



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería Agrícola - Programa de Doctorado en Ingeniería Agrícola  
mención Recursos Hídricos en la Agricultura

**Comportamiento espacial y temporal de los eventos  
extremos de precipitación, en monto e intensidad para  
duraciones desde los 15 minutos hasta las 24 horas en la  
Región del Maule, Chile.**

Tesis para optar al grado de Doctor en Ingeniería Agrícola con  
mención en Recursos Hídricos en la Agricultura

CLAUDIA BEATRIZ SANGÜESA POOL  
CHILLAN-CHILE  
2019

Profesor Guía: Diego Rivera Salazar  
Dpto. de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Comportamiento espacial y temporal de los eventos extremos de precipitación, en monto e intensidad para duraciones desde los 15 minutos hasta las 24 horas en la Región del Maule, Chile.

Tesis aprobada por:

Diego Rivera Salazar

Ingeniero Civil, Doctor

---

Profesor Guía

Roberto Pizarro Tapia

Ingeniero Forestal, Doctor

---

Evaluador Externo

Eduardo Holzapfel Hoces

Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

---

Evaluador Interno

José Luis Arumí Ribera

Ingeniero Civil, Ph.D.

---

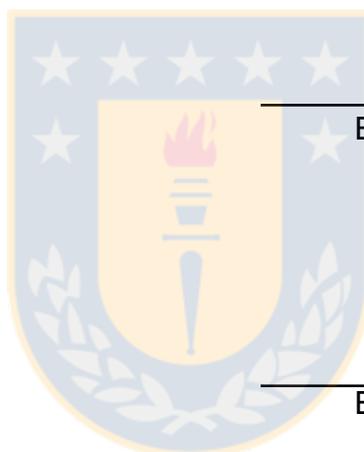
Evaluador Interno

Gabriel Merino Coria

Licenciado en Ciencias, Ph.D.

---

Director(s) de Programa





*A Agustín,  
la luz de mi alma,  
mi regalo de Dios*

## AGRADECIMIENTOS

A los colegas y amigos, por su constante motivación, enseñanzas y apoyo más allá de lo profesional, que me permitieron cumplir las distintas etapas de este trabajo, especialmente a Roberto, José Luis, Diego, Alfredo, Romina, Carlos y Ben; y a Bárbara por su meticuloso y constante trabajo.

Al Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca, por darme los elementos necesarios para concretar este proyecto.

A los proyectos INNOVA 09CN14-5809, FONDECYT 1160656 y CONICYT/FONDAP/15130015 por los recursos aportados para la realización del programa de doctorado.



## Tabla de contenido

Lista de figuras.....	vi
Lista de tablas.....	viii
RESUMEN.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Descripción del estudio.....	2
1.2. Aporte al conocimiento.....	2
1.3. Objetivos de la propuesta.....	3
II. ESTADO DEL ARTE.....	4
2.1. Área de estudio.....	4
2.2. Variabilidad climática.....	5
III. COMPORTAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL DE LAS INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITACIÓN PARA DURACIONES DESDE 15 MINUTOS A 24 HORAS. ....	10
3.1. Introducción.....	10
3.2. Materiales y métodos.....	10
3.2.1. Área de estudio.....	10
3.2.2. Procesamiento de datos.....	11
3.3. Resultados.....	16
3.4. Conclusiones.....	25
IV. COMPORTAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL DE CONCENTRACIÓN DE LLUVIAS: ÍNDICE DE GINI Y DE CONCENTRACIÓN DE PRECIPITACIONES.....	27
4.1. Introducción.....	27
4.2. Materiales y Métodos.....	27
4.3. Resultados.....	33
4.4. Conclusiones.....	44
V. ANÁLISIS DE EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EN LA ESTACIÓN POTRERO GRANDE, REGIÓN DEL MAULE. ....	46
5.1. Materiales y Métodos.....	47
5.1.1. Área de estudio.....	47
5.1.2. Metodología.....	48
5.2. Resultados y análisis.....	51

5.2.1. Descripción de los eventos .....	51
5.2.2. Análisis de tendencia de los eventos e intensidades máximas.....	59
5.3. Conclusiones .....	66
VI. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES .....	68
6.1. Conclusiones.....	68
6.2. Comentarios finales.....	69
VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	70
ANEXO 1: Artículo publicado.....	78
ANEXO 2: Artículo en revisión.....	95

### Lista de figuras

<b>Figura 3.1.</b> Diagrama de flujo del procesador de bandas pluviográficas .....	12
<b>Figura 3.2.</b> Estaciones pluviográficas disponibles en la Región del Maule y longitud de las series de datos. ....	14
<b>Figura 3.3.</b> Valores de intensidad máxima anual en mm/h para duraciones de 15, 30 y 45 minutos y 1, 2, 4, 6, 12 y 24 h obtenidos para el periodo 1974 – 2009.....	17
<b>Figura 3.4.</b> Intensidad máxima anual de precipitación para distintas duraciones en valores medios y desviación estándar respectiva, entre los años 1974 – 2009.....	18
<b>Figura 3.5.</b> Coeficiente de variación de las intensidades anuales máximas para cada duración, considerando los valores medios de todas las estaciones para el periodo.....	19
<b>Figura 3.6.</b> Coeficiente de correlación entre la intensidad máxima anual y la precipitación anual, para duraciones de 15 min, 1 h, 12 h y 24 h, en el periodo 1974 – 2009.....	20
<b>Figura 3.7.</b> Gráficos boxplot para de la intensidad máxima anual media para duraciones de 15, 30 y 45 min y 1, 2, 4, 6, 12 y 24 h, en el periodo 1974 – 2009, de las estaciones ordenadas por precipitación anual de menor a mayor.....	22
<b>Figura 3.8.</b> Mapa de tendencia (Mann Kendall) de intensidades máximas de precipitación para duraciones de 15, 30 y 45 min y 1, 2, 4, 6, 12 y 24 horas.....	23
<b>Figura 3.9.</b> Valor porcentual de las tendencias para todas las series analizadas.....	24
<b>Figura 3.10.</b> Frecuencia de ocurrencia de las intensidades máxima anual de todas las estaciones analizadas para distintas duraciones.....	25

<b>Figura 4.1.</b> Área de estudio y clasificación climática de Köppen-Geiger.....	28
<b>Figura 4.2.</b> Esquema de la metodología.....	29
<b>Figura 4.3.</b> Representación gráfica del coeficiente de Gini.....	30
<b>Figura 4.4.</b> Curva de Lorenz para 2 estaciones pluviográficas en el área de estudio, para el año 2016.....	34
<b>Figura 4.5.</b> Resultados del valor promedio de los coeficientes de Gini y de ICP para el periodo estudiado (1970-2016) en la zona árida-semiárida y húmeda-subhúmeda.....	35
<b>Figura 4.6.</b> Valores de a) PCI para 2 estaciones de la zona Árida-Semiárida y 2 de la zona Húmeda-Subhúmeda; b) GINI para 2 estaciones de la zona Árida-Semiárida y 2 de la zona Húmeda-Subhúmeda.....	36
<b>Figura 4.7.</b> Relación de la media del coeficiente de Gini e ICP respecto a las precipitaciones medias anuales para cada zona de estudio en el periodo 1970-2016.....	38
<b>Figura 4.8.</b> Promedio anual de días sin lluvias para el periodo analizado.....	39
<b>Figura 4.9.</b> Tendencias de los coeficientes de Gini y de ICP según Mann-Kendall.....	41
<b>Figura 4.10.</b> Tendencias Mann-Kendall encontradas para el coeficiente Gini.....	42
<b>Figura 4.11.</b> Tendencias de la prueba de Mann-Kendall para el ICP para ambas Zonas.....	43
<b>Figura 5.1.</b> Mapa de ubicación de la estación Potrero Grande.....	48
<b>Figura 5.2.</b> Distribución anual y estacional de la ocurrencia de los eventos de precipitación en la estación Potrero Grande en el periodo 1982 – 2009.....	52
<b>Figura 5.3.</b> Distribución de la frecuencia mensual de los eventos de precipitación para la estación Potrero Grande en el periodo 1982 – 2009.....	52
<b>Figura 5.4.</b> Monto total de precipitación caída por evento registrado en la estación Potrero Grande en el periodo 1982 – 2009.....	53
<b>Figura 5.5.</b> Monto de precipitación por evento para la estación Potrero Grande en el periodo 1982 – 2009.....	54
<b>Figura 5.6.</b> Duración de los eventos ocurridos en el periodo 1982 – 2009 en la estación Potrero Grande.....	54
<b>Figura 5.7.</b> Distribución de la duración media mensual de los eventos de precipitación para la estación Potrero Grande en el periodo 1982 – 2009.....	55
<b>Figura 5.8.</b> Intensidad de los eventos ocurridos en el periodo 1982 – 2009 en la estación Potrero Grande.....	55
<b>Figura 5.9.</b> Intensidad media mensual de los eventos ocurridos en el periodo 1982 – 2009 en la estación Potrero Grande.....	56

<b>Figura 5.10.</b> Promedio mensual de la intensidad máxima por evento para duraciones de 15, 30 y 45 minutos y 1, 2, 6, 12 y 24 h.....	58
<b>Figura 5.11.</b> Número de tendencias positivas y negativas a nivel mensual y anual de las variables relacionadas con las intensidades de precipitación.....	61
<b>Figura 5.12.</b> Número de tendencias positivas y negativas para las variables relacionadas con las intensidades de precipitación.....	62
<b>Figura 5.13.</b> Número de eventos extremos ocurridos en el periodo 1982 – 2009.....	64
<b>Figura 5.14.</b> Número de tendencias positivas y negativas para las variables relacionadas con las intensidades de precipitación.....	65

### Lista de tablas

<b>Tabla 4.1.</b> Correlaciones para Índice de Gini, Índice de Concentración de Precipitaciones y Precipitación media (Tau de Kendall).....	40
<b>Tabla 4.2.</b> Tendencias de las precipitaciones máximas en 24 horas por periodos (estival e invernal).....	43
<b>Tabla 5.1.</b> Rango de tiempo mínimo sin lluvias utilizado por diversos autores.....	49
<b>Tabla 5.2.</b> Tendencias temporales mensuales de las variables en estudio a través de Mann-Kendall.....	59
<b>Tabla 5.3.</b> Tendencias temporales estacionales de las variables en estudio a través de Mann-Kendall.....	63
<b>Tabla 5.4.</b> Tendencias temporales estacionales de las variables en estudio a través de Mann-Kendall.....	66

## RESUMEN

### Capítulo 1: **Comportamiento espacial y temporal de las intensidades máximas de precipitación para duraciones desde 15 minutos a 24 horas en la Región del Maule, Chile.**

La intensidad máxima de precipitación es un factor importante a la hora de determinar si se han producido cambios temporales y espaciales. Este estudio se basó en los registros obtenidos desde bandas pluviográficas para determinar las intensidades máximas anuales de precipitación para la Región del Maule, Chile, en 11 estaciones de medición y para duraciones de 15 minutos a 24 horas, entre los años 1974 y 2009. Se aplicaron pruebas estadísticas de posición y dispersión a estos datos, junto con la prueba no paramétrica de Mann-Kendall. De los resultados se desprende que las intensidades más altas se dan en las estaciones de mayor influencia orográfica y en zonas próximas a masas de agua. Adicionalmente, el análisis de las tendencias de las intensidades máximas de lluvia no mostró tendencias de comportamiento espacial o temporal a través del tiempo. En cambio, los resultados indicaron que las intensidades se han mantenido dentro de los límites conocidos y no han manifestado cambios importantes que puedan atribuirse a la variabilidad del clima o al cambio climático.

### Capítulo 2: **Análisis espacial y temporal de la concentración de lluvias a través del índice de GINI (GI) y el índice de Concentración de Precipitaciones (PCI)**

Se realizó un estudio para determinar el comportamiento de las concentraciones de precipitación entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía de Chile. Se analizaron los registros diarios y mensuales de 89 estaciones pluviométricas en el período 1970-2016 y distribuidas entre 29°12'S y 39°30'S. Esta área se dividió en dos zonas: árido-semiárida y húmedo-subhúmeda. Para cada estación se calcularon el coeficiente de Gini o Índice de Gini (GI), el Índice de Concentración de Precipitación (PCI) y la intensidad máxima anual de precipitación en un período de 24 horas. Estas series de valores anuales se analizaron con la prueba de Mann-Kendall al 5%. En general, se observó que las tendencias positivas de la GI están presentes en ambas áreas, aunque en la mayoría de los casos no se encontraron

significativas. En el caso de la PCI, la presencia de tendencias positivas sólo está presente en la zona árido-semiárida; en la zona húmedo-subhúmeda, se observaron en su mayoría tendencias negativas, aunque ninguna fue significativa. Aunque no se observan cambios significativos en ambos índices, destaca el caso particular del GI en la zona húmeda-subhúmeda, donde se encontraron tendencias mayormente positivas (91,1%), de las cuales el 35,6% fueron significativas. Esto indicaría que es más probable que las precipitaciones se concentren en una escala diaria.

### Capítulo 3: **Análisis de los eventos de precipitación**

Se realizó una caracterización de los eventos de lluvia registrados en la estación Potrero Grande (Región del Maule) para el periodo 1982 – 2009, a partir de los registros de precipitación extraídos de las bandas pluviográficas. En este periodo se registraron 539 eventos, con un promedio anual de 19 eventos/año. En términos anuales se verifica una disminución en el número de eventos por año y una disminución en el monto de lluvia caído por evento en el periodo estudiado.

En el mes de febrero ocurren los eventos de mayor intensidad lo que genera una situación de riesgo para la actividad agrícola.

Al analizar las tendencias de las intensidades de precipitación se observa un cambio en la estructuración intra anual de la precipitación, ya que algunos meses (febrero, marzo, junio y septiembre) presentan un aumento de las intensidades de lluvia mientras que en los demás meses han disminuido.

Al agrupar las series de datos por estación del año se observan claras tendencias significativas al aumento de las intensidades media del evento y de las máximas por evento para las duraciones desde 15 min hasta 12 horas y ello para las 4 estaciones. Para 24 horas si bien la tendencia es al aumento de la intensidad de precipitación, esta solo es significativa para el verano.

Finalmente, al considerar los eventos extremos, estos no muestran tendencias significativas para ningunas de las estaciones, excepto en primavera que tiene una tendencia a aumentar la intensidad media del evento.

## I. INTRODUCCIÓN

La precipitación es el principal aporte de recurso hídrico en una cuenca y es uno de los principales factores cuando se analiza la disponibilidad de agua superficial, para los distintos usos; pero al mismo tiempo es responsable de los eventos climático-meteorológicos extremos, ya sean sequías o inundaciones, afectando directamente a las personas, a la producción agrícola, a la infraestructura, entre otros. Asimismo, la precipitación en Chile es uno de los elementos del clima que mayor variación presenta en su extensión latitudinal y longitudinal, además de la variabilidad temporal en escalas de tiempo ínter diaria, estacional, interanual, interdecadal y secular (Quintana, 2004).

Muchos estudios del clima se basan en registros de precipitación diarios, debido a que son los más accesibles y en muchos lugares son los únicos disponibles. No obstante, existe una variabilidad de la precipitación mientras esta ocurre, ya sea durante el día e incluso dentro de una hora, ya que, durante un mismo evento de lluvia, las intensidades van cambiando.

En este sentido, es deseable conocer cómo se comporta la precipitación en términos espaciales y temporales, y en base a ello, establecer políticas y estrategias que permitan una gestión eficiente del recurso hídrico, minimizando los impactos negativos de los eventos extremos.

En el presente estudio se analizó el comportamiento de la precipitación en diferentes niveles de agregación temporal y espacial. Por una parte, se analizaron las concentraciones de las precipitaciones diarias y mensuales; por otra parte, se caracterizaron las intensidades máximas anuales de precipitación para la Región del Maule, y finalmente, en un estudio de caso se describió el comportamiento de la lluvia a nivel de eventos para una estación ubicada en la Región del Maule.

## **1.1. Descripción del estudio**

Este documento consta de 3 partes:

En primer lugar (capítulo 3) se analizaron las intensidades máximas anuales de precipitación para duraciones desde los 15 min hasta las 24 horas. Se consideraron 11 estaciones ubicadas en la Región del Maule para el periodo 1974 – 2009.

En la segunda parte (capítulo 4) se analizó el comportamiento de la concentración de la precipitación en base a valores diarios. El área de estudio se encuentra entre las regiones de Coquimbo y de la Araucanía y se consideraron 89 estaciones durante el periodo 1970 – 2016.

En la tercera parte (capítulo 5) se analizaron los eventos de precipitación ocurridos en la estación Potrero Grande (Región del Maule) en el periodo 1982 – 2009. Para cada evento se determinó su duración e intensidades de precipitación.

## **1.2. Aporte al conocimiento**

La mayoría de los estudios realizados del clima y la precipitación se basan en valores diarios de lluvia, ya que es la información de mayor disponibilidad, no solo en Chile, sino que en muchos países. En este estudio se obtendrá una descripción de la lluvia a nivel de eventos y en términos de intensidad sub-diaria y subhoraria; es decir, se conocerán las intensidades en lapsos desde los 15 minutos hasta las 24 h, y cómo ellas han variado en el tiempo.

Esta información se espera que aporte al conocimiento del comportamiento de las lluvias en la zona central y con ello puedan definirse políticas y estrategias futuras contra los impactos de los eventos extremos, así como también para una gestión más eficiente del agua.

### **1.3. Objetivos de la propuesta**

#### **Objetivo General**

Caracterizar el comportamiento espacial y temporal de los eventos extremos de precipitación definidos por las intensidades sub-diarias.

#### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar el comportamiento espacial y temporal de las intensidades máximas sub-diarias de precipitación para duraciones desde los 15 minutos a 24 horas en la Región del Maule, Chile.
- Caracterizar los eventos de precipitación ocurridos en una estación de la R. del Maule y determinar su comportamiento temporal.



## II. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Área de estudio

Chile se caracteriza por tener una amplia variedad de condiciones climáticas y topográficas en su más de 4.000 km de largo, entre las latitudes 17° y 56°S. La Región del Maule se ubica entre los 34°41' y los 36°33' latitud Sur, con precipitaciones medias anuales que fluctúan entre los 600 y los 2.300 mm. Esta región, al igual que la zona central del país, presenta una fisiografía que comprende los siguientes elementos: la Cordillera de Los Andes en su límite Oriente, con altitudes que bordean los 4.000 msnm, seguido por el valle central que alcanza un ancho de 40 km, la Cordillera de la Costa con alturas de 300 y 700 msnm, y la planicie litoral, que alcanza un ancho de 5 km y es interrumpida por los ríos que desembocan en el Océano Pacífico.

Chile central presenta un clima mediterráneo con una marcada estación lluviosa, debido principalmente a los frentes fríos asociados con la migración de núcleos de baja presión en latitudes medias del Océano Pacífico (Fuenzalida, 1982). El régimen de precipitación varía con la latitud, aumentando hacia el sur, y a una misma latitud, la precipitación aumenta con la elevación del terreno; adicionalmente muestra una fuerte estacionalidad con un verano seco y con 5 meses (mayo y septiembre) que concentran el 80-90% de la lluvia anual (Carrasco et al. 2005).

La Cordillera de los Andes presenta una clara influencia en el patrón de precipitación, y esta está más fuertemente relacionada con la altura de la topografía media alrededor de los sitios donde se localizan los pluviómetros, más que con las alturas reales de los instrumentos. Entre la costa y la cordillera de los Andes, el patrón de precipitación es relativamente uniforme a pesar de la compleja topografía costera (Falvey y Garreaud 2007).

Por su parte, Rojas (2016) señala que la máxima intensidad de los eventos extremos se ubica en la zona comprendida entre los 35,5°S y 36°S, que es donde la altura de la cordillera de los Andes presenta su máximo gradiente meridional,

descendiendo desde los 4.000 a los 3.000 msnm; y estas máximas intensidades se encuentran en la ladera oeste de la Cordillera de los Andes y ello en toda época del año.

## **2.2. Variabilidad climática**

En los últimos años, a escala global se han experimentado notables variaciones climáticas que han influido en el comportamiento de diferentes variables meteorológicas, entre ellas el patrón de precipitación (Puertas *et al.*, 2011; IPCC, 2014). La comprensión de los cambios futuros en la frecuencia, intensidad y duración de eventos extremos es importante para formular estrategias de adaptación y mitigación que minimicen los daños a los sistemas naturales y humanos (Singh *et al.*, 2013). En efecto, Zubieta & Saavedra (2009) señalan que uno de los más importantes aspectos del cambio climático que requiere investigación profunda es la caracterización de la precipitación en tiempo y espacio.

Chile no está exento a estas variaciones climáticas, ya que cuenta con marcados tipos de climas que varían de la zona norte al extremo sur. Las altas presiones, derivadas del anticiclón del Pacífico, se asocian con buen tiempo y se manifiestan generalmente en el territorio norte del país, donde predomina la escasez de precipitaciones. A medida que se avanza hacia el sur, aparece la influencia de masas de aire frío, denominadas frentes polares debido a su origen, que al interactuar con masas de aire cálido producen intensas precipitaciones (Pizarro, et al 2012; UNESCO, 2010). Es por esto, que en el norte del país hay una condición de extrema aridez y en el extremo sur una condición húmeda. Por consiguiente, si el país enfrenta un fenómeno de cambio climático o de alta variabilidad climática, las precipitaciones serían altamente sensibles a estos fenómenos por ubicarse Chile en una zona de transición climática (Garreaud 2011; Montecinos et al 2000). Por otro lado, las precipitaciones de la zona centro-sur del país están relacionadas por la dinámica de algunos eventos como El Niño Oscilación del Sur, que, por lo general, presenta una fase cálida en la zona central de Chile (30° - 35° S) asociada con un

aumento de las precipitaciones medias invernales. En la zona sur (38° - 41° S), los eventos suelen vincularse con una reducción de precipitaciones, especialmente en el verano siguiente (Ortlieb, 1994; Escobar & Aceituno, 1998; González & Muñoz, 2013; Acosta-Jamett *et al.*, 2016; Gonzáles, 2016; Valdés-Pineda *et al.* 2015; Barrett *et al.* 2009). No obstante, en condiciones de Non-ENSO son varios procesos que generan las lluvias en el invierno (Montecinos *et al.*, 2011).

La distribución e intensidad de las precipitaciones y la geomorfología, entre otros aspectos, determinan una sensibilidad del territorio frente a riesgos de origen meteorológico, gatillados por la presencia de niveles excesivos de pluviosidad cuyos efectos varían latitudinalmente en el territorio nacional. Estos fenómenos se pueden manifestar en forma de crecidas de los cauces de los ríos, inundaciones, aluviones, avalanchas, deslizamientos de laderas y marejadas en las costas (UNESCO, 2012).

En este contexto, Favier *et al.* (2009) señalaron que la precipitación en la región semi-árida del Norte Chico de Chile, después de una disminución considerable antes de 1930, se ha mantenido casi sin cambios hasta el día de hoy. Asimismo, Sarricolea & Romero (2015) describen que las tendencias de las precipitaciones en la zona árida del altiplano chileno presentan una disminución contundente. Similar situación está ocurriendo en la zona húmeda y sub-húmeda del país, observando tendencias negativas en las precipitaciones (Rubio & McPhee, 2010) y una concentración mayor en invierno (González & Muñoz, 2013).

