

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**COMPARACIÓN ENTRE ENFOQUES ESTACIONARIO Y NO ESTACIONARIO
PARA LA ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIONES DE DISEÑO EN CUENCAS DE
CHILE CONTINENTAL**

MARCIA PAREDES A.¹
FELIPE GATEÑO M.²
MIGUEL LAGOS Z.³
PABLO MENDOZA Z.⁴

RESUMEN

Durante la última década, diversos estudios han señalado que la magnitud y frecuencia de eventos extremos han cambiado en el territorio nacional. Con el fin de analizar este efecto a escala de cuenca, se analiza la presencia de tendencias significativas en series anuales de precipitaciones máximas diarias mediante la prueba de Mann-Kendall (p -valor $< 5\%$), considerando el producto grillado de precipitaciones diarias del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). Luego de aplicar la prueba a 513 cuencas, 80 cuencas presentan variaciones en sus precipitaciones máximas diarias en el periodo 1979 - 2016. Además, se realizaron análisis de frecuencia estacionario (con siete distribuciones de probabilidad) y no estacionario (ajustando la distribución generalizada de valores extremos (GEV) bajo tres enfoques), escogiéndose el mejor modelo como aquel que minimizara el criterio de información de Akaike (AIC) y posteriormente categorizando las elecciones según el método *k-means clustering*. Los resultados muestran que 68 cuencas mejoran su ajuste al seleccionar una distribución GEV con un enfoque no estacionario. La variación de las precipitaciones estimadas con modelos no estacionarios muestra una disminución máxima de 43% en sus magnitudes respecto a modelos estacionarios para el centro-sur, y aumentos de hasta el 61% en Chile austral en periodos de retorno mayores a 100 años. Se concluye que futuros proyectos de diseño hidrológico deben considerar la no estacionariedad en sus diseños debido a los impactos en la seguridad hidrológica que traen estas variaciones.

¹ Estudiante de magíster, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: marcia.paredes@ug.uchile.cl

² Estudiante de magíster, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: felipe.gateno@ug.uchile.cl

³ Profesional docente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: mlagosz@uchile.cl

⁴ Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: pamendoz@uchile.cl

1. INTRODUCCION

El territorio chileno presenta una gran diversidad de climas de norte a sur. Debido a su ubicación entre el océano Pacífico y la cordillera de los Andes, el país se encuentra vulnerable a los impactos de eventos extremos como crecidas, inundaciones y deslizamientos, como también de sistemas frontales de invierno, bajas segregadas en altura, y aumentos en las lluvias en épocas de verano producto de precipitaciones convectivas (Aceituno et al., 2021; Poveda et al., 2020). El alza de la temperatura del mar conlleva al aumento de esta agua precipitable, por lo que escenarios de cambio climático proyectan cambios en la magnitud y la frecuencia de las lluvias, indicando mayores variaciones en la zona sur debido a su alta humedad atmosférica (Garreaud, 2007; Pfahl et al., 2017).

La mega sequía experimentada en la última década ha provocado una disminución en las precipitaciones de la zona central, afectando así la calidad de los cultivos y la oferta del recurso debido a eventos anticiclónicos y ENSO (Garreaud et al., 2020). Garreaud et al. espera una disminución prolongada en la magnitud de las lluvias mensuales en la zona central de persistir las tendencias observadas, mientras que existiría un aumento de estas en Chile austral y en el altiplano. Al no incorporarse estas tendencias climáticas en la hidrometeorología de cuencas para futuros proyectos de ingeniería, la gestión hídrica podría no considerar la disminución de los volúmenes de agua disponibles en los próximos años hidrológicos, dejando vulnerables a la población y algunos sectores económicos. Por otro lado, el incremento de la frecuencia de algunos eventos extremos generaría un mayor número de riesgos hidrológicos, como aluviones e inundaciones, afectando la seguridad de las estructuras río abajo y llegando a cobrar vidas humanas. Esta conexión entre el cambio de las forzantes meteorológicas y la generación de escorrentía puede llegar a convertirse en un riesgo para los asentamientos humanos y los ecosistemas.

Una forma de incluir estos cambios es a través del diseño de infraestructura vulnerable y preventiva ante estos desastres, considerando estas tendencias en las precipitaciones aplicando análisis de frecuencia no estacionarios (Miguel Lagos-Zúñiga & Vargas, 2011). Sin embargo, obras antiguas no incluyen este enfoque debido a la falta y calidad de los datos disponibles, estando en alto riesgo. Un análisis no estacionario de la precipitación permitiría reducir la incertidumbre en la estimación de caudales de diseño para obras cuya construcción y operación se proyecta en las futuras décadas.

En el presente estudio se expone un análisis de tendencias en el promedio y desviación estándar de las series de precipitaciones máximas diarias para 513 cuencas chilenas en el periodo 1979 - 2016. Adicionalmente, se compararán los resultados del análisis de frecuencia bajo un enfoque estacionario con uno no estacionario para aquellas cuencas con tendencia significativa en sus precipitaciones, considerando los valores del producto grillado CR2MET.

2. METODOLOGÍA

2.1 CONSTRUCCIÓN DE LA SERIE DE VALORES MÁXIMOS

Se extrajeron las delimitaciones de 513 cuencas desde la base de datos CAMELS-CL (Alvarez-Garretón et al., 2018), cuyos puntos de salida corresponden a estaciones

fluviométricas de la red hidrometeorológica de la Dirección General de Aguas (DGA). Los datos de precipitación diaria fueron obtenidos del producto grillado “CR2MET” del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (Boisier et al., 2018), el cual contiene las magnitudes de las lluvias a una resolución de 0.05° para todo el territorio de Chile continental en el periodo 1979 - 2016.

