.77	2.47	-114.34
Weibull	2.04	0.61	184.55	187.83	0.91	1.83	-90.28

Tabla B.27: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Estero Arrayan en La Montosa

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.31	0.37	182.23	185.45	0.97	0.75	-89.11
GEV	0.77	0.50	184.77	189.61	0.98	0.55	-89.39
Lognormal	0.67	0.50	181.68	184.90	0.98	0.50	-88.84
$\mu(t)$	0.34	0.62	186.42	192.86	0.98	0.71	-89.21
$\sigma(t)$	1.46	1.37	183.87	190.31	0.97	2.57	-87.93
$\mu(t), \sigma(t)$	1.48	1.87	181.53	189.58	0.96	3.32	-85.76
Normal	2.95	0.75	199.39	202.61	0.89	1.16	-97.69
Weibull	0.75	0.37	183.72	186.94	0.96	0.76	-89.86

Tabla B.28: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Estero Yerba Loca antes Junta San Francisco

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	1.09	0.67	142.97	145.90	0.81	1.45	-69.49
GEV	2.57	0.40	136.90	141.30	0.93	1.10	-65.45
Lognormal	1.42	0.54	137.16	140.09	0.86	1.38	-66.58
$\mu(t)$	1.84	0.94	136.07	141.94	0.93	1.41	-64.04
$\sigma(t)$	2.89	1.07	137.82	143.69	0.87	2.26	-64.91
$\mu(t), \sigma(t)$	3.82	1.74	134.72	142.05	0.88	2.71	-62.36
Normal	3.17	1.07	165.19	168.12	0.70	1.66	-80.60
Weibull	3.16	0.80	148.94	151.87	0.79	1.39	-72.47

Tabla B.29: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Estero Puanque en Boquerón

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	2.39	0.87	90.98	94.20	0.71	1.61	-43.49
GEV	2.05	0.37	85.67	90.51	0.92	1.26	-39.84
Lognormal	1.85	0.62	90.44	93.66	0.91	0.87	-43.22
$\mu(t)$	0.72	0.75	83.70	90.14	0.95	1.05	-37.85
$\sigma(t)$	1.44	0.62	86.91	93.35	0.96	0.56	-39.45
$\mu(t), \sigma(t)$	4.99	1.87	82.53	90.58	0.92	2.25	-36.26
Normal	3.74	1.62	178.75	181.97	0.52	1.84	-87.37
Weibull	1.88	0.75	87.73	90.96	0.76	1.56	-41.87

Tabla B.30: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Palos en junta con Colorado

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.79	0.73	367.69	371.02	0.97	6.16	-181.85
GEV	0.61	0.61	368.57	373.56	0.98	4.79	-181.29
Lognormal	0.47	0.61	366.31	369.64	0.98	5.01	-181.16
$\mu(t)$	0.84	0.73	368.83	375.49	0.98	9.62	-180.42
$\sigma(t)$	0.98	0.97	369.22	375.87	0.98	14.74	-180.61
$\mu(t), \sigma(t)$	3.07	2.43	363.83	372.15	0.98	32.03	-176.92
Normal	1.21	0.97	376.84	380.17	0.91	8.81	-186.42
Weibull	1.94	0.73	371.78	375.11	0.95	6.87	-183.89

Tabla B.31: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Lirquén en cerro El Padre

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.62	0.49	299.68	302.95	0.97	3.66	-147.84
GEV	0.33	0.37	300.63	305.54	0.97	2.92	-147.32
Lognormal	0.44	0.37	297.72	301.00	0.98	2.60	-146.86
$\mu(t)$	0.98	0.98	300.42	306.98	0.98	5.38	-146.21
$\sigma(t)$	1.90	1.23	299.41	305.96	0.98	11.22	-145.70
$\mu(t), \sigma(t)$	1.90	1.60	297.20	305.39	0.98	14.13	-143.60
Normal	2.55	0.86	319.84	323.12	0.88	5.54	-157.92
Weibull	1.48	0.61	301.55	304.82	0.96	3.57	-148.77

Tabla B.32: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Mulchén en Mulchén

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	1.14	0.77	328.87	331.98	0.78	23.39	-162.44
GEV	0.54	0.38	321.61	326.28	0.91	19.77	-157.81
Lognormal	0.92	0.51	321.15	324.26	0.87	21.45	-158.57
$\mu(t)$	2.15	1.15	316.47	322.70	0.93	23.31	-154.24
$\sigma(t)$	1.15	0.77	321.73	327.95	0.94	11.60	-156.87
$\mu(t), \sigma(t)$	2.49	1.53	317.95	325.72	0.93	29.86	-153.97
Normal	5.36	1.28	368.20	371.31	0.64	26.55	-182.10
Weibull	2.26	0.77	331.53	334.64	0.79	21.96	-163.76