La concentración de las precipitaciones es una medida de la distribución temporal de la lluvia y puede ser caracterizada por distintos modelos, tales como, el índice de Gini (GI), el Índice de Concentración (CI) (Monjo & Martin-Vide, 2016; Yin *et al.*, 2016) y el Índice de Concentración de Precipitaciones (ICP) (Oliver, 1980; Pizarro *et al.*, 2008). El primer método se utiliza para establecer y evaluar la desigualdad en la distribución de las precipitaciones. El Índice de Concentración (CI), desarrollado por Martin-Vide (1984), representa la frecuencia teórica de los datos. Ambos índices consideran la precipitación diaria, y pueden ser utilizados en la serie de datos completa o sólo en los días con precipitación. Finalmente, el ICP

evalúa la concentración de las precipitaciones a partir de la variabilidad de las precipitaciones mensuales.

Algunas investigaciones realizadas en Chile señalan que el CI ha aumentado, verificándose que las precipitaciones ocurren en menos días del año, siendo la región árida la que manifiesta el mayor valor (Sarricolea & Martín-Vide (2012), Sarricolea *et al.* (2013), Monjo & Martín-Vide (2016)). Por su parte, Pizarro *et al.* (2008) y Valdés-Pineda *et al.* (2014) verifican la existencia de ciertas tendencias, pero que no significaron un cambio evidente en la concentración de las precipitaciones. La alta concentración temporal de la precipitación está ligada al rápido ritmo de los procesos físicos, como la convección en áreas con un alto grado de insolación y mares cálidos. A su vez, la baja concentración temporal de la lluvia puede interpretarse como consecuencia de patrones regulares (corrientes marítimas o tormentas altamente recurrentes) (Monjo & Martín-Vide, 2016).

Los altos índices de concentración de las precipitaciones diarias traen como consecuencia un incremento en el potencial de erosión, en la inestabilidad de laderas y en el riesgo de inundaciones (Zubieta & Saavedra, 2009).

En los últimos años han ocurrido en Chile importantes eventos que han ocasionado desastres naturales con pérdidas de vidas humanas, económicas y de infraestructura. Los desastres que más ocurren en el país y que generan mayor impacto han sido en su mayoría fenómenos sísmicos (terremotos y tsunamis) y climáticos (sequías e inundaciones). En la zona mediterránea (32° - 38° S) las inundaciones se relacionan con la ocurrencia de sistemas frontales fríos y cálidos; así, 227 eventos de inundación fluvial registrados en Chile en el período 1574-2012, el 71% se asocian a eventos pluviales intensos o persistentes (Rojas *et al.*, 2014).

Otra característica de la precipitación es su intensidad, definida como la cantidad de lluvia caída por unidad de tiempo. Y esta también se ve influenciada por los escenarios de incertidumbre climática (variabilidad y cambio climático) y podrían haber cambiado en los últimos 35 años (Jacques-Coper y Garreud, 2015). Diversos autores han señalado que las intensidades de precipitación se han visto

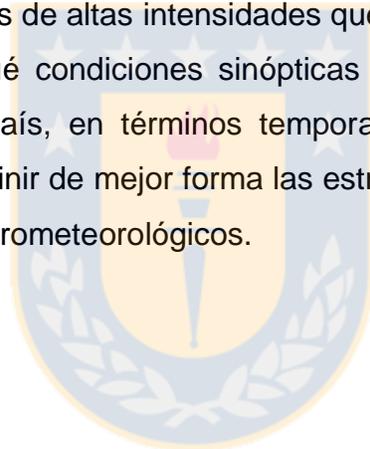
incrementadas en los últimos años, con las consecuencias que esto conlleva para la distribución temporal de las lluvias y el impacto sobre los procesos precipitación escorrentía (Fowler y Hennessy, 1995; Gong y Wang, 2000). Jacques-Coper y Garreaud (2015) demostraron que a partir del año 1976 se produjo en Chile un cambio en el patrón del comportamiento de las precipitaciones, lo cual habla de una situación diferencial y que debe ser detectada por métodos estadísticos y matemáticos que analicen el comportamiento de los datos de variables climáticas.

En la región del Maule se encuentran diversos climas, tales como el subhúmedo mediterráneo, el húmedo de altura, y el templado cálido (BCN, s.f.; DMC, 2001). Esto determina que al interior del territorio se verifiquen diversos escenarios de precipitación, que como se ha señalado, presenta diferencias notables en las precipitaciones medias anuales. Pizarro et al. (2008) analizaron el comportamiento de 15 estaciones pluviométricas de la Región del Maule y concluyeron que la precipitación anual tiende a aumentar latitudinalmente y que los valores de precipitación más altos se presentan en la cordillera andina. Al revisar la tendencia temporal se aprecia que existe una tendencia a la disminución de las precipitaciones influenciada principalmente por la década del '90. En relación a la concentración temporal de las precipitaciones, éstas no han manifestado un cambio en la composición anual. En cuanto a la agresividad del clima los mismos autores utilizaron los Índices de Fournier (IF) y Fournier Modificado (IFM) y el Índice de Concentración de Precipitación (IPC) de Oliver (1980), encontrando que los resultados que entregan dichos índices son bastantes heterogéneos entre un año y otro y no muestran tendencias claras. No obstante, se aprecia claramente que en la medida que el monto de precipitación anual se incrementa, la tendencia de los IF e IFM es al aumento, lo que significa que a mayor monto de precipitación anual la agresividad del clima aumenta. Del mismo modo se aprecia que la tendencia del IPC es al decremento, lo que habla de que a mayor monto de lluvia anual la concentración de las lluvias tiende a disminuir.

El estudio de las intensidades de precipitación en general se torna complejo y costoso. Los datos provienen principalmente de bandas pluviográficas que se

encuentran en un número reducido de estaciones en diversos territorios. La captura de los registros de intensidades de lluvia ha sido normalmente un proceso tedioso y limitado a duraciones mayores a 1 hora, debido a la dificultad que encierra estimar dichas intensidades a ojo humano (Deidda *et al.*, 2007; Jaklič *et al.*, 2016). Pizarro *et al.* (2008) determinaron las intensidades máximas anuales y las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) para estaciones ubicadas en diversas regiones del país de esta forma visual, pudiendo obtener valores para duraciones menores de 1 hora.

La variabilidad de la precipitación es posible determinarla a partir de registros anuales, mensuales, diarios, horarios y subhorarios, y según la escala temporal que se utilice los resultados pueden ser diferentes. De ahí la relevancia de conocer cómo se comportan los eventos de precipitación, especialmente en los eventos extremos y estos referidos a las lluvias de altas intensidades que ocurren a escala sub-diaria y sub-horaria; saber en qué condiciones sinópticas ocurren y cómo afectan en distintas condiciones del país, en términos temporales y espaciales. Con este conocimiento se podrán definir de mejor forma las estrategias para la reducción de los riesgos de desastres hidrometeorológicos.



### III. COMPORTAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL DE LAS INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITACIÓN PARA DURACIONES DESDE 15 MINUTOS A 24 HORAS. <sup>1</sup>

#### 3.1. Introducción

El objetivo de esta investigación es analizar el comportamiento de las intensidades de precipitación en forma temporal y espacial, en base al análisis de las intensidades máximas anuales para duraciones de 15, 30 y 45 min y 1, 2, 4, 6, 12 y 24 horas. Esto, con el fin de establecer, si es posible, la presencia de cambios significativos en el comportamiento de las tendencias temporales de las intensidades de lluvia en la Región del Maule.

#### 3.2. Materiales y métodos

##### 3.2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en la región del Maule, ubicada en la zona centro sur de Chile. La región del Maule se localiza aproximadamente entre los 34°43' y los 36°32' de latitud sur y cuenta con una superficie de 30.296 km<sup>2</sup> (Figura 3.2). Su clima es principalmente mediterráneo, pero varía longitudinalmente, cambiando a húmedo de altura al aproximarse a la cordillera de los Andes (BCN, s.f).

La Región del Maule cuenta con un número restringido de estaciones pluviográficas en el territorio, alcanzando un total de 18 estaciones meteorológicas con registro gráfico continuo de las precipitaciones a través de bandas pluviográficas semanales (Figura 3.1). En la actualidad, a partir del año 2010 las estaciones con pluviógrafo de bandas han sido reemplazadas por estaciones de

---

<sup>1</sup> Este capítulo corresponde a la síntesis del artículo **Spatial and temporal behavior of annual maximum sub-hourly rainfall intensities from 15-minute to 24-hour durations in central Chile**, actualmente en revisión en la revista International Journal of Climatology.

registro digital continuo. Estas últimas han sido ajustadas para entregar información de forma discreta, de hora en hora, debido al altísimo volumen de datos que se generarían si el registro ocurriese cada 0,2 mm de precipitación. Este hecho ha determinado una reducción en la resolución temporal de la información que se entrega, dado que se hace de hora en hora en valores enteros, perdiéndose la información interhoraria y toda aquella que es menor a 1 hora.

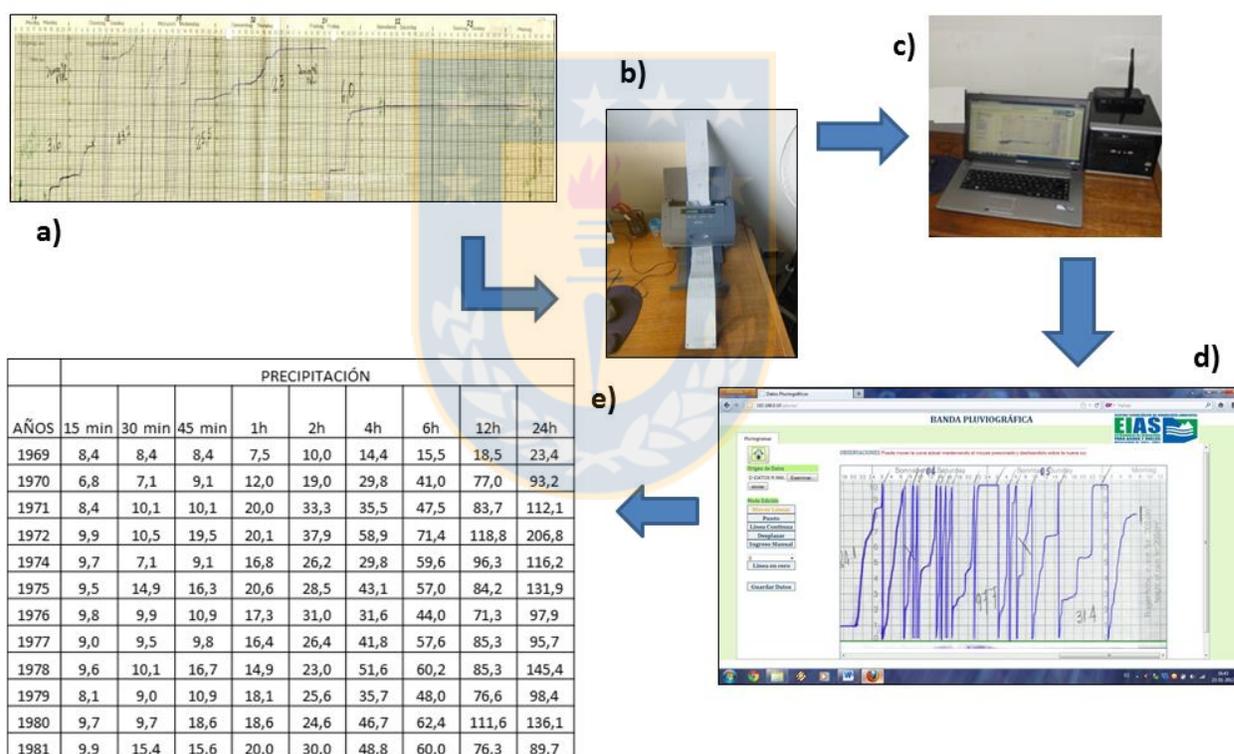
En el caso de la Región del Maule, las 18 estaciones pluviográficas de banda poseen información continua entre los años 1960 y 2009, aunque varias de estas estaciones poseen diversos periodos en los cuales existe carencia de información (Figura 3.2).

Las estaciones pluviográficas utilizadas para la realización de este estudio se localizan principalmente en la depresión intermedia y en la precordillera de Los Andes, a una altitud que varía entre los 55 y los 668 msnm. Por su lado la precipitación anual oscila entre los 599 y los 2.172 mm anuales (Figura 3.2).

### **3.2.2. Procesamiento de datos**

La mayor parte de las estaciones pluviográficas existentes en el país registra la precipitación sobre bandas de papel graduado en formato semanal cuyas medidas son 44 x 13 cm aprox.; esto significa que 2 horas de lluvia son registradas a través de una traza de 5 mm de largo en la horizontal sobre la banda de papel, por lo que ha sido posible obtener valores de precipitación hasta un lapso mínimo de 1 hora en forma visual. Pizarro *et al.* (2008) determinaron las intensidades máximas anuales y las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) para estaciones ubicadas en diversas regiones del país de esta forma visual, lo cual aparte de ser un trabajo largo y tedioso, no permite obtener valores para duraciones menores de 1 hora.

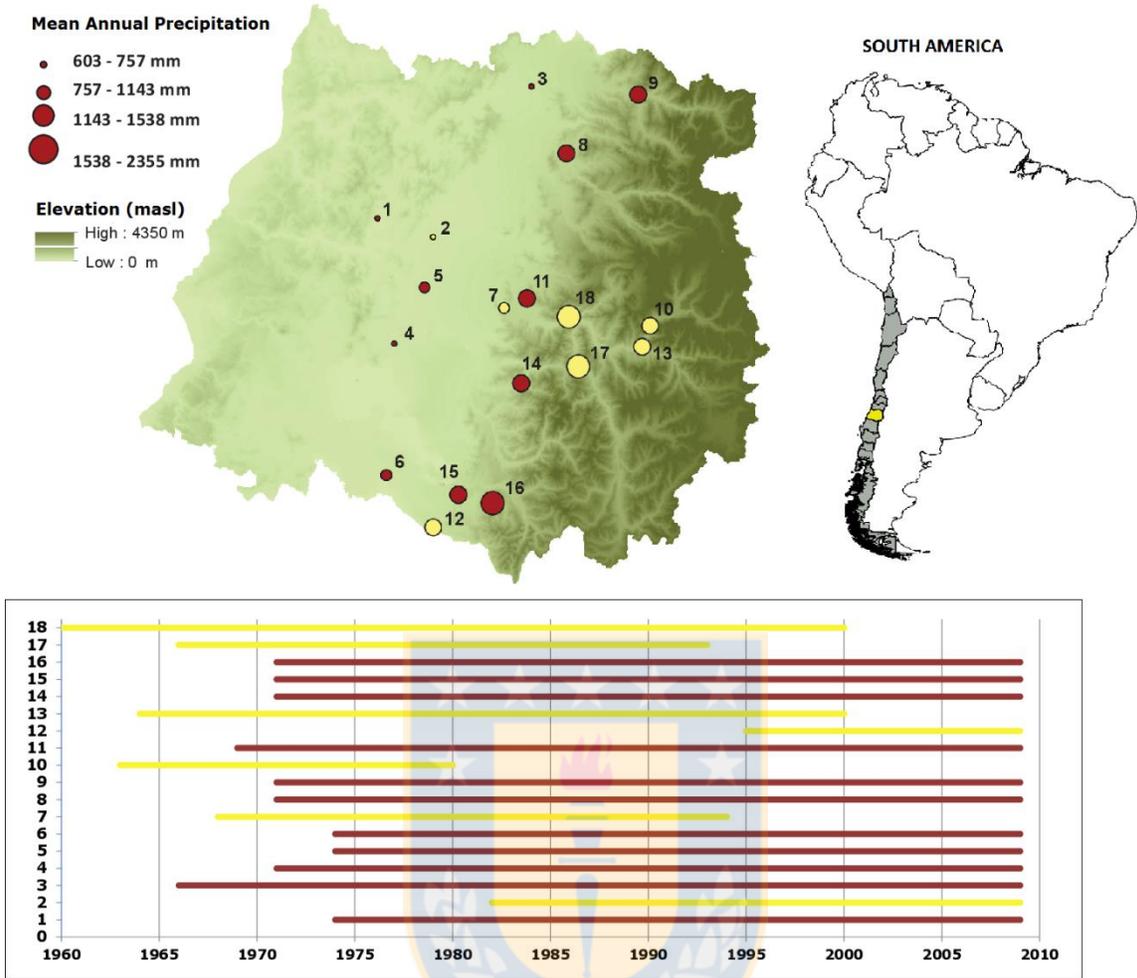
El Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca desarrolló un lector de bandas pluviográficas que permite digitalizar y procesar bandas del tipo semanales (Unesco, 2013; Pizarro *et al.* 2018). Este programa interpreta la traza dibujada por el pluviógrafo y la lleva a valores numéricos, obteniendo las alturas de precipitación en el tiempo (Figura 3.1). La máxima resolución que se puede obtener es de 15 minutos debido al grosor de la traza, aun así, este instrumento de última generación permite obtener información con la actual no se contaba anteriormente y con una mayor seguridad en la estimación cuantitativa del dato.



**Figura 3.1.** Diagrama de flujo del procesador de bandas pluviográficas: **a)** Banda pluviográfica semanal; **b)** Escáner de alimentación automática; **c)** Aplicación del software procesador de bandas; **d)** Banda procesada; **e)** Tabla de datos generados por el lector y ordenados en una planilla electrónica. Fuente: Elaboración propia

El estudio consideró la recopilación de las bandas de 18 estaciones pluviográficas ubicadas en la región del Maule, pertenecientes a 3 instituciones: la Dirección General de Aguas (DGA), la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y a la empresa privada Empresa Nacional de Electricidad (ENDESA). El largo de los registros es variable, teniendo 44 años la estación con el registro más amplio y 15 años la estación con el registro menor (Figura 3.2). Algunas de estas estaciones fueron descontinuadas en la década del 90, principalmente las que se ubican en precordillera. Para efectos de este artículo y con el objetivo de homogeneizar las series temporales de las estaciones disponibles, se trabajó sólo con el periodo 1974 – 2009, que es el periodo más extenso considerando el mayor número posible de estaciones. Así, se obtuvieron series de 36 años para un total de 11 estaciones pluviográficas (Figura 3.2).

Las bandas pluviográficas de las 11 estaciones seleccionadas, corresponden, en 10 de ellas, a bandas semanales y, la restante, a bandas mensuales. Las bandas semanales fueron digitalizadas y procesadas por medio del lector de bandas. Para identificar el máximo valor anual de intensidad de una determinada duración, se realizó un muestreo continuo en el intervalo seleccionado y con un desplazamiento de 5 minutos, registrando la precipitación acumulada en ese intervalo temporal. Con los datos obtenidos fue posible analizar el comportamiento de las intensidades de lluvia para duraciones de 15, 30 y 45 minutos; y 1, 2, 4, 6, 12 y 24 horas, para las estaciones ubicadas en la región del Maule, a excepción de la estación Curicó, en que no se pudo obtener intensidades para duraciones menores a 1 h, debido al formato de las bandas pluviográficas.



**Figura 3.2.** Estaciones pluviográficas disponibles en la Región del Maule y longitud de las series de datos. En color rojo se muestran las estaciones utilizadas en el estudio, mientras que las de color amarillo fueron descartadas. Estaciones: 1: Péncahue, 2: Talca, 3: Curicó, 4: Melozal, 5: San Javier, 6: Parral, 7: El Lirio (Colbún), 8: Potrero Grande, 9: Los Queñes, 10: Desagüe Laguna Invernada, 11: Colorado, 12: San Manuel en Perquilauquén, 13: Casa Maquinista, 14: Ancoa Embalse, 15: Digua Embalse, 16: Bullileo Embalse, 17: Melado en la Lancha, 18: Armerillo. Fuente: Elaboración propia

Para describir el comportamiento de las intensidades máximas anuales, para cada duración se utilizó estadística descriptiva e inferencial:

- a) Se realizó un análisis exploratorio de los datos (boxplot) para representar la distribución de los valores de intensidad de cada serie de datos, en cada duración y para las 11 estaciones consideradas en el estudio. Las estaciones fueron ordenadas respecto a la precipitación media anual.
- b) Se calculó la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación de la serie de cada duración para todas las estaciones; los valores se expresaron en un mapa, donde se pudo analizar la variabilidad respecto a la ubicación espacial.
- c) Se correlacionaron las intensidades para las distintas duraciones con la pluviometría anual, a través del coeficiente de correlación de Pearson.
- d) Posteriormente, se analizaron las tendencias temporales de las intensidades máximas anuales para cada duración y estación considerada, con el objetivo de determinar si esta variable ha presentado cambios significativos de tendencias en los 36 años de análisis. Este análisis se realizó en base a la prueba no paramétrica de Mann-Kendall. Esta prueba verifica la existencia de tendencias positivas o negativas o la carencia de estas, además de determinar su significancia estadística, a un determinado nivel de confianza.

El cálculo de la prueba de Mann-Kendall requiere primeramente del estadístico  $S$  de Kendall y de su varianza  $VAR(S)$ . Con ellos se obtiene un estadístico  $Z$  estandarizado cuando el tamaño de la muestra es mayor o igual a 8 (Yue *et al.*, 2002), cuyo signo y valor determinará la orientación y significancia de la tendencia, respectivamente. Para el estadístico  $S$ , se utiliza la siguiente expresión:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(x_j - x_k)$$

Donde la función *signo* ( $x_j - x_k$ ) se describe como:

$$\text{signo}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

Donde  $x_j$  y  $x_k$  son valores consecutivos de la variable en estudio. Luego, la varianza  $VAR(S)$  se describe como:

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

Por último, con ambos valores, se calcula el valor Z con una de las siguientes expresiones, dependiendo del resultado de S:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & ; \text{ si } S > 0 \\ 0 & ; \text{ si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & ; \text{ si } S < 0 \end{cases}$$

- e) Una vez obtenidos los valores Z de Mann-Kendall, se realizó un análisis cualitativo espacial.

### 3.3. Resultados

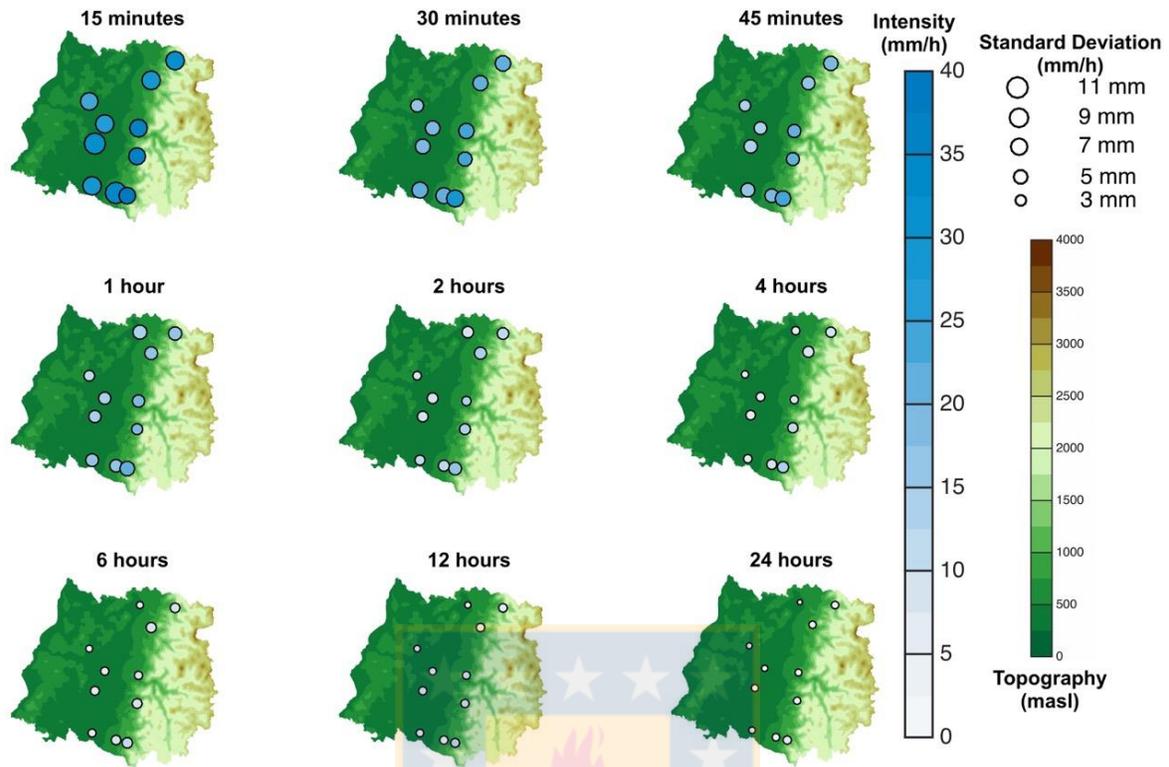
En la Figura 3.3 se presentan los valores obtenidos de intensidad máxima anual expresados en mm/h, para las 9 duraciones ya mencionadas. Se incluyeron los valores medios, además de los máximos y mínimos de cada serie, con el objetivo de dimensionar la alta variabilidad de los datos a través de los años.