Para cada una de las 513 cuencas se repite el siguiente procedimiento: (a) se asocia una fracción de área en la cuenca cubierta por cada píxel ($f_{p_{i,j}}$) según la delimitación de la cuenca en un archivo vectorial, superponiéndolo al producto grillado ; (b) el k-ésimo registro de precipitación en cada píxel de la cuenca ($P_{p_{i,j}}^k$) es ponderado por la respectiva fracción de área, obteniéndose la precipitación diaria ponderada por área como $P_{p_{i,j}}^k \cdot f_{p_{i,j}}$; (c) para cada paso temporal k, se suman las precipitaciones ponderadas por área en el dominio de la cuenca, resultando en la precipitación diaria representativa de la cuenca según la ecuación 1 para el periodo 1979 - 2016; (d) se obtiene la serie de precipitaciones máximas diarias anuales a la escala de cuenca, a partir de la extracción de la máxima precipitación diaria para cada año hidrológico. Esta metodología se encuentra ilustrada en la Figura 1.

$$P_{cuenca}^k = \sum_i \sum_j P_{p_{i,j}}^k \cdot f_{p_{i,j}} \quad (1)$$

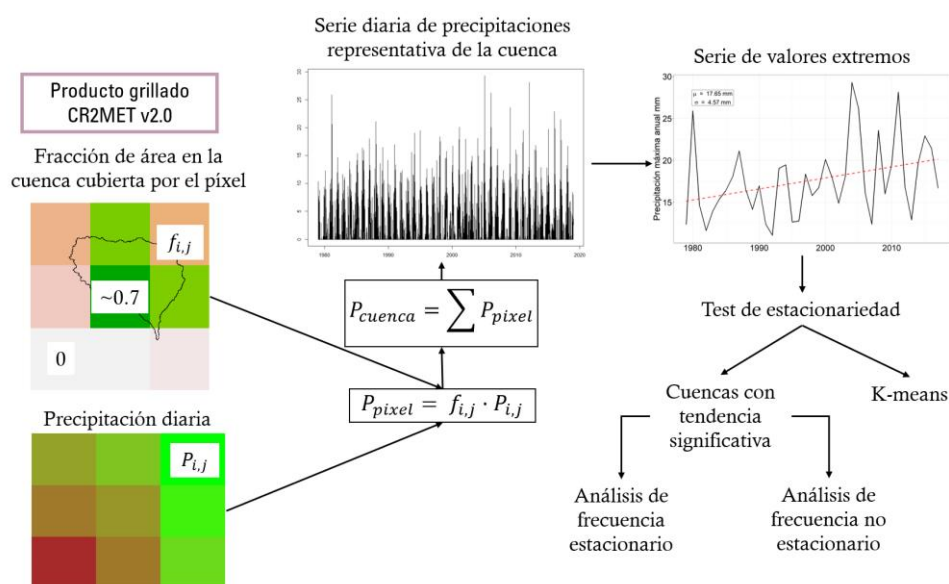


Figura 1: Metodología ilustrada para obtener los valores de la máxima precipitación diaria para un año hidrológico.

2.2 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Para justificar la aplicación de un análisis de frecuencia no estacionario, es necesario identificar primero las cuencas que presentan una tendencia estadísticamente significativa en su serie de precipitaciones máximas diarias (Salas et al., 2018; Wi et al., 2016). Para seleccionarlas, se aplican dos pruebas estadísticas a las series: (a) la prueba de Mann-Kendall (Kendall & Gibbons, 1975; Mann, 1945) para identificar la significancia estadística de la

tendencia presente en los datos; y (b) la prueba de Sen (Sen, 1968), para reconocer si esta es creciente o decreciente.

Adicionalmente, se realiza un *clustering* utilizando el método *k-means* (Forgy, 1965; Hartigan & Wong, 1979; MacQueen, 1967) para identificar patrones espaciales en las cuencas estudiadas. Esta técnica corresponde a un método de clasificación no supervisada, cuya implementación permite obtener los k grupos (o clústers) más distintivos entre las alternativas de agrupación, basado en los atributos utilizados para generar dicha clasificación. Es un método iterativo, donde primero se asigna cada observación a un clúster de forma aleatoria. Con ello, la i -ésima observación con n atributos, $O_i(a_1, \dots, a_n)$ queda asociada al k -ésimo clúster. Luego, en cada iteración, la i -ésima observación puede cambiar de clúster siempre y cuando se reduzca la variabilidad intra-clúster, calculada a partir de la suma de las distancias entre cada observación y el respectivo centroide del clúster. Los clústeres resultantes se obtienen una vez que se minimice dicha variabilidad.

Los atributos utilizados para implementar el *k-means* clustering fueron dos: el p-valor de la prueba de Mann-Kendall y el estadístico de Sen (i.e. cada cuenca posee dos atributos). Se aplica el método variando la cantidad de clústeres hasta disminuir la varianza del error en la clasificación (método del codo). Finalmente, se seleccionaron aquellas cuencas que presentaron una tendencia con nivel de significancia menor al 5% para proceder a realizar un análisis de frecuencias bajo los dos enfoques.

2.3 ANÁLISIS DE FRECUENCIA

Para la evaluación de los modelos bajo un enfoque estacionario, se ajustaron siete distribuciones de probabilidad a las series de valores extremos: (1) Normal, (2) LogNormal, (3) Gamma de dos parámetros, (4) Weibull, (5) Pearson, (6) LogPearson, y (7) la distribución generalizada de valores extremos (GEV).

Para la evaluación del enfoque no estacionario, se utilizó exclusivamente la distribución generalizada de valores extremos (GEV) como un *benchmarking* entre las alternativas no estacionarias y la simplicidad de sus parámetros, considerando tres opciones en la modelación de sus estadísticos:

- (a) Una variación lineal de la media con respecto al tiempo ($\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 \cdot t$).
- (b) Una variación lineal de la desviación estándar con respecto al tiempo ($\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 \cdot t$).
- (c) Una variación lineal de la media y desviación estándar respecto al tiempo ($\mu(t), \sigma(t)$).

Donde los parámetros μ_0, μ_1, σ_0 y σ_1 son ajustados mediante una regresión lineal simple. Dicha regresión se aplica a la serie de promedios y desviaciones estándar generada a través de ventanas móviles de 15 años de la serie de precipitaciones máximas diarias.

Para sistematizar la selección del mejor ajuste estacionario y no estacionario, se definió como la mejor distribución de cada enfoque a aquella que minimice el criterio de información de Akaike (AIC; Akaike, 1973) para cada cuenca que presentara una tendencia estadísticamente significativa. El AIC es un criterio estadístico de selección de modelos que no involucra una

prueba de hipótesis, si no que evalúa el desempeño basado en el criterio de la parsimonia (i.e., penaliza al modelo diagnosticado según la cantidad de parámetros que posea). Según este criterio, se prefiere el modelo que mínime $AIC = 2k - 2l(\hat{\theta})$, donde k es la cantidad de parámetros y $l(\hat{\theta})$ es el máximo valor del logaritmo de la verosimilitud del modelo.

