



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**PRECIPITACIONES EXTREMAS EL NIÑO-
OSCILACIÓN DEL SUR (ENSO) 2023 Y
VERIFICACIÓN DE CAUDAL DE DISEÑO DE
OBRAS HIDRÁULICAS URBANAS EN EL MAULE,
CHILE.**

Memoria de Título presentada por

Brandon Jeremy Jara Pizarro

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía

Lina Mabel Castro Heredia

Octubre de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: "PRECIPITACIONES EXTREMAS EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENSO) 2023 Y VERIFICACIÓN DE CAUDAL DE DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS URBANAS EN EL MAULE, CHILE."

Nombre del candidato(a): Brandon Jeremy Jara Pizarro

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Lina Mabel Castro Heredia, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 11-11-2025 Firma: Lina Mabel Castro H

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 11-11-2025 Firma: BJD



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**PRECIPITACIONES EXTREMAS EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR
(ENSO) 2023 Y VERIFICACIÓN DE CAUDAL DE DISEÑO DE OBRAS
HIDRÁULICAS URBANAS EN EL MAULE, CHILE.**

AUTOR:

BRANDON JEREMY JARA PIZARRO

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía	Lina Castro Heredia....	
Miembro 1 Comisión	Álvaro Ossandón.....	
Miembro 2 Comisión		

Santiago, Chile, Octubre de 2025



Agradecimientos

A mi mamá, por ser el pilar más importante de mi vida. Por su amor incondicional, su fuerza y por estar siempre presente cuando más la necesitaba. Gracias por enseñarme a ser perseverante, por creer en mí incluso cuando yo dudaba y por acompañarme con tanto cariño en cada paso de este camino. Tu esfuerzo y amor están reflejados en cada uno de mis logros.

A mis abuelos, por preocuparse siempre de que llegara bien a clases, por alentarme a no rendirme nunca y por celebrar cada uno de mis logros con alegría y cariño. Su afecto y apoyo incondicional han sido una fuente constante de fuerza y motivación.

A mi hermano y a mi papá, por acompañarme siempre, por ir a buscarme incluso en las noches muy tarde cuando me quedaba estudiando, por su paciencia y por ser un apoyo firme y silencioso cuando lo necesitaba.

A mi pareja Melanie y a nuestra hija Mía, por ser mi mayor impulso en este camino. Melanie, gracias por acompañarme en los momentos más duros, por cuidarme cuando más lo necesité y por no soltarme incluso cuando yo ya no tenía fuerzas. Tu apoyo y amor marcaron la diferencia. Y a Mía, mi bebé preciosa, que llegó cuando menos la esperaba, pero justo cuando más la necesitaba, llenándome el corazón y dándome la fuerza y convicción para seguir adelante.

Finalmente, agradecer a todos quienes me acompañaron durante mi proceso universitario: a mis compañeros, profesores y, en especial, a mi profesora guía Lina Castro, por su orientación, exigencia y compromiso durante el desarrollo de esta memoria. Su guía fue clave para culminar este proceso académico con éxito.

PRECIPITACIONES EXTREMAS EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENSO) 2023 Y VERIFICACIÓN DE CAUDAL DE DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS URBANAS EN EL MAULE, CHILE.

Brandon Jara¹, Lina Castro², Álvaro Ossandon¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Los eventos de precipitaciones extremas han generado impactos significativos a nivel global, expresados en pérdidas humanas y materiales. Este trabajo analiza las precipitaciones extraordinarias registradas en la Región del Maule durante junio y agosto de 2023, con énfasis en sus efectos sobre las obras hidráulicas urbanas. Se plantea como hipótesis que estos eventos se relacionan estrechamente con el fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO). La investigación integra el análisis de anomalías de temperatura superficial del mar (TSM) a partir de los índices Niño 3.4 y ONI, junto con el estudio de series históricas de precipitación y caudal de estaciones meteorológicas y fluviométricas de la cuenca del río Mataquito. Se aplicaron pruebas estadísticas de estacionariedad, análisis de tendencias, correlaciones entre el ENSO y el Índice de Precipitación Regional (RPI), y se ajustaron modelos de frecuencia hidrológica (Gumbel, Log-Normal y Pearson III) para estimar períodos de retorno. Además, se contrastaron los caudales máximos de 2023 con los caudales de diseño de infraestructura urbana definidos en informes técnicos y normativas vigentes.

Los resultados muestran que los eventos de junio y agosto de 2023 superaron ampliamente los registros históricos, alcanzando caudales de hasta 5904,55 m³/s en Licantén, equivalentes a períodos de retorno superiores a 300 años según la distribución de Gumbel. En paralelo, las precipitaciones en estaciones del valle registraron acumulados con períodos de retorno mayores a 2000 años. La verificación de las obras hidráulicas urbanas evidenció que sistemas de drenaje, canales y puentes fueron sobrepasados, confirmando que los caudales de diseño resultan insuficientes frente a eventos de esta magnitud. Estos hallazgos confirman la influencia del ENSO en la intensificación de tormentas invernales y evidencian la vulnerabilidad de las obras hidráulicas urbanas frente a un escenario de mayor frecuencia de eventos extremos.

Palabras clave: Precipitaciones extremas, El Niño–Oscilación del Sur (ENSO), Obras hidráulicas urbanas.

1 Introducción

En las últimas décadas, el cambio climático ha generado profundas alteraciones en los patrones climáticos e hidrológicos de diversas regiones alrededor del mundo (IPCC, 2021). El impacto de eventos extremos sobre las obras hidráulicas urbanas se ha convertido en una preocupación creciente, especialmente en un escenario marcado por el aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos como El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) (Zscheischler et al., 2018). Estos eventos se caracterizan por un aumento en la ocurrencia de episodios de precipitaciones extremas, sequías prolongadas y temperaturas elevadas, los cuales representan amenazas significativas para infraestructuras hidráulicas diseñadas bajo condiciones climáticas históricas (González-Reyes, 2016; Montecinos & Aceituno, 2003; Zhou, 2014).

Las obras hidráulicas cumplen un rol fundamental en la gestión de recursos hídricos y en la protección de comunidades ante eventos climáticos extremos (Jongman et al., 2012; MOP, 2018). En este contexto, el impacto de las precipitaciones extremas, especialmente aquellas generadas por el Fenómeno ENSO en las estructuras hidráulicas adquiere una relevancia crucial (Dai & Wigley, 2000). Este fenómeno ha sido ampliamente reconocido como un factor desencadenante de alteraciones climáticas significativas a nivel global (Trenberth, 1997). Según estudios previos, ENSO es el fenómeno climático que más

influye en la variabilidad de las precipitaciones extremas a escala mundial (Dai & Wigley, 2000). Durante sus fases cálidas, conocidas como El Niño, se han registrado variaciones extremas en los patrones de precipitación y temperatura, exacerbando eventos de lluvias intensas y prolongadas. Esta variabilidad climática representa una de las principales amenazas para las infraestructuras hidráulicas, sometiendo a estructuras diseñadas para manejar flujos regulares a niveles inusuales de estrés (Jongman et al., 2012).

El invierno de 2023 estuvo marcado por eventos meteorológicos extremos en la Región del Maule, particularmente entre los meses de junio y agosto, los cuales provocaron precipitaciones intensas, crecidas significativas y diversos impactos urbanos. Estas condiciones excepcionales coinciden con el desarrollo de una fase cálida del fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO), lo que plantea interrogantes sobre la influencia de este forzante climático en la intensificación de las lluvias invernales.

La región del Maule enfrentó dos eventos meteorológicos de gran magnitud, concentrados en junio y agosto. En estaciones como Curicó y General Freire se registraron acumulaciones superiores a 300 mm, mientras que en Los Queñes y Potrero Grande se superaron los 450 mm, duplicando los promedios mensuales históricos. En la estación de Licantén, el caudal del río Mataquito alcanzó un máximo de 5904,55 m³/s el 22 de agosto, el valor más alto desde 1994. Estos eventos provocaron inundaciones urbanas, cortes de servicios básicos y daños a infraestructura pública en comunas como Licantén, Rauco, Molina y Curepto, con decenas de viviendas afectadas y pérdidas agrícolas significativas (CIGIDEN, 2023).

Esta memoria tiene como propósito analizar las precipitaciones extremas ocurridas entre junio y agosto de 2023 en la Región del Maule, evaluar su relación con el fenómeno ENSO a través del índice Niño 3.4, y verificar si los caudales observados superaron los parámetros considerados en el diseño de las obras hidráulicas urbanas. Para ello, se aplica un análisis de frecuencia hidrometeorológica, se evalúan las correlaciones entre la precipitación invernal y el índice Niño 3.4, y se estiman los períodos de retorno en estaciones clave de la cuenca del río Mataquito. Esta memoria se realizó en el marco de dos proyectos de investigación: el Proyecto FONDECYT de Iniciación en Investigación N°11220482 y el Proyecto USM Interno Multidisciplinario PI_M_24_03.

2 Objetivos

El objetivo principal de esta investigación es analizar las precipitaciones extremas provocadas por el fenómeno el Niño-Oscilación del Sur en la región del Maule, Chile, durante el período junio a agosto de 2023, y verificar los caudales de diseño de las obras hidráulicas urbanas de la zona. Para alcanzar este propósito, es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- 1) Evaluar las condiciones climáticas extremas en la región del Maule empleando un análisis de frecuencia a los datos de precipitaciones máximas de diferentes duraciones, caudales máximos y temperaturas extremas, durante el período junio-agosto del 2023.
- 2) Identificar la relación causal entre el índice Niño 3.4 y los eventos climáticos extremos registrados en la región del Maule, centrándose específicamente en el período de invierno del 2023.
- 3) Verificar los caudales de diseño de las obras hidráulicas urbanas en uno de los centros urbanos de la región del Maule, Chile.

3 Área de estudio

La zona de estudio se ubica en el Centro-Sur de Chile, específicamente en la Región del Maule. La región está definida por las coordenadas geográficas 34°59'S - 36°32'S y 71°40'O - 72°50'O (Figura 1a), limitando al norte con la Región de O'Higgins, al sur con la Región del Biobío, al este con la República Argentina y al oeste con el Océano Pacífico, cubriendo un área aproximada de 30.296 km². Este territorio

presenta una orografía compleja, marcada por la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia y la Cordillera de los Andes, con elevaciones que alcanzan hasta 3.500 metros sobre el nivel del mar (Figura 1b).

Las características topográficas influyen en la variabilidad climática de la zona, donde se destaca la cordillera de Los Andes, la cual condiciona los patrones meteorológicos regionales y funciona como una barrera climática en relación con el continente sudamericano, produciendo además grandes cambios climáticos y meteorológicos (Garreaud, 2009). Por su parte, en los valles se ubican los principales centros urbanos de la región e inmediatamente al Oeste de estos, se encuentra la cordillera de la costa con alturas que varían entre los 1000 y 2000 m (Falvey & Garreaud, 2007), que influye en la distribución de precipitaciones generando sombras pluviométricas y modifica la circulación del aire marino hacia los valles interiores. Esta configuración topográfica contribuye a la distribución de los patrones climáticos que varían desde condiciones semiáridas en la costa, mediterráneas en el valle central, hasta clima de montaña en las zonas cordilleranas (Sarricolea et al., 2017).

El régimen de precipitaciones en la Región del Maule es predominantemente invernal, presentando un gradiente de precipitaciones que incrementa desde las zonas costeras hacia la cordillera, así como de norte a sur. Las áreas cercanas al litoral registran menos de 200 mm anuales, mientras que las zonas cordilleranas pueden recibir hasta 3.000 mm de precipitación al año (Quintana & Aceituno, 2012). Este patrón de distribución está fuertemente influenciado por la interacción de fenómenos climáticos como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), los cuales modulan la variabilidad interanual de las precipitaciones (Boisier et al., 2016). Estos fenómenos climáticos son determinantes en la ocurrencia de eventos extremos, como sequías prolongadas o precipitaciones intensas, afectando directamente el caudal de los principales ríos de la región tales como el Maule, Mataquito y Tinguiririca, planteando desafíos para la planificación y gestión de infraestructura hidráulica.

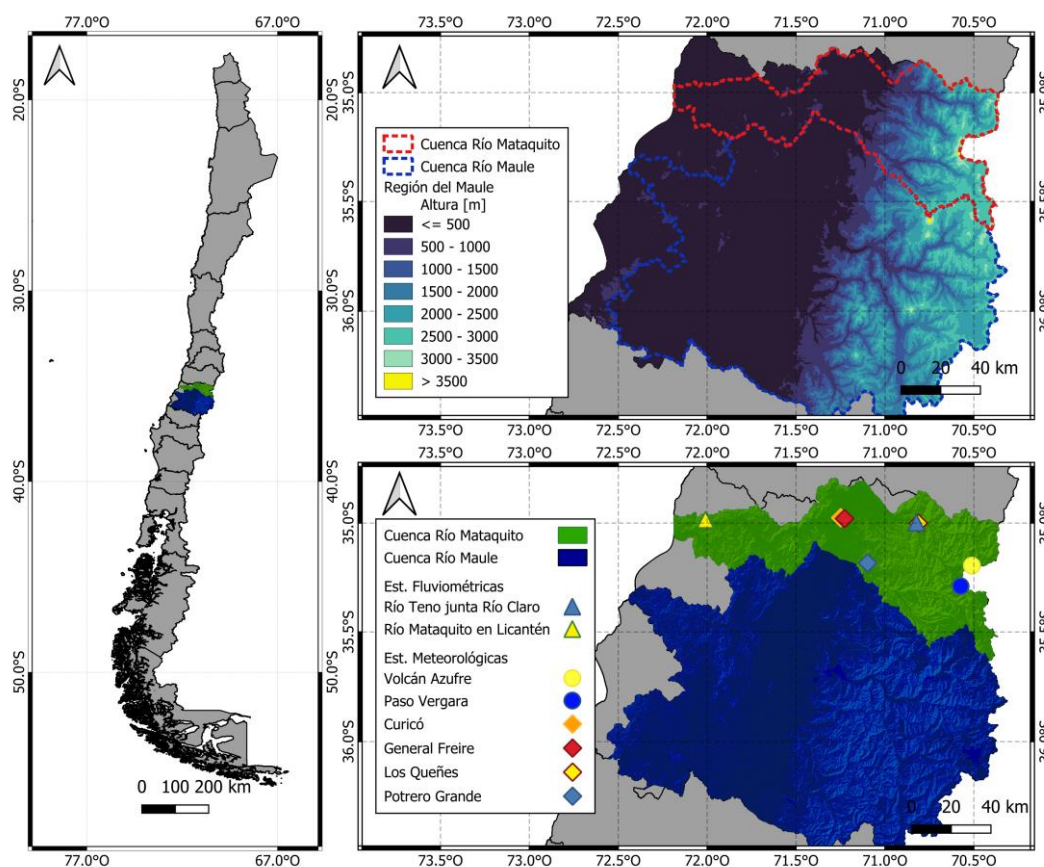


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio en la parte centro-sur de Chile y cuencas principales de la Región del Maule. (a) Mapa de Chile en el que se resalta la ubicación de las cuencas

del Río Maule y Mataquito. (b) Mapa de elevación de las cuencas del río Maule y Mataquito. (c) Mapa de la cuenca del río Maule y de la cuenca del río Mataquito destacando la ubicación de las estaciones meteorológicas consideradas para este estudio.

Aunque la Región del Maule presenta múltiples cuencas hidrográficas, no todas se vieron igualmente afectadas por los eventos del invierno de 2023. En particular, la cuenca del río Mataquito concentró los mayores impactos hidrometeorológicos, registrando precipitaciones extremas y crecidas significativas que derivaron en eventos de inundación urbana y daños en infraestructura, especialmente en zonas como Licantén y Curicó. Esta cuenca tiene una superficie aproximada de 6.300 km² y presenta elevaciones que alcanzan los 3.700 m.s.n.m. Si bien se generan crecidas tanto en la época de lluvias como durante el deshielo cordillerano, los eventos de mayor intensidad son predominantemente de origen pluvial (Prisma Ingeniería, 2003). Por ello, esta memoria se enfoca en estaciones ubicadas en la cuenca del río Mataquito, ya que refleja de manera representativa la interacción entre eventos ENSO extremos y la vulnerabilidad de las obras hidráulicas urbanas en la región.

4 Base de datos

Para efectos de la presente memoria, la recopilación y procesamiento de datos climáticos se centró en la Región del Maule, Chile. El análisis se basó en información proveniente de ocho estaciones distribuidas a lo largo del territorio regional, abarcando diversas condiciones topográficas y climáticas (Figura 1c). Estas estaciones entregan registros diarios y horarios de variables meteorológicas e hidrológicas correspondientes a las distintas localidades de la región. Cabe destacar que siete de las estaciones pertenecen a la Dirección General de Aguas (DGA), mientras que una pertenece a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), conforme se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas y fluviométricas consideradas para la investigación. En la Tabla 1, se muestran las estaciones con su ubicación geográfica, elevación, período de los registros, resolución de los registros y su fuente.

Nº	Estaciones	Lat.	Lon.	Alt. (m)	Serie	Dato	Tipo
1	Curicó	34°58'	71°14'	195	1984 - 2023	Hora	Meteo.
2	Los Queñes	34°59'	70°48'	663	1984 - 2019	Hora	Meteo.
3	Potrero Grande	35°10'	71°05'	445	1984 - 2023	Hora	Meteo.
4	Río Mataquito en Licantén	34°59'	72°00'	20	1994 - 2023	Hora	Fluvio.
5	Río Teno después de junta con Claro	35°00'	70°49'	647	1994 - 2023	Hora	Fluvio.
6	General Freire Curicó	34°58'	71°13'	225	1984 - 2023	Hora	Meteo.
7	Volcán Azufre	35°18'	70°35'	3321	2022 - 2023	Hora	Meteo.
8	Paso Vergara	35°11'	70°30'	2609	2022 - 2023	Hora	Meteo.

Las estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis climático se localizan dentro de la cuenca del río Mataquito, con altitudes que varían entre los 20 y los 3321 m.s.n.m. Estas estaciones entregan registros diarios y horarios de precipitación y temperatura, los cuales son fundamentales para caracterizar las condiciones climáticas durante el período invernal de 2023 (junio-agosto). El análisis principal se centró en las estaciones Curicó, General Freire Curicó, Los Queñes y Potrero Grande, seleccionadas por contar con series temporales extensas y homogéneas, sin interrupciones significativas, para el período 1984–2023. Los datos fueron obtenidos desde el Explorador Climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2, 2025).

El régimen pluviométrico de la Región del Maule presenta una marcada estacionalidad, característica de los climas mediterráneos. La estación General Freire, ubicada en la ciudad de Curicó y representativa de la cuenca del río Mataquito, muestra un patrón en el que las precipitaciones se concentran principalmente durante los meses invernales de 2023 (junio a agosto), alcanzando promedios mensuales cercanos a 150 mm (Figura 2). Este comportamiento contrasta con el período seco comprendido entre diciembre y marzo, en el cual las precipitaciones son escasas o prácticamente nulas, reflejando la fuerte amplitud estacional del régimen de lluvias en la zona central de Chile.

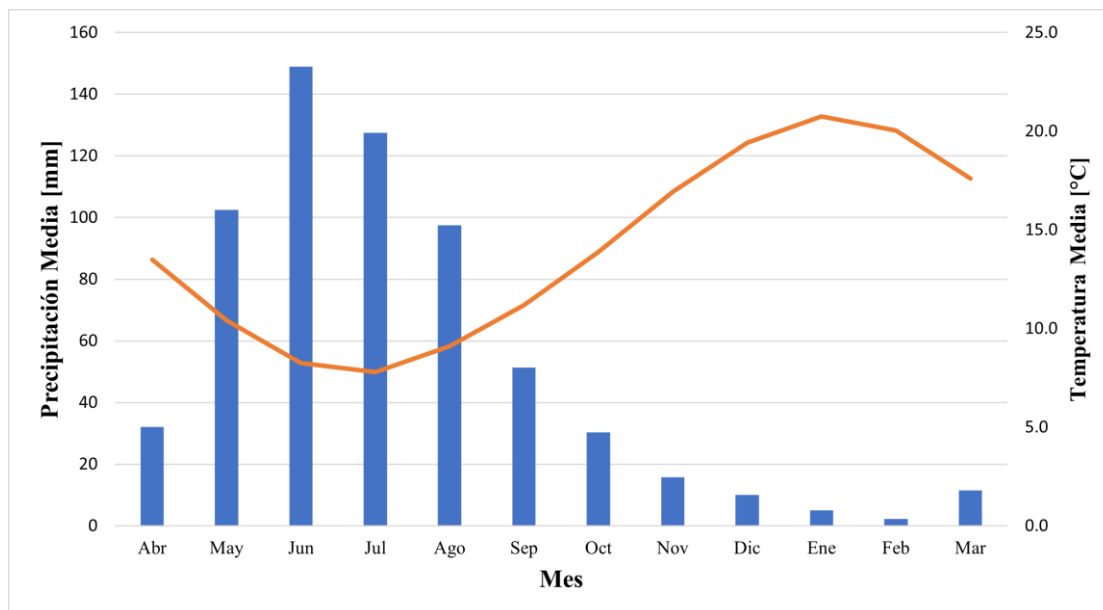


Figura 2. Climograma medio anual para el período 1950-2023. Los registros diarios de precipitación y temperatura se obtuvieron de la estación General Freire Curicó.

En cuanto al análisis hidrológico, se emplearon los registros de caudal instantáneo horario correspondientes a las estaciones Río Mataquito en Licantén y Río Teno después de junta con Claro. Estos datos, fueron obtenidos a través del portal de transparencia de la DGA para el período 1994–2023, los cuales permiten identificar los caudales máximos anuales en cada punto de control fluviométrico. De manera complementaria, se consideró el comportamiento estacional del caudal promedio mensual en la estación Río Mataquito en Licantén para el período 1994–2023, con el fin de caracterizar las fluctuaciones hidrológicas típicas del Río Mataquito. Tal como se observa en la Figura 3, el caudal exhibe una estacionalidad marcada, con máximos en invierno y mínimos en verano, en concordancia con el régimen pluvio-nival de la cuenca.