Como se observa en la Figura 3.3., de los valores medios de intensidad máxima para cada duración, Penciahue es la estación de menor intensidad y Bullileo la de mayor intensidad. Pero, si se analizan los valores máximos encontrados de cada serie, otras estaciones presentan los valores extremos, como es el caso de Digua E. que presenta los máximos valores para duraciones de 15 y 30 min, con 77,0 y 45,4 mm/h, respectivamente. Esto coincide con Pizarro *et al.* 2013, quienes encontraron que en las estaciones ubicadas cerca de cuerpos de agua la intensidad máxima aumenta. No obstante, la estación Melozal, a pesar de ubicarse en el valle central y lejos de un cuerpo de agua, presenta un valor máximo para 15 min de 64,5 mm/h, lo cual representa el tercer valor más alto. Esto resulta relevante considerarlo a la hora de estimar la intensidad de diseño para obras hidráulicas.

De lo expuesto se deduce que no existen patrones espaciales marcados en relación al comportamiento de las intensidades.

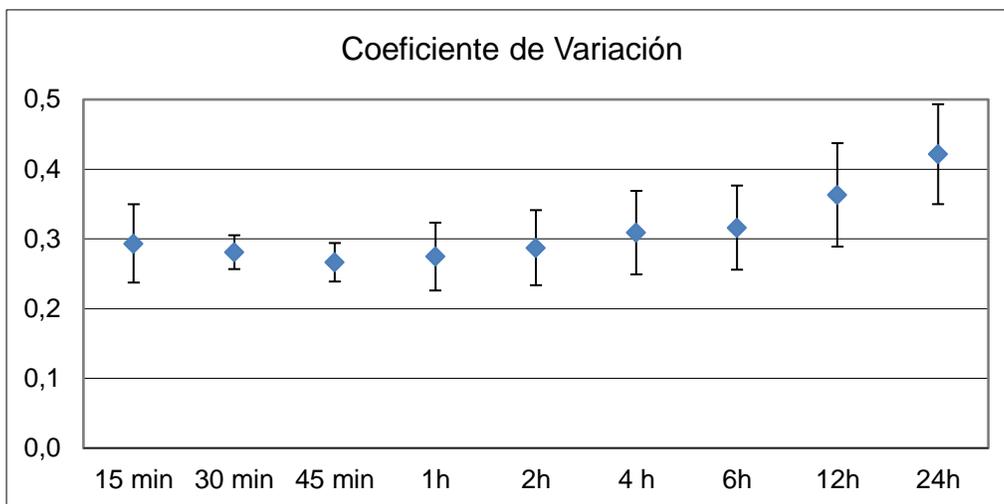


**Figura 3.3.** Valores de intensidad máxima anual en mm/h para duraciones de 15, 30 y 45 minutos y 1, 2, 4, 6, 12 y 24 h obtenidos para el periodo 1974 – 2009. Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.4.** Intensidad máxima anual de precipitación para distintas duraciones en valores medios y desviación estándar respectiva, entre los años 1974 – 2009. Fuente: Elaboración propia

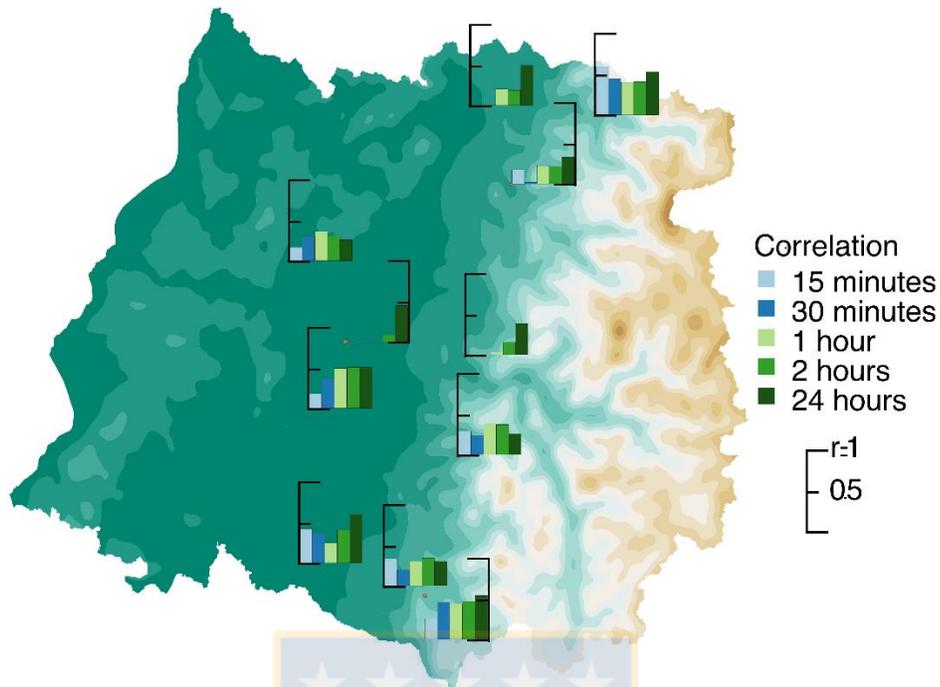
Como se aprecia en los mapas anteriores (Figura 3.4), los valores más altos de intensidad corresponden a las estaciones ubicadas en precordillera, donde el factor orográfico tiene una mayor incidencia, coincidiendo con lo expresado por (Garreaud, 2009). Respecto al coeficiente de variación, los menores valores se ubican en la zona de mayor altitud, en donde las precipitaciones e intensidades son mayores, y la variabilidad de las mismas es menor.



**Figura 3.5.** Coeficiente de variación de las intensidades anuales máximas para cada duración, considerando los valores medios de todas las estaciones para el periodo 1974 – 2009. Fuente: Elaboración propia.

Al analizar el coeficiente de variación de las intensidades para cada duración, se observa que éste varía entre 0,28 para la duración de 45 minutos y 0,41 para una duración de 24 horas (Figura 3.5). En general se aprecia que a medida que aumenta la duración, el coeficiente de variación tiende a aumentar levemente, lo que señalaría que a mayores duraciones, habría una mayor desviación de los datos con respecto a la media.

Al establecer relaciones entre las intensidades y las precipitaciones medias anuales de cada estación, se pudo observar que en general existe una relación positiva entre ambas variables. Así por ejemplo en el caso de la duración 15 minutos las intensidades muestran una clara dependencia de la precipitación; en tanto, en la duración 24 horas, si bien es cierto se manifiesta una relación positiva, esta no es tan marcada ni tan clara como en otras duraciones (Figura 3.6).



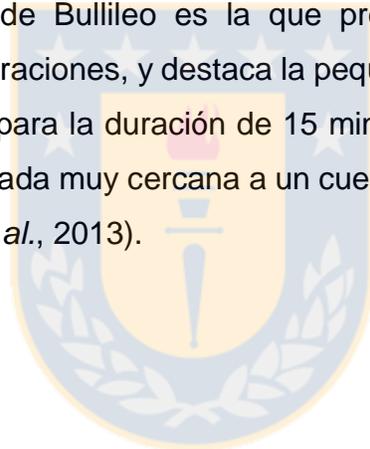
**Figura 3.6.** Coeficiente de correlación entre la intensidad máxima anual y la precipitación anual, para duraciones de 15 min, 1 h, 12 h y 24 h, en el periodo 1974 – 2009. Fuente: Elaboración propia.

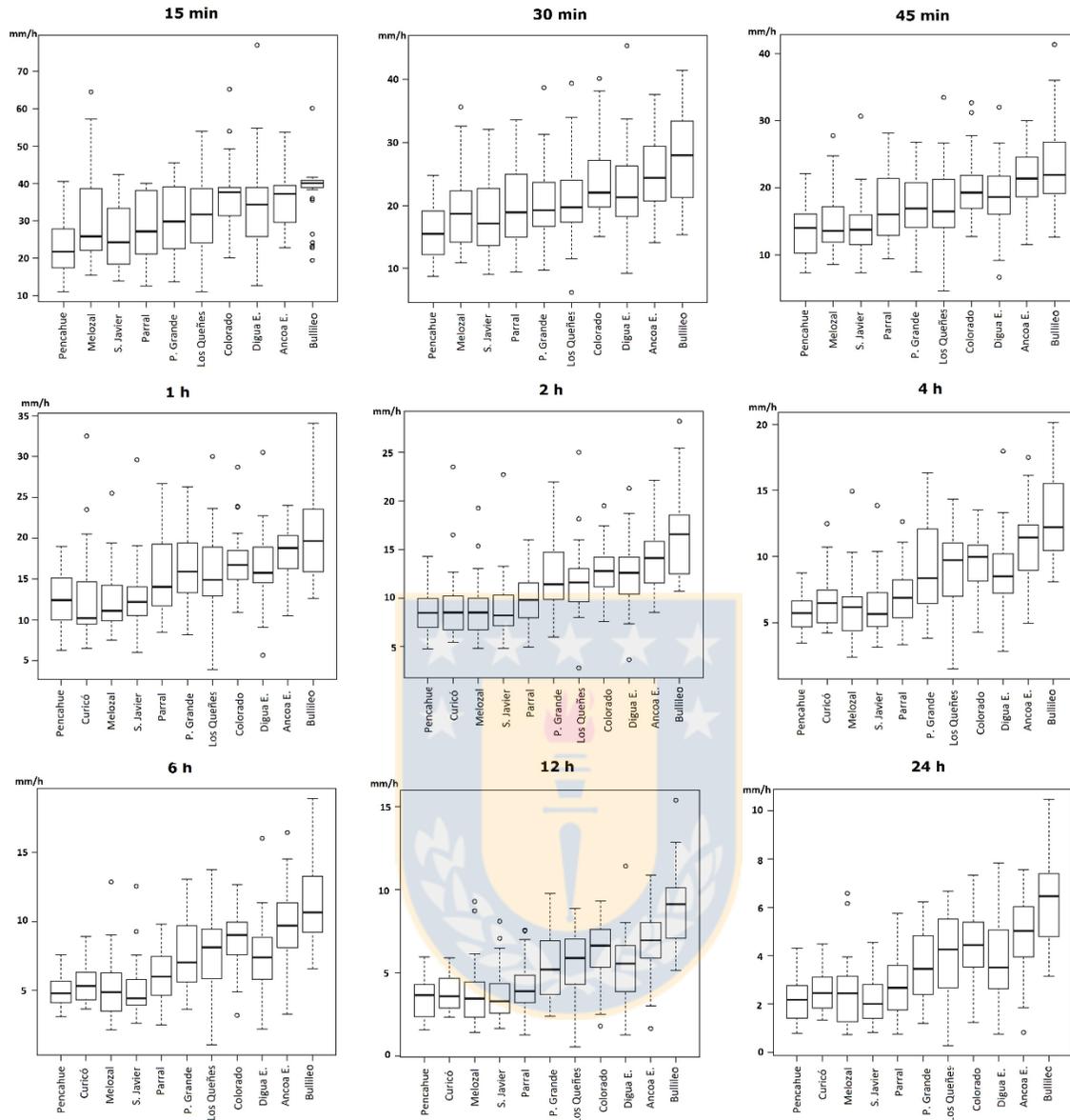
No obstante, al calcular el coeficiente de correlación, los valores obtenidos son bajos, superando en pocas ocasiones el 0,5. Incluso para la estación Colorado, el coeficiente llega a ser negativo para los 15 min y 0 para 30 min. También llama la atención que la estación Los Queñes tenga una correlación de 0,58 para una duración de 15 min, lo que se contradice con el supuesto de que las intensidades subhorarias estarían más ligadas a fenómenos orográficos que a los sistemas frontales. Parral, Bullileo y Los Queñes tienen correlación sobre 0,5 para una duración de 24 h (0,58, 0,53 y 0,52, respectivamente). En el resto de las estaciones y duraciones los valores son menores a 0,5, es decir, existe una baja relación lineal entre las máximas intensidades anuales y la precipitación anual.

En relación a los gráficos boxplot, se puede señalar que en general a medida que aumenta el monto de precipitación media anual, las intensidades tienden a aumentar para las distintas duraciones consideradas (Figura 3.7.).

Otro aspecto que surge de los resultados alcanzados es que las mayores intensidades ocurrieron en las estaciones con mayor influencia orográfica, es decir aquellas ubicadas en la zona precordillerana andina y las que están cerca de cuerpos de agua, corroborando las investigaciones realizadas por Pizarro *et al.*, 2013.

Se observa que para las duraciones mayores a 1 hora se pueden distinguir 2 grupos de estaciones; por un lado, están las de menor pluviometría que a la vez presentan menores valores de  $I_{max}$  (estaciones Penciahue, Curicó, Melozal, San Javier y Parral). Estas 5 estaciones se ubican en el valle central, y el resto en la precordillera. Cabe hacer notar que Parral, que presenta una alta pluviometría anual para el valle central, cercana a los 1.000 mm/año, no tiene una alta intensidad de precipitación. La estación de Bullileo es la que presenta mayores valores de intensidad para todas las duraciones, y destaca la pequeña dispersión de sus datos y gran cantidad de outliers para la duración de 15 minutos. Esto podría explicarse en que la estación está ubicada muy cercana a un cuerpo de agua, en este caso, el embalse Bullileo (Pizarro *et al.*, 2013).



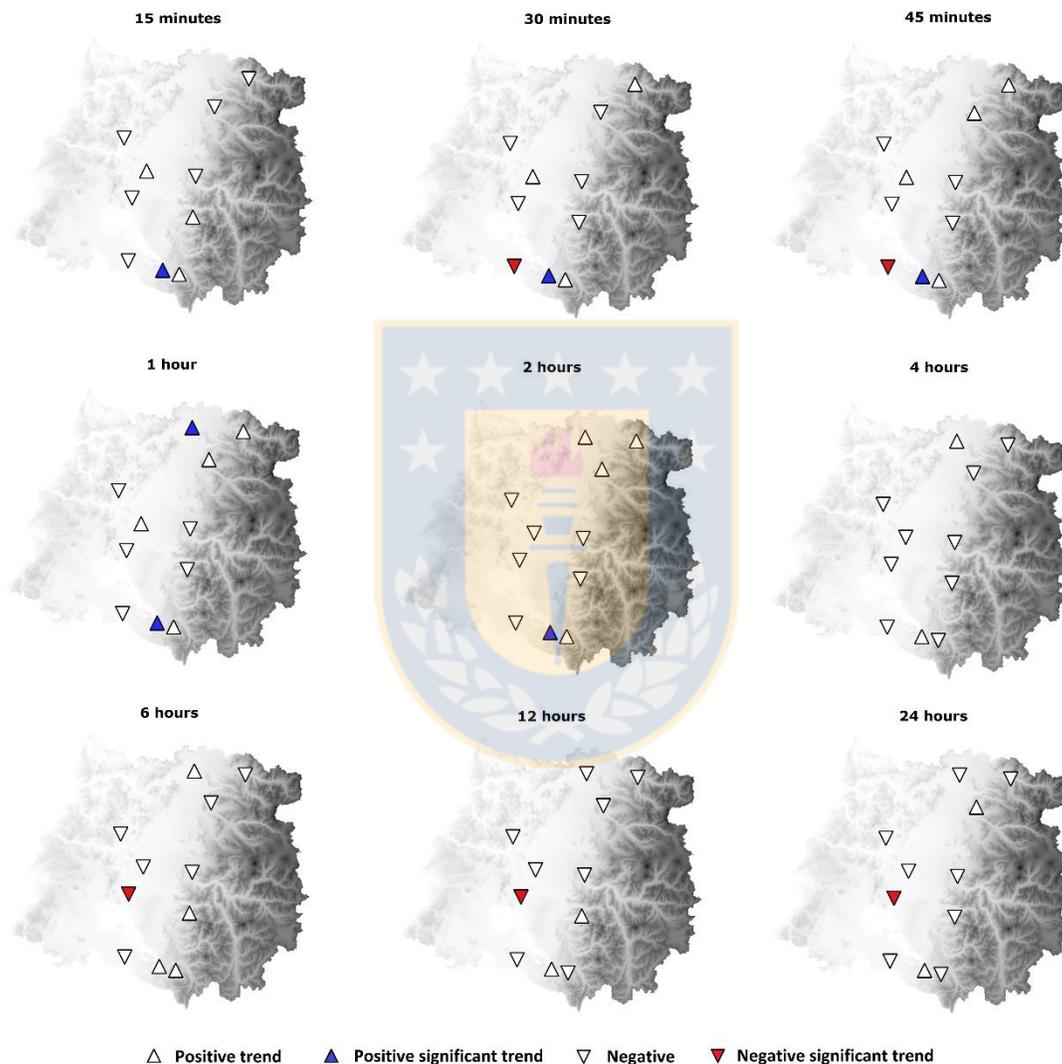


**Figura 3.7.** Gráficos boxplot para de la intensidad máxima anual media para duraciones de 15, 30 y 45 min y 1, 2, 4, 6, 12 y 24 h, en el periodo 1974 – 2009, de las estaciones ordenadas por precipitación anual de menor a mayor. Fuente: Elaboración propia.

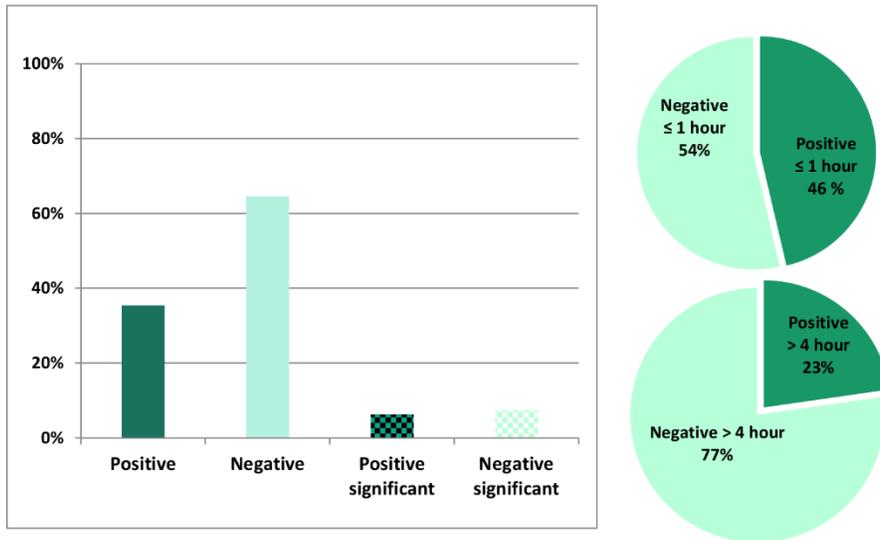
### Análisis de Tendencia Mann-Kendall

Utilizando el método de Mann – Kendall se analizaron las tendencias de las series completas de intensidades, para todas las estaciones y cada duración en

estudio. Derivado que son 11 estaciones, 10 de ellas con 9 duraciones y una con 6 duraciones, se estudió un total de 96 tendencias. De estas se pudo observar que 62 (64,6%) presentaron tendencias negativas y 34 (35,4%) tendencias positivas. Sin embargo, llama la atención que, en un lapso de 36 años, sólo 13 (13,5%) tendencias fueron significativas de las cuales, 6 (6,3%) son positivas y 7 (7,3%) son negativas.



**Figura 3.8.** Mapa de tendencia (Mann Kendall) de intensidades máximas de precipitación para duraciones de 15, 30 y 45 min y 1, 2, 4, 6, 12 y 24 horas. Fuente: Elaboración propia.

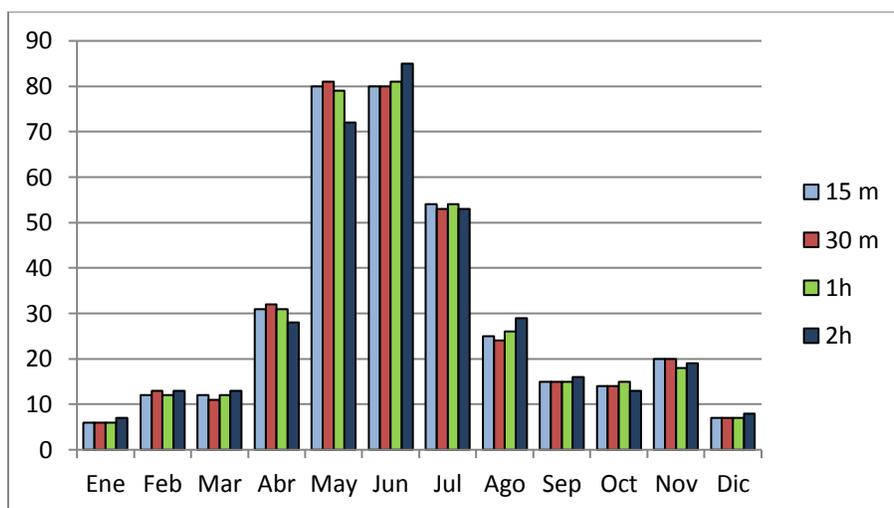


**Figura 3.9.** Valor porcentual de las tendencias para todas las series analizadas. Fuente: Elaboración propia.

Destaca la estación Digua E, que presenta tendencia positiva y significativa ( $p < 0,05$ ) para las duraciones que van desde los 15 min hasta las 2 horas. Por otra parte, las estaciones Parral, Melozal, Pencahue y Colorado presentan tendencia negativa en todas las duraciones y muy pocas de ellas son significativas.

Los resultados muestran que las estaciones mayoritariamente denotan tendencia negativa (aunque no significativa), a excepción de Pencahue y Potrero Grande que tienden tendencia positiva, pero no significativa. De lo anterior se desprende que a nivel anual no existen patrones claros para el comportamiento de las precipitaciones para la zona de estudio.

Al analizar la ocurrencia de las intensidades de lluvia para las duraciones 15 y 30 min, y 1 y 2 horas (Figura 3.10) se observa, como era de esperar, que la mayor frecuencia se encuentra en los meses invernales (mayo, junio y julio), aunque es interesante destacar que los meses estivales presentan una frecuencia no despreciable de intensidades, hecho que es relevante a la hora de realizar una planificación frente a fenómenos extremos, como movimientos en masa.



**Figura 3.10.** Frecuencia de ocurrencia de las intensidades máxima anual de todas las estaciones analizadas para distintas duraciones. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4. Conclusiones

Las intensidades de precipitación registradas en las 11 estaciones en estudio determinaron que, para la duración de una hora, la máxima intensidad alcanzó a los 34,1 mm/h (Bullileo E.), en tanto que el valor mínimo de las 11 estaciones en estudio alcanzó los 19 mm/h (Pencahue). El valor máximo representa una intensidad importante para zonas de clima mediterráneo como es la Región del Maule, derivado de que estas intensidades se producen mayormente en el periodo invernal, lapso en el cual la vegetación se encuentra en latencia y un alto porcentaje de la misma es caducifolia, lo que determina una alta probabilidad de riesgo frente a fenómenos de crecidas violentas o movimientos en masa.