Por último, se calculó la diferencia porcentual de las precipitaciones máximas diarias estimadas a través de un enfoque no estacionario respecto a uno estacionario según la ecuación 2.

$$\Delta P = \frac{P_{NE}^T - P_E^T}{P_E^T} \cdot 100\% \quad (2)$$

Donde P_{NE}^T y P_E^T son los montos de precipitación estimada para el periodo de retorno T bajo un enfoque no estacionario y estacionario, respectivamente. Valores positivos (negativos) de ΔP indican que el enfoque no estacionario estima un aumento (disminución) en la magnitud del evento extremo para el periodo de retorno de T años respecto al modelo estacionario.

3. RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

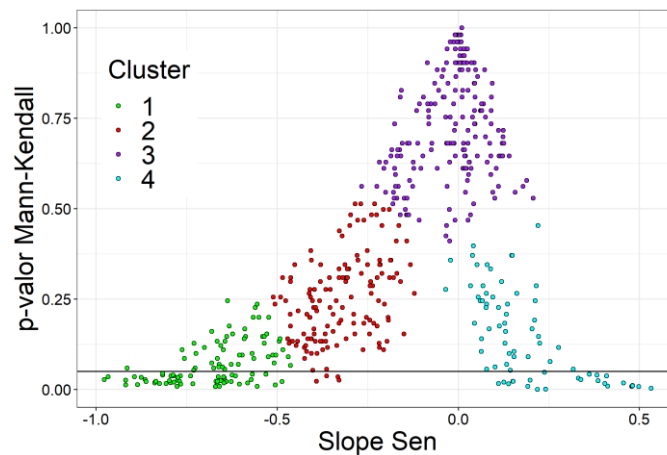


Figura 2: Distribución de los clústeres en el espacio de atributos (tendencia y p-valor). La línea negra corresponde al p-valor del 5%.

Al realizar la prueba de Mann-Kendall a las series de precipitación máximas diarias, se obtuvo que 80 de estas cuencas presentan una tendencia con un nivel de significancia menor al 5% (puntos bajo la recta horizontal en Figura 2 y puntos rojos en Figura 3.a). Al aplicar el *k-means clustering* utilizando los p-valores de la prueba de Mann-Kendall y el estadístico de Sen, se generaron cuatro clústeres como se muestra en la Figura 2 y Figura 3.c. El clúster 1 (verde) corresponden a cuencas con una gran tendencia a la disminución en las magnitudes de sus precipitaciones máximas anuales, las cuales están ubicadas principalmente en la zona centro-sur (-29°N a -37°N); el clúster 2 (rojo) corresponde a aquellas cuencas con una disminución moderada, donde sólo cuatro de ellas cumplen con la significancia estadística del 5%; el clúster 3 (morado) corresponde a cuencas tendencias cercanas al nulo, distribuidas

a lo largo del país; finalmente, el clúster 4 (celeste) son cuencas que presentaron un leve aumento en la magnitud de sus precipitaciones.

En la Figura 3.b se muestran las pendientes de la prueba de Sen, donde se identifican tres comportamientos según la ubicación geográfica de la cuenca: una ausencia de tendencias o magnitudes crecientes pequeñas (zona norte, hasta la latitud -20°N); tendencias negativas hasta la latitud -38°N (zona central); y un aumento en los eventos máximos en las latitudes al sur de -40°N (zona sur y austral). Estos resultados son similares a los obtenidos en Lagos-Zúñiga et al. (2021), donde se analizaron las estaciones pluviométricas en Chile continental.