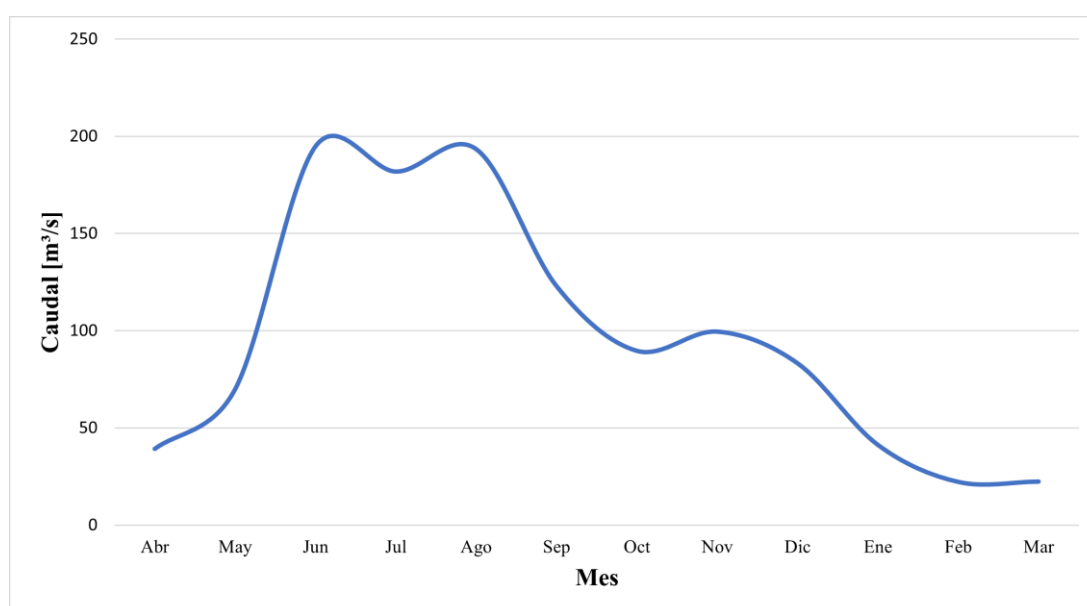


Figura 3. Caudal promedio anual de la estación río Mataquito en Licantén para el período 1994-2023.

Durante los eventos extremos de junio y agosto de 2023, las estaciones ubicadas en los ríos Teno y Mataquito presentaron fallas técnicas, lo que impidió registrar con precisión la totalidad de las crecidas.

Por lo tanto, los caudales máximos correspondientes a estos episodios deben interpretarse como una aproximación de los valores de caudales máximos reales. En contraste, las estaciones pluviométricas de Curicó, General Freire, Potrero Grande y Los Queñes operaron de manera continua durante todo el invierno, proporcionando información confiable para el análisis de intensidad y duración de las precipitaciones.

Cabe señalar que las estaciones Volcán Azufre y Paso Vergara, localizadas en el sector cordillerano de la cuenca del Maule, fueron incorporadas en esta memoria para la estimación del gradiente térmico y la altura de la isoterma 0 °C durante los eventos invernales de 2023. Estas estaciones, obtenidas directamente desde el sistema de monitoreo de la Dirección General de Aguas (DGA, 2025), cuentan con registros horarios de temperatura para el período 2022-2023. Sin embargo, debido a su corto período de operación, no fueron consideradas en los análisis de tendencias ni en los estudios de frecuencia, ya que no disponen de una serie histórica suficientemente extensa para este tipo de evaluación estadística.

Finalmente, con el objetivo de evaluar la influencia de patrones climáticos de gran escala sobre la variabilidad hidrometeorológica en la Región del Maule, se incorporan las series de anomalías de temperatura superficial del mar (TSM) correspondientes al Índice del Niño Oceánico (ONI) y al Índice Niño 3.4. Estas series fueron obtenidas desde la base de datos de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2024) y abarcan el período 1984–2023. Ambos índices permiten identificar y clasificar los episodios de El Niño y La Niña según la intensidad y persistencia de las anomalías térmicas en el Pacífico ecuatorial central.

En la presente memoria se utilizará principalmente la serie mensual del índice Niño 3.4, la cual será analizada en conjunto con los registros meteorológicos regionales, a fin de explorar su posible correlación con eventos extremos de precipitación durante el invierno. El uso de estos indicadores globales proporciona un marco comparativo para vincular los patrones climáticos regionales con fenómenos de escala oceánica-atmosférica.

5 Marco teórico

5.1 Análisis exploratorio de datos

5.1.1 Relleno de datos faltantes

Para el procesamiento de las series temporales de precipitación se utilizó el paquete “*Climatol*” del software R, desarrollado por Guijarro (2024). Este paquete facilita el relleno de vacíos en series climatológicas mediante interpolación espacial, no basada en los valores absolutos, sino en proporciones relativas al promedio de cada estación. Su enfoque se basa en la metodología original propuesta por Paulhus y Kohler (1952) para el tratamiento de datos de precipitación diaria, y ha sido validado como un método eficaz frente a técnicas de imputación más complejas. El proceso incluye una etapa de control de homogeneidad, que se realiza mediante la prueba SNHT (Standard Normal Homogeneity Test), propuesta por Alexandersson (1986). Dicha evaluación permite detectar cambios no naturales en la media de la serie, producto de modificaciones en el instrumental, el entorno o la ubicación de la estación. Posteriormente, *Climatol* realiza el relleno iterativo de los datos faltantes mediante interpolación espacial con apoyo de estaciones vecinas. Es importante señalar que este procedimiento se aplicó exclusivamente a las series de precipitación, mientras que para las series de temperatura se utilizó un enfoque alternativo basado en gradientes altitudinales y relaciones térmicas entre estaciones.

5.1.2 Verificación de estacionariedad en series temporales

La estacionariedad en series hidrometeorológicas implica que sus parámetros estadísticos fundamentales como la media, la varianza y la autocorrelación se mantengan constantes en el tiempo (Milly et al., 2008). La autocorrelación mide la dependencia entre observaciones sucesivas en una serie hidrometeorológica y es clave en la detección de patrones repetitivos y la verificación de estacionariedad (Kundzewicz & Robson, 2004). Asimismo, la variabilidad temporal y espacial de estas variables, documentada por Rodríguez-Iturbe y Mejía (1974), afecta directamente la caracterización de eventos extremos y el diseño de estrategias de monitoreo.

Para verificar la estacionariedad se evalúa la normalidad de la distribución de los datos mediante la prueba de Shapiro y Wilk (1965). Esta prueba, constituye uno de los métodos más robustos para verificar la normalidad de un conjunto de datos, especialmente en muestras pequeñas ($n < 50$). Esta evaluación calcula el estadístico W que compara la distribución de los datos con una distribución normal teórica, siendo particularmente útil en el análisis preliminar de series hidrometeorológicas.

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{(i)} - \bar{x})^2} \quad (1)$$

aquí $x_{(i)}$ representa los valores ordenados de la muestra, a_i son coeficientes preestablecidos dependientes del tamaño muestral y de los parámetros de la distribución normal, y $\bar{x}$ es el promedio o media aritmética de la muestra.

Si la serie presenta distribución normal, se emplean pruebas paramétricas como la t de Student para comparar medias entre dos subperíodos. Esta evalúa si la media de las observaciones ha cambiado significativamente en el tiempo, lo que permitiría identificar un cambio estructural en el comportamiento climático:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (2)$$

donde $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ son las medias de los dos subperíodos, s_1, s_2 sus varianzas y n_1, n_2 sus tamaños muestrales.

Asimismo, se aplica la prueba F de Fisher para contrastar la igualdad de varianzas entre períodos, utilizando el cociente de varianzas:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (3)$$

Un valor de F significativamente diferente de 1 sugiere un cambio en la variabilidad, lo cual puede indicar una transición hacia un clima más extremo o variable, incluso sin cambios en la media (Katz & Brown, 1992). Si los datos no son normales, se recurre a pruebas no paramétricas como la prueba U de Mann-Whitney, que permite comparar la distribución central de dos muestras independientes, y la Prueba de Levene, que evalúa la homogeneidad de varianzas sin requerir supuestos estrictos de normalidad.

La prueba U de Mann-Whitney constituye una alternativa no paramétrica estable cuando los datos no cumplen con los supuestos de normalidad. El estadístico U se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$U = \min \begin{cases} U_1 = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_1 \cdot (n_1 + 1)}{2} - R_1 \\ U_2 = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_2 \cdot (n_2 + 1)}{2} - R_2 \end{cases} \quad (4)$$

donde n_1 y n_2 representan los tamaños de muestra de los grupos 1 y 2 respectivamente, R_1 y R_2 son las sumas de rangos para cada grupo tras ordenar todos los valores de ambas muestras y, el estadístico de la prueba U corresponde al menor valor entre U_1 y U_2 . (Mann & Whitney, 1947)

Para evaluar la homogeneidad de varianzas entre grupos, se emplea la prueba de Levene (1960). Esta prueba es particularmente sólida ante desviaciones de la normalidad y se basa en el análisis de las desviaciones absolutas respecto a la medida de tendencia central de cada grupo.

El estadístico de Levene se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$W = \frac{(N - k) \sum_{i=1}^k n_i (Z_{i.} - Z_{..})^2}{(k - 1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Z_{ij} - Z_{i.})^2} \quad (5)$$

donde $Z_{ij} = |Y_{ij} - \tilde{Y}_i|$ representa la desviación absoluta de cada observación Y_{ij} respecto a la mediana del grupo $\tilde{Y}_i$, N es el tamaño total de la muestra, k es el número de grupos, n_i es el tamaño del grupo i , $Z_{i.}$ es la media de las desviaciones absolutas del grupo i , y $Z_{..}$ es la media global de todas las desviaciones absolutas. (Levene, 1960)

Estos estadísticos permiten evaluar si las condiciones climáticas observadas han experimentado cambios significativos en su media o en su variabilidad, lo cual es relevante para identificar posibles rupturas en la estacionariedad. Tales rupturas pueden reflejar transiciones hacia nuevos regímenes climáticos o alteraciones en los patrones de ocurrencia de eventos extremos, siendo estas pruebas especialmente valiosas para detectar cambios abruptos en series temporales climáticas (IPCC, 2023; Katz & Brown, 1992).

5.1.3 Análisis de tendencias y magnitud

Para detectar tendencias en series temporales hidrometeorológicas se utiliza la prueba no paramétrica de Mann–Kendall (Kendall, 1948; Mann, 1945), ampliamente reconocida por su robustez frente a distribuciones no normales y su insensibilidad a valores atípicos (Hamed & Ramachandra Rao, 1998; Puertas et al., 2011; Wang et al., 2020). Este método evalúa la presencia de una tendencia monotónica a lo largo del tiempo mediante la comparación sistemática de todos los pares posibles de datos.

El estadístico de tendencia S se define como:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_i - x_k) \quad (6)$$

donde la función signo es:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

La varianza de S , necesaria para evaluar la significancia estadística de la tendencia, se calcula mediante:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (8)$$

siendo t_p es el número de repeticiones del valor en el grupo p –ésimo y g es el número total de grupos con valores repetidos. A partir de estos valores se obtiene el estadístico normalizado Z_{MK} :

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Si $|Z_{MK}| \geq Z_{1-\alpha/2}$, se rechaza la hipótesis nula de ausencia de tendencia monotónica, lo que indica la existencia de una tendencia estadísticamente significativa al nivel de confianza $1-\alpha$, comúnmente establecido en 95%.

Para cuantificar la magnitud de dicha tendencia se utiliza el estimador de pendiente de Theil–Sen (Sen, 1968; Theil, 1992), un método no paramétrico que calcula todas las pendientes posibles entre pares de puntos en la serie:

$$\hat{\beta}_1 = \text{mediana}\{b_{ij}\}, \quad b_{ij} = \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}, x_i \neq x_j, 1 \leq i < j < n \quad (10)$$

Este estimador es particularmente estable frente a valores atípicos y proporciona una interpretación directa de la tasa de cambio temporal. Para determinar la significancia estadística de la pendiente estimada, se construye un intervalo de confianza utilizando el estadístico C_α , definido como:

$$C_\alpha = Z_{1-\alpha/2} \cdot \sqrt{\text{VAR}(S)} \quad (11)$$

Los límites del intervalo de confianza para la mediana de pendientes se calculan como:

$$UL = 1 + \frac{N + C_\alpha}{2} \quad (12)$$

$$LL = \frac{N - C_\alpha}{2} \quad (13)$$

donde N es el número total de pendientes calculadas entre observaciones. Este análisis permite no solo identificar tendencias significativas, sino también estimar su magnitud, aportando un insumo fundamental para comprender los cambios climáticos en el contexto de eventos extremos.

5.2 Gradiente térmico y altura de la isoterma 0 °C

La temperatura del aire disminuye progresivamente con la altitud, fenómeno conocido como gradiente térmico. En condiciones atmosféricas estándar, este gradiente alcanza un valor aproximado de 6,5 °C por cada 1000 metros de altitud, aunque su valor puede variar según la humedad, estabilidad atmosférica y características locales del terreno (Garreaud, 2009).

En estudios hidrológicos de zonas cordilleranas, este gradiente resulta fundamental para estimar la altura de la isoterma 0 °C, definida como el nivel altitudinal donde la temperatura del aire alcanza los 0 °C. Esta cota representa un umbral crítico en la hidrología de montaña, ya que delimita las zonas de precipitación sólida (nieve) de aquellas donde ocurre en forma líquida (lluvia), afectando directamente los procesos de acumulación nival y generación de escorrentía (Masiokas et al., 2006; Viale & Garreaud, 2015).

Para estimar la altura de la isoterma 0 °C durante un evento específico, se puede utilizar el gradiente térmico entre dos estaciones meteorológicas con distinta altitud, según la expresión:

$$\Gamma = \frac{T_1 - T_2}{Z_1 - Z_2} \quad (14)$$

en esta expresión, T_1 y T_2 son las temperaturas medidas en las estaciones de altitudes Z_1 y Z_2 , respectivamente. A partir de este gradiente, la isoterma 0 °C puede estimarse desde una estación conocida mediante:

$$Z_{0^\circ\text{C}} = Z_{\text{estación}} + \frac{T}{\Gamma} \quad (15)$$

siendo $Z_{0^\circ\text{C}}$ la altura estimada de la isoterma 0 °C, $Z_{\text{estación}}$ corresponde a la altitud de la estación donde se mide la temperatura T y Γ es el gradiente térmico (°C/m).

Este método ha sido ampliamente utilizado en numerosos estudios de análisis de eventos extremos en cuencas andinas, ya que permite evaluar si durante ciertos episodios climáticos las temperaturas en altura

favorecen el derretimiento nival o la ocurrencia de lluvias intensas a gran altitud, contribuyendo al aumento súbito de caudales y aumento de las áreas aportantes de la cuenca (Favier et al., 2009; Rabatel et al., 2013).

5.3 Índice de Precipitación Regional

El Índice de Precipitación Regional (RPI, por sus siglas en inglés), desarrollado por Garreaud et al., (2017) y extendido Garreaud et al., (2019), es una métrica diseñada para caracterizar la variabilidad interanual de las precipitaciones invernales en Chile central. Su aplicación considera un conjunto de estaciones meteorológicas representativas ubicadas entre los 32°S y 37°S, lo que permite capturar la heterogeneidad espacial de los patrones pluviométricos en esta zona.

La construcción del índice se basa en la estandarización de la precipitación anual registrada en cada estación, lo que permite homogeneizar los datos y hacer comparables las series entre estaciones con distintos promedios históricos. Esta estandarización se realiza mediante el cociente entre la precipitación anual observada y el promedio climatológico del período base, expresado como:

$$P_{est,i,t} = \frac{P_{i,t}}{\bar{P}_{i,X-Y}} \quad (16)$$

donde $P_{i,t}$ representa la precipitación anual observada en la estación i durante el año t y, $\bar{P}_{i,X-Y}$ corresponde al promedio anual de precipitación de la estación i en el período base $X - Y$.

Una vez estandarizados los valores para cada estación, el RPI correspondiente al año t se calcula como la mediana de dichos valores:

$$RPI_t = \text{mediana}(P_{est,1,t}, P_{est,2,t}, \dots, P_{est,n,t}) \quad (17)$$

El RPI proporciona una medida cuantitativa de las desviaciones de la precipitación respecto a las condiciones climáticas normales, permitiendo distinguir anomalías significativas en la señal pluviométrica regional. Cuando el índice adopta valores negativos, se interpreta como una condición más seca de lo habitual, mientras que valores positivos indican años con precipitaciones superiores al promedio histórico. De este modo, el RPI facilita la identificación de eventos tanto de sequía como de exceso hídrico, y constituye una herramienta valiosa para el análisis de tendencias climáticas y la evaluación del impacto de forzantes de gran escala, como el fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO).

5.4 Índices Climáticos

Los índices climáticos son indicadores fundamentales que permiten describir y monitorear el comportamiento de un sistema climático a partir de variables como la temperatura superficial del mar (TSM), la presión atmosférica o la precipitación. Estos índices son utilizados para evaluar patrones regionales y globales de variabilidad, detectar anomalías y comprender la influencia de forzantes climáticos sobre distintos fenómenos meteorológicos.

5.4.1 Fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO)

El fenómeno El Niño–Oscilación Sur (ENSO) representa uno de los patrones más significativos de variabilidad climática interanual a escala global, caracterizado por una compleja interacción entre el océano y la atmósfera en el Pacífico tropical (Trenberth, 1997; Wang et al., 2017). Históricamente, el término "El Niño" fue acuñado por pescadores peruanos para describir una corriente oceánica cálida que típicamente aparecía cerca de las costas de Perú y Ecuador durante la época navideña, fenómeno que posteriormente se asoció con episodios de calentamiento extremo que ocurren con una periodicidad irregular de entre dos a siete años (Cai et al., 2020; Trenberth, 1997).

La dinámica del ENSO se manifiesta en dos fases contrastantes: la fase cálida, conocida como El Niño, y la fase fría, denominada La Niña (McPhaden et al., 2006). Durante la fase de El Niño, se observa un calentamiento anómalo de las aguas superficiales en el Pacífico central y oriental, que puede alcanzar desviaciones de temperatura de hasta 2-3°C por encima de los valores normales (Santoso et al., 2017).

Este calentamiento desencadena una cascada de efectos atmosféricos, incluyendo la redistribución de las zonas de convección profunda, alteraciones en los patrones de precipitación y modificaciones significativas en la circulación atmosférica global (Collins et al., 2010; Trenberth, 1997).

En el caso de Chile central, el ENSO tiene impactos directos sobre la precipitación y la temperatura, particularmente durante los meses de invierno. Durante eventos El Niño, se observa un aumento en la ocurrencia de precipitaciones intensas y eventos extremos, debido a una intensificación del transporte de humedad hacia el continente y una mayor inestabilidad atmosférica (Garreaud, 2009; Montecinos & Aceituno, 2003). Por el contrario, los eventos La Niña suelen asociarse a condiciones más secas de lo normal y a la disminución de las lluvias invernales, lo que aumenta el riesgo de sequías meteorológicas e hidrológicas (Boisier et al., 2016).

5.4.2 Índice Niño 3.4 y su relación con Chile central

El índice Niño 3.4 es una medida de las anomalías de temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico ecuatorial central, específicamente entre los 5°N–5°S de latitud y los 170°O–120°O de longitud. Esta región forma parte de un sistema de subdivisión del Pacífico tropical que incluye otras zonas de monitoreo como Niño 1+2, Niño 3 y Niño 4 (Figura 4). Estas divisiones permiten caracterizar espacialmente los eventos ENSO según su localización y evolución, siendo la región Niño 3.4 la más representativa para evaluar tanto la fase como la intensidad de estos eventos (NCAR, 2024; Trenberth, 1997).

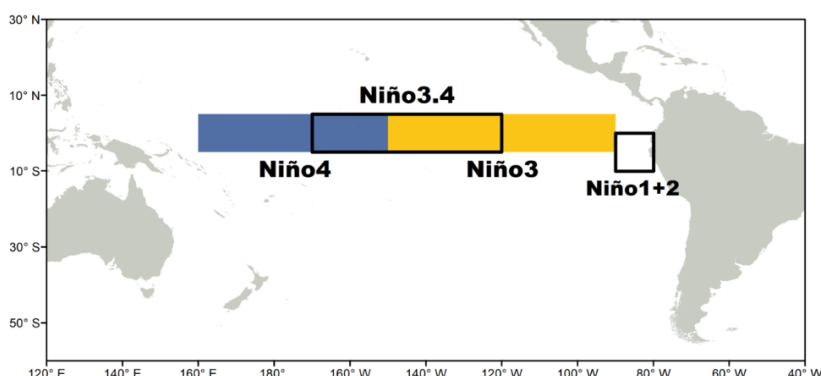


Figura 4. Regiones Niño en el océano Pacífico tropical utilizadas para el monitoreo del fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENSO).

El índice Niño 3.4 se calcula como una media móvil de cinco meses de las anomalías de TSM, y se utiliza para identificar eventos ENSO cuando estas superan los umbrales de $+0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (El Niño) o $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (La Niña) durante un período de seis meses o más. Este criterio ha sido ampliamente adoptado en la literatura científica para caracterizar estadísticamente la recurrencia y fuerza de los eventos ENSO (Cai et al., 2014; Rayner et al., 2003).

Complementariamente, el Índice Oceánico El Niño (ONI) es el indicador oficial utilizado por la NOAA y por diversos servicios meteorológicos a nivel mundial. El ONI también se calcula sobre la región Niño 3.4, pero emplea una media móvil de tres meses. Sus umbrales de clasificación son similares; anomalías de TSM superiores a $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para El Niño y menores a $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para La Niña, durante al menos cinco meses consecutivos. Gracias a su estandarización, el ONI es ampliamente utilizado en estudios comparativos históricos y para la emisión de alertas estacionales (NOAA, 2024).

En el caso de Chile central, incluyendo la Región del Maule, ambos índices (Niño 3.4 y ONI) son ampliamente utilizados para anticipar el comportamiento invernal de las precipitaciones. Durante eventos El Niño moderados o fuertes, con valores superiores a $+1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el índice Niño 3.4 y ONI, se ha observado un aumento significativo en la intensidad y frecuencia de eventos lluviosos extremos, atribuibles a una intensificación de la circulación del oeste y a una mayor inestabilidad atmosférica regional (Garreaud, 2009; Montecinos & Aceituno, 2003). Estos indicadores permiten desarrollar análisis estacionales y de riesgo hídrico clave para la planificación de infraestructura hidráulica.