Tabla B.33: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Renaico en Longitudinal

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.61	0.51	400.20	403.31	0.93	33.07	-198.10
GEV	0.83	0.38	400.29	404.96	0.99	23.06	-197.15
Lognormal	1.02	0.51	398.10	401.21	0.98	21.43	-197.05
$\mu(t)$	0.99	1.28	396.65	402.87	0.98	46.40	-194.32
$\sigma(t)$	0.94	0.38	402.29	408.51	0.98	24.60	-197.14
$\mu(t), \sigma(t)$	3.41	2.43	394.99	402.76	0.98	97.55	-192.49
Normal	4.06	0.89	424.34	427.45	0.80	43.83	-210.17
Weibull	1.09	0.51	402.18	405.29	0.92	32.01	-199.09

Tabla B.34: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Cautín En Almagro

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	0.38	0.49	545.37	548.64	0.90	141.45	-270.68
GEV	0.51	0.37	544.77	549.68	0.96	93.06	-269.39
Lognormal	0.39	0.37	542.16	545.43	0.94	116.15	-269.08
$\mu(t)$	0.84	0.86	543.11	549.66	0.96	148.09	-267.55
$\sigma(t)$	0.18	0.37	546.60	553.15	0.96	79.07	-269.30
$\mu(t), \sigma(t)$	2.29	1.35	544.00	552.19	0.96	266.98	-267.00
Normal	2.00	0.86	566.92	570.20	0.81	175.82	-281.46
Weibull	0.33	0.49	548.86	552.14	0.89	138.78	-272.43

Tabla B.35: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Allipén en Los Laureles

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	2.08	0.73	511.11	514.44	0.85	95.36	-253.56
GEV	1.94	0.61	506.74	511.73	0.94	76.37	-250.37
Lognormal	2.56	0.61	506.11	509.43	0.91	83.55	-251.05
$\mu(t)$	2.54	1.22	503.95	510.60	0.95	101.81	-247.98
$\sigma(t)$	2.68	0.73	507.98	514.64	0.95	51.72	-249.99
$\mu(t), \sigma(t)$	3.75	1.58	505.56	513.88	0.95	134.19	-247.78
Normal	3.59	0.97	536.38	539.71	0.73	115.90	-266.19
Weibull	2.55	0.73	516.81	520.13	0.83	92.78	-256.40

Tabla B.36: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Ibañez en Desembocadura

Modelo	χ^2	KS	AIC	BIC	R^2	RMSE	Loglk
Gamma	1.12	0.39	455.86	458.91	0.97	39.56	-225.93
GEV	1.79	0.39	457.45	462.03	0.98	35.88	-225.72
Lognormal	1.38	0.39	455.48	458.54	0.98	33.58	-225.74
$\mu(t)$	1.38	1.43	452.48	458.58	0.98	108.35	-222.24
$\sigma(t)$	1.42	0.39	459.24	465.35	0.98	49.61	-225.62
$\mu(t), \sigma(t)$	2.55	1.56	453.84	461.47	0.98	135.66	-221.92
Normal	1.25	0.65	460.30	463.35	0.94	51.43	-228.15
Weibull	2.13	0.65	459.67	462.72	0.94	47.63	-227.84

Tabla B.37: Métricas modelos estacionarios y no estacionario Río Murta en Desembocadura

Modelo	chi2	KS	AIC	BIC	R2	RMSE	Loglk
Gamma	0.74	0.53	423.42	426.41	0.94	46.32	-209.71
GEV	0.49	0.40	422.67	427.15	0.98	32.43	-208.33
Lognormal	0.84	0.40	421.27	424.27	0.96	40.90	-208.64
$\mu(t)$	1.43	1.71	412.28	418.27	0.99	84.51	-202.14
$\sigma(t)$	1.33	0.92	423.30	429.28	0.99	59.73	-207.65
$\mu(t), \sigma(t)$	2.14	1.98	411.19	418.67	0.99	132.93	-200.60
Normal	0.71	0.66	432.34	435.33	0.87	57.67	-214.17
Weibull	1.76	0.53	429.53	432.53	0.90	50.61	-212.77