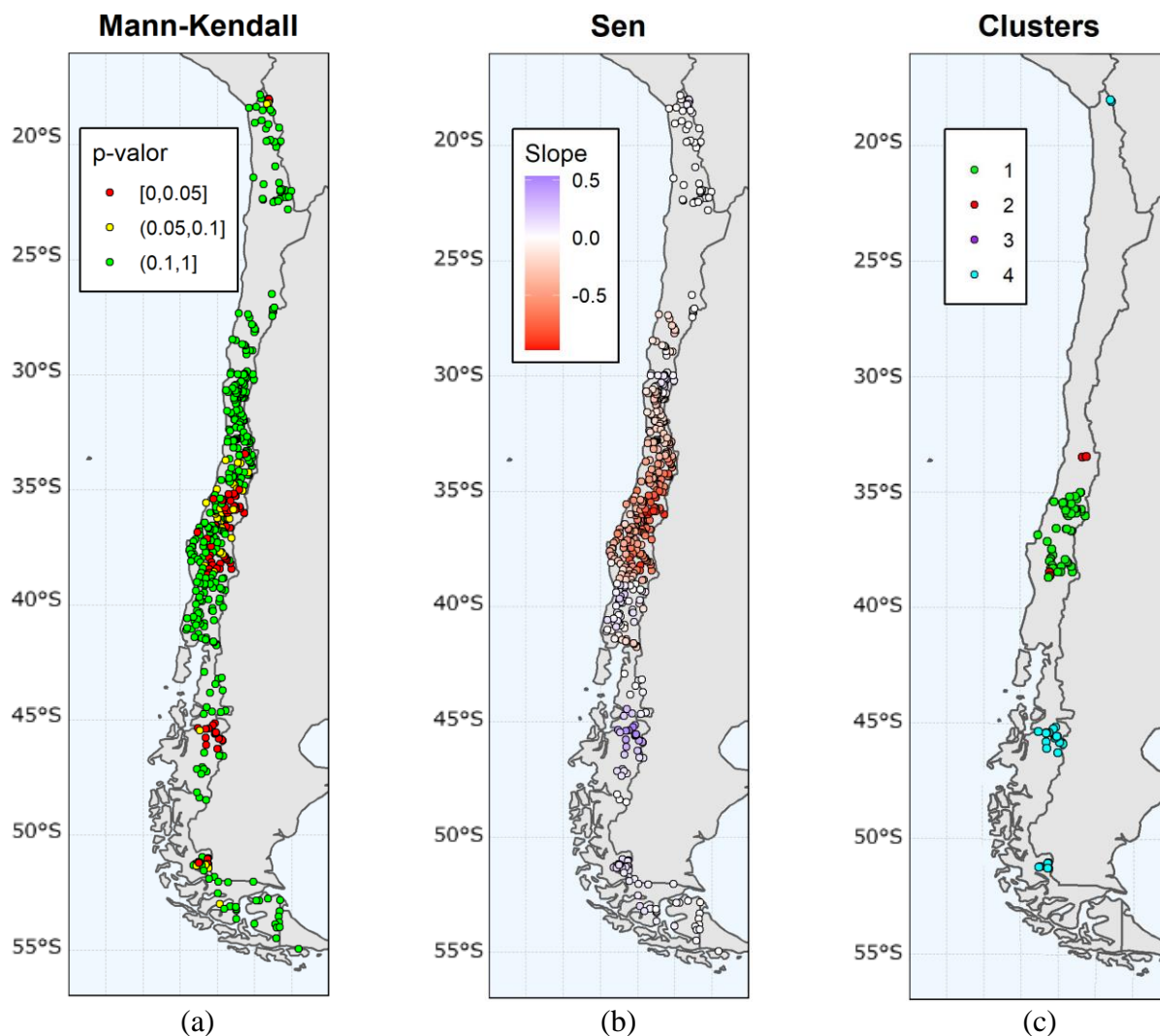


Figura 3: (a) Resultados de la prueba de Mann-Kendall para las 513 de CAMELS-CL. (b) Resultados de la prueba de Sen; en azul (rojo) se presentan las cuencas con una tendencia a aumento (decrecimiento) en la serie de precipitaciones máximas diarias. (c) Distribución espacial de los clústeres de las 80 cuencas con tendencia significativa (Figura 2).

3.2 SERIES DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS

El análisis gráfico a las series de precipitaciones máximas diarias permite identificar si las variaciones encontradas por las pruebas de Sen y Mann-Kendall se deben a cambios en el promedio o simplemente a variabilidad climática. La prueba de Sen indica que las cuencas ubicadas en el centro y centro-sur de Chile presentarían una disminución en la magnitud de sus eventos, tal como se observa para las cuencas de Río Melado en el Salto (-35.88°N , -71.02°E , Figura 4.b) y Río Cautín en Cajón (-38.69°N , -72.50°E , Figura 4.c), escogidas como ejemplos representativos. Estas cuencas —pertenecientes a los clústeres 1 y 2— presentaron una media móvil con tendencia negativa y una desviación estándar relativamente constante, lo que podría indicar que, si bien las magnitudes de los eventos de precipitación máxima serían menores, su distribución temporal y oscilaciones se han mantenido en los años de estudio.

Las cuencas ubicadas en los extremos del país (clúster 4) muestran un comportamiento distinto: el aumento de sus magnitudes está acompañado de un incremento notorio en la desviación estándar según una media móvil de 15 años (Figura 4.a y Figura 4.d). Estos eventos se caracterizan por precipitaciones convectivas, por lo que sus lluvias son menores comparadas a la zona centro, donde predominan los frentes o gradientes orográficos.

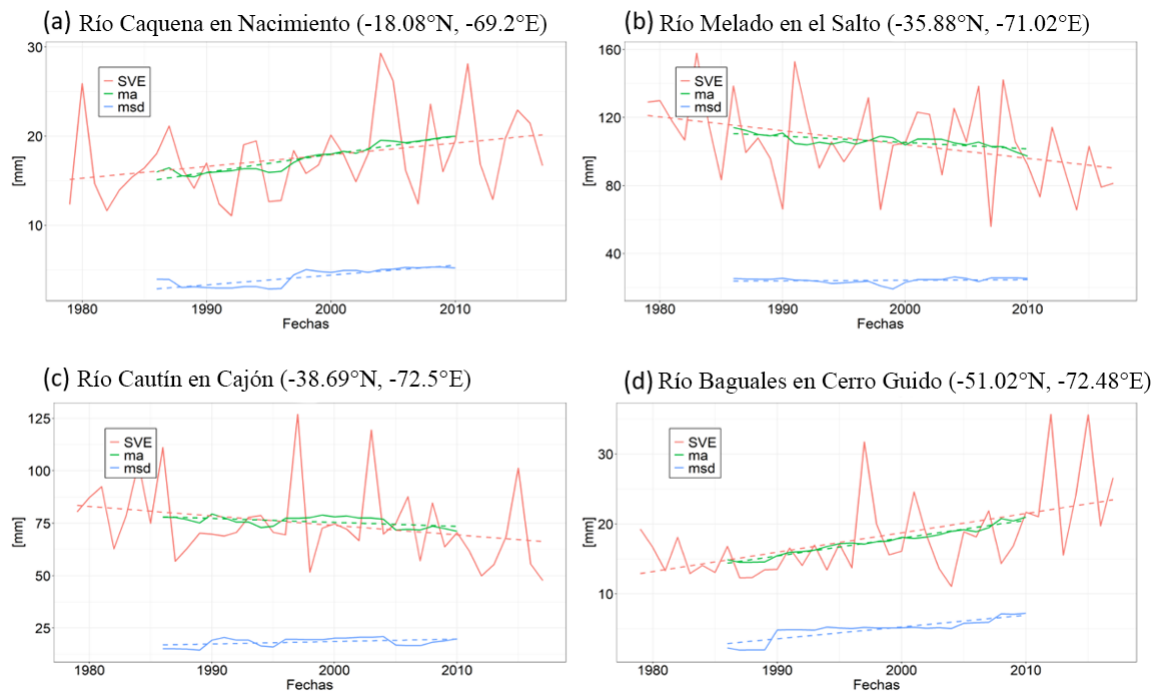


Figura 4: Series anuales de precipitaciones máximas diarias (SVE) para (a) Río Caquena en Nacimiento, (b) Río Melado en el Salto, (c) Río Cautín en Cajón, y (d) Río Baguales en Cerro Guido. Las curvas verde y azul corresponden a la media móvil (ma) y desviación estándar móvil (msd) con una ventana de 15 años; las rectas punteadas representan la regresión lineal de cada serie.

3.3 ANÁLISIS DE FRECUENCIA

La Figura 5 muestra como ejemplo el análisis de frecuencia de precipitaciones máximas diarias realizado para la cuenca Río Caquena en Nacimiento (-18.08°N, -69.2°E), ubicada en el norte de Chile y con tendencia al aumento en sus precipitaciones. Las curvas de las distribuciones estacionarias presentan un mejor ajuste visual para periodos de retorno menores a 10 años; sin embargo, la discrepancia entre las distintas distribuciones paramétricas aumenta para periodos de retorno superiores. Este comportamiento se vio replicado en las 80 cuencas, con la excepción de las cuencas del sur pertenecientes al clúster 4, donde los valores cercanos a $T = 10$ [años] mostraban mayor desviación.