5.5 Evaluación de correlaciones entre variables hidrometeorológicas

El análisis de correlaciones constituye un método estadístico para identificar dependencias entre variables hidrometeorológicas, como la relación entre el índice Niño 3.4 y la precipitación invernal. Establecer este tipo de vínculos es fundamental para comprender las teleconexiones climáticas y evaluar la respuesta hidrológica de una cuenca ante forzantes externos. En este contexto, se aplican tanto métodos paramétricos como no paramétricos, de acuerdo con las características estadísticas de los datos. La normalidad de las series es evaluada previamente mediante pruebas como Shapiro-Wilk (1965), con el fin de determinar si se pueden aplicar pruebas paramétricas como el coeficiente de Pearson o si deben emplearse alternativas no paramétricas como Spearman. El coeficiente de correlación de Pearson (r) representa la medida paramétrica más comúnmente utilizada para cuantificar la asociación lineal entre dos variables continuas. Desarrollado por Pearson (1896), este coeficiente asume normalidad bivariada y se calcula como:

$$r = \frac{\sum (x_{(i)} - \bar{x}) \cdot (y_{(i)} - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_{(i)} - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_{(i)} - \bar{y})^2}} \quad (18)$$

donde $x_{(i)}$, $y_{(i)}$ representan las observaciones emparejadas de las dos variables, y $\bar{x}$, $\bar{y}$ son sus respectivas medias. El coeficiente toma valores entre -1 y +1, indicando la dirección y fuerza de la relación lineal: valores cercanos a ± 1 indican una correlación fuerte (positiva o negativa), mientras que valores próximos a 0 sugieren independencia o falta de relación lineal.

Cuando los datos no cumplen con los supuestos de normalidad o presentan valores atípicos, el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) constituye una alternativa no paramétrica adecuada. Este método, basado en rangos, permite evaluar la asociación entre variables sin requerir que sigan una distribución normal (Helsel & Hirsch, 2002). Su expresión general queda definida por:

$$\rho = \frac{6 \cdot \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (19)$$

siendo d_i la diferencia entre los rangos de cada par de observaciones y n es el número total de observaciones. En ambos casos, la significancia estadística de los coeficientes se evalúa mediante el valor p asociado, el cual permite determinar si las asociaciones observadas son estadísticamente relevantes y no producto del azar.

La elección entre estos métodos depende de las propiedades de los datos y de los objetivos del análisis. El coeficiente de Pearson es apropiado para detectar relaciones lineales cuando las variables siguen distribuciones normales, mientras que el coeficiente de Spearman ofrece mayor robustez frente a datos no normales, no lineales o con presencia de valores extremos. En el marco de esta memoria, estos análisis permiten evaluar la relación causal entre el índice Niño 3.4 y el Índice de Precipitación Regional (RPI), con el objetivo de comprender cómo los forzantes climáticos se traducen en respuestas hidrológicas en la Región del Maule.

5.6 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) constituyen un instrumento esencial en ingeniería hidráulica e hidrología, ya que permiten estimar la intensidad máxima de precipitación en función de su duración y del período de retorno. Estas curvas son esenciales para el diseño de obras de drenaje, alcantarillado, presas, puentes y otras infraestructuras expuestas a eventos anormales de lluvia (Koutsoyiannis et al., 1998). Además, se utilizan para evaluar la severidad de eventos poco frecuentes y de gran intensidad, permitiendo concluir si una determinada precipitación registrada se encuentra dentro de los valores esperados para una zona o si constituye una anomalía de carácter excepcional.

El desarrollo de las curvas IDF se basa en el análisis de frecuencia de eventos máximos de precipitación registrados en cada año para diferentes duraciones, los cuales se ajustan estadísticamente a distribuciones de probabilidad. Entre las más utilizadas se encuentran la distribución Gumbel, la Log-

Normal y la distribución de Valor Extremo Generalizado (GEV), esta última especialmente recomendada por su flexibilidad al incorporar parámetros de forma, escala y ubicación (Chow et al., 1994; Hosking & Wallis, 1997; Katz et al., 2002).

Pizarro et al., (2013) propone una metodología aplicada a Chile para la obtención de curvas IDF regionalizadas, considerando factores topográficos como elevación y orientación, junto con registros históricos de estaciones meteorológicas. Esta propuesta ha permitido mejorar la representación espacial de la variabilidad pluviométrica en comparación con los enfoques generalizados empleados anteriormente. A partir de las curvas IDF, es posible construir representaciones de Precipitación-Duración-Frecuencia (PDF) que expresan el volumen total de precipitación esperada para distintas duraciones y períodos de retorno. Estas curvas permiten comparar directamente los eventos observados con los valores esperados, proporcionando un marco cuantitativo para evaluar la recurrencia y la magnitud de los eventos pluviométricos en una región determinada.

5.7 Caudales máximos y análisis de frecuencia hidrológica

Los caudales máximos instantáneos, también conocidos como caudales punta, representan el flujo más elevado registrado durante un evento hidrológico y, constituyen un parámetro esencial para el diseño y dimensionamiento de infraestructuras hidráulicas, tales como puentes, alcantarillas y defensas fluviales. Su análisis permite evaluar el comportamiento extremo del sistema hidrológico ante precipitaciones intensas, aportando información crítica para prevenir inundaciones y daños estructurales.

Una de las técnicas más utilizadas para evaluar estos eventos extremos es el análisis de frecuencia, el cual permite establecer una relación entre la magnitud del caudal y su probabilidad de ocurrencia. Este enfoque se basa en la construcción de series de caudales máximos anuales y su posterior ajuste a modelos probabilísticos que representen adecuadamente la distribución estadística observada. Entre las distribuciones más comúnmente aplicadas en hidrología se encuentran la **Gumbel**, la **Log-Normal** y la **Pearson Tipo III** (Aguilera, 2007). La distribución de Gumbel, perteneciente a la familia de valores extremos tipo I, ha sido ampliamente utilizada debido a su simplicidad y a su capacidad para representar adecuadamente los valores extremos de una serie hidrológica, especialmente en contextos donde los eventos extremos son poco frecuentes (Chow et al., 1994).

En cuanto a la distribución Log-Normal, se emplea cuando el logaritmo natural de los datos presenta una distribución normal. En otras palabras, si los datos originales muestran una fuerte asimetría, su transformación logarítmica puede normalizarlos, permitiendo así un mejor ajuste. Esta característica la convierte en una herramienta útil para describir variables hidrológicas con sesgo positivo, como los caudales extremos. Estudios realizados por Greenwood et al., (1979), han evidenciado que la función Log-Normal ofrece una alta bondad de ajuste para series de caudales anuales, alcanzando niveles de confianza superiores al 90% en pruebas estadísticas como Kolmogorov-Smirnov y Chi-cuadrado.

Finalmente, la distribución Pearson Tipo III destaca por su gran flexibilidad y capacidad para representar datos con diferentes grados de asimetría. Esta es particularmente adecuada para modelar caudales máximos anuales en series largas, ya que incorpora un parámetro adicional que permite ajustar la forma de la curva a la asimetría observada. De acuerdo con (Chow et al., 1994), su uso es recomendado cuando se cuenta con series extensas que permitan estimar de manera confiable el coeficiente de asimetría. Sin embargo, en condiciones de datos escasos, pueden preferirse distribuciones de dos parámetros, como se sugiere en (Ashkar et al., 1993), ya que estas reducen la varianza de la muestra y evitan problemas de sobreajuste.

La evaluación del ajuste de estas distribuciones respecto a los datos observados se realiza mediante pruebas de bondad, entre las que destacan la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) y la Chi-cuadrado (χ^2). Cuando se utiliza K-S como prueba de bondad de ajuste, el estadístico D tiene como definición:

$$D = \sup_x |F_n(x) - F(x)| \quad (20)$$

donde $F_n(x)$ es la función de distribución empírica de la muestra y $F(x)$ la función de distribución teórica del modelo probabilístico seleccionado (Gumbel, Log-Normal o Pearson tipo III). La hipótesis nula establece que la muestra proviene de dicha distribución teórica. Esta prueba permite comparar cuantitativamente la adecuación entre los datos observados y cualquier función de distribución continua ajustada a la serie hidrológica, detectando las desviaciones máximas entre ambas distribuciones, tanto en muestras pequeñas como grandes.

La prueba Chi-cuadrado (χ^2), en cambio, evalúa la diferencia global entre las frecuencias observadas y las teóricas agrupadas por intervalos. Su estadístico se define como:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (21)$$

donde O_i representa la frecuencia observada y E_i la frecuencia esperada en el intervalo i . Si el valor calculado de χ^2 es menor que el crítico para un nivel de significancia α , no se rechaza la hipótesis nula, indicando un ajuste adecuado. Esta prueba es apropiada para muestras medianas o grandes y complementa la K-S al ofrecer una evaluación integral de la correspondencia entre la distribución teórica y los datos.

El análisis de frecuencia de crecidas, apoyado en pruebas estadísticas como Kolmogorov–Smirnov (K–S) y Chi-cuadrado (χ^2), permite obtener caudales de diseño confiables asociados a distintos períodos de retorno. Estos resultados constituyen la base técnica para dimensionar y verificar infraestructuras hidráulicas urbanas, asegurando su desempeño frente a eventos hidrológicos extremos. En un escenario de creciente variabilidad climática, los caudales de diseño adquieren relevancia para evaluar la seguridad y resiliencia de las obras, ya que fenómenos recientes como el ENSO 2023 han puesto en discusión los parámetros de diseño vigentes, evidenciando la necesidad de reforzar la actualización y validación de estos métodos (Chow et al., 1994; Salas & Obeysekera, 2013).

5.8 Criterios de diseño hidráulico urbano y normativas vigentes en Chile

El diseño hidráulico urbano en Chile se rige principalmente por las normativas e informes del Ministerio de Obras Públicas (MOP), junto con las Guías de Diseño de Drenaje Urbano elaboradas por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y el SERVIU. Estas normativas establecen los criterios para el cálculo de caudales de diseño, recurrencias y parámetros de dimensionamiento de estructuras como colectores, canales, puentes y obras de evacuación pluvial. Sin embargo, estudios advierten que los cambios en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones extremas pueden comprometer la vigencia de dichos criterios (Gregersen & Arnbjerg-Nielsen, 2012; MOP, 2021). En este contexto, se incorporó información proveniente de informes técnicos y estudios realizados por consultoras y profesionales del área para organismos públicos, los cuales entregan antecedentes actualizados sobre el comportamiento hidráulico y las condiciones de diseño urbano en la región del Maule. Esta revisión permite establecer una base normativa y técnica sólida para la verificación de los caudales de diseño frente a los eventos hidrometeorológicos de 2023.

6 Metodología

La metodología propuesta para esta memoria integra análisis estadísticos, con el objetivo de comprender la relación entre los eventos climáticos extremos y las variables hidroclimáticas en la región del Maule, enfocándose especialmente en las condiciones registradas durante el invierno de 2023. En una primera etapa, se realizan análisis de tendencias y estacionalidad para identificar patrones en series temporales de precipitación y temperatura. Seguidamente, se efectúan análisis de frecuencia para precipitaciones y caudales máximos, y en paralelo una correlación entre el Índice de Precipitación Regional (RPI) y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), lo que permite evaluar su influencia en los eventos climáticos. Finalmente, se verifica el nivel de afectación de las obras hidráulicas urbanas mediante la

comparación de los caudales de diseño con los máximos observados, con el propósito de proporcionar una comprensión integral de los eventos climáticos extremos en la zona de estudio. Los métodos específicos de análisis se desarrollan y explican en detalle en los siguientes apartados. Las etapas descritas anteriormente se encuentran asociadas a un conjunto de actividades prácticas relevantes para su ejecución, las cuales se detallan de manera esquematizada en la Figura 5.

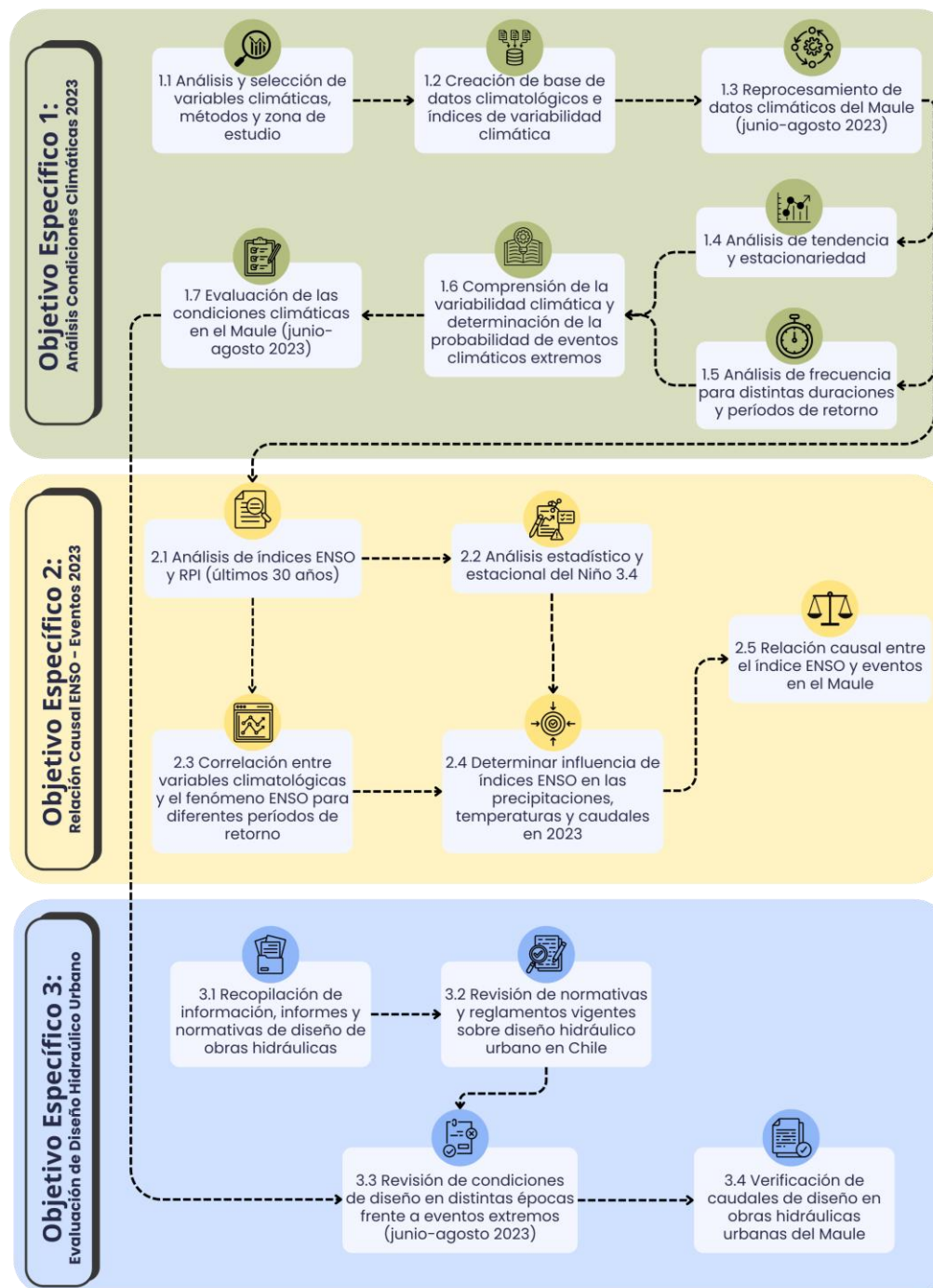


Figura 5. Esquema metodológico para alcanzar los objetivos específicos de la memoria.

6.1 Verificación de estacionariedad estadística

El análisis de la estacionariedad estadística se realizó sobre la serie anual de precipitación regional promedio, construida a partir del promedio aritmético simple de las precipitaciones anuales registradas en las estaciones Curicó, General Freire, Potrero Grande y Los Queñes, para el período 1984–2023. Este

promedio fue utilizado como representación integrada del comportamiento climático regional en la zona del Maule.

La selección de estaciones dentro de la cuenca del río Mataquito responde a criterios tanto de representatividad hidrológica como de impacto observado durante los eventos de junio y agosto de 2023. A diferencia de otras cuencas de la región del Maule, como la del río Maule superior, donde los impactos fueron menores, la cuenca del Mataquito registró desbordes, fallas en estaciones de monitoreo y efectos adversos en centros urbanos (CIGIDEN, 2023).

En primera instancia, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk a la serie regional anual, considerando un nivel de significancia del 5 %. Esta prueba permitió determinar si la distribución de los valores anuales podía considerarse como una distribución normal, condición necesaria para seleccionar el tipo de prueba estadística a aplicar en los análisis de cambio estructural. Posteriormente, la serie se segmentó en dos subperíodos de igual longitud: 1984–2003 y 2004–2023. Esta división se justificó por la necesidad de evaluar posibles variaciones en la distribución de la precipitación asociados a la intensificación de fenómenos extremos y al contexto de cambio climático observado a partir de la década de 2000.

Para detectar posibles cambios en la media y la dispersión de la serie entre los dos subperíodos definidos, se seleccionaron pruebas estadísticas en función del cumplimiento de los supuestos de normalidad. La aplicación de estas pruebas permitió determinar, si el comportamiento medio y la variabilidad interanual de la precipitación regional experimentaron cambios estructurales significativos durante el período de estudio. Los resultados se utilizaron como base para interpretar la posible pérdida de estacionariedad de la variable y su relación con la aparición de eventos extremos durante los últimos años. Este análisis es particularmente relevante en el contexto de eventos climáticos extremos, ya que un aumento en la variabilidad podría indicar una mayor frecuencia o intensidad de estos eventos, incluso en ausencia de cambios significativos en la media (Katz & Brown, 1992).

6.2 Análisis de tendencias en precipitación y temperatura media anual

El análisis de tendencias se realizó sobre la misma serie anual de precipitación regional promedio utilizada en la sección anterior, correspondiente al período 1984–2023. El objetivo de este fue identificar la existencia de tendencias significativas en la evolución de las precipitaciones invernales a lo largo del tiempo, considerando su importancia para la evaluación de cambios estructurales en el régimen climático regional. Para detectar la presencia de tendencias monotónicas, se utilizó la prueba no paramétrica de Mann–Kendall, ampliamente reconocida por su robustez frente a distribuciones no normales y su resistencia a valores atípicos. Esta prueba permitió analizar la existencia de una tendencia creciente o decreciente de largo plazo, sin necesidad de suponer una distribución específica de los datos. La significancia estadística del resultado se evaluó considerando un valor crítico bilateral asociado al 95 % de confianza. En caso de detectarse una tendencia significativa, se estimó su magnitud mediante el cálculo del estimador de pendiente de Theil–Sen. Esta técnica permitió obtener para la precipitación una tasa de cambio anual expresada en milímetros por año, mediante el cálculo de la mediana de todas las pendientes posibles entre pares de observaciones no coincidentes dentro de la serie. El valor de la pendiente resultante fue interpretado como una medida del cambio en la precipitación regional a lo largo del período de análisis.

Adicionalmente, se aplicó un análisis complementario de tendencia con Mann–Kendall sobre la serie de temperatura media anual registrada en la estación meteorológica General Freire para el mismo período 1984–2023. En este caso, también se utilizó el estimador de Theil–Sen para calcular la pendiente de la línea de tendencia, con el fin de evaluar si ha existido un aumento sistemático de las temperaturas a lo largo del tiempo, lo cual podría influir en la ocurrencia y magnitud de eventos extremos asociados a condiciones cálidas.

Ambos análisis se aplicaron de manera conjunta con el objetivo de caracterizar tanto la dirección como la intensidad del cambio observado en las series de precipitación y temperatura. Los resultados obtenidos se contrastaron con los análisis de frecuencia y eventos extremos abordados en secciones posteriores, permitiendo establecer una visión del comportamiento climático reciente de la región.

6.3 Estimación de la altura de la isoterma 0 °C y determinación del área de aporte líquida

Para estimar la altura de la isoterma 0 °C durante los eventos meteorológicos del invierno de 2023, se utilizaron datos horarios de temperatura provenientes de las estaciones Volcán Azufre (3321 msnm) y Paso Vergara (2609 msnm), ambas localizadas en el sector cordillerano de la cuenca del río Mataquito.

El cálculo del gradiente térmico vertical se realizó a partir de la diferencia de temperatura entre ambas estaciones, dividida por la diferencia de altitud (712 metros), considerando exclusivamente las horas en que se disponía de datos válidos y simultáneos. A partir de cada valor de gradiente térmico Γ , se estimó la altura correspondiente de la isoterma 0 °C utilizando la temperatura registrada en Paso Vergara como punto de referencia, bajo el supuesto de un perfil térmico lineal entre ambas estaciones. Este procedimiento se aplicó de forma horaria durante los eventos del 21 al 23 de junio y del 18 al 25 de agosto de 2023, generando una serie temporal de alturas estimadas para la isoterma 0 °C en cada evento. Posteriormente, se calculó el valor promedio de la isoterma 0 °C para cada uno de los episodios, con el fin de representar una altura representativa del umbral de fusión durante las tormentas más intensas.

Con la altura promedio de la isoterma 0 °C estimada para cada evento, se utilizó el software QGIS para determinar el área de la cuenca que se encontraba bajo esta cota altitudinal, es decir, la zona en la que las precipitaciones habrían ocurrido en forma líquida. Para ello, se empleó un modelo digital de elevación (DEM) y se generó un polígono de recorte en función de la cuenca total y la altura de la isoterma 0 °C. El área determinada se interpretó como el área aportante líquida, y se expresó como porcentaje del área total de la cuenca mediante la relación:

$$\%A_{liquida} = \frac{A_{bajo\ isoterma}}{A_{total\ cuenca}} \cdot 100 \quad (22)$$

Este análisis permitió cuantificar la porción de la cuenca que, durante los eventos analizados, contribuyó directamente a la escorrentía superficial, facilitando una interpretación hidrológica más precisa del comportamiento de la cuenca frente a condiciones térmicas críticas.

6.4 Cálculo del Índice de Precipitación Regional (RPI)

Con el objetivo de representar la variabilidad interanual de la precipitación invernal en la Región del Maule, se construyó una serie del Índice de Precipitación Regional (RPI) para el período 1984–2023, siguiendo la metodología propuesta por Garreaud et al., (2017) y extendida por el mismo Garreaud et al., (2019). El cálculo del índice se basó en los registros mensuales de precipitación de las estaciones Curicó, General Freire, Potrero Grande y Los Queñes, considerando el acumulado de las precipitaciones del período mayo–septiembre (MJJAS) de cada año.