Las intensidades de precipitación en la región del Maule presentan tendencias en su mayoría negativas no-significativas en un número relevante. Esto significa que en el periodo analizado no es posible inferir cambios en los patrones de comportamiento temporal de las intensidades.

Finalmente se puede señalar, hechos los análisis de tendencia de Mann-Kendall, que para las 11 estaciones en estudio y para las diferentes duraciones, las intensidades en el lapso comprendido entre 1974 y 2009, no se observan patrones de comportamiento espacial ni temporal. Los resultados más bien muestran que las intensidades se han mantenido en rangos conocidos y no han manifestado cambios importantes, que pudieran atribuirse a la presencia de variabilidad o cambio climático. No obstante, sería recomendable continuar este estudio hacia otras zonas latitudinales del país, así como agregar mayor información a las series de datos con las que se ha trabajado en esta investigación, con el fin de corroborar o descartar la existencia de cambios significativos en los patrones de comportamiento de las intensidades de lluvia.



## IV. COMPORTAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL DE CONCENTRACIÓN DE LLUVIAS: ÍNDICE DE GINI Y DE CONCENTRACIÓN DE PRECIPITACIONES<sup>2</sup>

### 4.1. Introducción

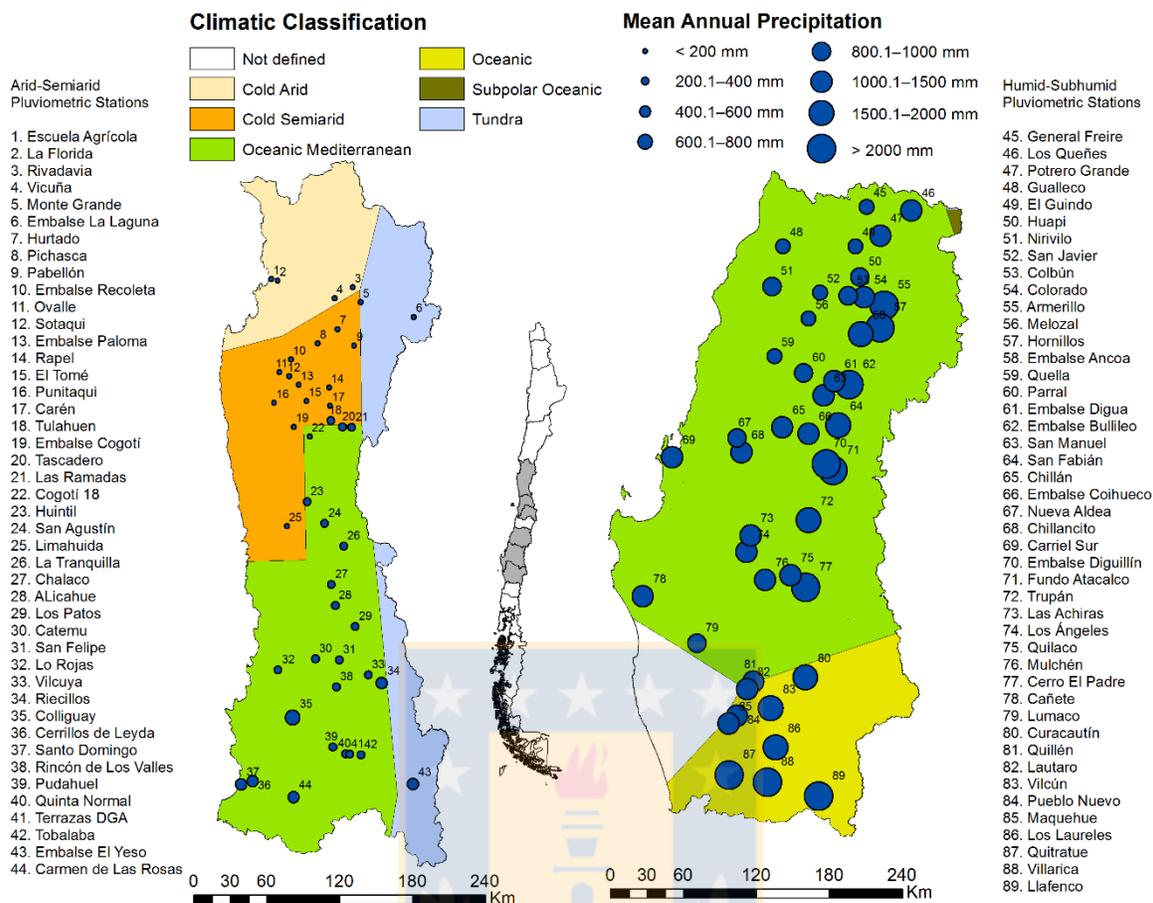
Como se ha señalado, las variables hidrológicas son sensibles a la variabilidad y/o cambio climático, en especial las precipitaciones, que últimamente han generado grandes desastres naturales, producto del aumento aparente de la concentración de las lluvias. Por tanto, el objetivo del presente estudio es caracterizar en tiempo y espacio el comportamiento y las concentraciones de las precipitaciones diarias y mensuales en dos zonas climáticas (árida-semiárida y húmeda-subhúmeda) del país.

### 4.2. Materiales y Métodos

El área de estudio abarca desde los 29°12' hasta los 39°30' de latitud sur, y considera 89 estaciones pluviométricas (figura 4.1). El área se dividió en 2 zonas; la zona árida-semiárida, la cual abarca desde los 29°12' hasta los 33°55' de latitud sur y la zona húmeda-subhúmeda, la cual ocupa desde los 34°44' hasta los 39°30' de latitud sur.

---

<sup>2</sup> Este capítulo corresponde a una síntesis del artículo **Spatial and Temporal Analysis of Rainfall Concentration Using the Gini Index and PCI**, publicado en la revista *Water MDPI* (*Water* 2018, 10, 112; doi:10.3390/w10020112)



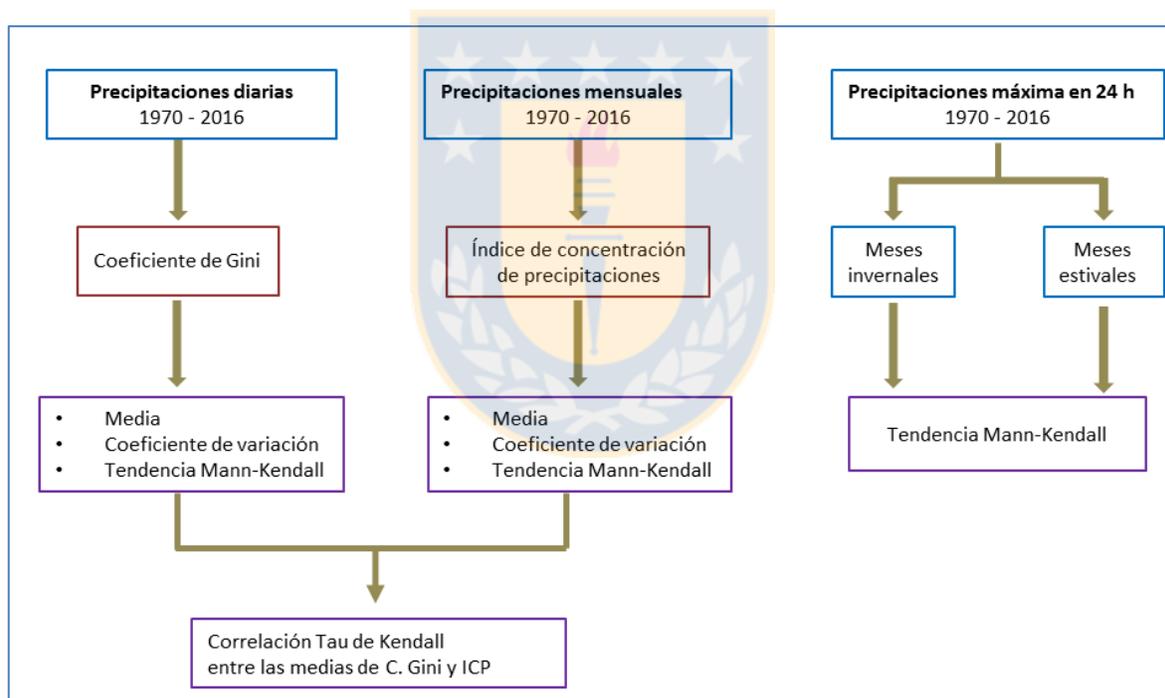
**Figura 4.1.** Área de estudio y clasificación climática de Köppen-Geiger. Fuente: Elaboración propia.

La zona árida-semiárida presenta distintos tipos de clima. Entre las latitudes 29°12'S y 30°00'S, existe un clima árido frío (Bwk) (Kottek *et al.*, 2006), donde las precipitaciones son escasas o inexistentes, los inviernos son fríos y los veranos cálidos y su vegetación es del tipo desértica. Entre las latitudes 30°00'S y 32°00'S, el clima es del tipo semiárido frío (Bsk) y al igual que el clima árido frío, tiene precipitaciones escasas y veranos cálidos o templados, pero las temperaturas invernales suelen ser menores a 18°C (Peel *et al.*, 2007). El clima predominante de esta zona es del tipo oceánico mediterráneo con verano suave (Csb). Este tipo de clima se caracteriza por concentrar las lluvias en el periodo invernal y la temperatura media de al menos 4 meses supera los 10°C (Kottek *et al.*, 2006; Peel *et al.*, 2007). Finalmente, la franja andina presenta un clima del tipo tundra (Et), donde la

temperatura media del mes más cálido oscila entre 0 y 10°C (Kottek *et al.*, 2006; Spavorek, 2007) y la vegetación es inexistente.

La zona húmeda-subhúmeda (33°55'S y 39°30'S) corresponde a un clima oceánico mediterráneo con verano suave. Entre las latitudes 38°30'S y 39°30'S, el clima es oceánico con verano suave (Cfb); este clima carece de un periodo seco, pero en Chile, por tratarse de un clima mediterráneo, el periodo seco es evidente y abarca de 2 a 4 meses y la mayor cantidad de precipitación cae en invierno; la temperatura media del mes más cálido no supera los 22°C (MARM, 2011; Kalvová *et al.*, 2003) (figura 4.1).

En la siguiente figura se muestra un esquema de la metodología empleada en este estudio:

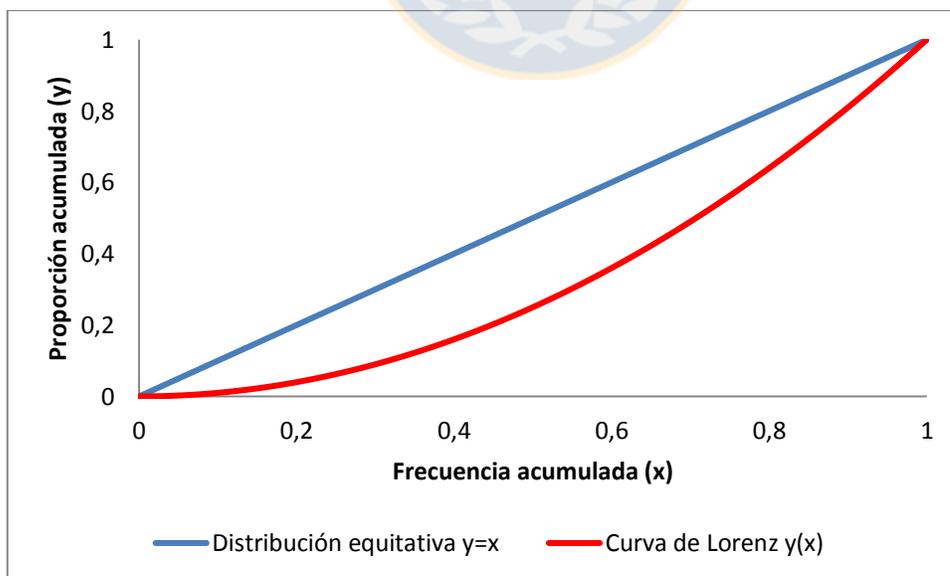


**Figura 4.2.** Esquema de la metodología. Fuente: Elaboración propia.

Para analizar la concentración en las precipitaciones diarias en la zona central de Chile, se estableció un periodo de análisis que abarca de 1970 a 2016. El proceso de selección de estaciones consistió en filtrar aquellas que tengan a lo menos 45 años de registro, eliminando las que no alcanzaron esta longitud en las series de

datos. Si bien existen métodos de completación de datos faltantes con buenos resultados en sus estimaciones (Pizarro *et al.* 2009), se prefirió no utilizarlos por posibles sesgos en las muestras.

Existen diversos métodos para establecer las tendencias de la concentración de precipitaciones. En el campo de la hidrología tradicionalmente se han empleado los índices de agresividad climática, pero recientemente se ha tomado del campo de la econometría la curva de Lorenz y el coeficiente de Gini. La curva de Lorenz es una representación gráfica de la concentración de la riqueza, e indica qué porcentaje de la riqueza acumulada se encuentra en posesión de un determinado porcentaje de la población (FAO, 2005). En situaciones ideales, la relación entre riqueza y población acumuladas es de 1:1. El coeficiente de Gini estima la desigualdad de los ingresos en la población. Para esto, evalúa cómo varía la riqueza entre los miembros de la población en función de la curva de Lorenz y su valor oscila entre 0 y 1, donde 0 representa una distribución homogénea de la riqueza y 1 una gran concentración de esta. Gráficamente el coeficiente de Gini es la proporción entre la curva de perfecta equidad ( $y=x$ ) y la curva de Lorenz ( $y(x)$ ), dividida por el área bajo la curva de equidad (figura 4.3).



**Figura 4.3.** Representación gráfica del coeficiente de Gini. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de Gini fue aplicado en este estudio a las precipitaciones diarias de cada año para el periodo de 1970 hasta 2016, siguiendo a Yin *et al* (2016).

Por otra parte, se trabajó con los valores mensuales de precipitación mediante el Índice de Concentración de Precipitaciones (ICP, ecuación 2), el cual explica el nivel de concentración de las precipitaciones durante el año (Oliver, 1980). El valor de este índice fluctúa desde 8,33% si la precipitación es igual en todos los meses, hasta 100% si toda la lluvia se concentra en un solo mes. Es decir, este índice señala si las precipitaciones de la época lluviosa se concentran sobre un periodo corto o más largo del año (Schultz *et al.*, 1997).

$$ICP_j = 100 \frac{\sum_{i=1}^{12} P_{ij}^2}{P_j^2}$$

Donde:

$ICP_j$ = Índice de concentración de precipitaciones, para el año j, expresado en porcentaje

$P_{ij}$ = Precipitación del mes i en el año j

$P_j$ = Precipitación anual en el año j

Adicionalmente, se correlacionaron los valores medios para cada estación de los coeficientes Gini, ICP y la precipitación anual por medio de la prueba estadística Kendall Tau. Una de las ventajas de esta prueba, es no requerir normalidad en la distribución de los datos, haciéndola ideal para su uso en variables hidrometeorológicas. Sus valores oscilan entre 1 y -1 y valores superiores/inferiores a +/- 0,7 indican una fuerte correlación entre las variables (Helsel & Hirsch, 1992).

$$\tau = \frac{2(C - D)}{\sqrt{[n(n - 1) \sum T_x(T_x - 1)] * [n(n - 1) \sum T_y(T_y - 1)]}}$$

Con:

$\tau$ : Tau de Kendall.

C y D: Valores concordantes y discordantes entre los pares.

$T_x$  y  $T_y$ : Empates al interior de las variables x e y respectivamente.

n: Tamaño muestral.

Finalmente, se evaluaron las tendencias en el tiempo para las precipitaciones máximas en 24 horas de las 89 estaciones analizadas; las precipitaciones máximas en 24 horas fueron estratificadas en 2 periodos, invernal y estival, considerando los meses de abril a septiembre como invernales y de octubre a marzo como estivales.

Para los coeficientes de Gini y los ICP de cada estación, se estimaron las tendencias temporales para el periodo completo entre 1970 y 2016. Estas tendencias fueron evaluadas por medio de la prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall, que detecta las tendencias en series temporales, y que es muy utilizada en el análisis de variables hidrometeorológicas (Ahmad *et al.*, 2015). Una de sus ventajas es no requerir que los datos provengan de una distribución normal (Song *et al.*, 2015). Para su cálculo, esta prueba requiere primeramente del estadístico S de Kendall y de su varianza  $VAR(S)$ . Con ellos se obtiene un estadístico Z estandarizado cuando el tamaño de la muestra es mayor o igual a 8 (Yue *et al.*, 2002), cuyo signo y valor determinará la orientación y significancia de la tendencia, respectivamente. Para el estadístico S, se utiliza la siguiente expresión:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(x_j - x_k)$$

Donde la función *signo* ( $x_j - x_k$ ) tendrá el valor 1 si  $x_j - x_k > 0$ ; valor 0 si  $x_j - x_k = 0$ ; y valor -1 si  $x_j - x_k < 0$ , donde además  $x_j$  y  $x_k$  son valores consecutivos de la variable en estudio.

Luego, la varianza  $VAR(S)$  se describe como:

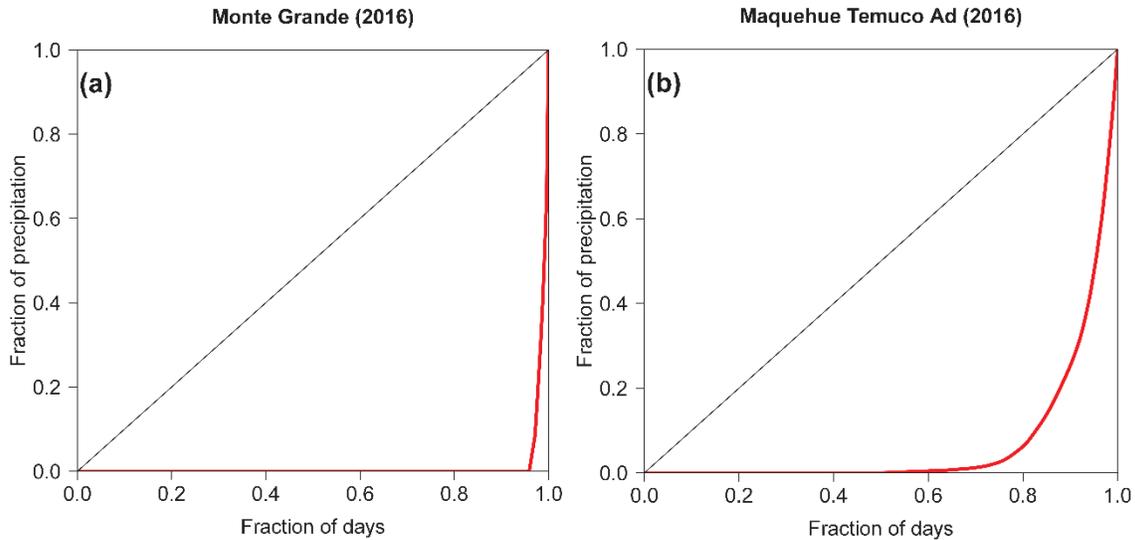
$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right]$$

Por último, con ambos valores, se calcula el valor Z dependiendo del resultado de S:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & ; \text{ si } S > 0 \\ 0 & ; \text{ si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & ; \text{ si } S < 0 \end{cases}$$

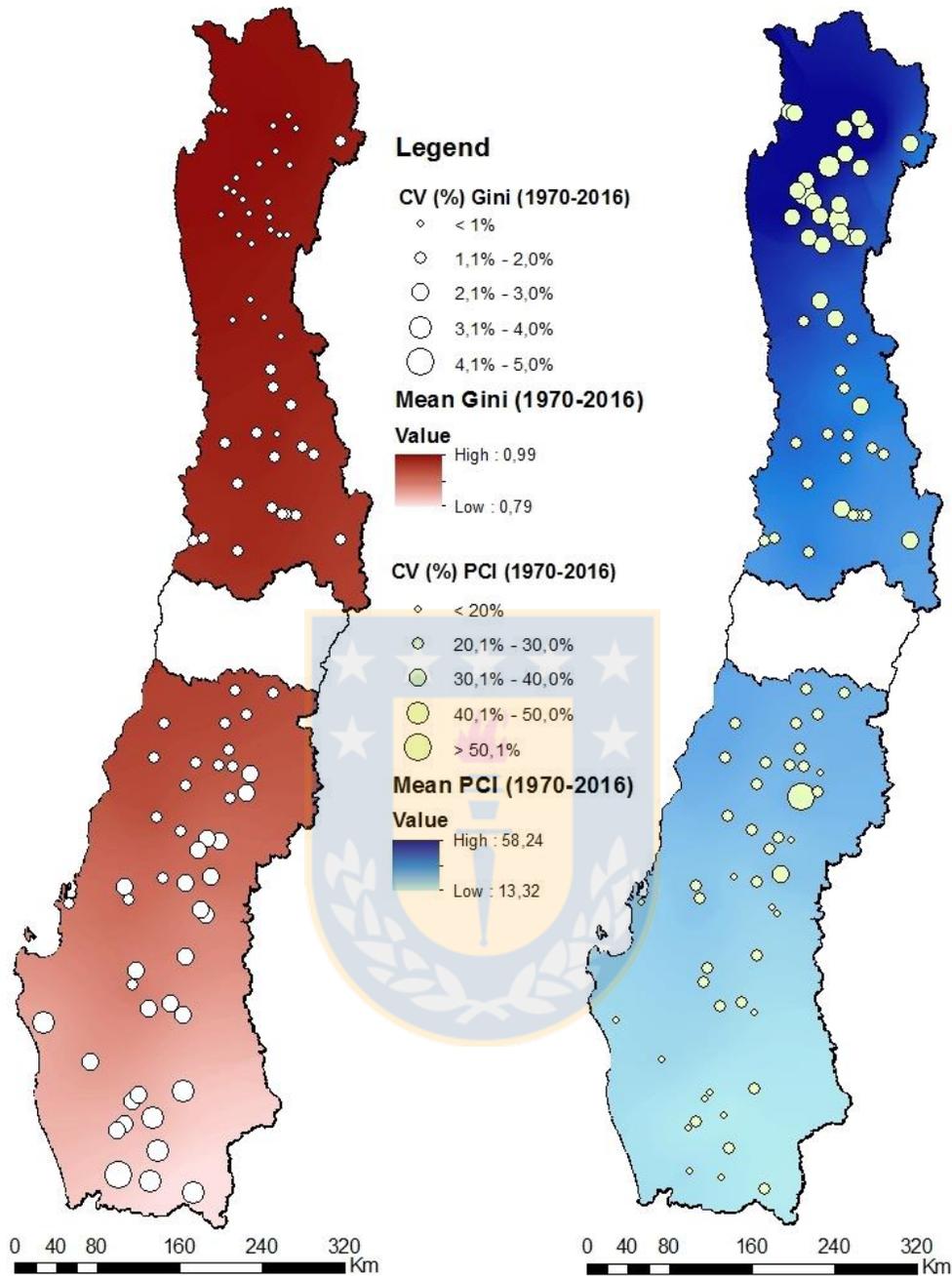
### 4.3. Resultados

La Figura 4.4. muestra, a modo de ejemplo, la curva de Lorenz para la estación de Monte Grande en la zona árido-semiárida, con una alta concentración (el valor del Índice Gini es casi 1) y la estación de Maquehue Temuco en la zona húmeda-subhúmeda, con una menor concentración de precipitaciones, ambos para el año 2016.