Al considerar las distribuciones no estacionarias (Figura 6) se detecta una mejora para el ajuste de eventos con $T_r > 10$ años. Además, se puede notar que existe una *trade-off* entre las opciones de dependencia temporal en los estadísticos: si bien el promedio temporal se ajusta mejor a los periodos mayores, la desviación temporal presenta un valor estimado más cercano para precipitaciones con menores periodos de retorno. Finalmente, en Río Caquena en Nacimiento se eligieron las distribuciones $GEV(\mu(t))$ y Pearson III como los mejores modelos no estacionario y estacionario, respectivamente, según los resultados de AIC (Tabla 1), siendo el modelo no estacionario el que presenta el menor AIC de todas las distribuciones.

Esta selección de mejores modelos se repitió para las 80 cuencas, donde sólo 12 entregaron un mejor ajuste manteniendo el enfoque estacionario (Figura 7); sin embargo, en la mayoría de los casos se presentaron mejoras al agregar una dependencia temporal del promedio, y en segundo lugar aquellos con una dependencia temporal de la desviación estándar. Esto señala que la incorporación de no estacionariedad en los estadísticos de las series de estas cuencas mejoraría la estimación de próximos eventos extremos en una disminución del AIC de 2.85 en promedio. Esto puede traducirse tanto en diseños más conservadores como en menos exigentes.

Tabla 1: Criterio de información de Akaike (AIC) resultante para la serie de precipitaciones máximas diarias de Río Caquena en Nacimiento.

Enfoque	Distribución	AIC
Estacionario	Normal	232.11
	LogNormal	226.46
	Gamma	227.72
	Weibull	234.45
	Pearson III	225.95
	LogPearson III	227.27
	GEV	227.59
No estacionario	GEV[$\mu(t)$]	225.39
	GEV[$\sigma(t)$]	229.46
	GEV[$\mu(t), \sigma(t)$]	226.39

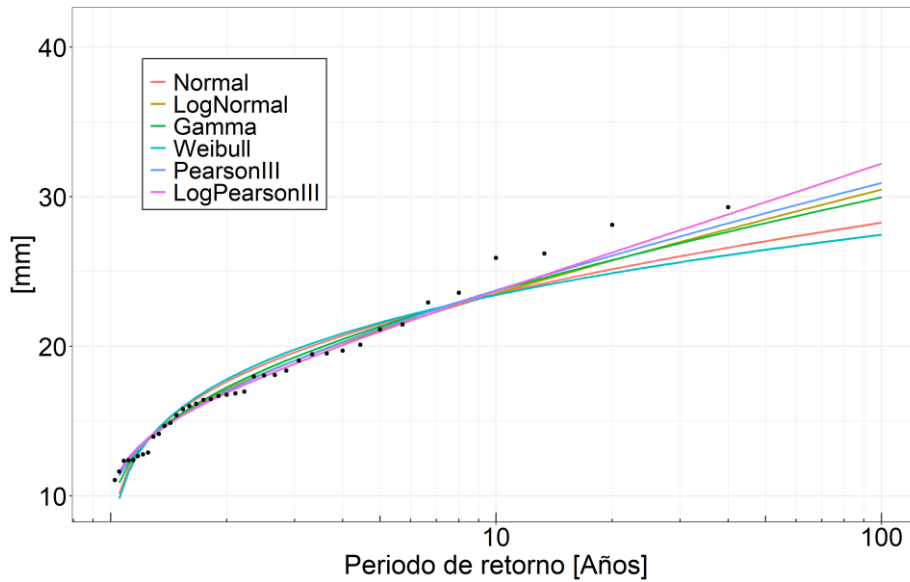


Figura 5: Análisis de frecuencia estacionario para las precipitaciones máximas diarias de la cuenca Río Caquena en Nacimiento.

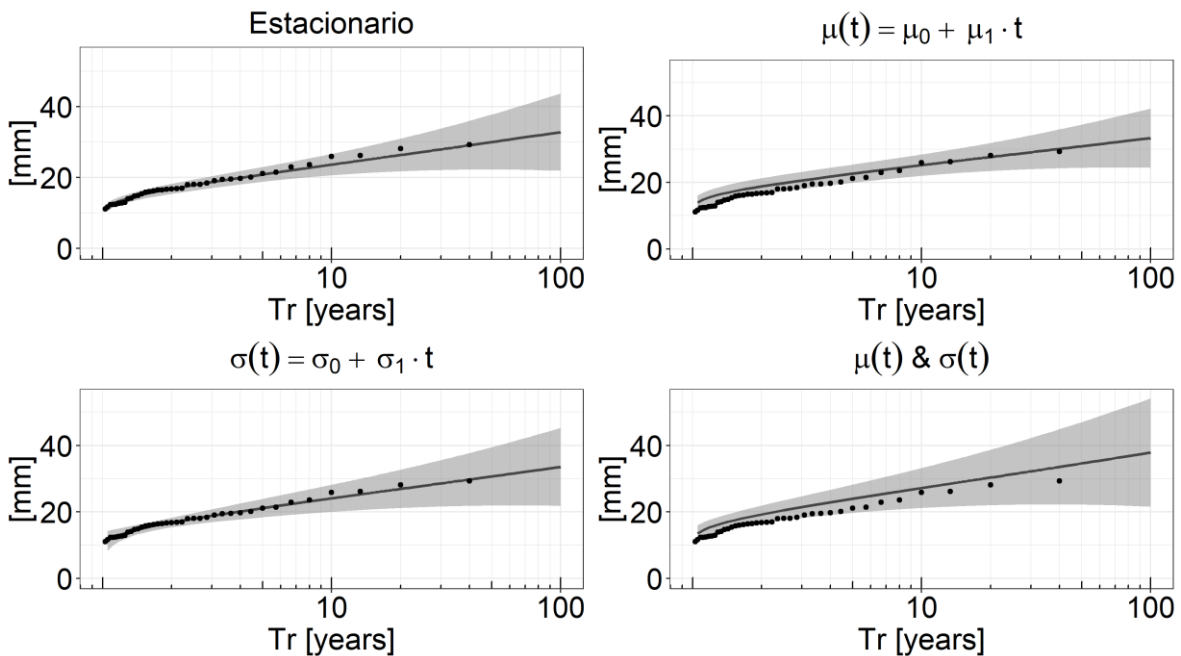


Figura 6: Análisis de frecuencia para Río Caquena en Nacimiento usando una GEV para un modelo estacionario (esquina superior izquierda) y tres modelos no estacionarios usando GEV: promedio dependiente del tiempo (superior derecha), desviación estándar dependiente del tiempo (inferior izquierda) y ambos estadísticos dependientes del tiempo (inferior derecha). La zona gris corresponde al intervalo de confianza de la estimación.