Como base de referencia, se definió un período climatológico de 25 años comprendido entre 1984 y 2008. Esta selección se fundamentó en que, a partir del año 2010, se observó una intensificación de las condiciones de sequía en la zona centro-sur de Chile (Garreaud et al., 2017, 2019), fenómeno que podría distorsionar el cálculo de las anomalías si se incluyeran años con déficit sistemático. De este modo, el período base elegido representa condiciones previas al inicio de la megasequía, asegurando una referencia más representativa del régimen climático histórico. Para cada estación y año, se calculó el cociente entre la precipitación invernal observada y el promedio de referencia correspondiente. Este cociente permitió obtener una serie de valores estandarizados relativos ($P/\bar{P}$) que homogenizan las diferencias entre estaciones con distintas magnitudes de precipitación.

Posteriormente, para cada año del período de estudio, se calculó el valor del RPI como la mediana de los valores estandarizados obtenidos en las cuatro estaciones. Este valor representa una medida robusta de la anomalía pluviométrica regional durante el invierno, minimizando la influencia de valores extremos individuales. De esta manera, se obtuvo una serie anual que caracteriza las condiciones regionales de exceso o déficit de precipitación. La serie resultante del RPI fue utilizada en secciones posteriores para evaluar su relación con la evolución del fenómeno ENSO, así como para identificar años con anomalías regionales relevantes en el contexto del análisis climático de la zona.

6.5 Análisis de TSM y su relación con las precipitaciones invernales

Para analizar la influencia del fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) sobre las condiciones hidroclimáticas del invierno de 2023 en la Región del Maule, se trabajó con series históricas de los índices Niño 3.4 y ONI correspondientes al período 1984–2024. Ambos índices se construyen a partir de las anomalías mensuales de temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico ecuatorial, siendo el Niño 3.4 calculado sobre la región comprendida entre 5°N–5°S y 170°W–120°W. Estos datos fueron obtenidos a partir de los registros satelitales del NOAA, en formato mensual.

En primera instancia, se procesaron las series de anomalías de TSM correspondientes a los índices Niño 3.4 y ONI con el propósito de representar su evolución interanual durante el período de estudio. Este análisis permitió identificar sistemáticamente la ocurrencia de fases cálidas (El Niño) y frías (La Niña), así como evaluar la intensidad relativa de cada episodio. La caracterización temporal de estas anomalías oceánicas proporcionó un contexto histórico para interpretar la señal observada en el invierno de 2023, facilitando su comparación con eventos previos y constituyendo una base preliminar para el análisis de un vínculo con los patrones pluviométricos regionales en la Región del Maule.

Posteriormente, con el objetivo de establecer una relación cuantitativa entre ENSO y las precipitaciones invernales, se calculó el promedio estacional del índice Niño 3.4 para el período mayo–septiembre (MJJAS) de cada año, asegurando su correspondencia con el período considerado para el cálculo del Índice de Precipitación Regional. Esta consistencia temporal permitió garantizar la comparabilidad entre ambas variables.

Este procedimiento metodológico facilita la construcción de la serie Niño 3.4 MJJAS necesaria para su posterior análisis en conjunto con el RPI, siguiendo el enfoque planteado por Garreaud et al., (2017). Este análisis tiene como finalidad identificar posibles correlaciones entre las condiciones oceánicas del Pacífico ecuatorial y los eventos de precipitación extrema registrados en la Región del Maule.

Adicionalmente, se incorporaron imágenes satelitales de la temperatura superficial del mar y sus respectivas anomalías térmicas obtenidas desde el Centro Internacional para la Investigación de El Niño (CIIFEN). Estas imágenes, correspondientes a los períodos en que ocurrieron las tormentas invernales de junio y agosto de 2023, fueron utilizadas como insumo visual complementario para caracterizar el estado térmico del Pacífico ecuatorial durante dichos eventos. Su inclusión permitió observar espacialmente la magnitud y distribución de las anomalías cálidas asociadas a la fase activa del fenómeno El Niño, aportando contexto adicional para interpretar la posible intensificación de la actividad lluviosa en la Región del Maule durante ese invierno.

6.6 Correlación entre el índice Niño 3.4 y el Índice de Precipitación Regional (RPI)

Con el objetivo de evaluar la relación entre la señal oceánica del ENSO y la respuesta pluviométrica regional en el Maule, se realizó un análisis de correlación entre el índice Niño 3.4 estacional (MJJAS) y el Índice de Precipitación Regional (RPI), ambos calculados para el período 1984–2023. Este análisis tuvo por finalidad determinar si los años con anomalías positivas de TSM en el Pacífico ecuatorial central corresponden a inviernos más lluviosos en la región, o si, por el contrario, las fases frías se asocian a déficits de precipitación.

Previo al cálculo de la correlación, se evaluó la distribución estadística de las series de precipitación anual y los registros históricos del índice Niño 3.4, mediante la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk, utilizando un nivel de significancia del 5 %. Esta verificación permitió seleccionar el coeficiente de correlación más apropiado en función del comportamiento de los datos; el coeficiente de Pearson, en caso de normalidad conjunta, o el coeficiente de Spearman, si al menos una de las series no cumplía dicho supuesto.

Una vez definido el método estadístico, se procedió al cálculo del coeficiente de correlación junto con su valor p asociado, con el objetivo de evaluar la significancia estadística de la relación observada entre ambas variables. Para apoyar la interpretación de los resultados, se elaboraron dos representaciones gráficas complementarias. En primer lugar, se construyó un gráfico de dispersión que muestra la relación entre el índice Niño 3.4 (MJJAS) y la precipitación invernal regional, expresada como porcentaje del

promedio climatológico. Esta visualización permitió identificar claramente los años asociados a las fases cálida (El Niño), fría (La Niña) y neutra, así como su correspondencia con los niveles de precipitación registrados, destacando los eventos más representativos, incluyendo el año 2023. En segundo lugar, se incorporó un gráfico de doble eje que representa la evolución anual conjunta del índice Niño 3.4 y del RPI, facilitando el análisis del comportamiento sincrónico de ambas variables a lo largo del período 1984–2023, con énfasis en la caracterización del invierno de 2023.

6.7 Análisis de frecuencia de precipitaciones intensas mediante curvas IDF

El análisis de frecuencia de precipitaciones se desarrolló a partir de series de datos horarios registrados en las estaciones de Curicó, General Freire, Potrero Grande y Los Queñes, correspondientes al período 1984–2023. A partir de las ecuaciones IDF ajustadas previamente para cada estación, se calcularon intensidades máximas para combinaciones de duración entre 15 minutos y 24 horas, y para períodos de retorno entre 2 y 2000 años. Estas intensidades fueron convertidas a acumulaciones (en mm) para generar las curvas teóricas de Precipitación–Duración–Frecuencia (PDF), utilizadas como referencia para la evaluación de eventos extremos.

Para caracterizar los eventos meteorológicos de los meses de junio y agosto de 2023, se construyeron curvas PDF observadas a partir de los datos horarios disponibles para cada estación. La estimación de los acumulados máximos por duración se realizó mediante el método de totales móviles descrito por Chow et al., (1994), que permite obtener para cada duración, la máxima precipitación acumulada dentro de una ventana temporal que se desliza a lo largo del evento. Se consideraron duraciones desde 1 hasta 24 horas directamente sobre los datos horarios. Para duraciones subhorarias (15, 30 y 45 minutos), se aplicó una interpolación lineal basada en los valores horarios registrados, asumiendo una distribución uniforme de la precipitación dentro de cada intervalo horario. Esto permitió construir una curva PDF observada continua para cada tormenta.

Una vez determinados los acumulados máximos por duración para los eventos de junio y agosto, se graficaron las curvas PDF observadas y se superpusieron sobre las curvas PDF teóricas de cada estación. Esta comparación permitió estimar visualmente los períodos de retorno alcanzados por cada evento para distintas duraciones, y caracterizar su nivel de severidad en relación con los parámetros de diseño.

6.8 Estimación de caudales de diseño mediante análisis de frecuencia hidrológica

Complementando el análisis de precipitaciones, se llevó a cabo un análisis de frecuencia para los caudales máximos instantáneos registrados en las estaciones Río Mataquito en Licantén y Río Teno después de junta con Claro, abarcando el período 1994–2023. Con el objetivo de modelar la ocurrencia de estos eventos extremos, las series fueron ajustadas a tres distribuciones de probabilidad ampliamente utilizadas en hidrología: Gumbel, Log-Normal y Pearson Tipo III. La estimación de los parámetros de cada distribución se realizó mediante el método de máxima verosimilitud (MLE), lo que permitió obtener funciones de distribución ajustadas a las características empíricas de cada estación.

La evaluación de la bondad de ajuste se efectuó utilizando dos criterios estadísticos: la prueba de Kolmogorov–Smirnov (K–S) y la prueba Chi-cuadrado (χ^2). La primera compara la función de distribución acumulada empírica con la teórica, determinando la desviación máxima entre ambas y verificando si los datos provienen de la distribución probabilística seleccionada. La segunda contrasta las frecuencias observadas y esperadas agrupadas en intervalos, evaluando la correspondencia global entre el modelo teórico y los datos. Ambas pruebas se aplicaron a cada distribución y estación, considerando un nivel de significancia del 5 % para la validación estadística del ajuste.

Una vez identificado el modelo que presentó el mejor desempeño estadístico en cada estación, se procedió a estimar los caudales de diseño asociados a períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años. Además, se calculó el período de retorno correspondiente al caudal máximo observado durante el invierno de 2023, con el objetivo de evaluar su severidad relativa en comparación con los caudales de diseño establecidos para las infraestructuras hidráulicas urbanas de la región.

6.9 Criterios de diseño hidráulico urbano y normativas vigentes en Chile

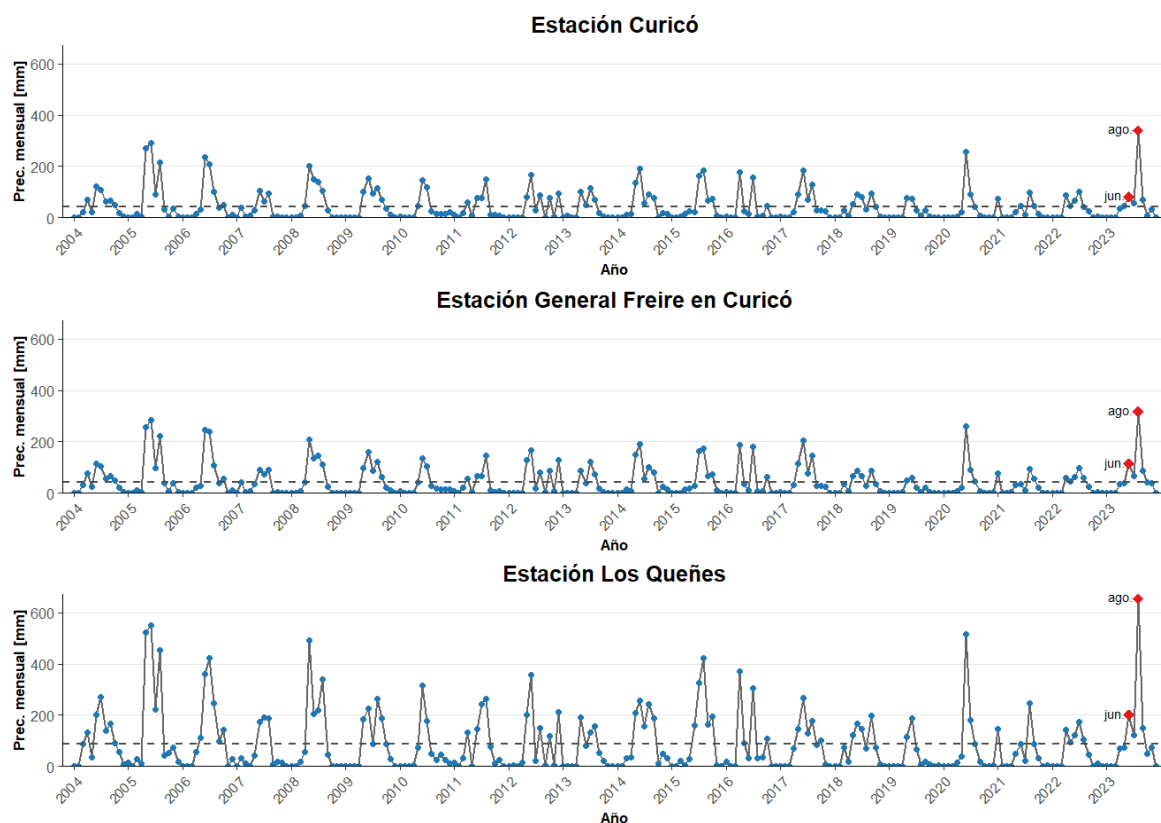
Para la verificación de los caudales de diseño urbano en la región del Maule, específicamente en la cuenca del río Mataquito, se recopilaban antecedentes de diseño hidráulico de obras urbanas representativas, tales como puentes, canales de drenaje y colectores pluviales, a partir de informes técnicos, memorias de cálculo y estudios elaborados por organismos públicos y consultoras privadas. Los caudales de diseño establecidos en dichos documentos fueron comparados con los caudales máximos estimados mediante el análisis de frecuencia hidrológica, seleccionando la distribución de probabilidad que presentó el mejor ajuste estadístico, ya sea Gumbel, Log-Normal o Pearson Tipo III, según las pruebas de Kolmogorov–Smirnov y Chi-cuadrado, con un nivel de significancia del 5 %.

Finalmente, esta comparación permitió verificar si los caudales de diseño definidos para las obras hidráulicas urbanas fueron superados durante las tormentas invernales de 2023, evaluando la capacidad actual de las infraestructuras urbanas frente a eventos hidrometeorológicos extremos y la suficiencia de los criterios normativos de diseño aplicados en la región del Maule.

7 Resultados y discusión

7.1 Eventos meteorológicos extremos del invierno 2023

Durante el invierno de 2023, la Región del Maule experimentó dos eventos meteorológicos extremos concentrados en los meses de junio y agosto, los cuales generaron impactos significativos tanto a nivel hidrológico como territorial. Ambos episodios coincidieron con la presencia de condiciones oceánicas cálidas en el Pacífico ecuatorial, asociadas al fenómeno El Niño, el cual tiende a favorecer la intensificación de las precipitaciones en la zona centro-sur de Chile. En este contexto, se registraron lluvias intensas y sostenidas que derivaron en crecidas fluviales excepcionales, afectando infraestructuras críticas, servicios básicos y diversas localidades ubicadas en la cuenca del río Mataquito y el río Maule.



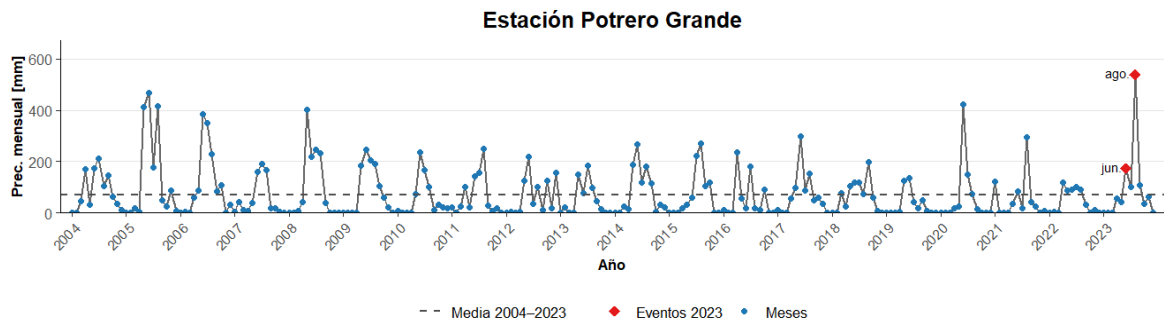


Figura 6. Precipitación mensual acumulada en las estaciones (a) Curicó, (b) General Freire, (c) Los Queñes y (d) Potrero Grande para el período 2004–2023.

Con el objetivo de contextualizar la magnitud de estos eventos dentro de un marco histórico, se analizó la evolución de la precipitación mensual acumulada en las estaciones Curicó, General Freire, Los Queñes y Potrero Grande, para el período comprendido entre 2004 y 2023. En la Figura 6a a la Figura 6d, se presentan las series temporales correspondientes a cada estación, en las cuales se destacan visualmente los eventos de los meses de junio y agosto de 2023. En todas las estaciones se evidenció que agosto de 2023 se posicionó como el mes con mayor precipitación mensual del registro, superando los 330 mm en estaciones de valle como Curicó y General Freire, y alcanzando valores superiores a 450 mm en estaciones de mayor altitud como Los Queñes y Potrero Grande. Estos acumulados no solo duplicaron la media histórica mensual, sino que superaron incluso los registros extremos de años como 2006, 2008 y 2015, los cuales también se desarrollaron bajo condiciones El Niño. El evento de junio, si bien menos intenso, también sobrepasó los promedios mensuales y destacó por la concentración de la lluvia en intervalos muy cortos, provocando crecidas abruptas en los cauces principales.

Durante el evento de junio, se registró un episodio de precipitaciones que se extendió entre el 21 y el 24 de junio de 2023, seguido por un segundo sub-evento de menor intensidad que continuó hasta el día 26. Las lluvias se concentraron en un lapso de aproximadamente 85 horas continuas, alcanzando una acumulación promedio superior a 340 mm en la cuenca del río Mataquito. Esta magnitud generó una respuesta hidrológica rápida, alcanzando un caudal máximo de 5529.92 m³/s en la estación de Licantén, antes de que esta presentara fallas en su funcionamiento. El ascenso del caudal desde niveles base fue abrupto, lo que provocó inundaciones puntuales en zonas urbanas, interrupciones en la infraestructura vial y activación de protocolos de emergencia en comunas como Hualañé, Licantén y Curepto. Según información levantada por SENAPRED y medios regionales, este evento dejó al menos 4 edificios de gobierno sin funcionamiento operativo y provocó pérdidas materiales y agrícolas de magnitud considerable (CIGIDEN, 2023).

El segundo evento, ocurrido entre el 18 y el 23 de agosto de 2023, fue aún más severo, destacando tanto por su intensidad como por su prolongada duración. Se registró una precipitación prácticamente ininterrumpida durante 4,5 días, con intensidades promedio cercanas a los 16 mm/h en el conjunto de estaciones de la cuenca del río Mataquito. La acumulación promedio superó los 470 mm, es decir, aproximadamente un 38 % más que lo observado durante el evento de junio. Desde el punto de vista hidrológico, el caudal en la estación Licantén alcanzó un valor máximo de 5904.55 m³/s el día 22 de agosto, convirtiéndose en el más alto del período 1994–2023. A diferencia de la crecida abrupta registrada en junio, este evento presentó una evolución más gradual pero sostenida durante más de 72 horas, lo que favoreció la saturación del suelo y desbordes generalizados en la cuenca baja.

Las consecuencias fueron ampliamente extendidas, ya que, se reportaron inundaciones masivas en las comunas de Licantén, Rauco, Molina y Curepto, con interrupciones prolongadas de servicios básicos como agua potable y electricidad. En Licantén, al menos dos establecimientos educacionales, tres centros de salud, seis edificios públicos y numerosos comercios resultaron inutilizables. En Curepto, los sectores de Docamavida, Calpún y el área del puente Lautaro (Ruta K-60) también sufrieron afectaciones graves, evidenciando la alta vulnerabilidad del territorio ante eventos de esta magnitud (CIGIDEN, 2023).

7.2 Análisis exploratorio de las series hidrometeorológicas

Los resultados presentados a continuación corresponden al análisis exploratorio de largo plazo aplicado a las principales series hidrometeorológicas de la cuenca del río Mataquito, considerando el período 1984–2023. Este análisis abarcó tres variables para la comprensión del régimen climático e hidrológico regional: precipitación anual acumulada, temperatura (mínima, media y máxima) y caudal máximo anual. El objetivo fue identificar patrones de variabilidad interanual, recurrencia de eventos extremos e indicios de posibles alteraciones atribuibles al cambio climático, lo cual permite contextualizar adecuadamente los eventos registrados durante el invierno de 2023.

La precipitación anual promedio regional, estimada a partir de las estaciones Curicó, General Freire, Potrero Grande y Los Queñes exhibe una alta variabilidad interanual (Figura 7), con una media de 825.3 mm. Se identifican años con acumulados significativamente superiores al promedio, como 1997, 2002, 2006 y 2023, todos ellos coincidentes con fases cálidas del fenómeno El Niño (Niño 3.4 > +0.5 °C). En contraste, entre 2009 y 2018 se observa una fase prolongada de déficit hídrico, asociada a condiciones La Niña, con precipitaciones por debajo de la media en la mayoría de esos años. El año 2023 marcó una ruptura en esta tendencia, con un repunte notable que se atribuye preliminarmente a condiciones oceánicas anómalas en el Pacífico ecuatorial.