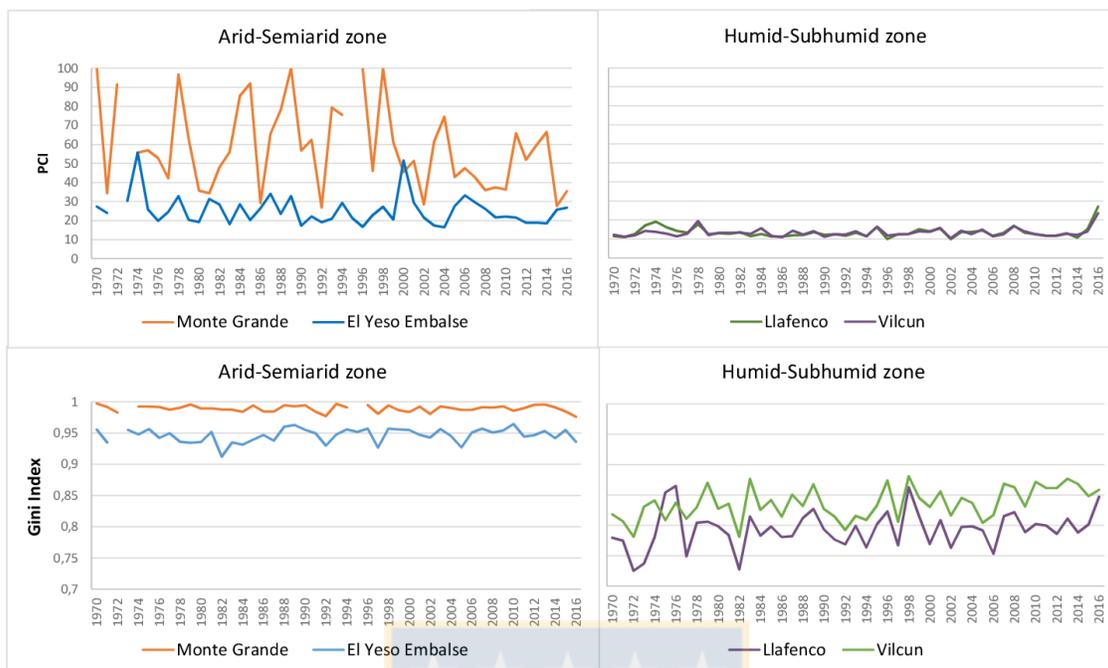


**Figura 4.4.** Curva de Lorenz para 2 estaciones pluviográficas en el área de estudio, para el año 2016. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 4.5, el coeficiente de Gini es alto en la zona árida-semiárida (mayor concentración de precipitaciones) y disminuye hacia la zona húmeda-subhúmeda (menor concentración de las precipitaciones). Al promediar los valores del coeficiente Gini en el periodo estudiado, se observa que en ambas zonas existe una baja dispersión, es decir no existen datos anómalos que sesguen la media aritmética, aunque la zona húmeda-subhúmeda posee una mayor dispersión en sus datos. Esto porque la zona árida-semiárida normalmente presenta una alta concentración de las precipitaciones como se observa, a modo de ejemplo, en la Figura 4.6; en cambio, la zona húmeda-subhúmeda presenta una mayor variabilidad en la concentración de las precipitaciones, lo que es reflejado por el coeficiente de Gini.



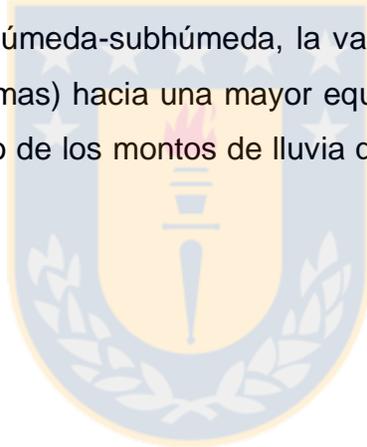
**Figura 4.5.** Resultados del valor promedio de los coeficientes de Gini y de ICP para el periodo estudiado (1970-2016) en la zona árida-semiárida y húmeda-subhúmeda. Fuente: Elaboración propia.

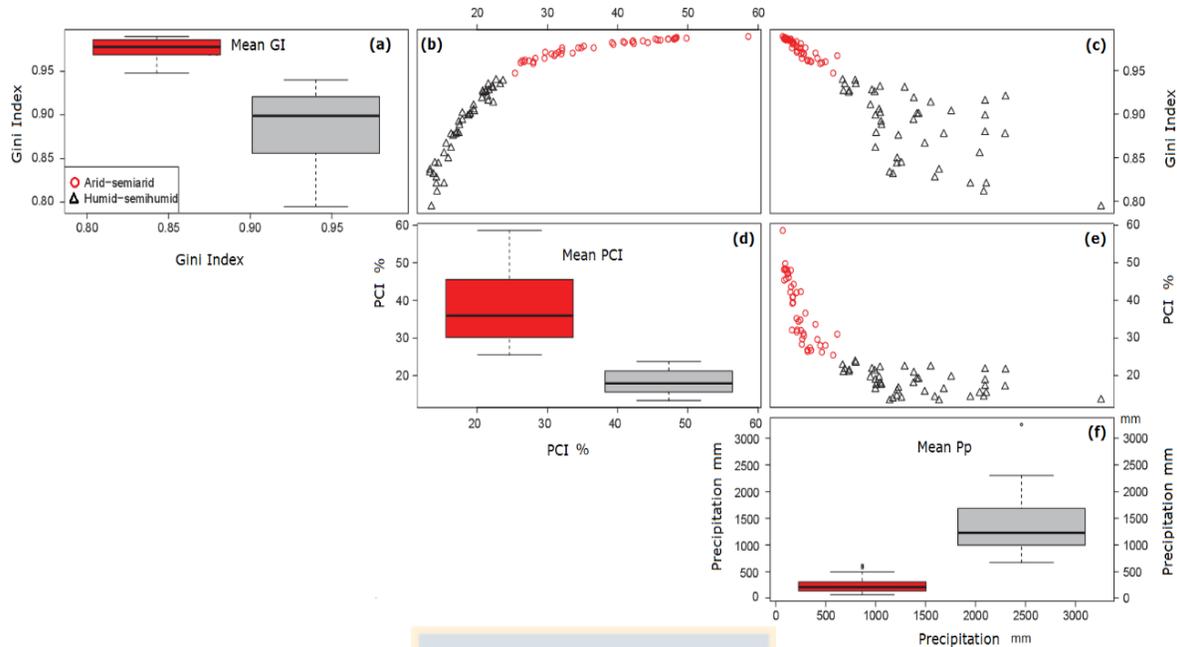


**Figura 4.6.** Valores de a) PCI para 2 estaciones de la zona Árida-Semiárida y 2 de la zona Húmeda-Subhúmeda; b) GINI para 2 estaciones de la zona Árida-Semiárida y 2 de la zona Húmeda-Subhúmeda. Fuente: Elaboración propia.

En relación al ICP se pudo establecer que conforme se avanza latitudinalmente desde la zona árida-semiárida, los valores de este indicador tienden a disminuir hasta en 30 puntos porcentuales en estaciones de la zona húmeda-subhúmeda. En relación al índice de Gini, que es calculado para datos diarios, se determinó que al avanzar latitudinalmente desde la zona árida-semiárida, el índice disminuye en casi 2 décimas, pero aumenta su coeficiente de variación en 3 puntos porcentuales (figura 4.5); esto deriva de que el índice de Gini considera datos diarios, y por ende, incluye los días en que no hay precipitaciones, hecho más frecuente en la zona árida-semiárida que en la zona húmeda-subhúmeda y de ahí los valores de mayor variabilidad que manifiesta esta última zona. Por último, se puede señalar en este análisis que los 2 índices disminuyen su valor conforme se avanza desde la zona árida-semiárida hasta la zona húmeda-subhúmeda, denotando una menor concentración de las precipitaciones a nivel mensual (ICP) y a nivel diario (Gini) en esta última zona.

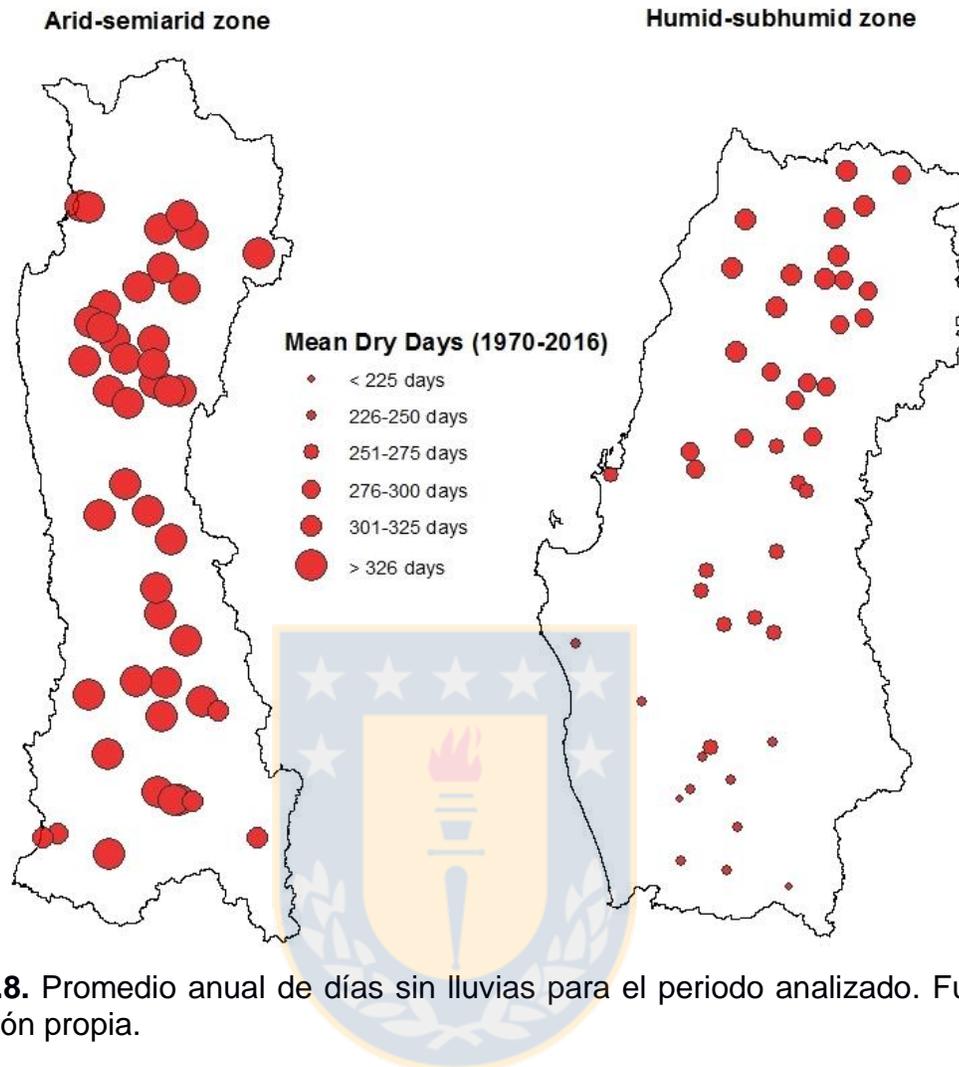
Al relacionar el coeficiente de Gini con las precipitaciones medias anuales (figura 4.7.), se observa que en la zona árida-semiárida existe una disminución del valor del mismo a medida que aumentan las precipitaciones medias anuales, en un rango de valores pequeños. Respecto a la zona húmeda-subhúmeda, también se denota una disminución del valor del coeficiente de Gini a medida que aumentan las precipitaciones, pero en un rango mayor que en la zona árida-semiárida. Lo anterior se debe a que, al existir mayor precipitación, se posee un mayor número de días con presencia de lluvias (Figura 4.8.), lo cual permite establecer que el Índice de Gini aumenta su equidad en la distribución de las precipitaciones, lo que se manifiesta en una disminución de sus valores. Como los montos de precipitación en la zona árida-semiárida son bajos, no superando en general los 350 mm de promedio anual, la variación del índice en esa zona es muy acotada, al nivel de 4 a 5 centésimas. En la zona húmeda-subhúmeda, la variación del Índice de Gini es más acentuada (15 centésimas) hacia una mayor equidad en la concentración de las precipitaciones, derivado de los montos de lluvia que alcanzan hasta los 3.200 mm promedio anuales.





**Figura 4.7.** Relación de la media del coeficiente de Gini e ICP respecto a las precipitaciones medias anuales para cada zona de estudio en el periodo 1970-2016. Los círculos color rojo indican zona árida-semiárida y los triángulos color negro, la zona húmeda-subhúmeda. **(a)** valores medios de Índice de Gini para las zonas árida-semiáridas y húmeda-subhúmeda; **(b)** relación entre el Gini Index y el PCI; **(c)** relación entre Gini Index y precipitación; **(d)** valores medios de PCI para las zonas árida-semiárida y húmeda-subhúmeda; **(e)** relación entre el PCI y la precipitación; **(f)** valores medios de precipitación para las zonas árida-semiáridas y húmeda-subhúmeda. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la relación entre el ICP y las precipitaciones medias anuales, la figura 4.7. muestra que, para la zona árida-semiárida, el ICP disminuye en 33 puntos porcentuales a medida que aumentan las precipitaciones. Lo mismo ocurre en la zona húmeda-subhúmeda, pero no es tan acentuada esta disminución (levemente superior a 10 puntos decimales). Lo anterior determina que en la medida que crecen las precipitaciones en la zona árida-semiárida, se evidencia una disminución en la concentración de las precipitaciones. No obstante, en la zona húmeda-subhúmeda, la disminución del ICP en función del aumento de las precipitaciones no es tan notoria, derivado que en esta zona las precipitaciones son notablemente más abundantes y por tanto la concentración normal es relativamente baja en relación a la zona árida-semiárida.



**Figura 4.8.** Promedio anual de días sin lluvias para el periodo analizado. Fuente: Elaboración propia.

Al relacionar los valores medios anuales del índice Gini, el ICP medio anual y las precipitaciones medias anuales por medio del Tau de Kendall, se observa lo siguiente: Una fuerte correlación entre el valor medio de Gini y el ICP para las 2 zonas estudiadas, de 0,91 y 0,86 (Tabla 4.1). Este hecho apunta a que el patrón de concentración de las precipitaciones en el país es descrito de igual forma por la resolución diaria y mensual, ya que ambos índices tienen un comportamiento similar. En cuanto a la relación de los índices (Gini e ICP) con las precipitaciones medias anuales, se observa que en la zona árida-semiárida la relación es fuerte e inversamente proporcional con valores de -0,83 y -0,74 respectivamente, mientras

que, en la zona húmeda-subhúmeda, aunque sigue siendo inversamente proporcional, la relación disminuye a -0,41 y -0,32 respectivamente.

**Tabla 4.1.** Correlaciones para Índice de Gini, Índice de Concentración de Precipitaciones y Precipitación media (Tau de Kendall)

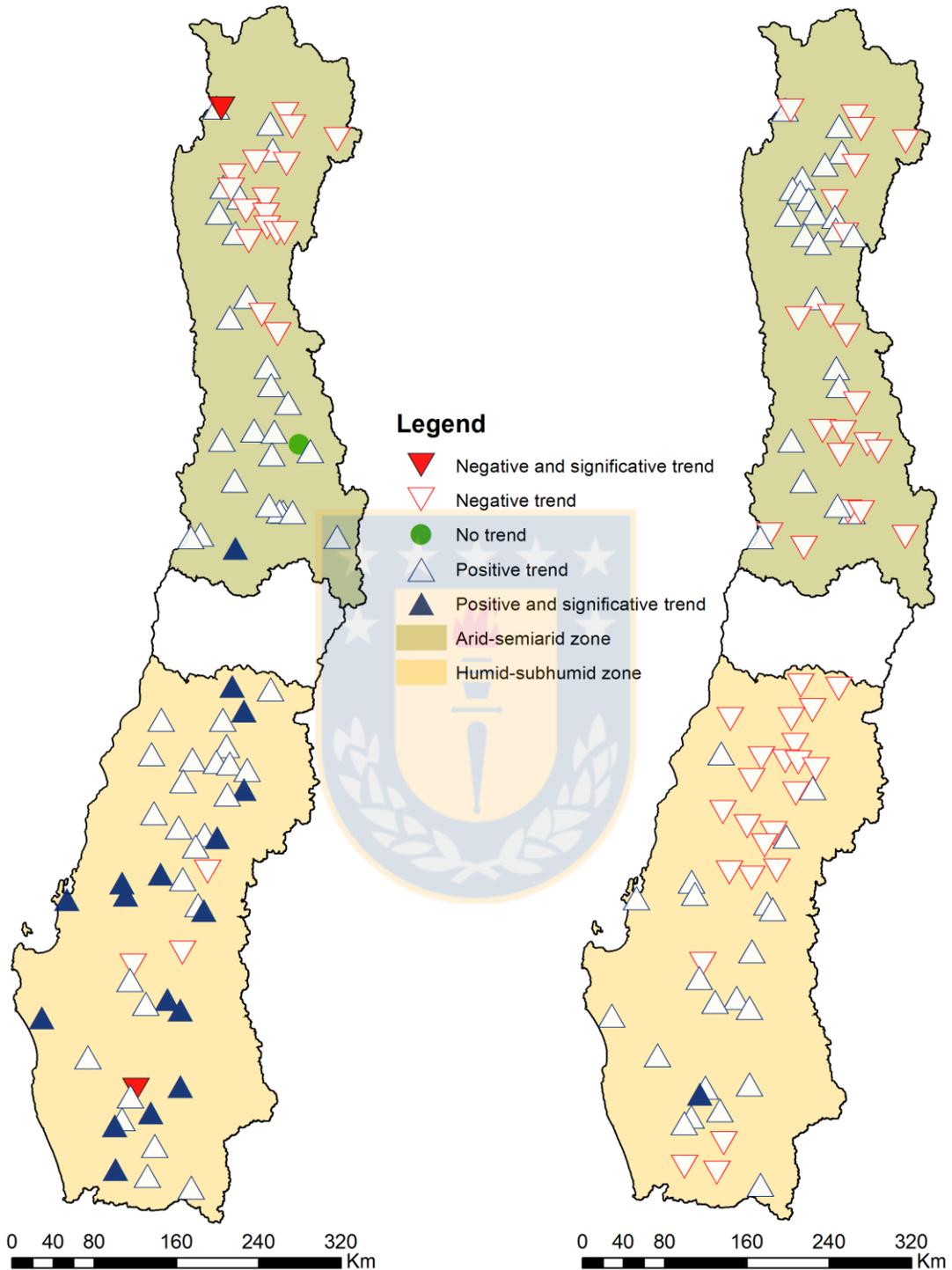
Zona	Índice	Gini	ICP	PP
Árida-semiárida	Gini		0,91*	-0,83*
	ICP	0,91*		-0,74*
	PP	-0,83*	-0,74*	
Húmeda-subhúmeda	Gini		0,86*	-0,41*
	ICP	0,86*		-0,32*
	PP	-0,41*	-0,32*	

\* $p < 0,01$ . Fuente: Elaboración propia.

Respecto del comportamiento temporal del coeficiente de Gini y el Índice de Concentración de Precipitaciones, en el periodo 1970-2016, el análisis de tendencia de Mann-Kendall muestra que el índice de Gini en la zona árida-semiárida presenta mayoritariamente tendencias positivas (59,1%), aunque sólo una de estas es significativa (Figuras 4.9 y 4.10). En la misma zona, se aprecia que un 38,6% de las tendencias son negativas, aunque 1 sola de ellas es significativa. Se verifica entonces una mínima proporción de tendencias significativas, lo cual permite afirmar que no hay grandes cambios en el tiempo en la concentración de las precipitaciones a nivel de esta macrozona.

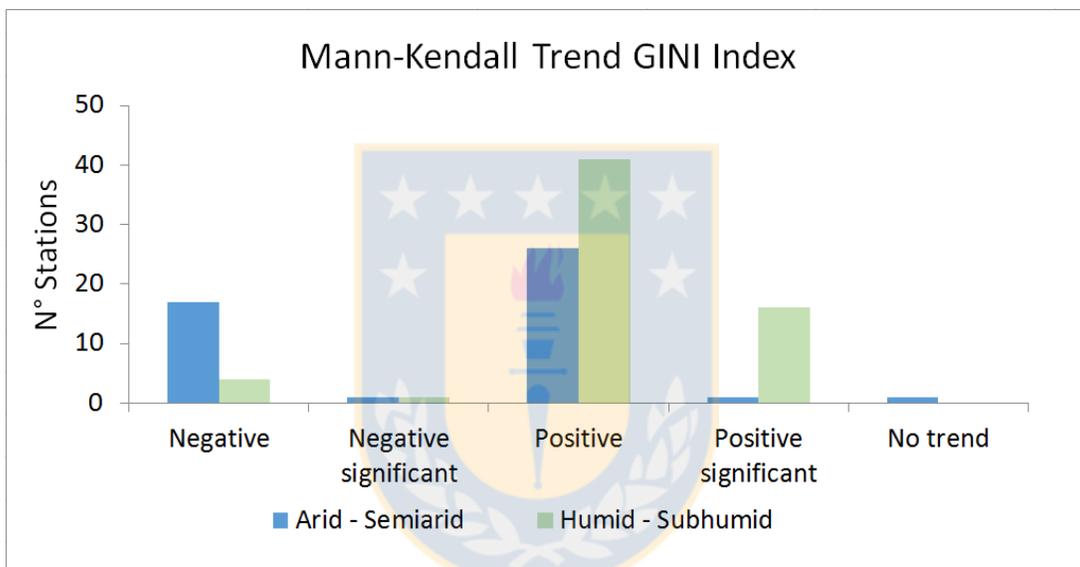
Gini Trends (1970–2016)

PCI Trends (1970–2016)



**Figura 4.9.** Tendencias de los coeficientes de Gini y de ICP según Mann-Kendall.  
Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la zona húmeda-subhúmeda se aprecia que las tendencias son principalmente positivas (91,1%); no obstante, las tendencias significativas no son mayoritarias, aunque presentan una proporción importante (35,6%). Los resultados obtenidos en la zona húmeda indican que las precipitaciones anuales se están concentrando en una menor cantidad de días. Esta concentración en las precipitaciones podría explicarse por el cambio en el régimen climático que Chile experimenta desde la década de los 70's (Jacques-Coper y Garreud, 2015).

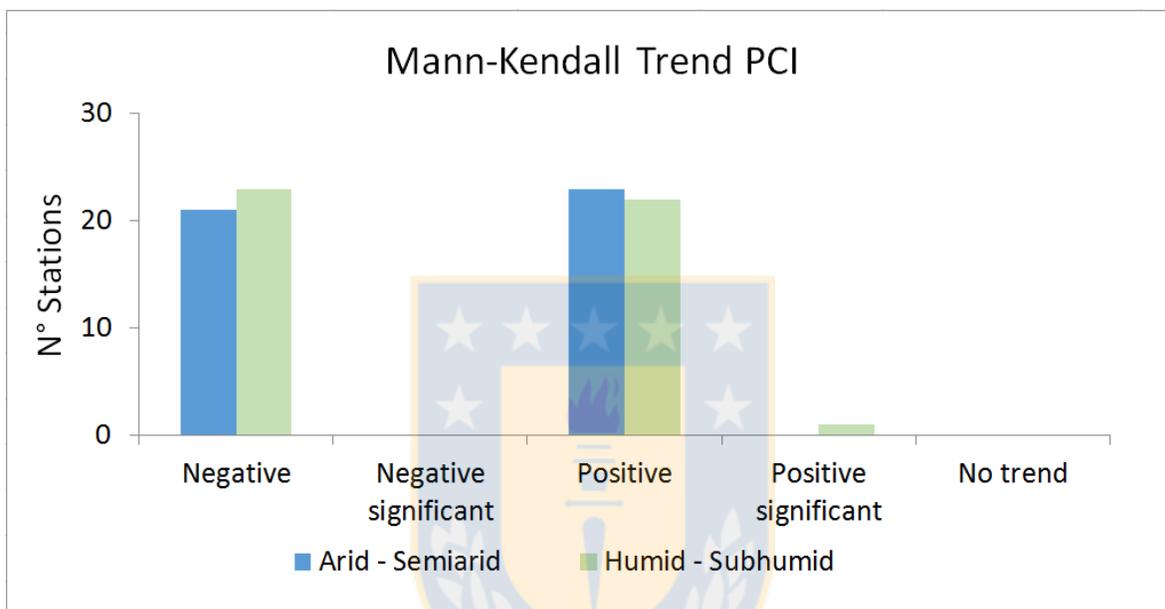


**Figura 4.10.** Tendencias Mann-Kendall encontradas para el coeficiente Gini. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, el ICP mostró que la proporción entre tendencias positivas y negativas para ambas zonas en estudio es menor que el Índice de Gini (en el ICP los valores de tendencias positivas y negativas están casi en razón 1:1, mientras que en Gini la razón entre ambas es de 3:1). Esta diferencia estaría condicionada por la naturaleza de ambos índices, pues el ICP utiliza valores mensuales de precipitación y Gini utiliza valores diarios, por lo que cuenta con muchos valores cero, los cuales serían ignorados al momento de estimar los valores mensuales. Estos valores crean una curva de Lorenz con muy poca pronunciación, por tanto, los valores del Índice de Gini se aproximan a 1. Esta misma razón también explicaría

el por qué el Índice de Gini fluctúa muy poco en la zona árida-semiárida, pues en esta zona las estaciones registran periodos bastantes largos sin precipitación.