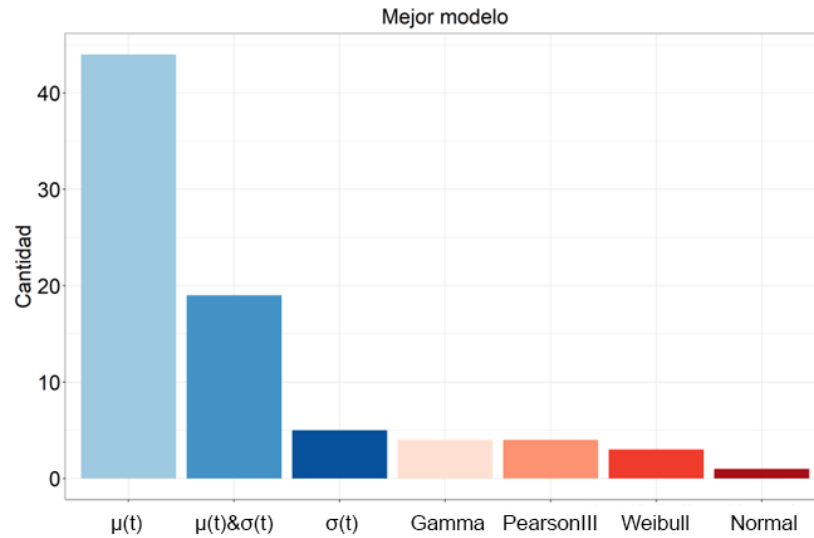


Figura 7: Histograma de cuencas con tendencia significativa y su mejor ajuste para eventos de precipitación extremos. Las tonalidades rojizas corresponden a modelos con enfoque estacionario, y las azules a no estacionarios.

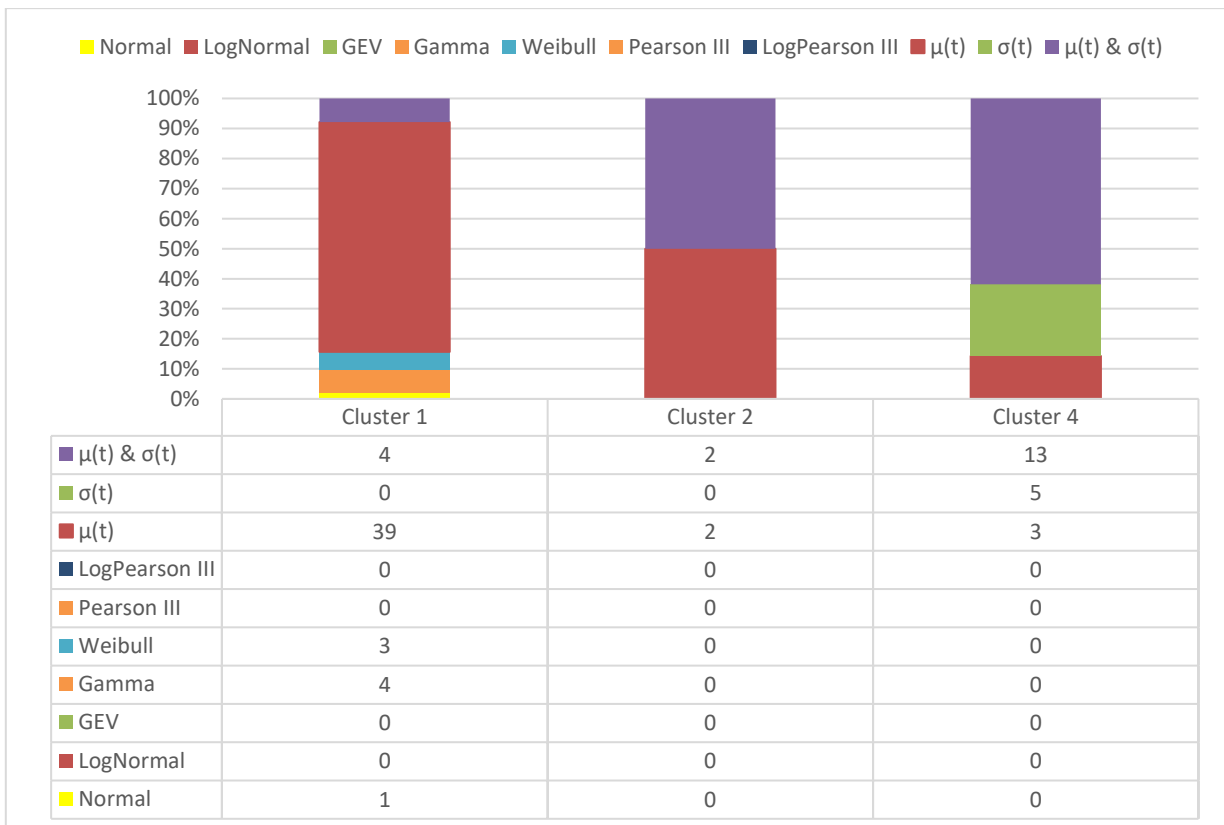


Figura 8: Porcentaje de mejores ajustes según los clústeres mostrados en la Figura 3.c.

Al clasificar estos mejores modelos en los clústeres, las cuencas del centro y centro-sur disminuyen su AIC principalmente por la incorporación de temporalidad en sus promedios (Figura 8, clúster 1). En este clúster también se presenta una mayor heterogeneidad en los modelos debido a la variedad de cuencas que lo conforman. Los mejores modelos para

cuencas del sur y norte (Figura 8, clúster 4) son aquellos que dependen tanto de la desviación estándar como del promedio. Por último, para las cuatro cuencas que conformaban el clúster 2, se obtuvo un menor AIC para distribuciones que modificaban el promedio de la serie. Esto refleja que las series de precipitación-promedio-desviación tienen asociadas mayores variaciones en cuencas extremas del país con respecto a las ubicadas en la zona central.