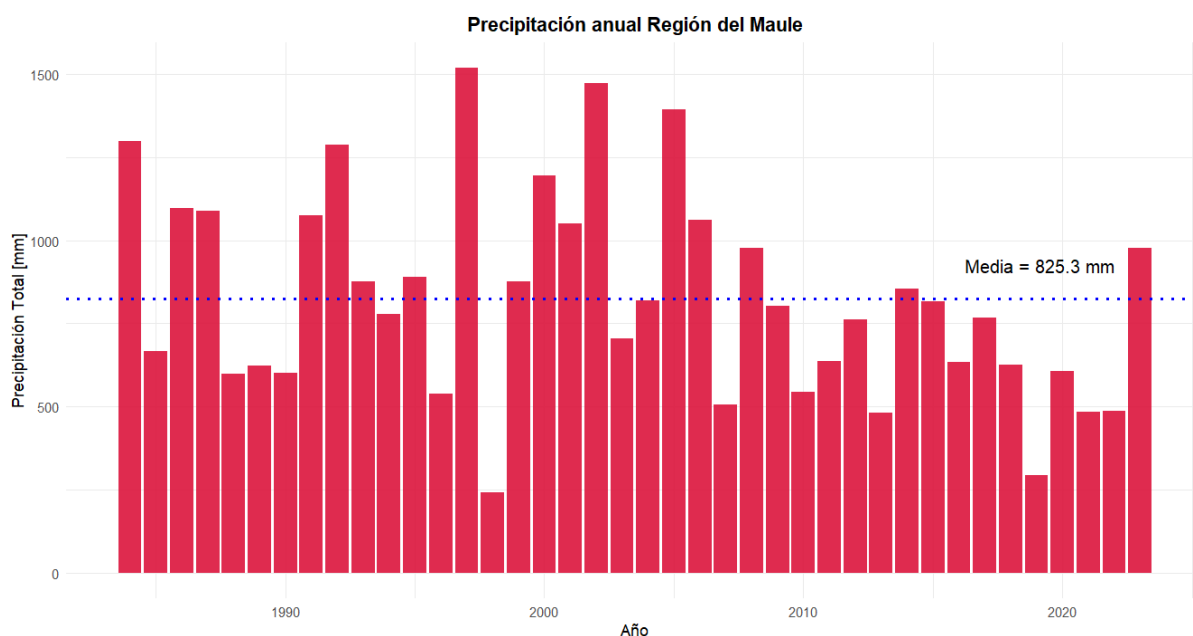


Figura 7. Precipitación anual promedio en la Región del Maule durante el período 1984–2023, calculada a partir de las estaciones Curicó, General Freire, Potrero Grande y Los Queñes.

En relación con el comportamiento térmico, se utilizaron solo los registros de la estación General Freire, esto debido a que las estaciones cordilleranas Volcán Azufre y Paso Vergara presentan series incompletas o con períodos muy acotados. En la estación General Freire en Curicó, se observa un aumento progresivo en las temperaturas mínimas y medias a lo largo de las últimas cuatro décadas (Figura 8), mientras que las temperaturas máximas se han mantenido relativamente estables, con fluctuaciones menores y sin una tendencia clara. Este incremento sostenido en las temperaturas mínimas podría estar evidenciando una alteración en la dinámica térmica regional, coherente con las proyecciones asociadas al cambio climático. Dicho comportamiento puede tener múltiples implicancias en los procesos hidrológicos de la cuenca, como el aumento de la evapotranspiración, la reducción de la acumulación nival en sectores cordilleranos, y una mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos, favorecida por la mayor capacidad atmosférica de retener humedad en un entorno térmico más cálido.

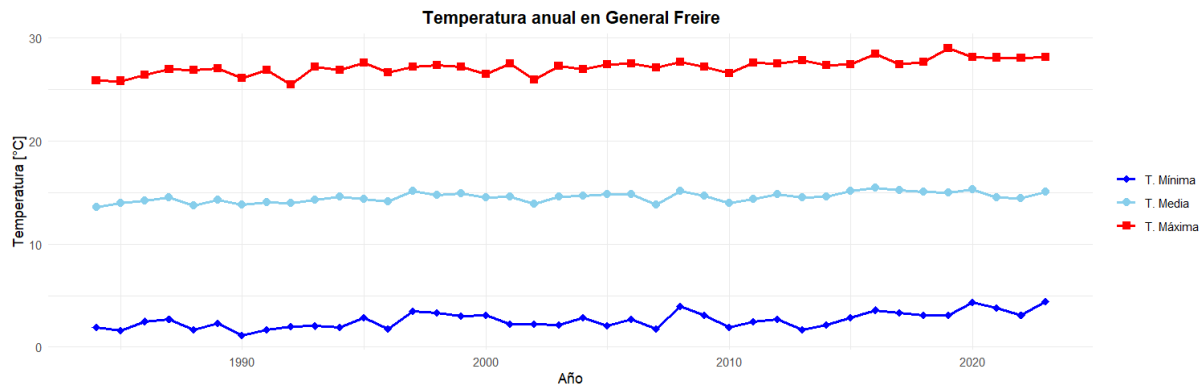


Figura 8. Evolución anual de las temperaturas mínima, media y máxima en la estación General Freire (Curicó) durante el período 1984–2023.

Respecto al comportamiento hidrológico, el análisis de los caudales máximos anuales registrados en las estaciones del río Mataquito en Licantén (Figura 9) y del río Teno después de la junta con río Claro (Figura 10), muestran una marcada variabilidad interanual. Se observan valores altos en 1997, 2002, 2005 y 2023, todos ellos coincidentes con años de lluvias por sobre lo normal y presencia confirmada del fenómeno El Niño. El evento de agosto de 2023 alcanzó un caudal de 5904.55 m³/s en Licantén como se especificó anteriormente, el valor más alto del registro disponible. Este comportamiento confirma que la cuenca responde rápidamente a lluvias intensas, sobre todo cuando se combinan con suelos saturados y sistemas frontales intensificados por las condiciones oceánicas anómalas.

En el caso del río Teno, aunque los valores máximos son de menor magnitud, también se observa un peak relativo en 2023, junto con un patrón de mayor dispersión interanual y sin una tendencia definida, posiblemente influido por su régimen mixto pluvio-nival y condiciones locales más variables.

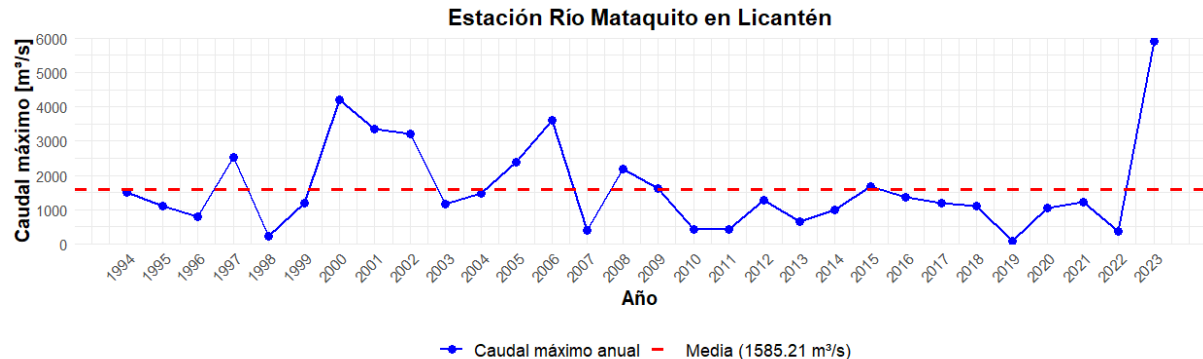


Figura 9. Caudales máximos anuales en la estación Río Mataquito en Licantén (1994–2023)

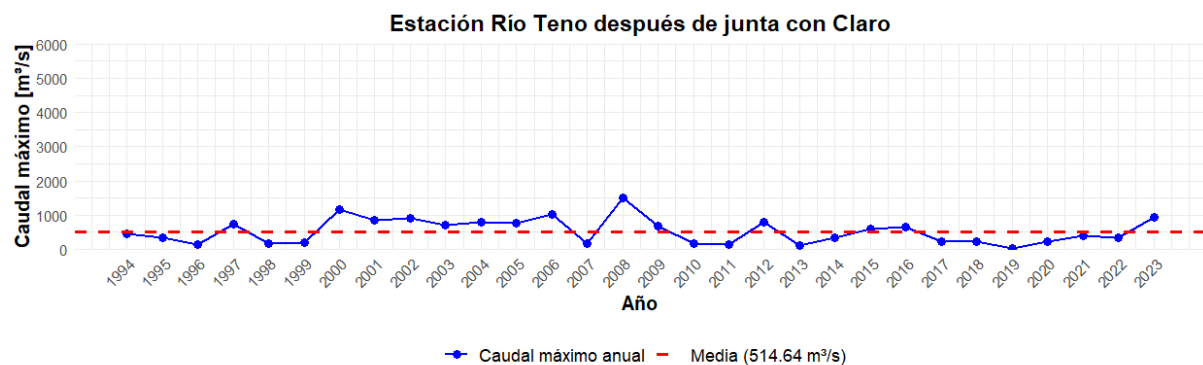


Figura 10. Caudales máximos anuales en estación Río Teno después de junta con Claro (1994–2023).

En conjunto, estos resultados muestran que la cuenca del Mataquito ha estado sujeta a ciclos hidrometeorológicos modulados principalmente por la oscilación ENSO, y que en los últimos años podrían estar intensificándose bajo un escenario de cambio climático. La ocurrencia recurrente de eventos extremos, junto con la evolución térmica observada, refuerza la necesidad de evaluar en detalle la estacionariedad y las tendencias de estas variables, lo cual se abordará en las siguientes secciones.

7.3 Análisis de estacionariedad de la media y la varianza de las series hidrometeorológicas

Para evaluar la estabilidad estadística de las variables hidrometeorológicas en la cuenca del río Mataquito, se aplicaron pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk), de estabilidad de la media (t de Student o Mann-Whitney), y de estabilidad de la varianza (F de Fisher o Levene) a las series anuales de precipitación, temperatura y caudal máximo para el período 1984–2023. Este análisis permite identificar posibles cambios estructurales en las series que podrían reflejar alteraciones del régimen climático regional o efectos de largo plazo del cambio climático.

Los resultados de la prueba de normalidad (Tabla 2) indican que las series de precipitación anual en las estaciones Curicó, General Freire, Potrero Grande y Los Queñes, así como la temperatura promedio en General Freire, presentan una distribución normal ($p > 0.05$), lo que habilita el uso de pruebas paramétricas en los siguientes análisis. Sin embargo, se detectó una distribución no normal en el caudal máximo del río Mataquito en Licantén y el Río Teno ($p < 0.05$), por lo que en este caso se optó por aplicar pruebas no paramétricas. Las estaciones Volcán Azufre y Paso Vergara no fueron incluidas en este análisis debido a la corta extensión de sus registros, que impide una evaluación estadística robusta.

Tabla 2. Resultados de la prueba de normalidad Shapiro–Wilk para las series hidrometeorológicas (1984–2023).

Variable	Estación	Prueba de normalidad			Período
		W	Valor- P	Resultado	
Precipitación	Curicó	0.95	0.11	Normal	1984-2023
Precipitación	General Freire	0.97	0.27	Normal	1984-2023
Precipitación	Potrero Grande	0.97	0.31	Normal	1984-2023
Precipitación	Los Queñes	0.98	0.55	Normal	1984-2023
Temp. Promedio	General Freire	0.98	0.65	Normal	1984-2023
Temp. Promedio	Volcán Azufre	-	-	-	2022-2023
Temp. Promedio	Paso Vergara	-	-	-	2022-2023
Caudal máximo	Río Mataquito en Licantén	0.85	0.0004	No normal	1994-2023
Caudal máximo	Río Teno junta con Claro	0.91	0.015	No normal	1994-2023

El análisis de estabilidad de medias (Tabla 3) revela diferencias significativas en algunas de las series. En particular, la precipitación en la estación Curicó mostró un cambio estadísticamente significativo en su media anual, lo que sugiere una alteración en el comportamiento hidrometeorológico de esas estaciones en las últimas décadas. En contraste, las estaciones General Freire, Los Queñes y Potrero Grande, no presentan diferencias significativas. Respecto a la temperatura promedio en la estación General Freire, se identificó una disminución significativa en la media, lo que coincide con la tendencia creciente observada en la serie de temperaturas mínimas y medias. Este comportamiento refuerza la hipótesis de un cambio en la dinámica térmica regional, posiblemente vinculado al cambio climático.

De manera complementaria, se evaluó la serie de precipitación promedio anual, obtenida como el promedio simple de las estaciones Curicó, General Freire, Potrero Grande y Los Queñes. Esta serie presentó una distribución cercana a la normalidad ($W = 0.97$, $p = 0.29$), y una diferencia significativa en la media ($t = 2.10$, $p = 0.04$), lo que respalda su representatividad regional. Estos resultados justifican el uso posterior de la serie en el análisis de tendencias mediante la prueba de Mann–Kendall, permitiendo identificar posibles cambios estructurales en el régimen de precipitaciones de la cuenca.

Tabla 3. Resultados del análisis de estabilidad de la media y varianza para series normales (1984–2023).

Variable	Estación	Estabilidad de la media			Estabilidad de la varianza			Período
		t	Valor- P	Resultado	F	Valor- P	Resultado	
Precipitación	Curicó	2.27	0.03	Sig.	2.26	0.08	No sig.	1984-2023
Precipitación	General Freire	2.02	0.05	No sig.	1.79	0.21	No sig.	1984-2023
Precipitación	Potrero Grande	1.94	0.06	No sig.	1.60	0.31	No sig.	1984-2023
Precipitación	Los Queñes	2.08	0.05	No Sig.	1.72	0.25	No sig.	1984-2023
Temp. Media	General Freire	-3.65	0.0008	Sig.	0.97	0.95	No sig.	1984-2023
Temp. Media	Volcán Azufre	-	-	No sig.	-	-	No sig.	2022-2023
Temp. Media	Paso Vergara	-	-	No sig.	-	-	No sig.	2022-2023

En cuanto a las series de caudales máximos, se aplicaron pruebas de Mann–Whitney para la mediana y Levene para la varianza (Tabla 4). En ambas estaciones no se observaron diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 5 %. En el caso del río Teno, el valor $p = 0.05$ indica un resultado limítrofe pero no significativo. Esto sugiere que no existen evidencias suficientes para afirmar cambios en la magnitud central de los caudales máximos anuales. El río Mataquito en Licantén tampoco mostró cambios significativos ($p = 0.07$), aunque el valor cercano al umbral podría indicar una tendencia emergente que será analizada en el apartado de tendencias. En ninguna de las estaciones se detectaron diferencias significativas en la varianza, lo que indica estabilidad en la dispersión de los valores a lo largo del tiempo.

Tabla 4. Resultados del análisis de estabilidad en series no normales: caudal máximo (1994–2023).

Variable	Estación	Estabilidad de la media			Estabilidad de la varianza			Período
		U	Valor- P	Resultado	F	Valor- P	Resultado	
Caudal máximo	Río Mataquito en Licantén	167	0.07	No sig.	0.82	0.37	No sig.	1994-2023
Caudal máximo	Río Teno junta con Claro	170	0.05	No sig.	1.77	0.10	No sig.	1994-2023

En conjunto, estos resultados indican que, si bien muchas de las series mantienen una estructura estadística estable en términos de su varianza, existen indicios claros de cambios en las medias de precipitación, temperatura y caudal en ciertas estaciones. Estas alteraciones podrían estar vinculadas a la intensificación de eventos climáticos extremos, al forzamiento del ENSO o al cambio climático, hipótesis que serán exploradas con mayor detalle en las secciones siguientes mediante análisis de tendencias y correlación.

7.4 Análisis de tendencias en series hidrometeorológicas

Con el propósito de detectar tendencias hidrometeorológicas de largo plazo en la cuenca del río Mataquito, se aplicó la prueba de Mann–Kendall a las series anuales de precipitación y temperatura para el período 1984–2023. Para cuantificar la magnitud del cambio, se utilizó el estimador robusto de Theil–Sen, el cual permite expresar las pendientes en unidades físicas (mm/año para precipitación y °C/año para temperatura), facilitando así una interpretación directa de los ritmos de variación interanual.

Tabla 5. Resultados del análisis de tendencia mediante prueba de Mann-Kendall y estimador de Theil-Sen para series anuales de precipitación y temperatura promedio en la cuenca del río Mataquito (1984–2023).

Variable	Estación	Mann-Kendall			Theil-Sen		Período
		Valor- Z	Valor- P	Tendencia	Valor	Unidad	
Precipitación	Curicó	-2.27	0.02	Sig.	-8.00	mm/año	1984-2023
Precipitación	General Freire	-2.16	0.03	Sig.	-7.19	mm/año	1984-2023
Precipitación	Potrero Grande	-2.46	0.01	Sig.	-11.27	mm/año	1984-2023
Precipitación	Los Queñes	-2.23	0.03	Sig.	-14.95	mm/año	1984-2023
Temp. Promedio	General Freire	4.16	0.00003	Sig.	0.28	°C/año	1984-2023
Temp. Promedio	Volcán Azufre	-	-	-	-	-	2022-2023
Temp. Promedio	Paso Vergara	-	-	-	-	-	2022-2023

Los resultados obtenidos (Tabla 5) muestran una tendencia negativa estadísticamente significativa en todas las estaciones de precipitación evaluadas. Las pendientes estimadas mediante Theil-Sen varían entre -7.19 y -14.95 mm/año, lo que evidencia una disminución sostenida en los volúmenes anuales de precipitación durante las últimas cuatro décadas. Esta señal es consistente con el período de Mega Sequía en Chile central entre 2010 y 2018, caracterizado por un déficit pluviométrico persistente, asociado a una mayor frecuencia de eventos La Niña y a patrones atmosféricos bloqueantes que limitaron la entrada de sistemas frontales (Garreaud et al., 2019).

La evaluación de la precipitación regional promedio anual confirmó también una tendencia decreciente significativa ($Z = -2.53$, $p = 0.01$), con una pendiente estimada de -10.44 mm/año (Figura 11). Sin embargo, el año 2023 se destacó como una anomalía positiva dentro de la tendencia descendente observada, registrando un total anual superior a la media histórica. Este comportamiento excepcional no contradice la tendencia de largo plazo, sino que refuerza la hipótesis central de esta memoria, al evidenciar que los eventos extremos del invierno 2023 representan un cambio significativo asociada a condiciones cálidas del ENSO. En este sentido, el repunte pluviométrico de 2023 no debe interpretarse como un retorno a un régimen húmedo sostenido, sino como la intensificación transitoria de las precipitaciones en respuesta a un episodio de El Niño caracterizado por anomalías oceánicas marcadas.

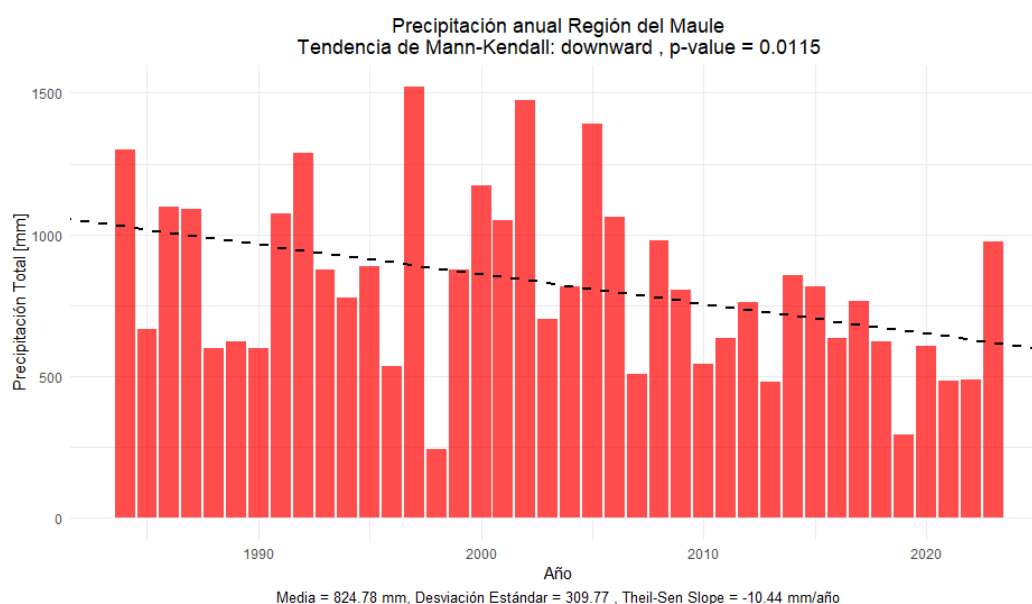


Figura 11. Evolución de la precipitación regional anual promedio en la Región del Maule y tendencia estimada mediante Mann-Kendall y Theil-Sen (1984–2023).

En relación con la temperatura (Figura 12), los resultados evidencian una tendencia creciente altamente significativa en la estación General Freire ($p < 0.05$) y una pendiente estimada mediante Theil-Sen de $+0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ por año. Este aumento sostenido de la temperatura promedio anual es consistente con lo observado en otras regiones del centro-sur de Chile, y sugiere un proceso de calentamiento global y regional sostenido. Esta tendencia térmica tiene implicancias directas sobre la dinámica hidrológica de la cuenca, al influir en procesos como la reducción de heladas, la disminución de la acumulación nival en sectores cordilleranos y, especialmente, el ascenso de Es importante señalar que, las estaciones de alta montaña como Volcán Azufre y Paso Vergara no fueron incluidas en este análisis debido a la brevedad de sus registros (2022–2023), lo que impide establecer conclusiones robustas sobre posibles tendencias térmicas en altitud.

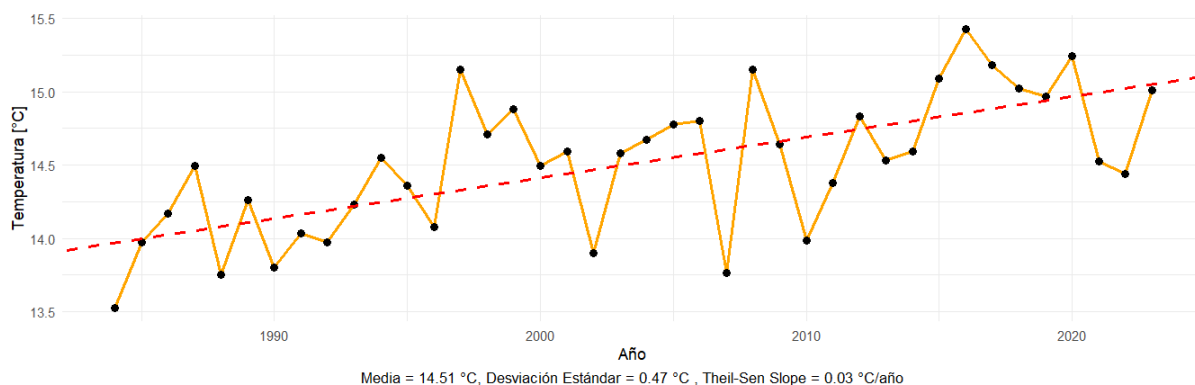


Figura 12. Tendencia de la temperatura anual media en la estación General Freire (1984–2023), con línea de tendencia estimada mediante el método de Theil–Sen.