Al analizar las tendencias del ICP (Figura 4.11), se observa que en su mayoría son positivas en la zona árida-semiárida, pero ninguna es significativa. Por el contrario, en la zona húmeda-subhúmeda se evidencia una presencia mayoritaria de tendencias negativas, aunque tampoco son significativas.



**Figura 4.11.** Tendencias de la prueba de Mann-Kendall para el ICP para ambas zonas. Fuente: Elaboración propia.

Al analizar las tendencias de las precipitaciones máximas en 24 horas, separándolas en periodo estival y periodo invernal (tabla 4.2), se observa que, en la zona árida-semiárida, y para ambos periodos, las tendencias negativas y positivas son similares, aunque las con significancia estadística son muy reducidas, no mayores al 1,5%.

La zona húmeda-subhúmeda denota un mayor número de tendencias negativas que positivas en ambos periodos (al menos en 30 puntos porcentuales), y se advierte una significancia estadística más acentuada que en la zona árida-semiárida, especialmente en el caso de las tendencias negativas, las que alcanzan hasta un 10%.

**Tabla 4.2.** Tendencias de las precipitaciones máximas en 24 horas por periodos (estival e invernal).

Zona	periodo	Negativas	Negativas significativas	Positivas	Positivas significativas	Sin tendencia
Árida-semiárida	Estival	140 (53,0%)	1 (0,4%)	114 (43,2%)	4 (1,5%)	10 (3,8%)
	Invernal	129 (48,9%)	4 (1,5%)	132 (50,0%)	3 (1,1%)	3 (1,1%)
Húmeda-subhúmeda	Estival	210 (77,8%)	9 (3,3%)	57 (21,1%)	0 (0%)	3 (1,1%)
	Invernal	175 (64,8%)	27 (10,0%)	94 (34,8%)	10 (3,7%)	1 (0,4%)

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4. Conclusiones

Las principales conclusiones que se desprenden de los resultados alcanzados establecen que los valores de concentración disminuyen a medida que se avanza latitudinalmente desde la zona árida-semiárida hasta la zona húmeda-subhúmeda; es decir, en la zona árida-semiárida la precipitación presenta una mayor concentración tanto en la escala diaria como mensual.

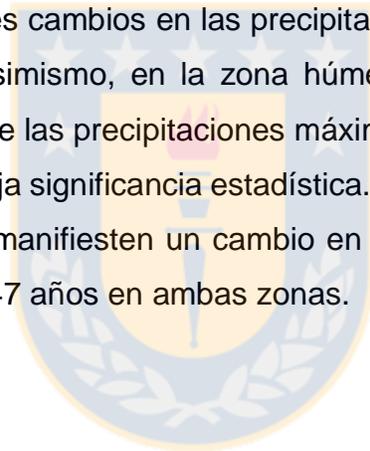
El Índice de Gini y el ICP presentan correlación positiva entre ellos, tanto para las zonas árida-semiárida como para húmeda-subhúmeda, lo que determina que ambos son aplicables a estas zonas con resultados similares a pesar de su diferencia en la resolución temporal de los datos.

Se observó que para el Índice de Gini existe una dominancia de las tendencias positivas, tanto para la zona árida-semiárida (59,1% de las estaciones) y húmeda-subhúmeda (91,1% de las estaciones), aunque en su mayoría no son significativas; para el ICP, sólo la zona árida-semiárida presenta tendencias positivas (con un 52,3% de las estaciones), mientras que la zona húmeda-subhúmeda presenta tendencias negativas en 51,1% de las estaciones, aunque no se evidencian tendencias negativas significativas.

A pesar de que en general no se advierten significancias estadísticas para el Índice de Gini, la zona húmeda-subhúmeda manifiesta una mayor preponderancia de tendencias positivas, con una significancia estadística no despreciable (35,6%). Esto estaría señalando que en la zona húmeda-subhúmeda las lluvias se estarían concentrando a nivel diario, no así en la zona árida-semiárida.

Los resultados obtenidos para el ICP en ambas zonas señalarían que a nivel anual no existe una evidencia concreta de incremento o decremento de la concentración de las precipitaciones anuales en el tiempo, para las estaciones y el periodo estudiado.

Finalmente, los resultados obtenidos en el análisis de las tendencias de las precipitaciones máximas en 24 horas estarían señalando que en la zona árida-semiárida no habría mayores cambios en las precipitaciones máximas en 24 horas en los últimos 47 años. Asimismo, en la zona húmeda-subhúmeda, habría una disminución más evidente de las precipitaciones máximas en 24 horas en el mismo periodo, aunque con una baja significancia estadística. Esto permite concluir que no hay evidencias claras que manifiesten un cambio en las precipitaciones máximas en 24 horas en los últimos 47 años en ambas zonas.



## V. ANÁLISIS DE EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EN LA ESTACIÓN POTRERO GRANDE, REGIÓN DEL MAULE.

Existen muchos estudios del comportamiento de la precipitación, pero la mayoría utilizan registros diarios, es decir, la lluvia acumulada en 24 horas. No obstante, la precipitación es uno de los elementos del clima que mayor variación presenta, especialmente en términos temporales. Una tormenta o evento de precipitación tiene su propia dinámica y obedece a factores climáticos y orográficos y lo que suceda en 1 hora puede ser distinto a lo que ocurra en 30 minutos o en 24 horas, en cuanto a intensidad de la precipitación o monto de lluvia.

Ejemplos de ello, se puede ver en el capítulo IV de esta tesis (Sangüesa *et al.*, 2018), donde se señala que en la zona húmeda-subhúmeda las lluvias se estarían concentrando a nivel diario (dado por el Índice de Gini), mientras que, en esta misma zona, el Índice de Concentración de Precipitaciones (ICP) (que utiliza valores mensuales) no muestra variación; y en el caso de la precipitación máxima en 24 horas tampoco se evidencia cambios en sus valores para la misma zona. Otro ejemplo está dado por la estación Digua Embalse, que como se mencionó anteriormente (capítulo III de esta tesis), presenta una tendencia significativa al aumento de su intensidad máxima de lluvia para duraciones de 15, 30, 45, 60 y 120 minutos; mientras que, para duraciones de 4, 6, 12 y 24 horas, esta tendencia no es significativa.

Distintos procesos como de producción de agua de una cuenca, generación de inundaciones, de erosión de suelos, acumulación de aguas lluvias, comportamiento del complejo suelo-vegetación, entre otros, están fuertemente relacionados con los eventos de lluvia y sus características como la duración del evento, el monto de lluvia caída y la intensidad del evento. Por ejemplo, en procesos erosivos, la Universal Soil Loss Equation (USLE) define una tasa de erosión en base a eventos de lluvia, donde interesa conocer la Intensidad máxima en 30 minutos para cada evento (Wischmeier y Smith, 1978). Por otra parte, existe un creciente interés en conocer el comportamiento de los eventos de lluvia para el diseño de

sistemas de captación de aguas lluvias en viviendas urbanas (Guo y Baetz, 2007); y en relación a las inundaciones también se ha demostrado la importancia de la estructura de las precipitaciones y sus fluctuaciones dentro de la tormenta en la generación de los volúmenes de agua circulantes (Kusumastuti *et al.*, 2007; Dunkerley *et al.*, 2008).

En este marco, surge la necesidad de conocer cómo se comportan las precipitaciones a escalas subdiarias e incluso subhorarias, y saber, por ejemplo, cuántos eventos ocurren en el año y con qué características de intensidades, monto de lluvia y duración, entre otras.

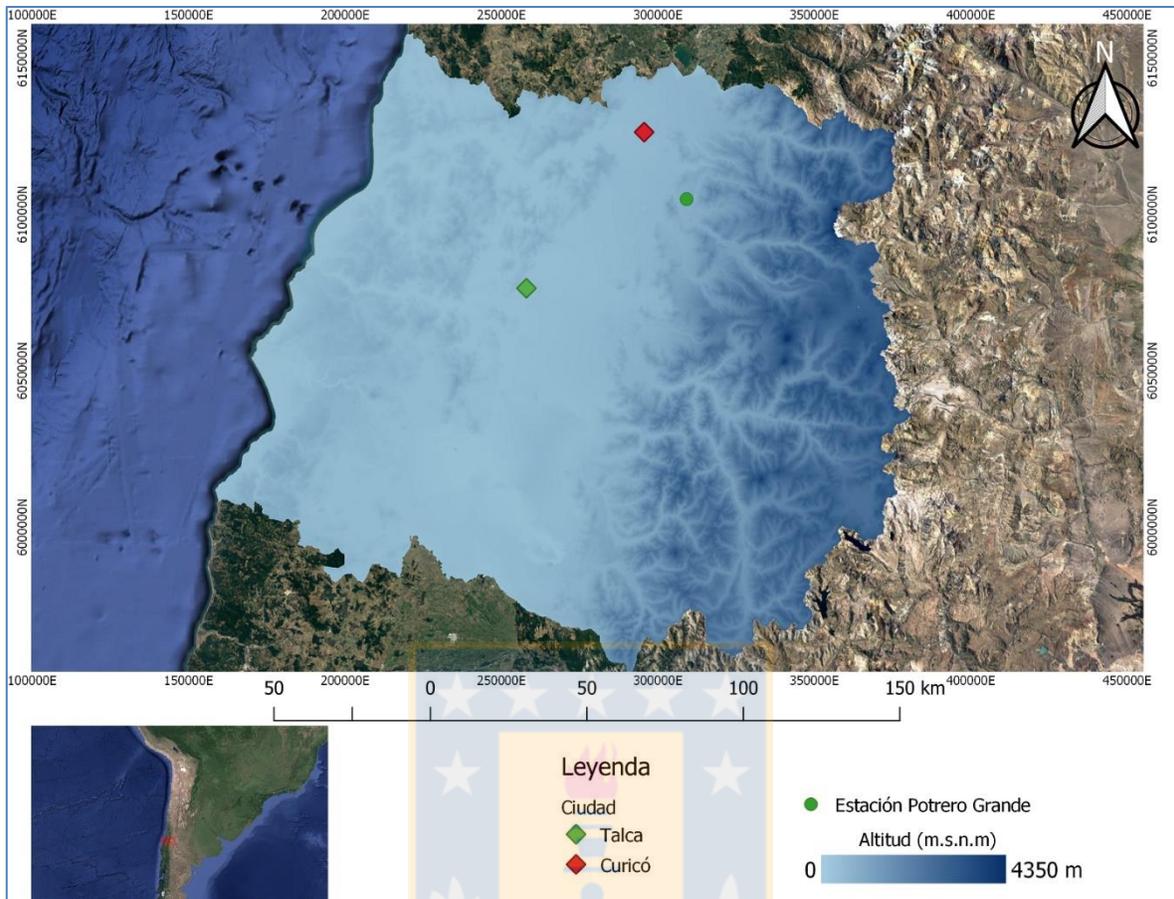
En el presente capítulo se presenta un estudio de caso de la estación pluviográfica Potrero Grande, ubicada en la provincia de Curicó, en la que se identificaron y caracterizaron los eventos de lluvia ocurridos entre los años 1982 y 2009.

## **5.1. Materiales y Métodos**

### **5.1.1. Área de estudio**

El estudio se realizó en la estación Potrero Grande, ubicada en la parte norte de la región del Maule. Se ubica a los pies de la precordillera andina a 460 msnm y pertenece a la subcuenca del río Lontué de la cuenca del río Mataquito. Su clima es mediterráneo (BCN, s.f) y presenta una pluviometría anual de 1144 mm.





**Figura 5.1.** Mapa de ubicación de la estación Potrero Grande. Fuente: Elaboración propia.

## 5.1.2. Metodología

### 5.1.2.1. Determinación de los eventos

En base a la digitalización y procesamiento de las bandas pluviográficas (explicado en el apartado 3.1.2.), se obtuvo la base de datos de los registros de precipitación de la estación Potrero Grande en el periodo de 1982 – 2009 (28 años). Estos registros dan cuenta de la precipitación acumulada en lapsos de 15 minutos con un desplazamiento de 5 minutos. Estos datos se ordenaron en una planilla Excel y se determinaron los eventos ocurridos en el periodo.

Para definir un evento de lluvia se utilizó un criterio de mínimo tiempo sin lluvia (Minimum inter-event time, MIT) muy utilizado por diversos autores, tales como Dunkerley *et al.*, (2008); Gou y Baetz (2007), Levia *et al.* (2004), entre otros. Ellos han utilizado distintos tiempos sin lluvia, sin llegar acuerdo entre cuál es el tiempo más adecuado. En la siguiente tabla se muestra un compilado de distintos autores (Dunkerley *et al.*, 2008).

**Tabla 5.1.** Rango de tiempo mínimo sin lluvias utilizado por diversos autores.

Inter-event interval	Minimum event depth	Basis for event definition	Reference
3 min		Digitiser resolution	Vilar and Burgueño (1995)
15 min		Correlation with runoff events	Cattan <i>et al.</i> (2006)
15 min	0.2 mm	Not specified	Vernimmen <i>et al.</i> (2007)
20 min		Not specified	Bidin and Chappell (2006)
30 min	0.5 mm	Not specified	Balme <i>et al.</i> (2006)
30 min		Proportion of total rainfall included in events	Cosgrove and Garstang (1995)
1 h	0.1 m	Not specified	Cutrim <i>et al.</i> (2000)
1 h	5.0 mm	Not specified	Ziegler <i>et al.</i> (2006)
2 h	5.0 mm	Not specified	Fornis <i>et al.</i> (2005)
2 h		Estimated subjectively	Klassen <i>et al.</i> (1998)
2 h	0.5 mm in 0.5 h	Not specified	Germer <i>et al.</i> (2006)
3 h		Not specified	Cuartas <i>et al.</i> (2007)
4 h		Not specified	Xiao <i>et al.</i> (2000a)
5 h		Not specified	Deguchi <i>et al.</i> (2006)
6 h		Not specified	Loukas and Quick (1996)
6 h	13.0 mm	Not specified	Agnese <i>et al.</i> (2006)
6 h		Not specified	Murakami (2006)
6 h		Judged to isolate single storm events	Manfroi <i>et al.</i> (2004)
6 h	0.5 mm	Judgement	Link <i>et al.</i> (2004)
6 h		Observed drying time for upper canopy	Tobón Marin <i>et al.</i> (2000)
8 h		Following Lloyd <i>et al.</i> (1988)	Asdak <i>et al.</i> (1998)
10 h		Sap flow measurement	Toba and Ohta (2005)
12 h (or 8 h if all in daylight)		Canopy drying time (estimated)	Silva and Okumura (1996)
12 h		Not specified	Bracken <i>et al.</i> (2008) (criterion for rain 'spell')
24 h	Measurable amount	Not specified	Levia and Herwitz (2002)
24 h	0.254 mm	Not specified	Levia (2004)

Fuente: Dunkerley *et al.*, 2008.

Para este estudio, se definió un tiempo sin lluvia de 24 horas, por lo tanto, un evento de lluvias queda determinado por aquel periodo en que se registra una precipitación acumulada mayor a 5 mm, antecedido y seguido por un lapso de al menos 24 h sin lluvia. Adicionalmente, se agregó otra condición que dice que en 30 minutos debe registrarse a lo menos 1 mm de lluvia, de lo contrario se descarta como evento.

Esta última condición responde al hecho de que existen lecturas de 0,01 mm cada 5 minutos, lo cual, probablemente, no representa lluvia; si no que puede deberse a la presencia de rocío o al distinto grosor de la traza dibujada en la banda, entre otras razones.

### 5.1.2.2. Descripción de los eventos

Cada evento se describió en términos de fecha de ocurrencia (fecha y hora de inicio) y de las siguientes variables:

- N° Eventos: se registró el número de eventos ocurridos por mes, por año y por estación.
- Duración del evento: N° de horas desde que inicia hasta que termina el evento; en horas
- Precipitación del evento: monto de lluvia caída durante el evento, en mm.
- Intensidad media del evento: definida como el monto de lluvia dividido por la duración del evento (mm/h),
- Intensidad máxima para 15 min (**Imax15**): intensidad máxima del evento para una duración de 15 minutos, en mm/h.
- Intensidad máxima para 30 min (**Imax30**): intensidad máxima del evento para una duración de 30 minutos, en mm/h.
- Intensidad máxima para 45 min (**Imax45**): intensidad máxima del evento para una duración de 45 minutos, en mm/h.
- Intensidad máxima para 1 h (**Imax1**): intensidad máxima del evento para una duración de 1 hora, en mm/h.
- Intensidad máxima para 2 h (**Imax2**): intensidad máxima del evento para una duración de 2 horas, en mm/h.
- Intensidad máxima para 4 h (**Imax4**): intensidad máxima del evento para una duración de 4 horas, en mm/h.
- Intensidad máxima para 6 h (**Imax6**): intensidad máxima del evento para una duración de 6 horas, en mm/h.

- Intensidad máxima para 12 h (**Imax12**): intensidad máxima del evento para una duración de 12 horas, en mm/h.
- Intensidad máxima para 24 h (**Imax24**): intensidad máxima del evento para una duración de 24 horas, en mm/h.

Las estaciones del año están definidas por los meses de la siguiente forma: Verano= diciembre, enero, febrero; Otoño= marzo, abril y mayo; Invierno= junio, julio y agosto; Primavera= septiembre, octubre y noviembre.

### **5.1.2.3. Análisis de tendencia de los eventos e intensidades máximas**

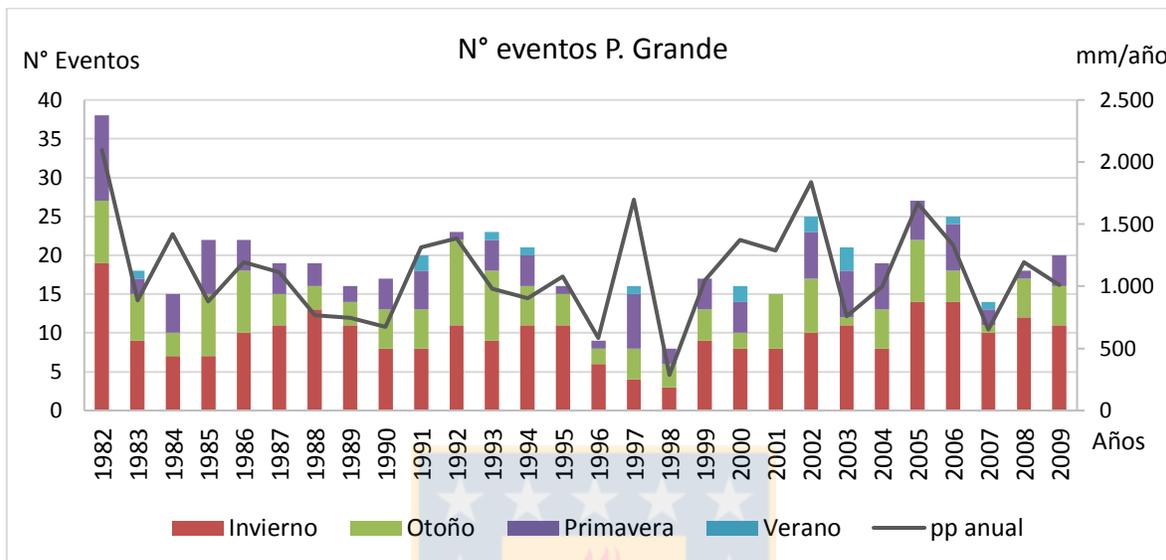
Se aplicó la prueba de tendencia Mann-Kendall (explicado en el 3.1.2. letra d) para las variables ya mencionadas, en primer lugar, para todos los eventos registrados a nivel mensual, anual y estacional. Y luego se aplicó para los eventos extremos, definidos como aquellos ubicados en el percentil 10% superior en cuanto a intensidad media del evento.

## **5.2. Resultados y análisis**

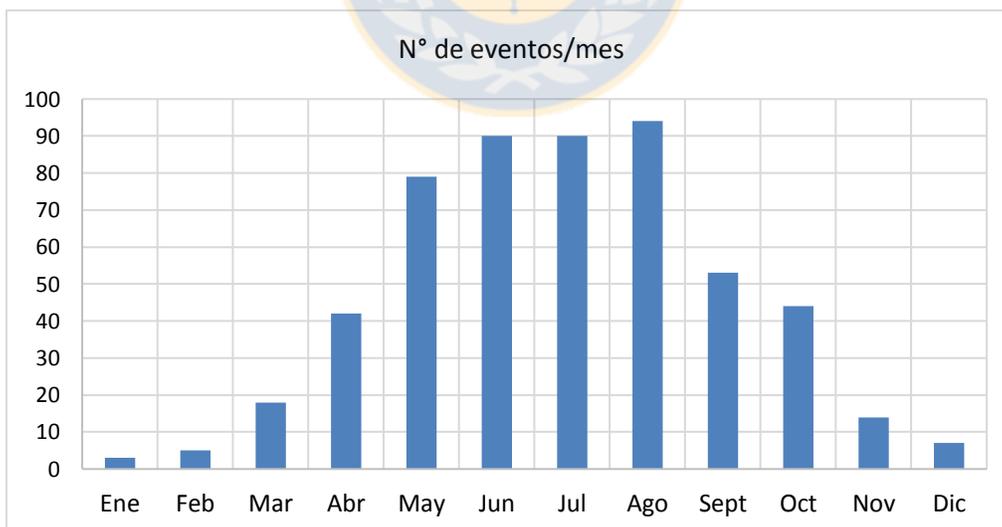
### **5.2.1. Descripción de los eventos**

Según los criterios definidos para un evento de lluvia, en la estación Potrero Grande se registraron 539 eventos en el periodo 1982 – 2009, con un promedio de 19 eventos por año (desviación estándar de 5,7 y coeficiente de variación de 0,3); el valor máximo encontrado es de 38 eventos durante el año 1982 y el mínimo es de 8 eventos en el año 1998 (Figura 5.2). Si se ve a nivel mensual, 3 meses concentran el 50% de los eventos, estos son: junio, julio y agosto, los que corresponden a la temporada de invierno (Figura 5.3). Si se considera además el mes de mayo y septiembre, esta proporción sube a 75%. Por otra parte, durante los meses estivales, de diciembre a febrero, solo se registraron 15 eventos (2,8%), lo

que está acorde con la presencia de un clima mediterráneo, con una marcada estación lluviosa en invierno y seca en verano.