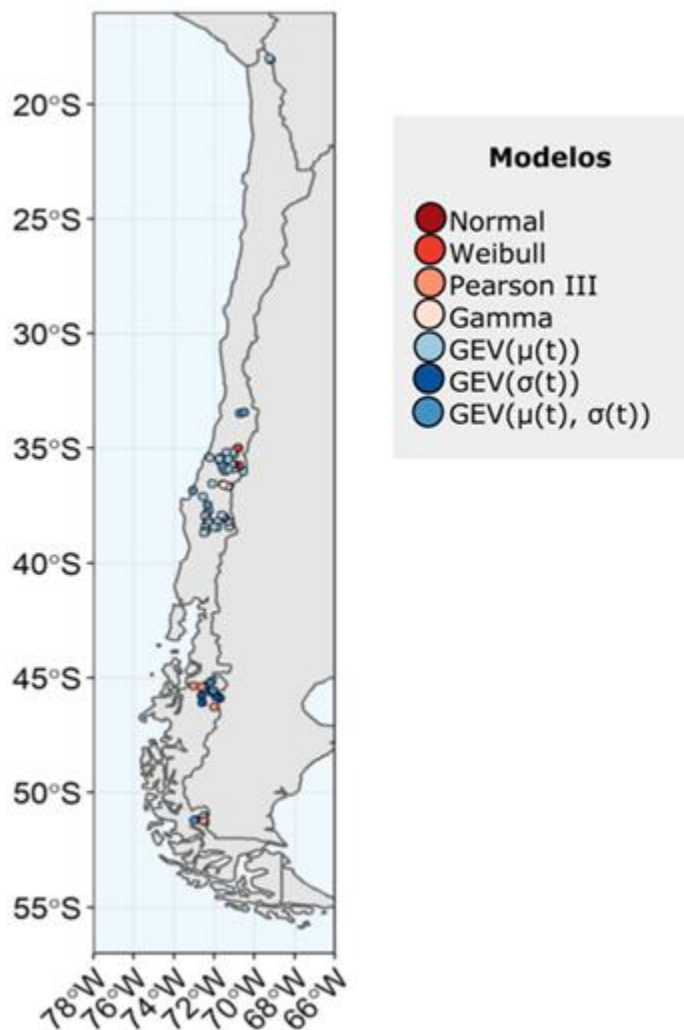


Figura 9: Distribución de los mejores modelos para las cuencas con tendencia significativa. Las tonalidades rojizas corresponden a modelos estacionarios, mientras que las azules a no estacionarios.

3.4 DIFERENCIAS ENTRE MODELOS ESTACIONARIOS Y NO ESTACIONARIOS

La inclusión de criterios estadísticos como el AIC permite una selección sistemática de los mejores modelos ajustados, tanto bajo un enfoque estacionario como no estacionario. En base a esto, se realizó una comparación entre las magnitudes de los eventos extremos estimados por el mejor ajuste estacionario y el mejor ajuste no estacionario (Figura 10). En cada panel

se presenta la diferencia porcentual por cuenca de la precipitación estimada en tres periodos de retorno (10, 100 y 500 años), calculadas a través de la ecuación 2.

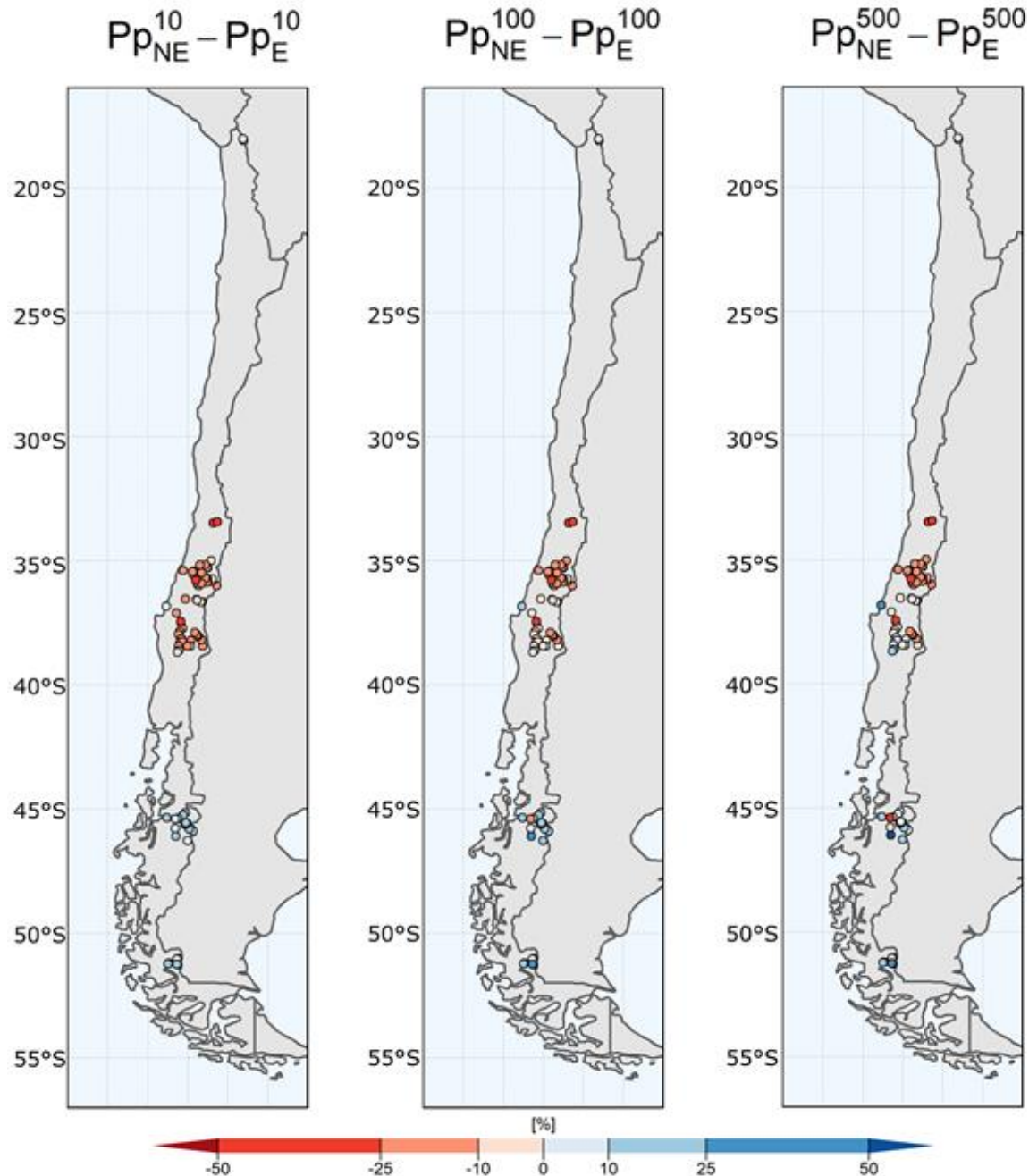


Figura 10: Diferencia porcentual de precipitación máxima diaria esperada para los periodos de retorno 10, 100 y 500 años entre el estimado por el mejor modelo no estacionario (NE) y el mejor modelo estacionario (E). Las cuencas con tonos rojizos indican que el modelo no estacionario entrega una disminución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