Los resultados del análisis de tendencia confirman la existencia de un proceso de cambio climático regional en la cuenca del río Mataquito, evidenciado por la disminución sostenida de la precipitación anual y el aumento progresivo de la temperatura. No obstante, el comportamiento anómalo del año 2023, con lluvias excepcionales en un contexto general de sequía, refuerza la hipótesis de esta memoria donde los eventos extremos recientes no responden a un retorno al régimen húmedo, sino a una intensificación puntual vinculada a condiciones cálidas del ENSO.

7.5 Comportamiento térmico e implicancias hidrológicas

Durante los eventos de junio y agosto de 2023, la altura de la isoterma $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ presentó variaciones significativas que influyeron directamente en el tipo de precipitación y en la respuesta hidrológica de la cuenca del río Mataquito, cuya superficie total alcanza los $6331,7\text{ km}^2$. En junio, la isoterma se mantuvo en torno a los 2450 msnm, abarcando aproximadamente el 84,4 % del área total (5344 km^2), lo que indica que una parte importante de la cuenca recibió precipitación en forma líquida, mientras los sectores más altos registraron nieve o precipitación sólida. En agosto, en cambio, la isoterma se elevó hasta cerca de 3000 msnm, cubriendo el 97,7 % del área total (6186 km^2). Este ascenso favoreció a que prácticamente toda la cuenca aportara escorrentía líquida, incrementando de manera notable la respuesta hidrológica y los caudales observados durante este evento.

El aumento en la altura de la isoterma $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en ambos episodios refleja un perfil térmico más cálido e inestable, coherente con la tendencia positiva de temperatura identificada en la estación General Freire y con las condiciones oceánicas cálidas del ENSO 2023. Este cambio térmico elevó el límite altitudinal de fusión y amplió la zona de aporte líquida, intensificando la generación de escorrentía superficial en toda la cuenca. En consecuencia, la mayor extensión del área bajo la isoterma $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ explica en gran medida los caudales extremos registrados en agosto, confirmando el efecto combinado del calentamiento regional y del episodio cálido del ENSO sobre la dinámica hidrológica del Maule durante el invierno de 2023.

7.6 Anomalías de la TSM e Índices ENSO

7.6.1 Temperatura Superficial del Mar (TSM) y anomalías en el Pacífico

La Figura 13 y Figura 14, muestran la distribución espacial de la temperatura superficial del mar y sus anomalías durante el evento de junio (EV1) y agosto (EV2) de 2023. En ambos períodos se aprecia un marcado gradiente latitudinal, con temperaturas que oscilaron entre los 28-32°C en la región ecuatorial y valores inferiores a 8°C en latitudes superiores a 40°S. Las anomalías térmicas registradas durante este período revelaron desviaciones positivas significativas, particularmente a lo largo de la costa centro-sur de Chile, donde se alcanzaron valores de +2 °C a +3 °C en junio y superaron los +4 °C en agosto.

Estos resultados indican condiciones oceánicas excepcionalmente cálidas para un invierno austral, ya que en un año promedio las anomalías no suelen sobrepasar +1 °C (Cai et al., 2020). La intensificación observada en agosto coincide con los registros de tormentas extremas en la región del Maule, lo que respalda la hipótesis de un vínculo entre las condiciones cálidas del Pacífico y la ocurrencia de precipitaciones excepcionales en 2023. Este patrón también es coherente con estudios previos que destacan el rol de las anomalías positivas de TSM en la intensificación de los sistemas frontales invernales (Cai et al., 2015; Garreaud, 2009).

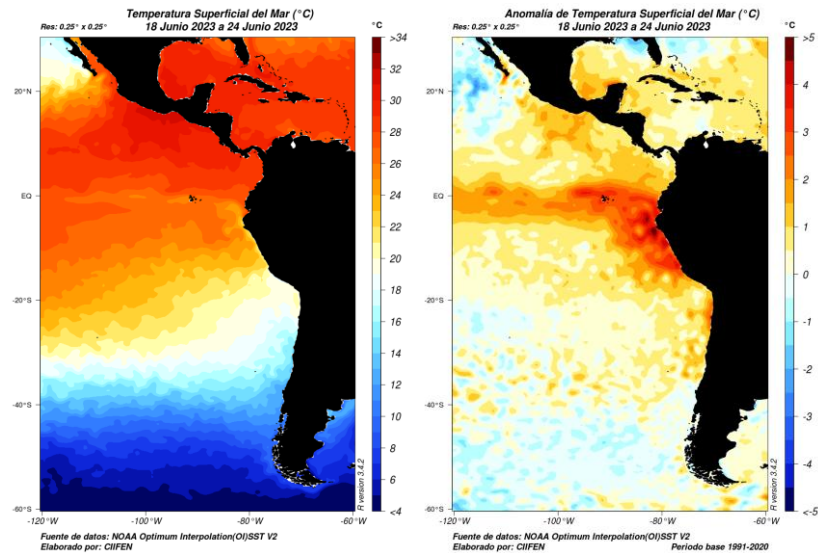


Figura 13. Temperatura y anomalías térmicas superficiales del Pacífico ecuatorial (18–24 junio 2023).

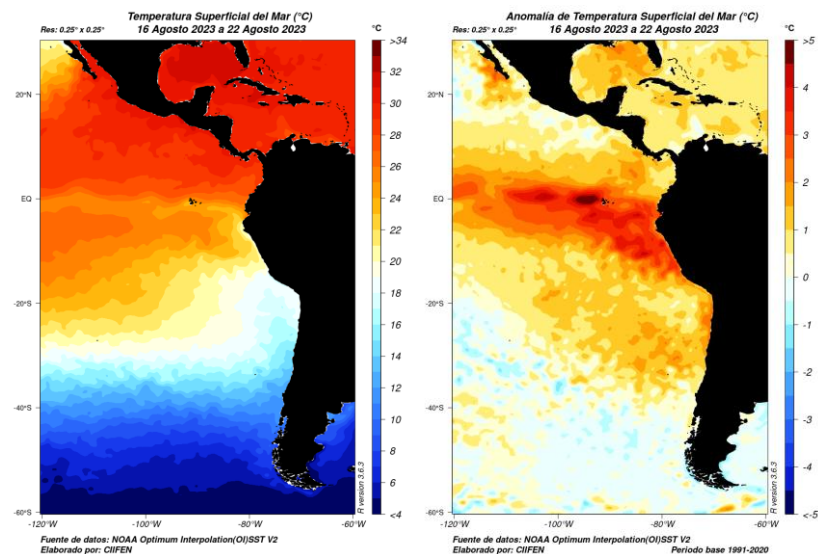


Figura 14. Temperatura y anomalías térmicas del Pacífico ecuatorial (16–22 agosto 2023).

7.6.2 Anomalías en los índices Niño 3.4 y ONI (1984–2023)

El análisis de las anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 (Figura 15) y el Índice Oceánico de El Niño (ONI) (Figura 16) durante el período 1984-2023 revela patrones cíclicos significativos del fenómeno El Niño, con episodios particularmente intensos en los años 1997-1998, 2015-2016 y en 2023. Estos registros muestran que las anomalías térmicas positivas han superado consistentemente el umbral de 0.5°C durante estos eventos, siendo especialmente visibles en los picos que alcanzaron valores superiores a 2.5°C en 1997 y 2015. Al examinar la duración y magnitud de estos eventos, se observa que el episodio de 2023 muestra características similares a los eventos históricos más intensos, con valores que han alcanzado aproximadamente los 2°C , sugiriendo un patrón de recurrencia aproximadamente cada 7-8 años para los eventos de mayor magnitud.

La coherencia entre Niño 3.4 y ONI confirma la consistencia de ambos índices para monitorear ENSO, en concordancia con lo reportado por Trenberth (1997) y McPhaden et al., (2006). Asimismo, los datos evidencian una marcada estacionalidad, ya que, los episodios cálidos de mayor intensidad se consolidan en la segunda mitad del año y se prolongan hasta el primer trimestre del año siguiente, como ocurrió en 1997–1998, 2015–2016 y en el evento de 2023.

Este patrón tiene implicancias directas para la Región del Maule. La fase cálida registrada en 2023 coincidió con precipitaciones extremas y crecidas significativas en la cuenca del Mataquito, confirmando la influencia de ENSO en la intensificación de tormentas invernales. Además, la ocurrencia de este evento inmediatamente después de la megasequía 2010 –2018 documentada por (Garreaud et al., 2017), refuerza la hipótesis de transiciones abruptas entre extremos hidrológicos, configurando un escenario de mayor riesgo para la gestión de recursos hídricos y la planificación de infraestructura hidráulica.

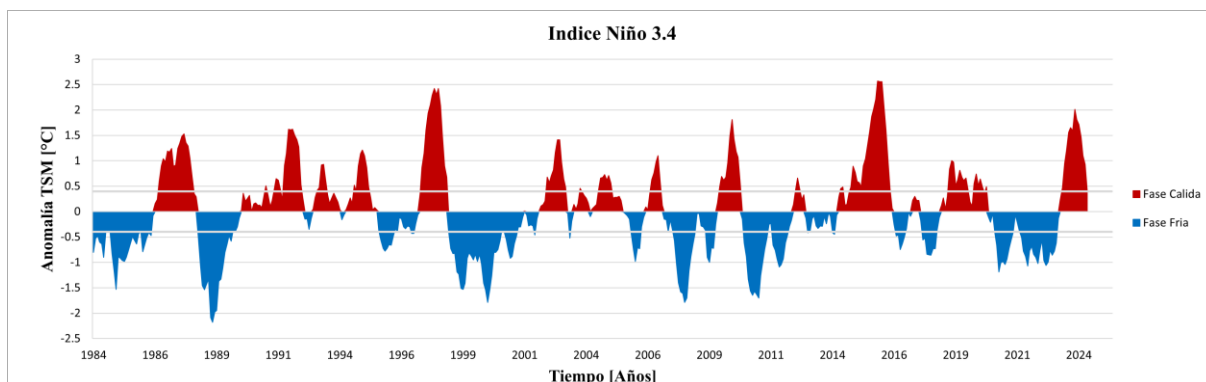


Figura 15. Anomalías para el índice Niño 3.4 en el período de 1984-2024.

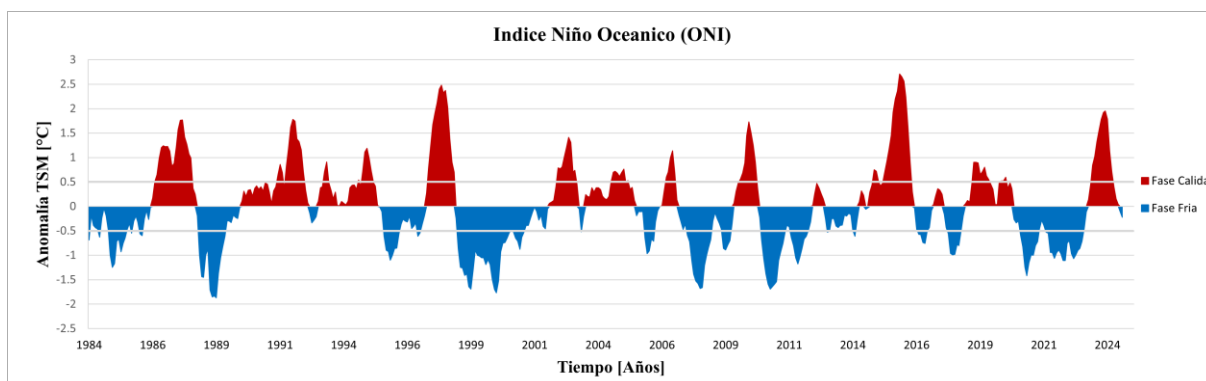


Figura 16. Anomalías para el índice Niño Oceánico (ONI) en el período de 1984-2024.

7.7 Relación entre el índice Niño 3.4 y las precipitaciones invernales en la Región del Maule

El diagrama de dispersión presentado en la Figura 17, ilustra la relación entre el índice Niño 3.4 y las precipitaciones invernales en la región del Maule durante el período 1984-2023. En este, se distinguen claramente tres zonas: La Niña (índice $< -0.5^{\circ}\text{C}$), Neutral (-0.5°C a 0.5°C) y El Niño (índice $> 0.5^{\circ}\text{C}$). El análisis de la dispersión revela una correlación positiva entre el índice Niño 3.4 y las precipitaciones invernales en el Maule, aunque con una visible variabilidad.

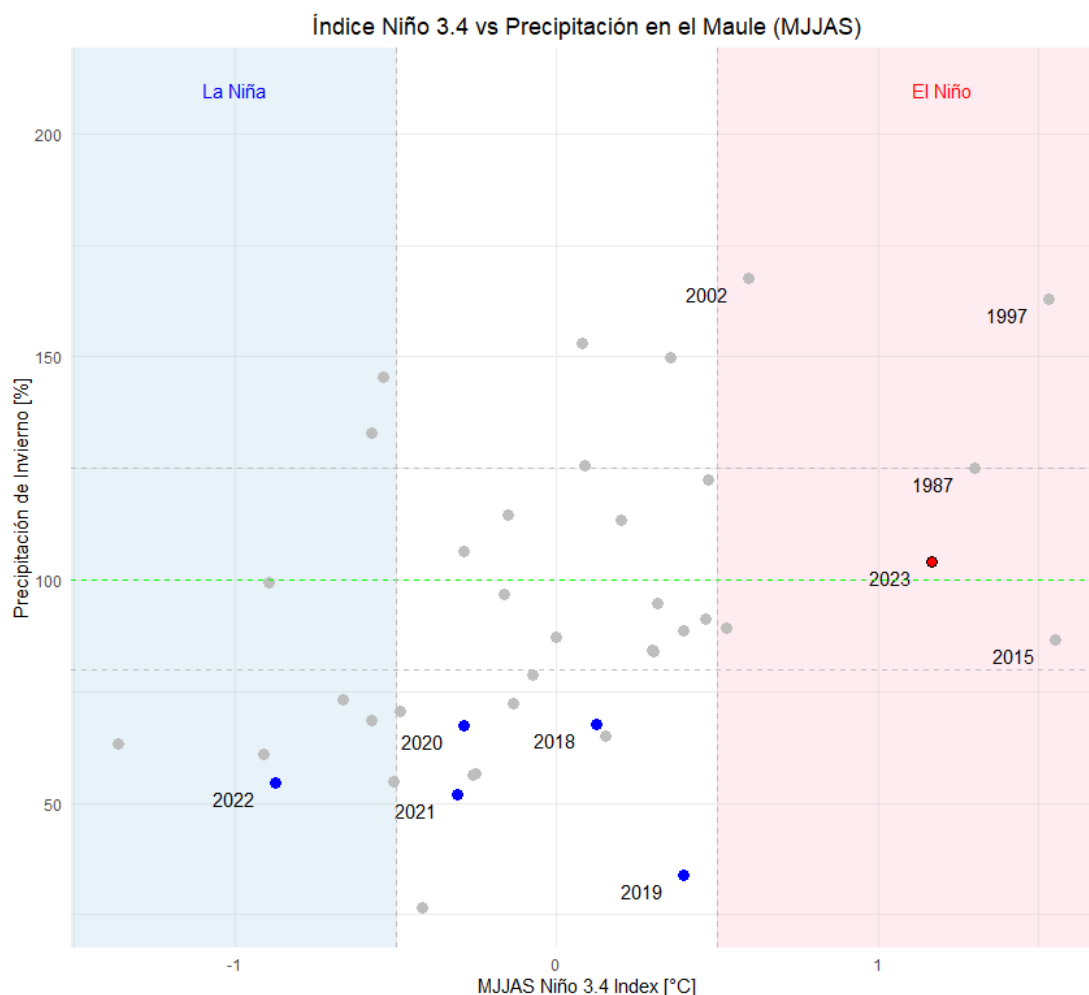


Figura 17. Diagrama de dispersión entre el índice Niño 3.4 y la precipitación en el Maule.

Los eventos El Niño más intensos, como los de 1997 y 2002, se asociaron con precipitaciones significativamente superiores al promedio histórico, superando el 150% de la precipitación normal. En contraste, el período 2019-2022, caracterizado por condiciones La Niña, registró precipitaciones consistentemente por debajo del 50% del promedio histórico, evidenciando una sequía persistente en la región desde 2009 a 2018. El año 2023, con un índice Niño 3.4 aproximado de 1°C , marca una transición hacia condiciones El Niño y muestra una recuperación moderada en las precipitaciones, alcanzando valores ligeramente superiores al 100% del promedio histórico. Esta respuesta, aunque positiva, resulta menos pronunciada que en eventos El Niño históricos de magnitud similar, como los observados en 1987 y 2015. Estos resultados confirman que, a pesar de la variabilidad interanual y la influencia de otros forzantes, la señal ENSO tiene un impacto claro en la distribución de las precipitaciones en la región del Maule.

Para cuantificar estadísticamente la relación entre el RPI y el índice Niño 3.4 en los meses invernales, se realizó un análisis de correlación entre ambas variables. La prueba de Shapiro-Wilk confirmó la normalidad de ambas series ($p > 0.05$), permitiendo aplicar el coeficiente de correlación de Pearson. El análisis arrojó un coeficiente $r = 0.35$ ($p < 0.05$), indicando una correlación positiva débil a moderada.

El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.12$) indica que aproximadamente un 12% de las variaciones de lluvia pueden atribuirse directamente a las fluctuaciones del índice Niño 3.4. La Figura 18, muestra la evolución temporal conjunta del RPI y de las anomalías de TSM en la región Niño 3.4, donde se aprecia que los repuntes positivos de este índice suelen coincidir con incrementos del RPI (por ejemplo, en 1997 y 2002), mientras que las fases frías (La Niña) se asocian a déficits persistentes. En 2023, la fase cálida emergente produjo un aumento de la precipitación invernal, aunque menos intenso que en eventos históricos de magnitud similar, lo que refuerza la hipótesis de que ENSO actúa como modulador clave, pero no único, del régimen pluviométrico regional.

Los resultados confirman que, aunque la correlación entre el índice Niño 3.4 y las precipitaciones invernales en el Maule no es fuerte, sí existe una relación significativa que explica parte de la variabilidad observada. Esto respalda la hipótesis de que ENSO actúa como un modulador relevante del régimen pluviométrico regional, cuya influencia se hizo particularmente evidente en el repunte de 2023.

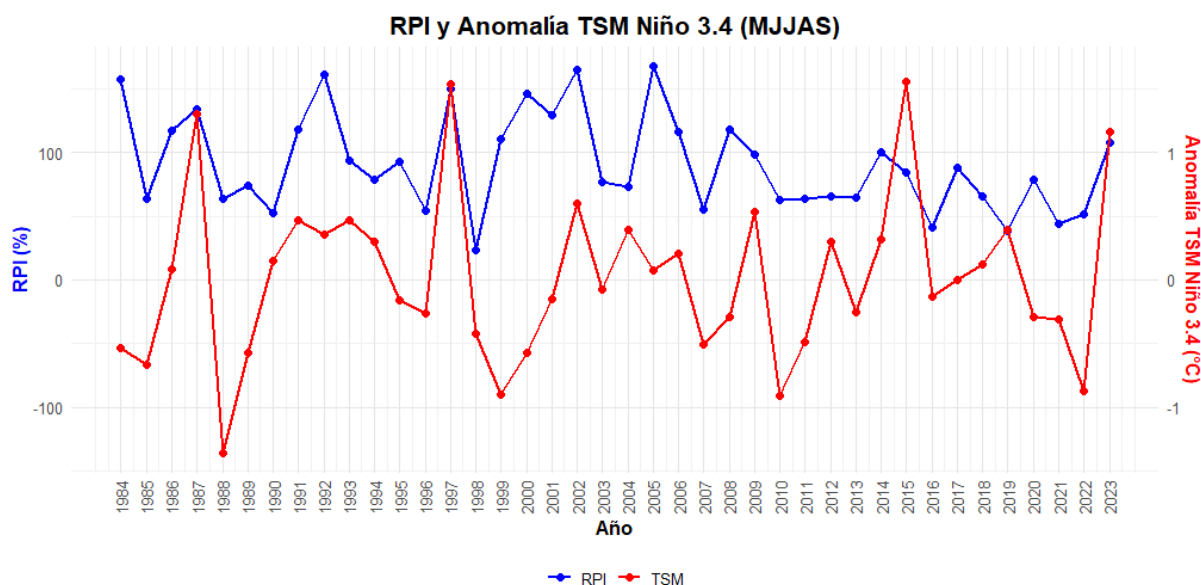


Figura 18. Correlación de Precipitación Invernal (RPI) y la anomalía de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en la región Niño 3.4 durante el período mayo-septiembre (MJJAS).

7.8 Análisis de las tormentas de junio y agosto de 2023 mediante curvas PDF

La Figura 19 muestra la obtención de las curvas PDF, en donde se observa en línea roja los períodos de retorno (T_r) asociados a cada duración durante los eventos del 21 al 24 de junio y en línea negra los correspondientes al período del 18 al 23 de agosto de 2023. Estas curvas permiten evaluar la magnitud de las precipitaciones acumuladas en distintas escalas temporales (1 a 24 horas) en relación con los valores históricos de cada estación, proporcionando un marco de análisis para interpretar la severidad de los eventos desde una perspectiva hidrológica.

A nivel general, se observa que el evento de agosto 2023 presenta valores inusuales de precipitación acumulada para todas las estaciones, alcanzando períodos de retorno superiores a 2000 años para duraciones de 24 horas en las estaciones de valle (Curicó y General Freire). En cambio, en las estaciones de mayor altitud (Potrero Grande y Los Queñes), los T_r disminuyen progresivamente, situándose entre 200 y 500 años para igual duración. Esta variación espacial en los períodos de retorno refleja la influencia orográfica en la distribución de la precipitación, pero también destaca un comportamiento anómalo en las estaciones del valle, donde las intensidades registradas fueron excepcionalmente altas en lapsos cortos.

Durante las primeras 6 horas de ambos eventos, las curvas muestran una pendiente pronunciada en todas las estaciones, lo que evidencia una alta intensidad inicial. Esta condición fue particularmente crítica en agosto, donde en Potrero Grande se acumularon más de 120 mm en las primeras 8 horas, mientras que

Curicó y General Freire superaron los 100 mm. Sin embargo, al analizar la totalidad del evento, se constata que la estación Curicó registró una acumulación diaria superior a 200 mm, lo que en el marco de sus registros históricos equivale a un Tr de 2000 años, el más alto observado.