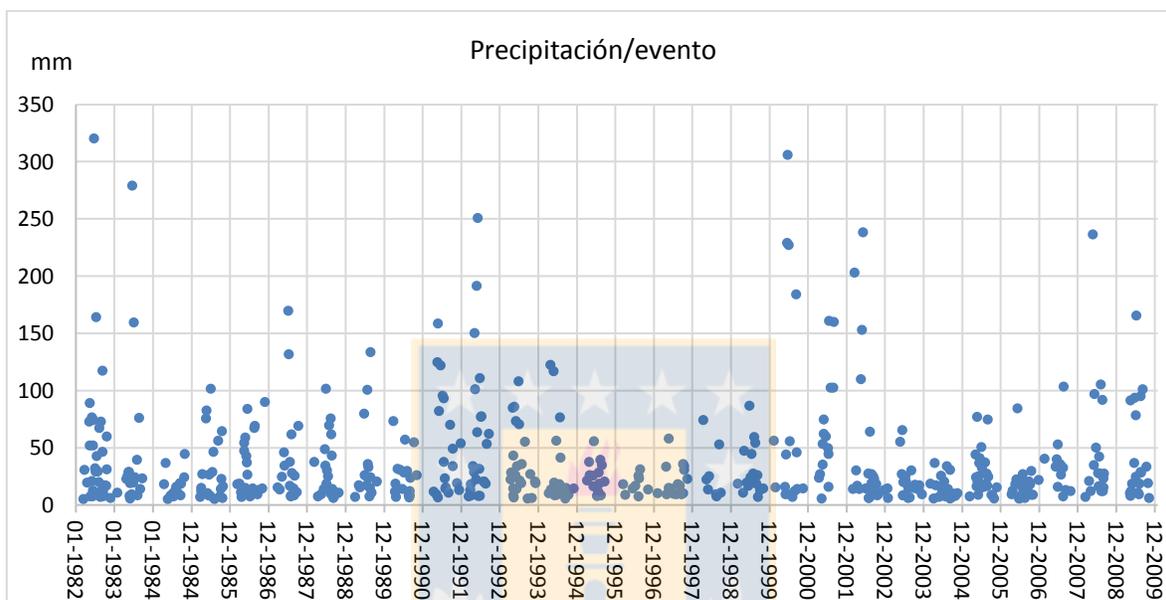


**Figura 5.2.** Distribución anual y estacional de la ocurrencia de los eventos de precipitación en la estación Potrero Grande en el periodo 1982 – 2009. Fuente: Elaboración propia.



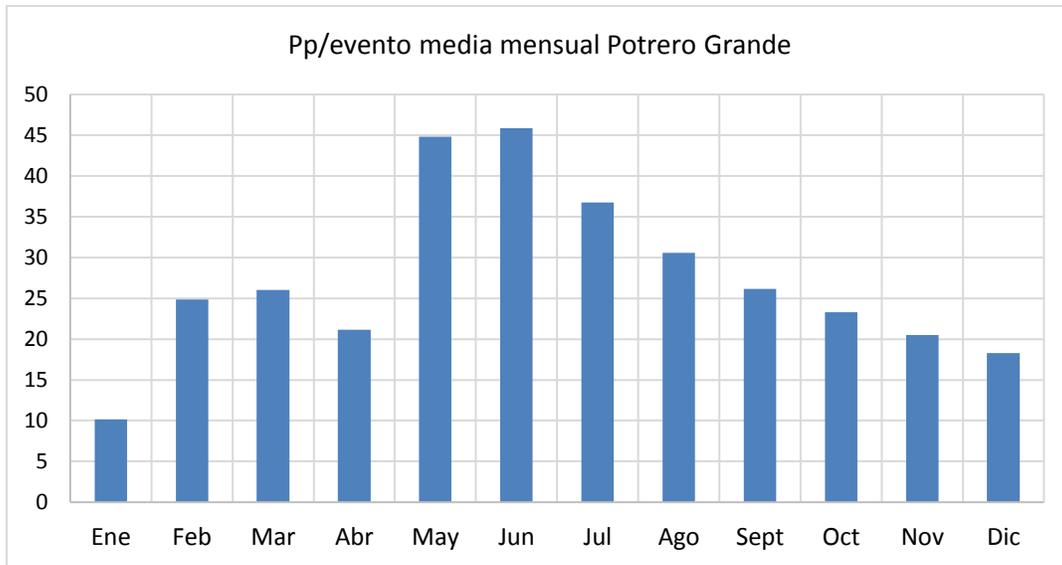
**Figura 5.3.** Distribución de la frecuencia mensual de los eventos de precipitación para la estación Potrero Grande en el periodo 1982 – 2009. Fuente: Elaboración propia.

El monto de lluvia caída por evento presenta una alta variabilidad, con un coeficiente de variación de 1,2. El valor más alto encontrado es de 320 mm caídos en 4 días (23 de junio 1982), mientras que el menor fue de 5 mm en 1,6 h, ocurrido el 16 marzo de 1982 (Figura 5.4).



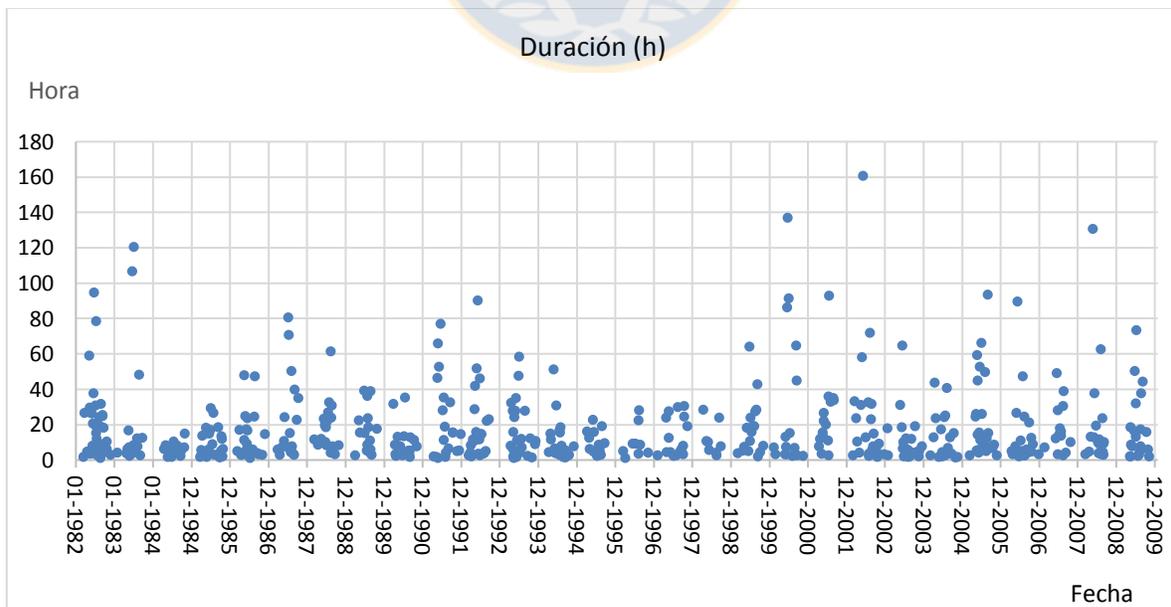
**Figura 5.4.** Monto total de precipitación caída por evento registrado en la estación Potrero Grande en el periodo 1982 – 2009. Fuente: Elaboración propia.

A nivel mensual los eventos con mayor pluviometría ocurren entre los meses de junio y mayo, con 46 y 44 mm/evento, respectivamente (Figura 5.5).

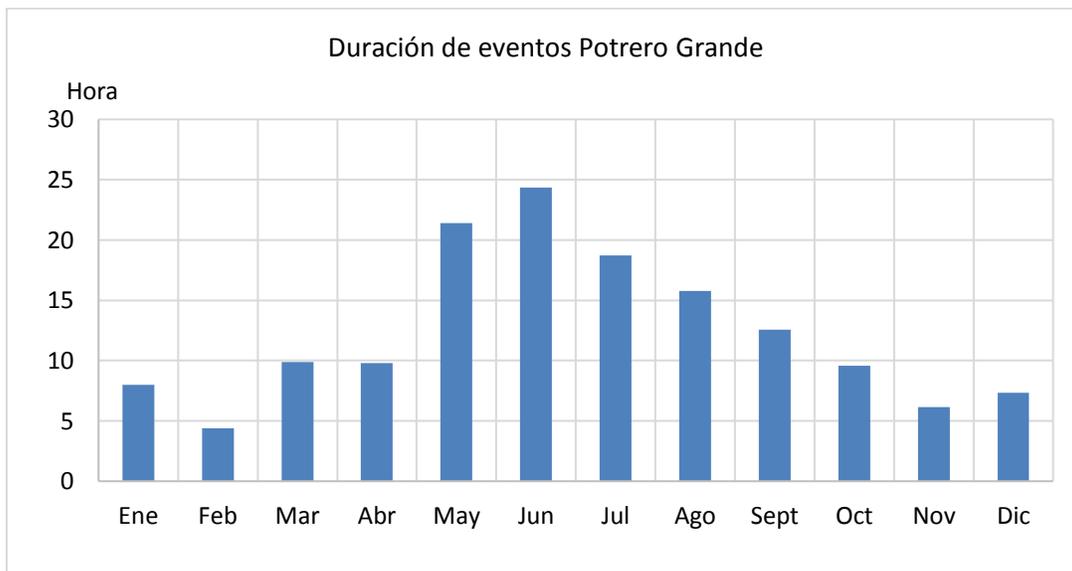


**Figura 5.5.** Monto de precipitación por evento para la estación Potrero Grande en el periodo 1982 – 2009. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la duración de los eventos, estos varían entre un mínimo de 0,8 h (24 mayo 1991) y un máximo de 160,6 h ocurrido el 31 de mayo de 2002 (Figura 5.6). A nivel mensual, los meses mayo, junio y julio presentan las mayores duraciones promedio, mientras que en los meses estivales se dan los menores valores (Figura 5.7.).

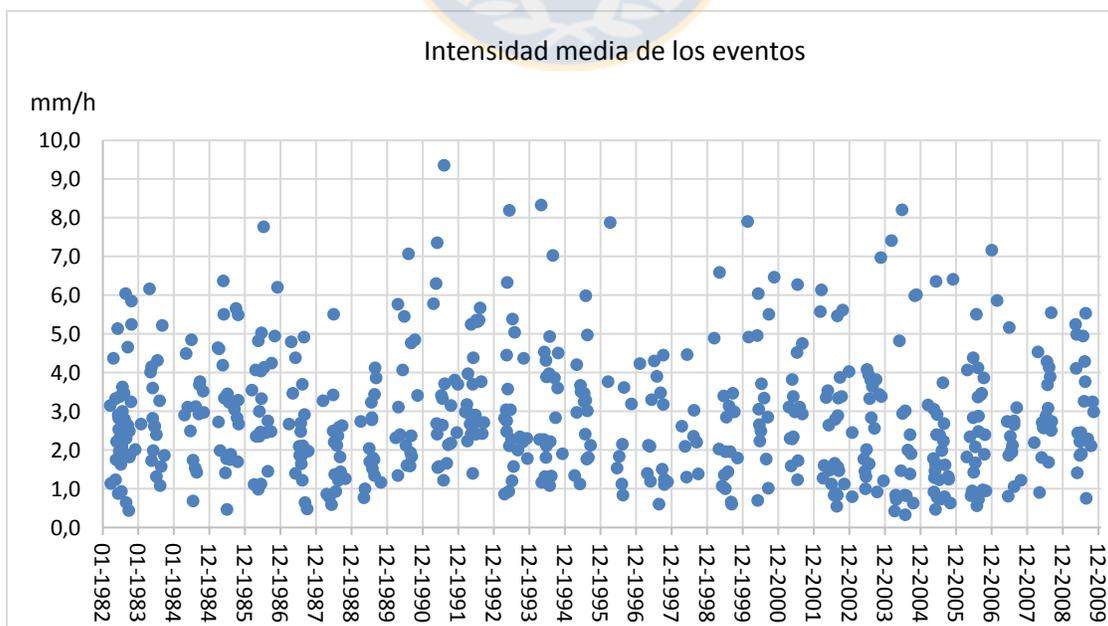


**Figura 5.6.** Duración de los eventos ocurridos en el periodo 1982 – 2009 en la estación Potrero Grande. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.7.** Distribución de la duración media mensual de los eventos de precipitación para la estación Potrero Grande en el periodo 1982 – 2009. Fuente: Elaboración propia.

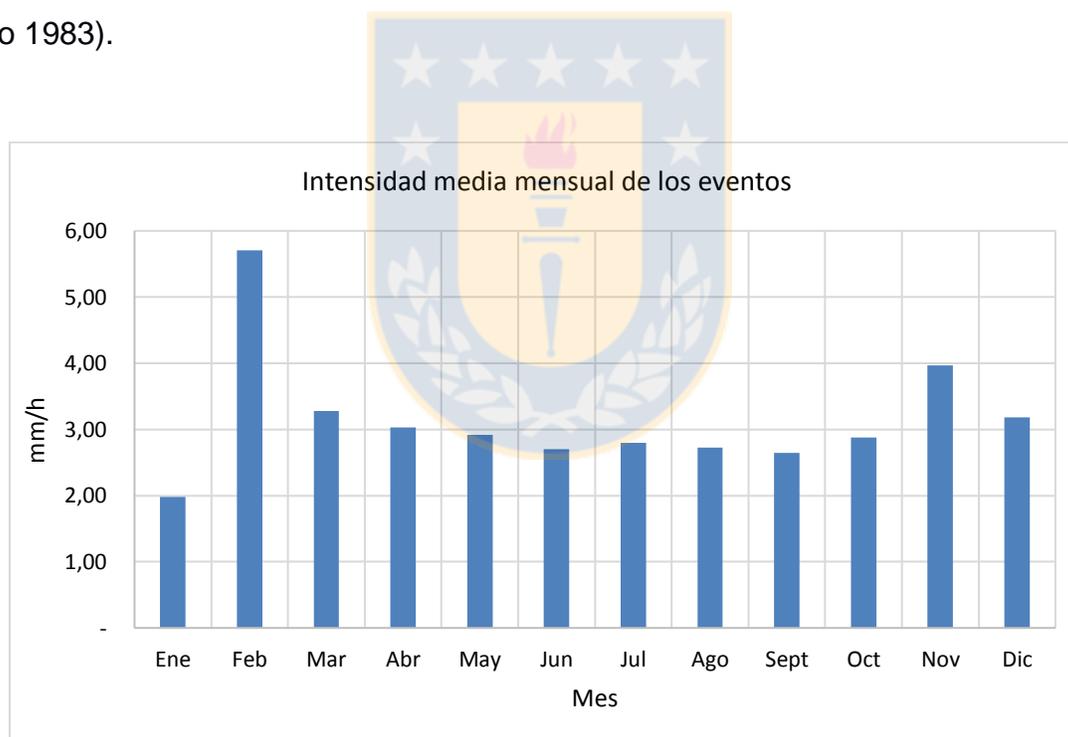
En cuanto a la intensidad de los eventos, este valor fluctúa entre 0,34 mm/h (20 de julio de 2004) y 9,36 mm/h (5 de agosto de 1991), con un valor promedio de 2,87 y coeficiente de variación de 0,6 (Figura 5.8).



**Figura 5.8.** Intensidad de los eventos ocurridos en el periodo 1982 – 2009 en la estación Potrero Grande. Fuente: Elaboración propia.

Si se analiza la intensidad media por evento a nivel mensual destaca el mes de febrero con los mayores valores, con un promedio de 5,7 mm/h (Figura 5.9). En este mes solo se registraron 5 eventos y estos presentan intensidades altas, entre 4,24 (año 1997) y 7,91 (año 2000), aunque las duraciones de estos eventos no superan las 8 h. Esto es relevante si se considera que en el mes de febrero existen cultivos agrícolas en desarrollo, especialmente en etapa de fructificación y cosecha, y que pueden verse afectados por estas altas intensidades, generando una situación de riesgo para los agricultores.

Por otra parte, el mes de enero presenta los menores valores, los que fluctúan entre 0,8 y 2,68 mm/h, en sus 3 eventos registrados (2 el año 2003 y 1 el año 1983).



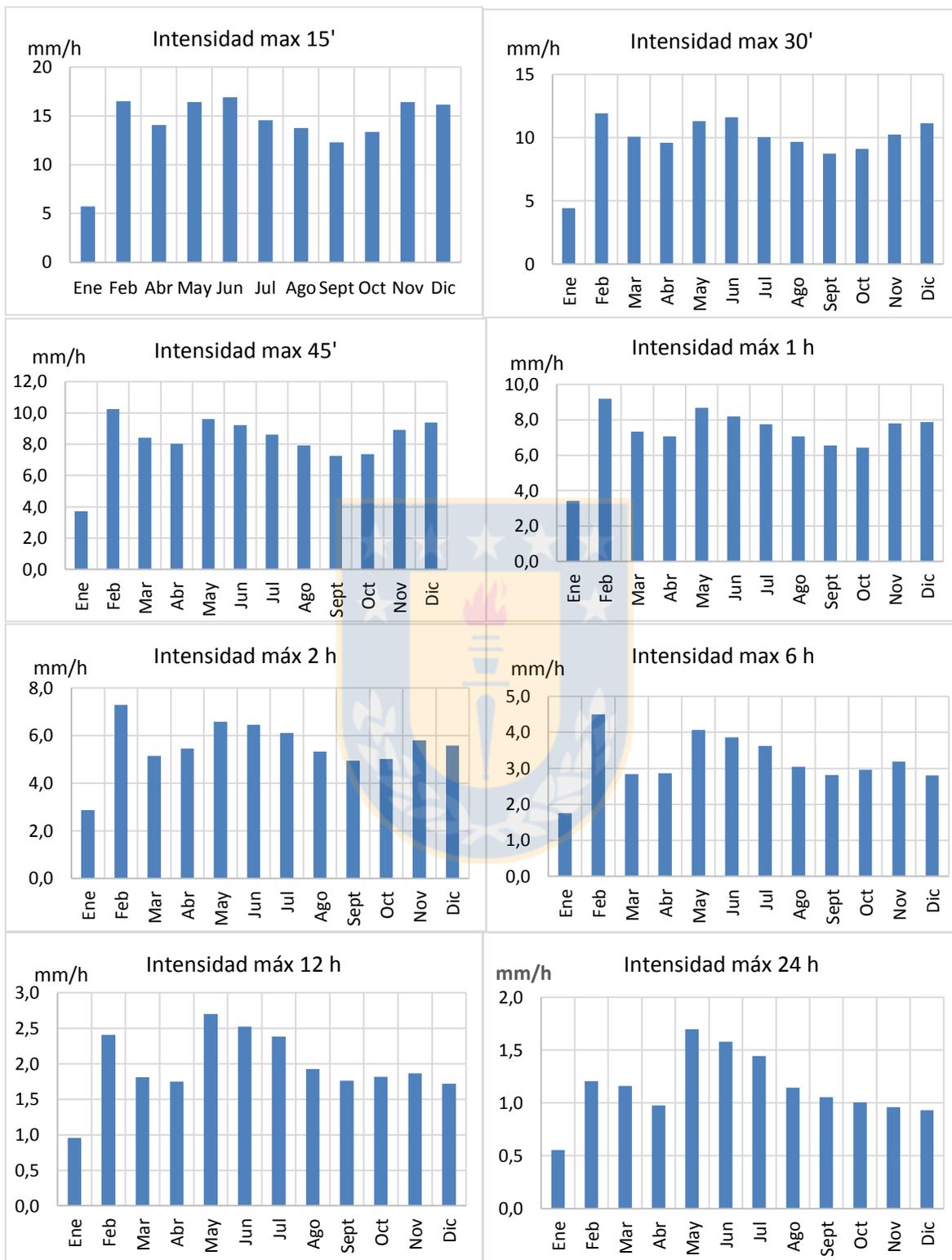
**Figura 5.9.** Intensidad media mensual de los eventos ocurridos en el periodo 1982 – 2009 en la estación Potrero Grande. Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la intensidad máxima para las distintas duraciones consideradas, se aprecia que, para 15 minutos de duración, el valor mínimo ocurre en enero con 5,7 mm/h, mientras que, en el resto de los meses, los valores fluctúan entre 12,3 mm/h del mes de septiembre y 16,9 del mes de junio (Figura 5.10).

Para una duración de 30 minutos, enero sigue siendo el mes de menor registro (4,4 mm/h), mientras que el resto de los meses fluctúan entre 8,7 (septiembre) y 11,9 mm/h (febrero). El mismo patrón se observa para las duraciones de 45 minutos, 1, 2 y 6 horas, en que enero es el mes de menor intensidad máxima y febrero presenta los mayores valores. Ya para las duraciones mayores, es decir, para 12 y 24 horas, el mes de mayo registra las mayores intensidades máximas, pero enero sigue siendo el menor.

Nuevamente el mes de febrero, que presenta una baja pluviometría, presenta las mayores de intensidades de lluvia para las duraciones subhorarias, lo que puede afectar negativamente la producción agrícola.





**Figura 5.10.** Promedio mensual de la intensidad máxima por evento para duraciones de 15, 30 y 45 minutos y 1, 2, 6, 12 y 24 h. Fuente: Elaboración propia.

## 5.2.2. Análisis de tendencia de los eventos e intensidades máximas

### 5.2.2.1. Para todos los eventos a nivel mensual y anual

Se analizaron 13 variables para los 11 meses más el valor anual de cada variable, completando un total de 156 series analizadas (Tabla 5.2.). Cabe mencionar que como en el mes de enero se registraron solo 3 eventos, no fue posible incluirlo en el análisis de tendencia, por no tener datos suficientes. En la siguiente tabla se presentan las tendencias resultantes para cada serie analizada.

**Tabla 5.2.** Tendencias temporales mensuales de las variables en estudio a través de Mann-Kendall

	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	N°+	N°-
N° eventos	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	-	6	5
Pp total evento	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	3	8
Duración evento	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	6	5
Int /evento	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	6	5
Int 15 min	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	+	7	4
Int 30 min	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	4	7
Int 45 min	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	5	6
Int 1 h	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	-	5	6
Int 2 h	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	-	-	5	6
Int 4 h	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	3	8
Int 6 h	+	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	5	6
Int 12 h	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	2	9
Int 24 h	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	4	7
N° +	10	7	4	3	8	2	8	10	1	6	2	4		
N° -	3	6	9	10	5	11	5	3	12	7	11	9		

+: tendencia positiva; - : tendencia negativa; N°+: N° tendencias positivas; N°-: N° tendencias negativas; cuadros achurados: tendencia significativa.

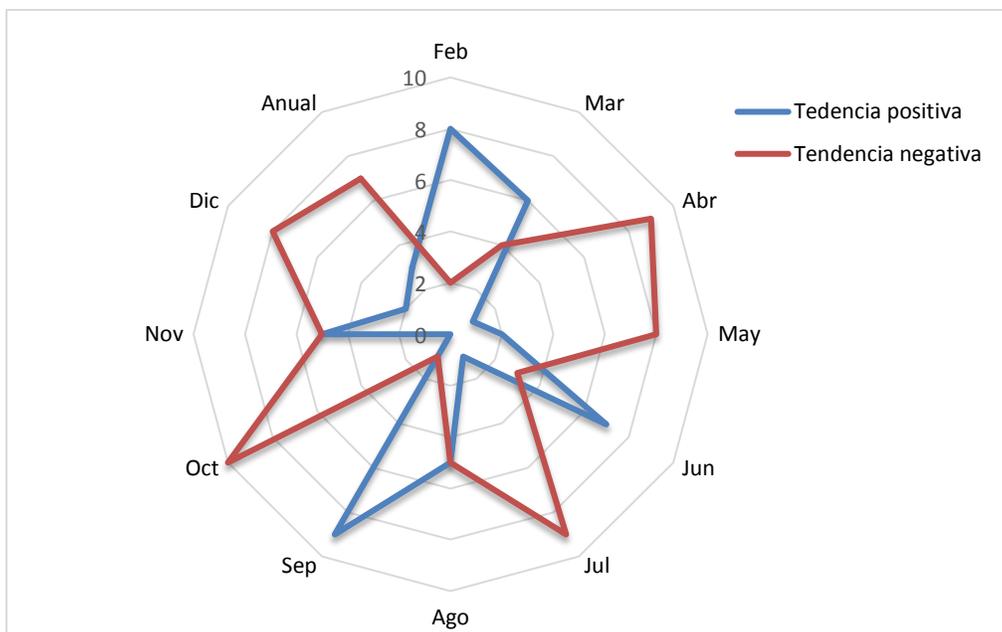
Fuente: Elaboración propia.