De la Figura 10 también se desprende que no existe una diferencia notoria entre dichos enfoques para las dos cuencas del extremo norte, donde la diferencia porcentual fue cercana

a cero. Por otro lado, para las cuencas de la zona centro (alrededor de la latitud -35°N) se observa un sesgo negativo en la magnitud al considerar un enfoque no estacionario. En la zona sur (cerca de la latitud -38°N), en cambio, la diferencia depende del periodo de retorno analizado: para periodos de retorno bajos (10 y 100 años), se obtienen menores precipitaciones al utilizar un enfoque no estacionario, mientras que para $Tr = 500$ años se tienen eventos más húmedos en hasta un 25% para algunas cuencas. Finalmente, en la zona austral se presenta un comportamiento heterogéneo en las estimaciones de las cuencas, con aumentos en las precipitaciones que alcanzan el 39% y 61% en Río Ibáñez Antes de Junta Cajón (BNA 11500002) en un periodo de retorno de 100 y 500 años, respectivamente.

4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En el presente estudio, se realizó un análisis de tendencias a las precipitaciones máximas diarias de 513 cuencas distribuidas en Chile continental, para luego realizar un análisis de frecuencia estacionario y no estacionario mediante la selección sistemática de distribuciones de probabilidad con el criterio de información de Akaike (AIC).

La prueba de Mann Kendall señala que existe un cambio en la magnitud de eventos extremos en Chile, siendo la zona central la más afectada presentando una caída mayor al 25% en cuencas del Maule y O'Higgins para periodos de retorno altos (100 y 500 años). Esta tendencia no es homogénea ni lineal según las latitudes ni longitudes, como se pudo notar con las cuencas nortinas y aquellas al sur de la latitud -45°N , donde existen aumentos en las lluvias en aquellos periodos de retorno mayores a 100 años. Esto puede deberse al rol de teleconexiones climatológicas debido al aumento de la temperatura de la superficie del océano, como la severidad de ENSO (Campos Díaz, 2020) o el aumento en la evapotranspiración en la cuenca del Amazonas (Poveda et al., 2020), pero también en el trayecto de ríos atmosféricos difíciles de pronosticar en estas escalas temporales.

La prueba de Mann-Kendall indica que en la gran mayoría de dichas cuencas (68 de 80 estadísticamente significativas) se obtiene una mejoría al utilizar un enfoque no estacionario. El contraste entre las diferencias de AIC de los modelos según enfoques varía entre macrozonas del país, con la zona centro-sur presentando una mejora del AIC de hasta 7.63 puntos considerando un enfoque no estacionario y la zona norte entre un 0.95 y 0.55. Si bien estas mejoras del AIC pueden ser inapreciables en cuencas del norte y centro-norte, existen casos puntuales donde las diferencias pueden sobrepasar los 13 puntos a favor de uno de los enfoques estudiados. Futuros estudios que repliquen este análisis podrían utilizar una función objetivo distinta y comparar los resultados, con tal de discernir sobre un enfoque u otro a nivel de cuenca.

Al examinar las magnitudes de los eventos extremos predichos para varios periodos de retorno, se obtiene (a) un sesgo negativo en los montos al considerar un enfoque no estacionario para las cuencas de la zona centro en todos los periodos de retorno estudiados; mientras, (b) para la zona sur dicho sesgo se obtiene solo para los periodos de retorno más bajos (10 y 100 años), alcanzándose condiciones 15% más secas para $Tr=10$; (c) la zona austral presenta incrementos en sus precipitaciones máximas al aumentar el periodo de retorno estudiado.

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 decidir entre un enfoque estacionario o no estacionario. Además, se recomienda considerar varias distribuciones de probabilidad candidatas, así como otras opciones de modelación de los estadísticos no estacionarios en caso de optar por dicho enfoque o añadir información adicional, como la tendencia de temperatura o caudal.

REFERENCIAS

- Aceituno, P., Boisier, J. P., Garreaud, R., Rondanelli, R., & Rutllant, J. A. (2021). *Climate and Weather in Chile* (pp. 7–29). https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_2
- Akaike, H. (1973). *Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle* (pp. 199–213). https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1694-0_15
- Alvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes 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>
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 19739.
- Campos Díaz, D. (2020). *Variabilidad interanual del transporte de humedad en el Pacífico Sur y su relación con la precipitación en Chile*. Universidad de Chile.
- Forgy, E. (1965). Cluster Analysis of Multivariate Data: Efficiency vs Interpretability of Classifications. *Biometrics*, 21, 768–780.
- Garreaud, R. D. (2007). Precipitation and circulation covariability in the extratropics. *Journal of Climate*, 20(18), 4789–4797. <https://doi.org/10.1175/JCLI4257.1>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Hartigan, J. A., & Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Applied Statistics*, 28(1), 100. <https://doi.org/10.2307/2346830>
- Kendall, M. G., & Gibbons, J. D. (1975). *Rank correlation methods*.
- Lagos-Zúñiga, M., Pinto, D., Torrez, L., & Rondanelli, R. (2021). ¿Son las precipitaciones extremas estacionarias en Chile?. In Universidad de Chile (Ed.), *XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*.
- Lagos-Zúñiga, Miguel, & Vargas, X. (2011). Variación de eventos extremos de precipitación diaria proyectados a mediados del siglo XXI, Resultados en regiones de Coquimbo y Maule. *XX CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRAULICA SOCHID*.
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 5.1, 281–297.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245–259.
- Pfahl, S., O’Gorman, P. A., & Fischer, E. M. (2017). Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, 7(6), 423–427. <https://doi.org/10.1038/nclimate3287>
- Poveda, G., Espinoza, J. C., Zuluaga, M. D., Solman, S. A., Garreaud, R., & van Oevelen, P. J. (2020). High Impact Weather Events in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8(May), 1–32. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00162>
- Salas, J. D., Obeysekera, J., & Vogel, R. M. (2018). Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 63(3), 325–352.

<https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1426858>

Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

Wi, S., Valdés, J. B., Steinschneider, S., & Kim, T. W. (2016). Non-stationary frequency analysis of extreme precipitation in South Korea using peaks-over-threshold and annual maxima. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(2), 583–606. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1180-8>