En el caso del evento de junio, aunque las precipitaciones fueron inferiores a las de agosto, se alcanzaron también Tr superiores a 100 años en varias estaciones, con máximos de 500 años para Potrero Grande en la duración de 12 horas. Este evento destaca por su rápida concentración en Los Queñes y Potrero Grande, ya que el grueso de la lluvia se concentró en apenas 12 horas, generando respuestas hidrológicas rápidas en la cuenca.

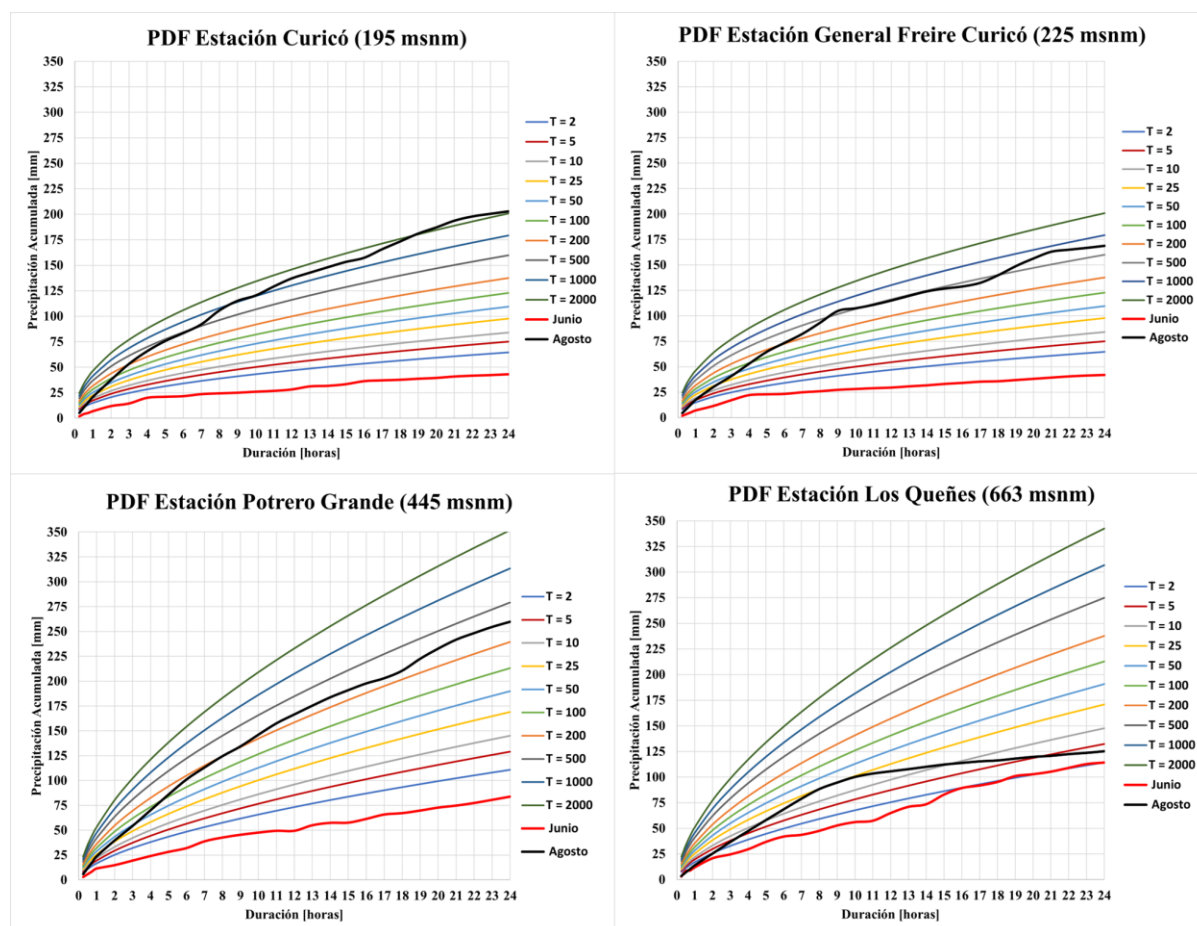


Figura 19. Período de retorno asociado a distintas duraciones de precipitación durante las tormentas del 21–24 de junio y 18–23 de agosto de 2023, representadas por las curvas PDF de (a) Curicó (b) General Freire en Curicó (c) Potrero Grande (d) Los Queñes.

Desde una perspectiva comparativa, se puede afirmar que el evento de agosto fue más prolongado y extremo, mientras que el evento de junio fue más abrupto y concentrado. Las estaciones de valle, tradicionalmente menos expuestas a precipitaciones intensas, presentaron en agosto los mayores períodos de retorno, lo cual explica los impactos severos en infraestructura urbana en zonas como Curicó, Licantén y Molina.

7.9 Análisis de frecuencia de caudales máximos

7.9.1 Evaluación estadística del ajuste de bondad de las distribuciones

Los resultados del ajuste estadístico de las distribuciones de probabilidad Gumbel, Log-Normal y Pearson Tipo III se presentan en la Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8. En términos generales, las tres distribuciones mostraron un ajuste estadísticamente aceptable para las estaciones fluviométricas analizadas, según los valores obtenidos en las pruebas de Kolmogorov–Smirnov (K–S) y Chi-cuadrado (χ^2), bajo un nivel de significancia del 5 %.

Tabla 6. Evaluación del ajuste estadístico de la distribución Gumbel para los caudales máximos mediante la prueba de Kolmogorov–Smirnov (K-S) y Chi-cuadrado (χ^2).

Estación	K-S			Chi-cuadrado		
	D	Dc	Resultado	χ^2	$\chi^2_{critico}$	Resultado
Río Mataquito en Licantén	0.10	0.25	No se rechaza Ho	2.66	3.84	No se rechaza Ho
Río Teno junta con Claro	0.15	0.25	No se rechaza Ho	5.18	3.84	Se rechaza Ho

Tabla 7. Evaluación del ajuste estadístico de la distribución Log-Normal para los caudales máximos mediante la prueba de Kolmogorov–Smirnov (K-S) y Chi-cuadrado (χ^2).

Estación	K-S			Chi-cuadrado		
	D	Dc	Resultado	χ^2	$\chi^2_{critico}$	Resultado
Río Mataquito en Licantén	0.14	0.25	No se rechaza Ho	3.47	3.84	No se rechaza Ho
Río Teno junta con Claro	0.15	0.25	No se rechaza Ho	3.93	3.84	Se rechaza Ho

Tabla 8. Evaluación del ajuste estadístico de la distribución Pearson Tipo III para los caudales máximos mediante la prueba de Kolmogorov–Smirnov (K-S) y Chi-cuadrado (χ^2).

Estación	K-S			Chi-cuadrado		
	D	Dc	Resultado	χ^2	$\chi^2_{critico}$	Resultado
Río Mataquito en Licantén	0.11	0.25	No se rechaza Ho	2.60	3.84	No se rechaza Ho
Río Teno junta con Claro	0.14	0.25	No se rechaza Ho	2.95	3.84	No se rechaza Ho

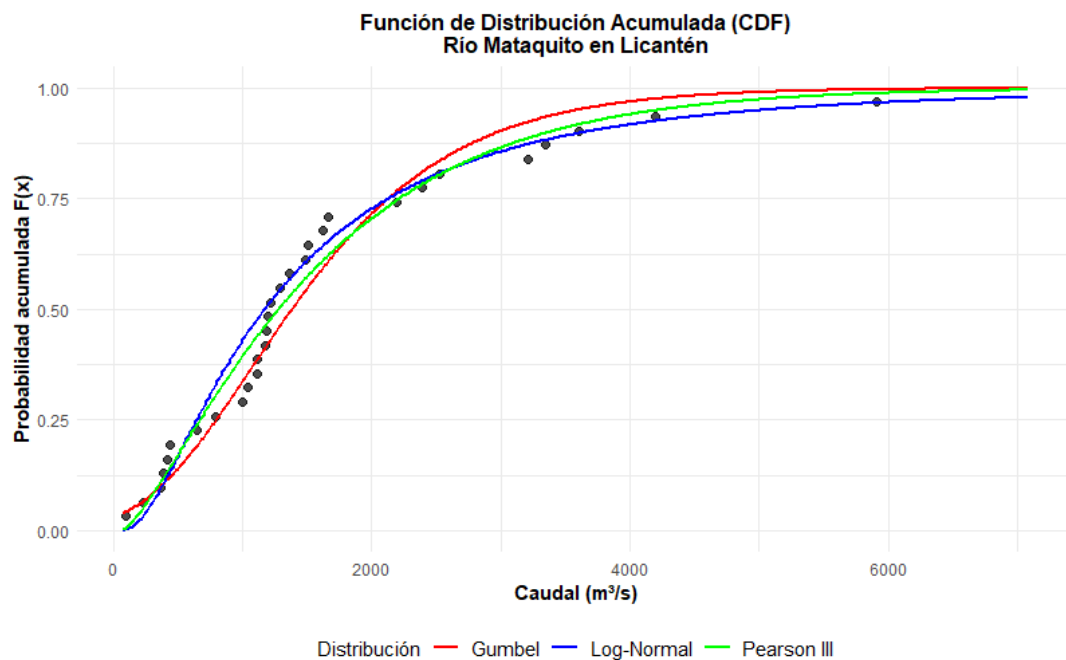


Figura 20. Función de Distribución Acumulada (CDF) de caudales máximos anuales ajustados a las distribuciones Gumbel, Log-Normal y Pearson tipo III en la estación Río Mataquito en Licantén.

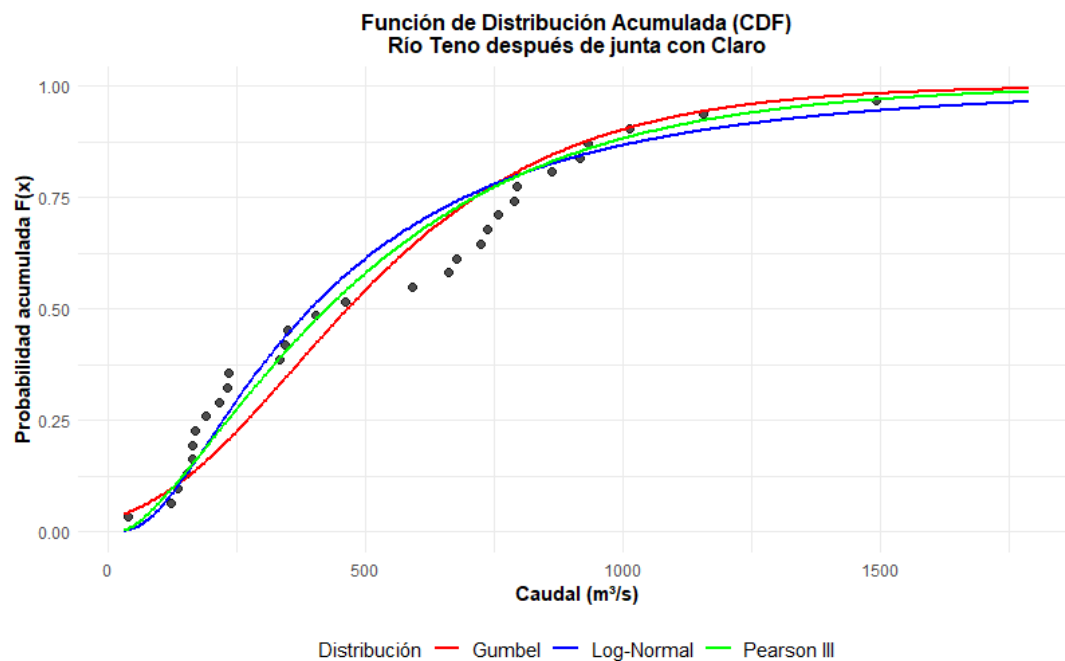


Figura 21. Función de Distribución Acumulada (CDF) de caudales máximos anuales ajustados a las distribuciones Gumbel, Log-Normal y Pearson tipo III en la estación Río Teno después de junta con Claro.

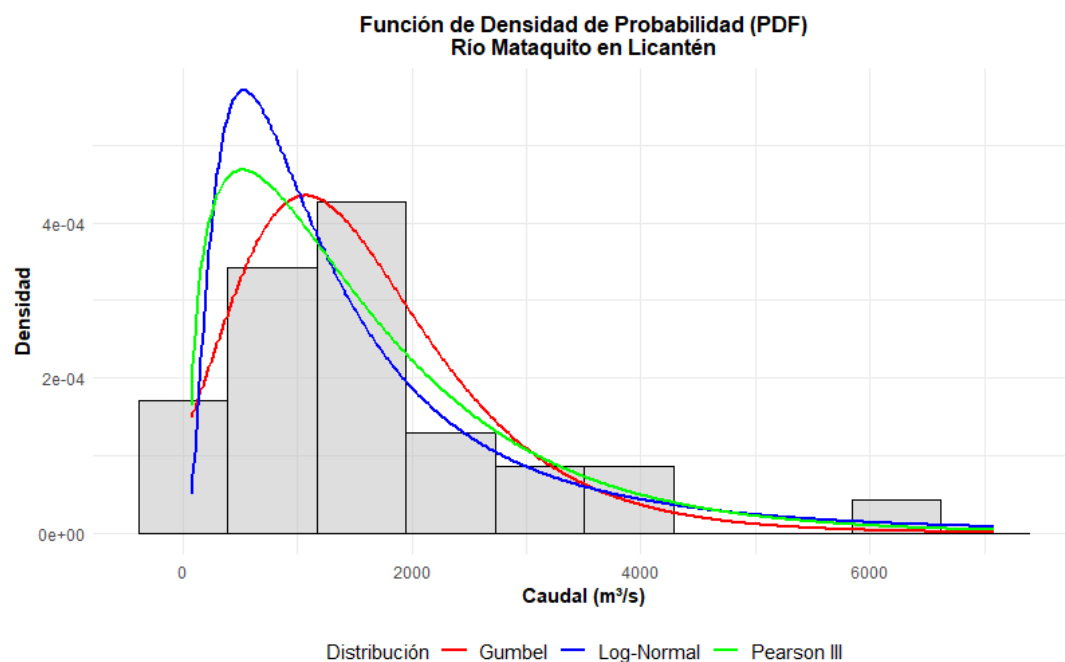


Figura 22. Función de Densidad de Probabilidad (PDF) de caudales máximos anuales ajustados a las distribuciones Gumbel, Log-Normal y Pearson tipo III en la estación Río Mataquito en Licantén.

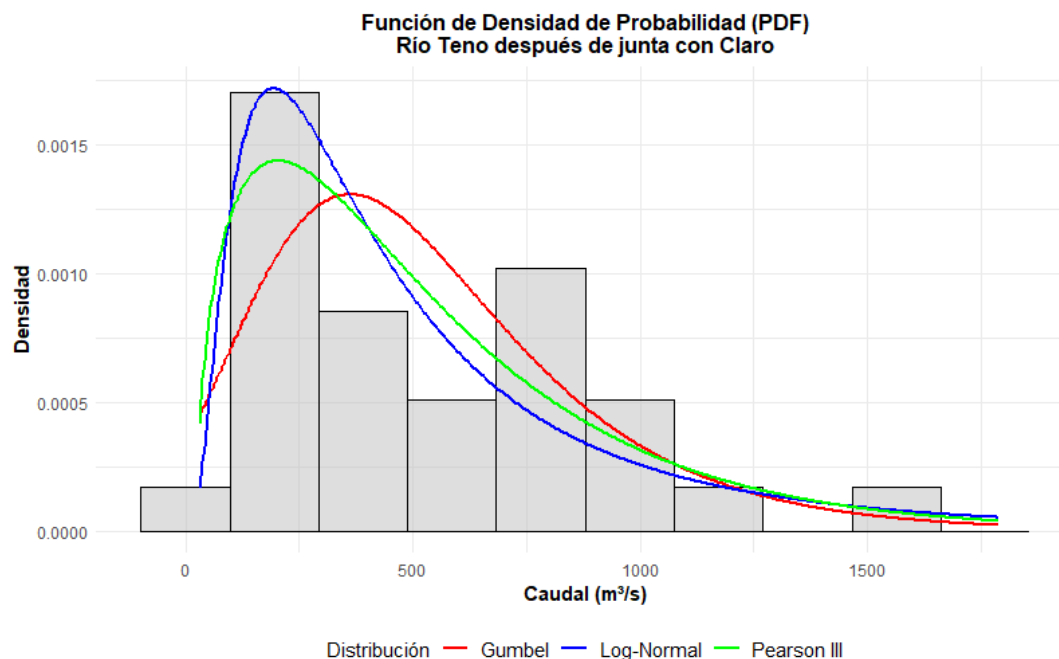


Figura 23. Función de Densidad de Probabilidad (PDF) de caudales máximos anuales ajustados a las distribuciones Gumbel, Log-Normal y Pearson tipo III en la estación Río Teno después de junta con Claro.

En la estación Río Mataquito en Licantén, las tres distribuciones superaron los criterios de aceptación, sin rechazo de la hipótesis nula de buen ajuste. La Pearson Tipo III obtuvo los valores más bajos de los estadísticos ($K-S = 0.11$; $\chi^2 = 2.60$), indicando la mejor correspondencia global entre los datos y la función teórica. Sin embargo, el análisis visual de la Figura 20 y Figura 21 revela que la distribución Gumbel representa de mejor forma la cola derecha de máximos, capturando adecuadamente los valores extremos del registro, incluido el caudal máximo de 2023 ($Q = 5904.55 \text{ m}^3/\text{s}$). La Log-Normal, por su parte, tiende a subestimar los valores más altos y a sobreajustarse en la zona central del histograma.

En la estación Río Teno después de junta con Claro, las tres distribuciones mantuvieron un ajuste estadísticamente aceptable (Figura 22 y Figura 23). La Pearson Tipo III mostró nuevamente el mejor desempeño global ($K-S = 0.14$; $\chi^2 = 2.95$), mientras que la Gumbel reprodujo mejor la forma de la cola superior, lo que la hace más adecuada para la estimación de eventos extremos raros, pese a ligeras diferencias en el ajuste general. La Log-Normal exhibió una mayor dispersión en la zona de bajas probabilidades, sobreestimando los caudales intermedios.

En conjunto, los resultados de las pruebas estadísticas y del análisis gráfico confirman que las tres distribuciones son adecuadas para describir el comportamiento de los caudales máximos anuales. Sin embargo, la distribución Gumbel se destaca como la más representativa para la modelación de eventos extremos, por su mejor ajuste visual en la cola de máximos y su coherencia hidrológica con el comportamiento observado en la cuenca del río Mataquito.

7.9.2 Estimaciones de caudales máximos por período de retorno

Las estimaciones de caudales máximos para diferentes períodos de retorno se presentan en la Tabla 9 y Tabla 10. Los resultados evidencian comportamientos marcadamente diferentes entre las tres distribuciones, especialmente para períodos de retorno superiores a 100 años. Esta divergencia resulta fundamental para la evaluación de eventos extremos como los ocurridos durante 2023.

Tabla 9. Caudales máximos asociados a períodos de retorno, en la estación Río Mataquito en Licantén en m³/s

Período de Retorno	Probabilidad de Excedencia	Probabilidad de no Excedencia	Gumbel	Log-Normal	Pearson III
10	0.1	0.9	2913.85	3538.67	3335.03
20	0.05	0.95	3515.09	4891.45	4135.56
30	0.033	0.967	3860.97	5789.00	4592.74
50	0.02	0.98	4293.34	7041.72	5159.99
100	0.01	0.99	4876.53	8977.88	5917.48
200	0.005	0.995	5457.59	11213.01	6664.02
500	0.002	0.998	6224.19	14679.93	7637.99

En la estación de Licantén se observa un comportamiento claramente diferenciado entre las tres distribuciones analizadas. Los caudales estimados aumentan progresivamente con el período de retorno, evidenciando diferencias sustanciales entre los modelos probabilísticos aplicados.

La distribución de Gumbel proporciona estimaciones consistentes y razonables para todos los períodos de retorno evaluados. Para un período de retorno de 100 años, Gumbel estima un caudal de 4.876,53 m³/s, mientras que para 500 años alcanza 6.224,19 m³/s, mostrando un crecimiento gradual y coherente con el comportamiento esperado de eventos extremos hidrológicos. Esta distribución presenta la ventaja de no generar estimaciones excesivamente altas que podrían carecer de fundamento, manteniendo una relación proporcional entre la probabilidad de excedencia y la magnitud del evento.

Por el contrario, la distribución Log-Normal presenta estimaciones que podrían considerarse excesivamente elevadas, especialmente para períodos de retorno superiores a 100 años. Como se observa en las Figura 20 y Figura 21, esta distribución sobrestima la cola de los máximos, generando valores que exceden los caudales empíricos registrados. Para un período de 500 años, esta distribución estima un caudal de 14.679,93 m³/s, superando en 8.455,74 m³/s a la estimación de Gumbel. Está marcada diferencia (136% superior) sugiere que la distribución Log-Normal tiende a sobreestimar los eventos extremos, generando estimaciones que carecen de respaldo en el registro histórico y que podrían llevar a sobredimensionamientos innecesarios en el diseño de infraestructura.

La distribución Pearson Tipo III, aunque se posiciona como una alternativa intermedia, presenta estimaciones que para algunos períodos de retorno podrían considerarse elevadas. Para el período de 500 años, esta distribución estima 7.637,99 m³/s, valor que representa un incremento del 23% respecto a Gumbel.

Tabla 10. Caudales máximos asociados a períodos de retorno, en la estación Río Teno en Junta con Claro en m³/s

Período de Retorno	Probabilidad de Excedencia	Probabilidad de no Excedencia	Gumbel	Log-Normal	Pearson III
10	0.1	0.9	969.94	1126.64	1003.65
20	0.05	0.95	1169.17	1533.69	1179.54
30	0.033	0.967	1283.78	1800.71	1275.77
50	0.02	0.98	1427.04	2170.19	1391.76
100	0.01	0.99	1620.29	2735.31	1541.79
200	0.005	0.995	1812.82	3380.58	1685.19
500	0.002	0.998	2066.84	4369.81	1866.86

El análisis de la estación Río Teno después de la junta con Claro confirma la tendencia observada en Licantén, donde la distribución Gumbel demuestra un comportamiento más estable y coherente en la

estimación de caudales extremos. Como se aprecia en la Figura 22 y Figura 23, Gumbel ajusta adecuadamente la cola de máximos, manteniendo una relación proporcional entre probabilidad de excedencia y magnitud del caudal, a diferencia de la Log-Normal, que tiende a sobreestimar los valores más altos. Este resultado concuerda con los estadísticos presentados en la Tabla 10, donde Gumbel produce valores graduales y consistentes desde 969,94 m³/s para un período de 10 años hasta 2.066,84 m³/s para 500 años, reflejando un crecimiento estable respecto a la ubicación aguas arriba de la estación. Por su parte, la distribución Pearson Tipo III entrega estimaciones intermedias, alcanzando 1.866,86 m³/s para el período de 500 años, lo que representa una diferencia aproximada del 10 % respecto de Gumbel. Si bien esta variación es moderada, sugiere una leve tendencia a la subestimación de los eventos de baja probabilidad, reforzando la consistencia de Gumbel como la alternativa más estable y representativa para describir los caudales extremos del río Teno.

Los resultados obtenidos en ambas estaciones evidencian que la distribución Gumbel logra el mejor equilibrio entre realismo estadístico y coherencia hidrológica. Su desempeño refleja un crecimiento gradual de los caudales estimados con el período de retorno y una adecuada representación de la cola de máximos observada en los registros empíricos. En contraste, la Log-Normal tiende a sobreestimar significativamente los eventos anómalos, mientras que la Pearson Tipo III los subestima levemente en los períodos más largos. Por lo tanto, la selección de Gumbel como modelo de referencia se sustenta en su consistencia estadística, su adecuada correspondencia con la evidencia gráfica y su capacidad para reproducir con estabilidad los valores extremos observados. Estos criterios, en conjunto, la posicionan como la alternativa más apropiada para el análisis de frecuencia de caudales máximos en la región del Maule.

7.9.3 Análisis de los eventos extremos de 2023

La Tabla 11 y Tabla 12 presentan los períodos de retorno calculados para los caudales máximos registrados durante los eventos de crecida de junio y agosto de 2023, respectivamente. Sin embargo, es importante destacar que las estaciones fluviométricas presentaron fallas operativas durante estos eventos, dejando de funcionar correctamente en momentos cruciales, lo que imposibilitó medir íntegramente la magnitud de las crecidas en cada sección de medición.

Tabla 11. Períodos de retorno obtenidos para cada método de análisis de frecuencia empleado utilizando el valor del caudal máximo junio del 2023.

Estación	Qmax [m ³ /s]	Gumbel	Log-Normal	Pearson III
Río Mataquito en Licantén	5529.92	218	27	70
Río Teno junta con Claro	925.25	9	7	8

Tabla 12. Períodos de retorno obtenidos para cada método de análisis de frecuencia empleado utilizando el valor del caudal máximo agosto del 2023.

Estación	Qmax [m ³ /s]	Gumbel	Log-Normal	Pearson III
Río Mataquito en Licantén	5904.55	341	32	99
Río Teno junta con Claro	744.18	5	5	4

Al contrastar los valores observados durante los eventos de crecida de 2023 con las estimaciones obtenidas para los distintos períodos de retorno, se confirma el carácter altamente excepcional de dichos eventos, especialmente en la estación Río Mataquito en Licantén. Como se mencionó anteriormente, en junio, esta estación registró un caudal de 5.529,92 m³/s, y en agosto, un máximo de 5.904,55 m³/s. Según la distribución Gumbel, estos caudales corresponden a eventos de 218 y 341 años de retorno, respectivamente. En contraste, las distribuciones Log-Normal y Pearson Tipo III arrojaron estimaciones considerablemente menores, subestimando la rareza de estos fenómenos.

En el caso de la estación Río Teno en Junta con Claro, los caudales fueron 925,25 m³/s en junio y 744,18 m³/s en agosto, y se asociaron a períodos de retorno mucho más bajos, en torno a los 4 a 9 años según

las distintas distribuciones. Este contraste entre ambas estaciones resalta tanto la variabilidad espacial de los impactos como la sensibilidad hidrológica diferencial en la cuenca del Mataquito.

Este análisis evidencia que los eventos de 2023 se posicionan coherentemente en el rango superior de las estimaciones de períodos de retorno, validando la consistencia del modelo Gumbel. La ocurrencia de dos crecidas con períodos de retorno superiores a 200 años en un mismo año constituye un fenómeno estadísticamente extraordinario que plantea interrogantes sobre la validez de los criterios de diseño actuales.

7.10 Verificación de caudales de diseño en obras hidráulicas urbanas del Maule

Con el propósito de verificar la suficiencia de los caudales de diseño utilizados en las obras hidráulicas urbanas de la cuenca del río Mataquito, se realizó una comparación entre los caudales máximos estimados mediante la distribución Gumbel y los valores de diseño adoptados en estudios y proyectos históricos desarrollados en la cuenca. Esta evaluación permitió determinar si las condiciones de diseño tradicional continúan siendo adecuadas frente a los caudales registrados durante los eventos invernales de 2023, caracterizados por intensidades excepcionales y altos períodos de retorno. Los antecedentes considerados para esta verificación se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Comparación de caudales máximos estimados por diferentes estudios en la cuenca del Mataquito

Período de Retorno (Años)	Prisma Ingeniería. (2003)	Ingeniería Cuatro Ltda. (2006)	Cruz (2008)	Amaro y Jara Ingenieros. (2010)
5	2159	2800	2713	2838
10	2729	3900	3457	3566
25	3449	5400	4213	4554
50	3983	6400	5095	5302
100	4514	7600	5787	6023
200	5024	8700	6477	6772

Para períodos de retorno de 50, 100 y 200 años, las estimaciones obtenidas mediante la distribución Gumbel (4293.34, 4876.53 y 5457.59 m³/s, respectivamente) muestran una alta concordancia con los resultados reportados por Prisma Ingeniería Ltda. (2003) y Cruz (2008), mientras que difieren significativamente de los valores estimados por Ingeniería Cuatro Ltda. (2006), cuyas proyecciones son sistemáticamente superiores. Estas diferencias se explican por variaciones en la longitud de las series hidrométricas utilizadas, en los criterios de selección de eventos extremos y en las metodologías de ajuste aplicadas por cada autor.

Los resultados permiten establecer una relación directa entre las precipitaciones extremas de 2023 y los caudales observados, ya que, según el análisis de curvas PDF (Sección 7.7), las estaciones de valle (Curicó y General Freire) alcanzaron períodos de retorno superiores a 2000 años para duraciones de 24 horas, mientras que en estaciones precordilleranas como Potrero Grande y Los Queñes los valores oscilaron entre 200 y 500 años. Este comportamiento hidrológico extremo generó volúmenes de escorrentía muy superiores a los supuestos de diseño urbano convencional, incrementando significativamente los caudales máximos en la cuenca.

En consecuencia, los caudales de diseño históricamente adoptados en las obras hidráulicas urbanas del río Mataquito, basados en recurrencias de 50 a 100 años, fueron ampliamente superados durante las tormentas del invierno de 2023. Infraestructuras como colectores pluviales, canales de evacuación y sistemas de drenaje urbano resultaron insuficientes para conducir los volúmenes generados, provocando anegamientos y sobrecargas hidráulicas en zonas urbanas de Curicó, Licantén y Molina. Esta condición evidenció la limitada capacidad del sistema urbano ante precipitaciones de magnitud excepcional.

Frente a esta situación, se vuelve especialmente relevante extender el análisis hacia infraestructuras mayores, como defensas fluviales y puentes, cuya falla o sobrepaso puede ocasionar impactos estructurales y económicos severos. Un ejemplo emblemático corresponde al puente Lautaro, ubicado entre las comunas de Licantén y Curepto, el cual presentó daños estructurales considerables durante el evento de agosto de 2023 debido a los elevados caudales y procesos de socavación del cauce (CIGIDEN, 2023).

Finalmente, los resultados confirman que los eventos de junio y agosto de 2023 superaron ampliamente los umbrales de diseño tradicional de la infraestructura urbana y vial en Chile, donde se adoptan generalmente períodos de retorno entre 25 y 100 años para drenaje urbano (MOP, 2013; MINVU, 2005; SERVIU, 2005) y de hasta 100–200 años para puentes y defensas fluviales (MDSF, 2013; MOP, 2018). Esta evidencia plantea desafíos urgentes para la gestión del riesgo hídrico y la planificación urbana, demostrando la necesidad de revisar los criterios normativos de diseño, actualizar los períodos de retorno empleados e incorporar consideraciones de estacionariedad y cambio climático en la proyección de caudales máximos.

8 Conclusiones

El análisis de los eventos de junio y agosto de 2023 en la Región del Maule permitió confirmar que se trató de precipitaciones y crecidas de carácter excepcional, ampliamente superiores a los registros históricos disponibles. En particular, agosto se constituyó como el mes más lluvioso del período 2004–2023, con acumulados que superaron los 330 mm en estaciones de valle y 450 mm en estaciones cordilleranas, lo que duplicó e incluso triplicó los valores promedios históricos. Estas precipitaciones extremas derivaron en caudales máximos sin precedentes, alcanzando 5904,55 m³/s en la estación Licantén del río Mataquito, equivalentes a un período de retorno superior a 300 años bajo la distribución de Gumbel.

El análisis de las series hidrometeorológicas (1984–2023) evidenció que los eventos de 2023 constituyen una anomalía positiva dentro de una tendencia general decreciente de las precipitaciones anuales, y un aumento sostenido de la temperatura promedio. Este comportamiento confirma la existencia de un proceso de cambio climático regional, donde las condiciones cálidas del ENSO intensificaron temporalmente el régimen pluviométrico, pero no modificaron la señal descendente de largo plazo. La correlación positiva, aunque moderada, entre el índice Niño 3.4 y las precipitaciones invernales ($r = 0,35$; $p < 0,05$) refuerza la influencia condicionante del fenómeno en la ocurrencia de eventos extremos como los de 1997, 2002, 2015 y 2023.

Desde la perspectiva hidrológica, los análisis de frecuencia mostraron que las distribuciones Gumbel y Pearson Tipo III se ajustan de manera robusta a los datos, siendo Gumbel la que ofrece la mejor representación de los caudales extremos observados. Las estimaciones de períodos de retorno confirman que los eventos de 2023 superaron ampliamente los parámetros de diseño tradicionalmente adoptados en infraestructura urbana y vial, los cuales suelen considerar horizontes de 25 a 100 años. La ocurrencia de dos crecidas con retornos superiores a 200 años en un mismo año constituye un fenómeno estadísticamente extraordinario que evidencia la limitación de los caudales de diseño vigentes y la necesidad urgente de revisarlos.

La verificación de los caudales de diseño de obras hidráulicas urbanas en la cuenca del río Mataquito permitió constatar que infraestructuras como colectores pluviales, canales de drenaje y sistemas de evacuación urbana fueron ampliamente superadas durante las tormentas de 2023. Asimismo, se identificaron impactos estructurales en obras mayores, como el puente Lautaro en Licantén, afectado por socavación y sobrepaso del cauce, lo que demuestra que incluso las estructuras diseñadas con períodos de retorno de 100 a 200 años resultaron insuficientes frente a la magnitud de los eventos.

Los resultados confirman que la vulnerabilidad de la infraestructura urbana y fluvial del Maule se encuentra subestimada frente a la magnitud real de los fenómenos hidrometeorológicos extremos. Esta memoria enfatiza la importancia de actualizar los criterios de diseño, incorporando metodologías basadas en registros recientes y considerando la influencia de fenómenos climáticos globales como ENSO.

9 Referencias

- Aguilera, M. (2007). *Estimación de funciones de distribución de probabilidad, para caudales máximos Región del Maule*.
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6), 661–675. <https://doi.org/10.1002/JOC.3370060607>
- Amaro y Jara Ingenieros. (2010). *Ampliación Red Fluviométrica Cuenca Hidrográfica Río Mataquito. Informe Final. DGA, División de Estudios y Planificación*.
- Ashkar, F., Ouarda, T. B. , & Roy, R. B. B. (1993). Robust estimators in hydrologic frequency analysis. . *In Engineering Hydrology. ASCE.*, 347–352.
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1). <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., Van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santoso, A., Mcphaden, M. J., Wu, L., England, M. H., Wang, G., Guilyardi, E., & Jin, F. F. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 4(2). <https://doi.org/10.1038/nclimate2100>
- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y. G., Santoso, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H. S., Marengo, J. A., Alves, L. M., Osman, M., Li, S., ... Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment* 2020 1:4, 1(4), 215–231. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>
- Cai, W., Wang, G., Santoso, A., Mcphaden, M. J., Wu, L., Jin, F. F., Timmermann, A., Collins, M., Vecchi, G., Lengaigne, M., England, M. H., Dommenges, D., Takahashi, K., & Guilyardi, E. (2015). Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(2), 132–137. <https://doi.org/10.1038/nclimate2492>
- Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN). (2023). *Inundaciones 21-26 junio 2023 Cuencas del Río Mataquito y Río Maule (Región del Maule)*.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Editorial McGraw-Hill. 584 p.
- Collins, M., An, S. Il, Cai, W., Ganachaud, A., Guilyardi, E., Jin, F. F., Jochum, M., Lengaigne, M., Power, S., Timmermann, A., Vecchi, G., & Wittenberg, A. (2010). The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. *Nature Geoscience* 2010 3:6, 3(6), 391–397. <https://doi.org/10.1038/ngeo868>
- CR2. (2025). *Explorador Climático*. <https://explorador.cr2.cl/>
- Cruz, C. (2008). *Análisis crecida río Mataquito y tributarios, 22 y 23 de mayo de 2008. Informe Técnico DGA Región del Maule, Junio 2008*.
- Dai, A., & Wigley, T. M. L. (2000). Global patterns of ENSO-induced precipitation. *Geophysical Research Letters*, 27(9). <https://doi.org/10.1029/1999GL011140>
- DGA. (2025). *Sistema Hidrométrico en Línea | Dirección General de Aguas*. <https://dga.mop.gob.cl/sistema-hidrometrico-en-linea/>
- Falvey, M., & Garreaud, R. (2007). Wintertime Precipitation Episodes in Central Chile: Associated Meteorological Conditions and Orographic Influences. *Journal of Hydrometeorology*, 8(2), 171–193. <https://doi.org/10.1175/JHM562.1>
- Favier, V., Falvey, M., Rabatel, A., Praderio, E., & López, D. (2009). Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of chile's norte chico region (26–32°S). *Water Resources Research*, 45(2), 2424. <https://doi.org/10.1029/2008WR006802>

- Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22, 3–11. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Pablo Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/HESS-21-6307-2017>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, | Roberto, Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Daniel Veloso-Aguila, |. (2019). The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *Int J Climatol*. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- González-Reyes, Á. (2016). Ocurrencia de eventos de sequías en la ciudad de Santiago de Chile desde mediados del siglo XIX. *Revista de Geografía Norte Grande*, 64, 21–32. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000200003>
- Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C., & Wallis, J. R. (1979). Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research*, 15(5), 1049–1054. <https://doi.org/10.1029/WR015I005P01049>
- Gregersen, I. B., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2012). Decision strategies for handling the uncertainty of future extreme rainfall under the influence of climate change. *Water Science and Technology*, 66(2), 284–291. <https://doi.org/10.2166/WST.2012.173>
- Guijarro, J. A. (2024, April 5). *The climatol R package*. <https://climatol.eu/>
- Hamed, K. H., & Ramachandra Rao, A. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1–4), 182–196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). Chapter A3 - Statistical Methods in Water Resources, Book 4 - Hydrologic Analysis and Interpretation. In *Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey*.
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: An approach based on L-moments*. Cambridge University Press.
- Ingeniería Cuatro Ltda. (2006). *Informe Hidráulico e Hidrológico y Mecánico Fluvial Actualizado. Puente Mataquito (Ruta Costera)*. MOP-DOH.
- IPCC, (2021). *The Physical Science Basis Summary for Policymakers Technical Summary Frequently Asked Questions Glossary Part of the Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Edited by*. www.ipcc.ch
- IPCC, (2023). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*, 1513–1766. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J. I., Bates, P. D., Feyen, L., Gericke, A., Neal, J., Aerts, J. C. J. H., & Ward, P. J. (2012). Comparative flood damage model assessment: Towards a European approach. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(12), 3733–3752. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3733-2012>
- Katz, R. W., & Brown, B. G. (1992). Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Climatic Change*, 21(3), 289–302. <https://doi.org/10.1007/BF00139728/METRICS>
- Katz, R. W., Parlange, M. B., & Naveau, P. (2002). Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25(8–12). [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00056-8)
- Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods. *Griffin*.

- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., & Manetas, A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206(1–2), 118–135. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00097-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00097-3)
- Kundzewicz, Z. W., & Robson, A. J. (2004). Change detection in hydrological records—a review of the methodology / Revue méthodologique de la détection de changements dans les chroniques hydrologiques. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), 7–19. <https://doi.org/10.1623/HYSJ.49.1.7.53993>
- Levene, H. (1960). Robust tests for equality of variances. *Contributions to Probability and Statistics: Essays in ...*, 69(346).
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. <https://doi.org/10.1214/Aoms/1177730491>, 18(1), 50–60. <https://doi.org/10.1214/AOMS/1177730491>
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Le Quesne, C., & Aravena, J. C. (2006). Snowpack Variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-Scale Atmospheric Influences and Implications for Water Resources in the Region. *Journal of Climate*, 19(24), 6334–6352. <https://doi.org/10.1175/JCLI3969.1>
- McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H. (2006). ENSO as an Integrating Concept in Earth Science. *Science*. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1132588>
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Climate change: Stationarity is dead: Whither water management? In *Science* (Vol. 319, Issue 5863, pp. 573–574). <https://doi.org/10.1126/science.1151915>
- Ministerio de Desarrollo Social (MDSF). (2013). *METODOLOGÍA DE PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE DEFENSAS FLUVIALES*.
- Ministerio de Obras Públicas. (2021). *Plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático 2017–2022*.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2013). *Manual de drenaje urbano*.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2018a). *Diagnóstico de la vulnerabilidad de las obras del MOP y medidas de adaptación al cambio climático*. <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/handle/20.500.12140/32598>
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2018b). *MANUAL DE CARRETERAS, CAPITULO 3.1000 PUENTES Y ESTRUCTURAS AFINES*.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (2005). *GUIA DE DISEÑO Y ESPECIFICACIONES DE ELEMENTOS URBANOS DE INFRAESTRUCTURA DE AGUAS LLUVIAS*.
- Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003a). Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate*, 16(2), 281–296. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016)
- Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003b). *Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies*.
- National Center for Atmospheric Research (NCAR). (2024). *Nino SST Indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI) | Climate Data Guide*. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>

- NOAA. (2024, November 24). *Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time Series: NOAA Physical Sciences Laboratory*. <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>
- Paulhus, J. L. H., & Kohler, M. A. (1952). INTERPOLATION OF MISSING PRECIPITATION RECORDS. *Monthly Weather Review*, 80(8), 129–133.
- Pearson, K. (1896). VII. Mathematical contributions to the theory of evolution.—III. Regression, heredity, and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 187, 253–318. <https://doi.org/10.1098/RSTA.1896.0007>
- Pizarro, R., Sangüesa, C., Bjarne, P., Ingram, B., Vera, M., Vallejos, C., Morales, C., Olivares, C., Balocchi, F., Fuentes, R., Mendoza, R., Abarza, A., & Valdés, R. (2013). *Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas PHI-VII / Documentos Técnicos del N° 29*.
- Prisma Ingeniería. (2003). *Plan Maestro de Manejo de Cauces Cuenca Río Mataquito. MOP-DOH VII Región*.
- Puertas, O. L., Carvajal, Y., & Quintero, M. (2011). STUDY OF MONTHLY RAINFALL TRENDS IN THE UPPER AND MIDDLE CAUCA RIVER BASIN, COLOMBIA. *DYNA*, 78(169), 112–120. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000500013&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Quintana, J. M., & Aceituno, P. (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43o S. In *Atmósfera* (Vol. 25, Issue 1).
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J. E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., ... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/TC-7-81-2013>,
- Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P., Kent, E. C., & Kaplan, A. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(14). <https://doi.org/10.1029/2002jd002670>
- Rodríguez-Iturbe, I., & Mejía, J. M. (1974). The design of rainfall networks in time and space. *Water Resources Research*, 10(4), 713–728. <https://doi.org/10.1029/WR010I004P00713>
- Salas, J. D., & Obeysekera, J. (2013). Revisiting the Concepts of Return Period and Risk for Nonstationary Hydrologic Extreme Events. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3), 554–568. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000820](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000820)
- Santoso, A., Mcphaden, M. J., & Cai, W. (2017). The Defining Characteristics of ENSO Extremes and the Strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1079–1129. <https://doi.org/10.1002/2017RG000560>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- 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>
- Servicio de Vivienda y Urbanización Metropolitana (SERVIU). (2005). *Capítulo No 5 DISEÑO DE AGUAS LLUVIAS URBANOS*.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), 591–611. <https://doi.org/10.1093/BIOMET/52.3-4.591>

- Theil, H. (1992). *A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis*. 345–381. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2546-8_20
- Trenberth, K. E. (1997). The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12). [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2)
- Viale, M., & Garreaud, R. (2015). Orographic effects of the subtropical and extratropical andes on upwind precipitating clouds. *Journal of Geophysical Research*, 120(10), 4962–4974. <https://doi.org/10.1002/2014JD023014>
- Wang, C., Deser, C., Yu, J. Y., DiNezio, P., & Clement, A. (2017). El Niño and Southern Oscillation (ENSO): A Review. In *Coral Reefs of the World* (Vol. 8). https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_4
- Wang, F., Shao, W., Yu, H., Kan, G., He, X., Zhang, D., Ren, M., & Wang, G. (2020). Re-evaluation of the Power of the Mann-Kendall Test for Detecting Monotonic Trends in Hydrometeorological Time Series. *Frontiers in Earth Science*, 8, 494616. <https://doi.org/10.3389/FEART.2020.00014/BIBTEX>
- Zhou, Q. (2014). A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. *Water 2014*, Vol. 6, Pages 976–992, 6(4), 976–992. <https://doi.org/10.3390/W6040976>
- Zscheischler, J., Westra, S., Van Den Hurk, B. J. J. M., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., Aghakouchak, A., Bresch, D. N., Leonard, M., Wahl, T., & Zhang, X. (2018). Future climate risk from compound events. In *Nature Climate Change* (Vol. 8, Issue 6, pp. 469–477). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>