De las 156 series analizadas, 65 presentaron tendencia positiva y 91 tendencia negativa, lo que equivale a 42 % y 58%, respectivamente. Y de estas, solo 1 presenta tendencia positiva significativa y 7 tendencia negativa significativa, completando solo un 5% del total de la serie con tendencia significativa.

Para la variable N° de eventos no existe una tendencia clara a través de los meses, y a nivel anual el número de eventos por año tienen una tendencia a la baja, aunque esta no es significativa. Por su parte, la precipitación total por evento muestra una tendencia a la disminución tanto a nivel anual como en la mayoría de los meses (excepto febrero, abril y agosto).

Los resultados de la prueba Mann-Kendall para las variables anuales muestran tendencias mayoritariamente negativas a excepción de la duración del evento y las intensidades máximas para 15, 30 y 45 minutos, que tienen tendencia positiva. Aunque ninguna tendencia anual presenta significancia estadística. No obstante, se puede decir que, a la luz de los resultados, el número de eventos y el monto de lluvia por evento a nivel anual han disminuido en el periodo analizado, aunque no es posible afirmar si esta tendencia tendrá continuidad en el tiempo o es parte de la variabilidad natural de la precipitación.

A nivel mensual se observa que los meses de febrero y septiembre presentan tendencias positivas en gran parte de las variables, aunque sin significancia. En septiembre sí se verifica una disminución significativa en el número de eventos. Por su parte, en el mes de octubre las intensidades máximas por evento para duraciones de 2, 12 y 24 horas también han disminuido en el periodo analizado (Figura 5.11).



**Figura 5.11.** Número de tendencias positivas y negativas a nivel mensual y anual de las variables relacionadas con las intensidades de precipitación. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico anterior se ve de mejor manera que los meses de febrero, marzo, junio y septiembre presentan un aumento de las intensidades de lluvia mientras que en los demás meses han disminuido, es decir, se verifica un cambio en la estructuración intra anual de la precipitación. Aunque este cambio puede deberse a una variabilidad natural de la lluvia.

En el siguiente gráfico (Figura 5.12.) se muestran el número de tendencias (mensuales y anual) de las variables de intensidad para los distintos lapsos analizados, esto es, para el evento y para duraciones desde los 15 min hasta las 24 horas. Se puede apreciar que solo las variables intensidad máxima en 15 minutos y la intensidad media del evento tienen mayor número de veces con tendencia positiva, mientras que, para las duraciones desde 30 minutos hasta 24 horas, se registra una tendencia mayoritariamente negativa.



**Figura 5.12.** Número de tendencias positivas y negativas para las variables relacionadas con las intensidades de precipitación. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.2.2. Todos los eventos a nivel estacional

Por otra parte, los eventos se agruparon en estaciones, y al ser sometidos a la prueba de Mann-Kendall, la mayor parte de las variables mostraron tendencias positivas y significativas, como se observa en la siguiente tabla.

**Tabla 5.3.** Tendencias temporales estacionales de las variables en estudio a través de Mann-Kendall

	Otoño	Invierno	Primavera	Verano	N°+	N° -
<b>Duración evento</b>	-	-	-	-	0	4
<b>Pp total evento</b>	-	-	+	+	2	2
<b>Int 15 min</b>	+	+	+	+	4	0
<b>Int 30 min</b>	+	+	+	+	4	0
<b>Int 45 min</b>	+	+	+	+	4	0
<b>Int 1 h</b>	+	+	+	+	4	0
<b>Int 2 h</b>	+	+	+	+	4	0
<b>Int 4 h</b>	+	+	+	+	4	0
<b>Int 6 h</b>	+	+	+	+	4	0
<b>Int 12 h</b>	+	+	+	+	4	0
<b>Int 24 h</b>	+	+	+	+	4	0
<b>Int /evento</b>	+	+	+	+	4	0
<b>N° +</b>	10	10	11	11		
<b>N° -</b>	2	2	1	1		

+: tendencia positiva; -: tendencia negativa; N°+: N° tendencias positivas; N°-: N° tendencias negativas; cuadros achurados: tendencia significativa  
Fuente: Elaboración propia.

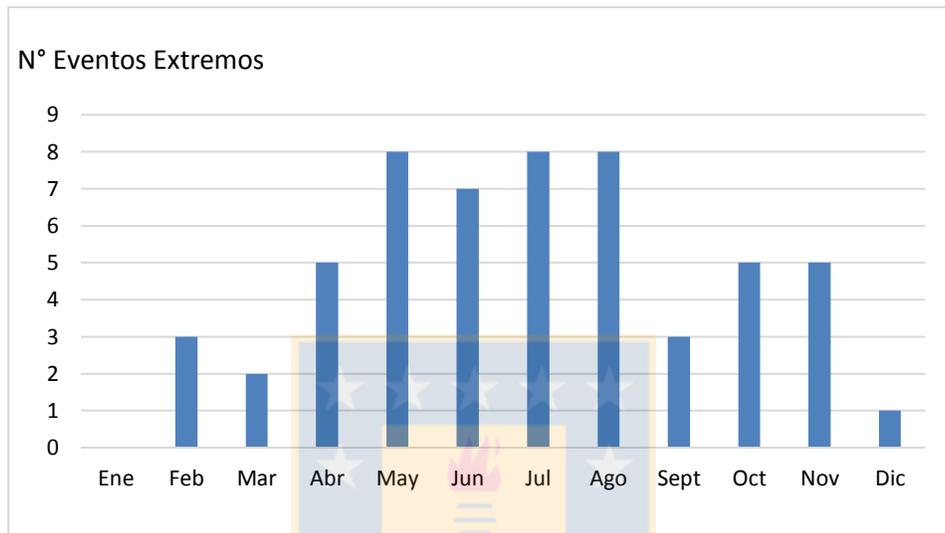
Si bien a nivel mensual no se verifican tendencias significativas de las variables analizadas, esta situación cambia radicalmente al considerar las estaciones del año, ya que sí se verifica una tendencia al aumento en la intensidad media de los eventos en las 4 estaciones, es decir, existe una tendencia a que los eventos sean más intensos. Del mismo modo, se verifica una tendencia al aumento de las intensidades máximas para 15, 30 y 45 min y para 1, 2, 4, 6 y 12 horas en las 4 estaciones. Mientras que la intensidad máxima en 24 horas solo aumenta significativamente en verano.

De esta forma se ratifica que el comportamiento de la precipitación es diferente en las distintas escalas temporales analizadas.

### 5.2.2.3. Todos los eventos extremos

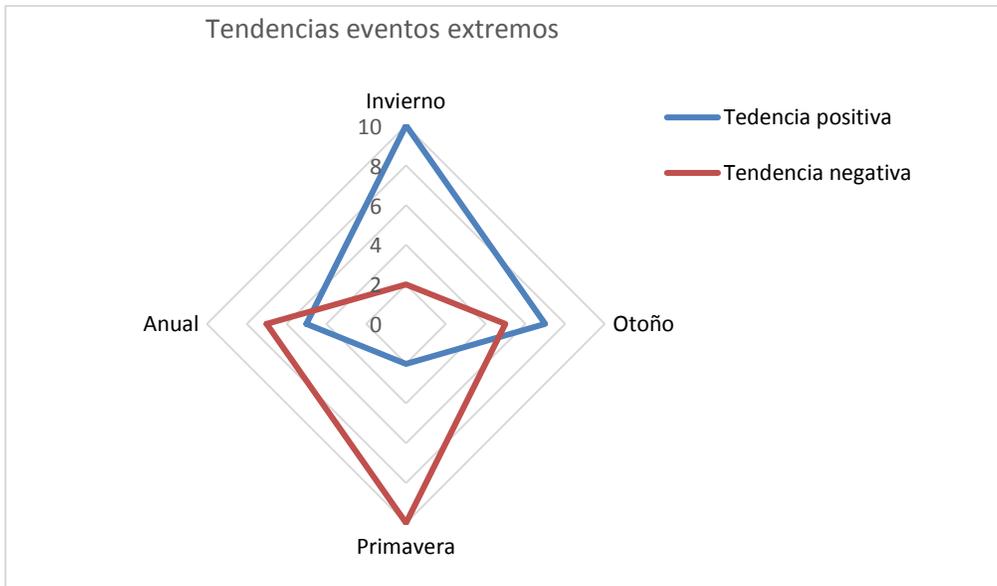
Finalmente, se separaron los eventos extremos, definidos como aquellos ubicados en el percentil 10% superior en cuanto a intensidad media del evento. El

56% de los eventos extremos ocurre entre los meses mayo y agosto, lo cual es esperable. Pero en la época estival también ocurrieron eventos extremos, 3 en febrero y 1 en diciembre, que, si bien la frecuencia es baja, es un factor de riesgo que debe tenerse en cuenta para las actividades productivas existentes en este periodo.



**Figura 5.13.** Número de eventos extremos ocurridos en el periodo 1982 - 2009. Fuente: Elaboración propia.

Como disminuyó el número de eventos a analizar, solo 55 en total, no fue posible aplicar la prueba de Mann-Kendall a cada uno de los meses, por lo que se agruparon los eventos en estaciones. Aun así, en verano solo sumaron 4 eventos, por lo que esta estación no entró en el análisis de tendencia de Mann-Kendall.



**Figura 5.14.** Número de tendencias positivas y negativas para las variables relacionadas con las intensidades de precipitación. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico anterior se puede observar una tendencia al aumento de las intensidades de los eventos extremos en invierno, mientras que, en primavera, la tendencia es a la disminución de las intensidades de lluvia.

**Tabla 5.4.** Tendencias temporales estacionales de las variables en estudio a través de Mann-Kendall

	Otoño	Invierno	Primavera	Anual	N°+	N° -
Duración evento	-	+	-	-	1	3
Pp total evento	+	+	-	-	2	2
Int 15 min	+	+	-	+	3	1
Int 30 min	+	+	-	+	3	1
Int 45 min	+	+	+	+	4	0
Int 1 h	+	+	-	+	3	1
Int 2 h	-	-	-	-	0	4
Int 4 h	-	+	-	-	1	3
Int 6 h	-	+	-	-	1	3
Int 12 h	-	+	-	-	1	3
Int 24 h	+	+	-	-	2	2
Int /evento	+	-	+	+	3	1
<b>N°+</b>	7	10	2	5		
<b>N° -</b>	5	2	10	7		

+: tendencia positiva; - : tendencia negativa; N°+: N° tendencias positivas; N°-: N° tendencias negativas; cuadros achurados: tendencia significativa  
Fuente: Elaboración propia.

Se observa que en primavera existe una tendencia significativa al aumento de la intensidad media del evento, probablemente dada por una disminución de la duración de los eventos, ya que en las demás variables se observa una tendencia negativa no significativa.

### 5.3. Conclusiones

Se realizó una descripción de los eventos de precipitación ocurridos en el periodo 1982 – 2009, registrándose 539 eventos, con un promedio anual de 19 eventos/año. Estos eventos muestran una mayor ocurrencia en los meses invernales, concentrando en 5 meses el 75% de ellos. Del mismo modo, tanto el monto de lluvia caída por evento y la duración del evento presentan valores mayores durante los meses de mayo, junio, julio y agosto.

En cuanto a la intensidad de precipitación, febrero, que presenta una baja pluviometría, es el mes que presenta una mayor intensidad media de los eventos; así como también presenta los valores más altos de intensidad máxima para 15, 30, 45 min, y 1, 2, 4 y 6 horas. Esto es relevante si se considera que en el mes de febrero existen cultivos agrícolas en desarrollo, especialmente en etapa de fructificación y cosecha, y que pueden verse afectados por estas altas intensidades, generando una situación de riesgo para los agricultores.

En términos anuales se verifica una disminución en el número de eventos por año y una disminución en el monto de lluvia caído por evento en el periodo estudiado.

Al analizar las tendencias de las intensidades de precipitación se verifica un cambio en la estructuración intra anual de la precipitación, ya que algunos meses (febrero, marzo, junio y septiembre) presentan un aumento de las intensidades de lluvia mientras que en los demás meses han disminuido. Aunque este cambio puede deberse a una variabilidad natural de la lluvia.

Al agrupar las series de datos por estaciones se observan claras tendencias significativas al aumento de las intensidades media del evento y de las máximas por evento para las duraciones desde 15 min hasta 12 horas y ello para las 4 estaciones. Para 24 horas si bien la tendencia es al aumento de la intensidad de precipitación, esta solo es significativa para el verano.

Finalmente, al considerar los eventos extremos, estos no muestran tendencias significativas para ningunas de las estaciones, excepto en primavera que tiene una tendencia a aumentar la intensidad media del evento.

## **VI. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES**

### **6.1. Conclusiones**

Se realizaron análisis de registros de precipitación con diferentes escalas temporales.

Las intensidades máximas de precipitación, ya sea como valor máximo anual o del evento o para distintas duraciones pueden ocurrir en cualquier época el año, incluso el mes de febrero presenta altas intensidades de precipitación.

En términos de concentración de la lluvia, el Índice de Gini muestra una tendencia positiva especialmente en la zona húmeda-subhúmeda, es decir, la precipitación se está concentrando a nivel diario. Mientras que el Índice de Concentración de Precipitación, que refleja la concentración de la lluvia a nivel mensual, no se aprecia una tendencia clara para el periodo estudiado.

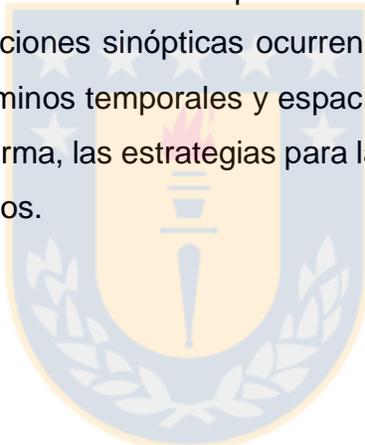
Al considerar la intensidad máxima anual referida a un valor por año, este no refleja la variabilidad existente en un evento de lluvia. Más aún, el comportamiento de este valor anual difiere para distintas duraciones en una misma estación.

En la estación Potrero Grande, en términos anuales se verifica una disminución en el número de eventos por año y una disminución en el monto de lluvia caído por evento en el periodo estudiado. Y al analizar las tendencias de las intensidades de precipitación se verifica un cambio en la estructuración intra anual de la precipitación, ya que algunos meses (febrero, marzo, junio y septiembre) presentan un aumento de las intensidades de lluvia mientras que en los demás meses han disminuido.

## 6.2. Comentarios finales

En un clima mediterráneo con una estación seca, llama la atención la ocurrencia de lluvias intensas en el mes de febrero, lo cual puede transformarse en una situación de riesgo para la actividad agrícola. Dependiendo de la etapa del cultivo, una lluvia intensa puede malograr la producción, por lo que es necesario que en la planificación y manejo productivo se considere este factor de riesgo.

Dada la alta variabilidad de las precipitaciones intra-anual e incluso durante la ocurrencia del evento, surge la necesidad de mejorar el conocimiento acerca del comportamiento de la precipitación, especialmente en los eventos extremos y estos referidos a las lluvias de altas intensidades que ocurren a escala sub-diaria y sub-horaria; saber en qué condiciones sinópticas ocurren y cómo afectan en distintas condiciones del país, en términos temporales y espaciales. Con este conocimiento se podrán definir de mejor forma, las estrategias para la reducción de los riesgos de desastres hidrometeorológicos.



## VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Acosta-Jamett, G.; Gutiérrez, J.; Kelt, D.; Meserve, P.; Previtali, M. El Niño Southern Oscillation drives conflict between wild carnivores and livestock farmers in a semiarid area in Chile. *J. Arid Environ.* 2016, 126, 76–80, doi:10.1016/j.jaridenv.2015.08.021

Ahmad, I.; Tang, D.; Wang, T.; Wang, M.; Wagan B. Precipitation Trends over Time Using Mann-Kendall and Spearman's rho Tests in Swat River Basin, Pakistan. *Advances in Meteorology*, 2015, 1-15. doi: 10.1155/2015/431860

Barrett, B.S.; Garreaud, R.D.; Falvey, M. Effect of the Andes Cordillera on Precipitation from a Midlatitude Cold Front. *Mon. Weather Rev.* 2009, 137, 3092–3109, doi:10.1175/2009MWR2881.1.

Biblioteca del Congreso Nacional (BCN). Available online: <http://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region7/clima.htm> (access on 02-04-2017).

Carrasco, J.; Casassa, G. y Quintana, J. Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century / Changements de l'isotherme 0°C et de la ligne d'équilibre des neiges dans le Chili central durant le dernier quart du 20ème siècle. *Hydrological Sciences Journal*. 2005. 50:6, -948

Deidda, R.; Mascaro, G.; Piga, E.; Querzoli, G. An automatic system for rainfall signal recognition from tipping bucket gage strip charts. *J. Hydrol.* 2007, 333, 400-412. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.011>

Dirección Meteorológica de Chile (DMC). *Climatología Regional*. 2001. Available online: [http://164.77.222.61/climatologia/publicaciones/Climatologia\\_regional.pdf](http://164.77.222.61/climatologia/publicaciones/Climatologia_regional.pdf) (access on 04-04-2017).

Dunkerley, D. Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrol. Process.* 2008. 22, 5024–5036.

Escobar, F.; Aceituno, P. Influencia del fenómeno ENSO sobre la precipitación nival en el sector Andino de Chile central durante el invierno. *Bulletin de L'institut Français D'études Andines* 1998. 27, 753–759.

Favier, V.; Falvey, M.; Rabatel, A.; Praderio E.; López, D. Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26–32° S). *Water Resour. Res.* 2009, 45, W02424, doi:10.1029/2008WR006802.

Falvey, M. & Garreaud, R. Wintertime Precipitation Episodes in Central Chile: Associated Meteorological Conditions and Orographic Influences. *Journal of Hydrometeorology* 2007, 8, 171-193.

Fowler, A; Hennessy, K. Potential impacts of global warming on the frequency and magnitude of heavy precipitation. *Nat. Hazards.* 1995. 11, 283-303. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00613411>.

Favier, V.; Falvey, M.; Rabatel, A.; Praderio E., and 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, W02424, doi: 10.1029/2008WR006802.

Garreaud, R. Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. Available online: [http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/inia\\_RGS\\_final.pdf](http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/inia_RGS_final.pdf) (accessed on 14/11/ 2011)

Garreaud, R. 2009. The Andes climate and weather. *Adv. Geosci.* 2009. 22, 3-11.

Gong, D; Wang, S. Severe summer rainfall in China associated with enhanced global warming. *Clim. Res.* 2000. 16, 51-59. doi: <https://doi.org/10.3354/cr016051>

González, A. Ocurrencia de eventos de sequías en la ciudad de Santiago de Chile desde mediados del siglo XIX. *Revista de geografía Norte Grande.* 2016. 64, 21–32, doi:10.4067/S0718-34022016000200003.

González, A. & Muñoz, A. Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años. *BOSQUE.* 2013. 34(2), 191-200. doi: 10.4067/S0717-92002013000200008

Guo, Y. and Baetz, B. Sizing of Rainwater Storage Units for Green Building Applications. *Journal of Hydrologic Engineering.* March 2007.

Helsel, D.; Hirsch, R. *Statistical Methods in Water Resources: Book 4, Chapter A3;* U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 1992.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Pachauri, R.K., Meyer, L.A., Eds.; *Climate Change 2014: Synthesis Report;* IPCC: Geneva, Switzerland, 2014; p. 151.

Jacques-Coper, M; Garreud, R. Characterization of the 1970s climate shift in South America. *Int. J. Climatol.* 2015. 35, 2164-2179. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.4120>.

Jaklič, A.; Šajn, L.; Derganc, G.; Peer, P. Automatic digitization of pluviograph strip charts. *Meteorol. Appl.* 2016, 23, 57-64. doi: <https://doi.org/10.1002/met.1522>.

Kalvová, J.; Halenka, T.; Bezpalcová, K.; Nemešová, I. Köppen climate types in observed and simulated climates. *Studia Geophysica et Geodaetica,* 2003, 47(1), 185-202. doi: 10.1023/A:1022263908716.

Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F. World map of the Köppen-Geiger classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, 15(3), 259-263. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130.

Levia, DF. Differential winter stemflow generation under contrasting storm conditions in a southern New England broad-leaved deciduous forest. *Hydrol. Process.* 2004, 18, 1105–1112.

Martín-Vide, J. Análisis de la irregularidad de la precipitación diaria en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica. *Revista de Geofísica*, 1984, 40 (1), 101-106.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). Atlas Climático Ibérico. Agencia Estatal de Meteorología (Spain); Instituto de Meteorología de Portugal publisher: Madrid, Spain City, state, country, 2011. ISBN 978-7837-079-5.

Monjo & Martin-Vide. Daily precipitation concentration around the world according to several indices. *International Journal of Climatology*, 2016, 36, 3828-3838. doi: 10.1002/joc.4596

Montecinos, A.; Kurgansky, M.; Muñoz, C. y Takahashi, K. Non-ENSO interannual rainfall variability in central Chile during austral winter. *Theor Appl Climatol.* 2011. 106:557–568

Montecinos, A.; Díaz, A and Aceituno P. Seasonal Diagnostic and Predictability of Rainfall in Subtropical South America Based on Tropical Pacific SST. *Journal of climate*.2000. volume 13. 746 – 758

Oliver, J. 1980. Monthly precipitation distribution: a comparative index. *Professional Geographer*, 32(3), 300-309. doi: 10.1111/j.0033-0124.1980.00300.x.

UNESCO. Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas. Roberto Pizarro, Per Bjarne Bro, Claudia Sangüesa, Carolina Morales, Benjamin Ingram, Claudio Olivares, Mauricio Vera, Carlos Vallejos, Roberto Fuentes. *Documentos Técnicos del PHI-LAC*, 2013, N° 29. 128 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), 2012. Documento País “Análisis de Riesgos de Desastres en Chile 2012”. VII Plan de Acción Dirección General de Ayuda Humanitaria y Protección Civil (DIPECHO) en Sudamérica 2011-2012.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), 2010. Documento País “Análisis de Riesgos de Desastres en Chile 2010”. VI Plan de Acción Dirección General de Ayuda Humanitaria y Protección Civil (DIPECHO) en Sudamérica. 120 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Inequality Analysis: The Gini index. FAO: Roma, Italy, 2005.

Ortlieb, L. Las mayores precipitaciones históricas en Chile central y la cronología de eventos ENOS en los siglos XVI-XIX. *Rev. Chil Hist. Nat.* 1994, 67, 463–485.

Peel, M.; Finlayson, B.; Beck, C.; McMahon, T. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(5), 1633-1644. doi: 10.5194/hess-11-1633-2007.

Pizarro, R.; Ingram, B.; Gonzalez-Leiva, F.; Valdés-Pineda, R.; Sangüesa, C.; Delgado, N.; García-Chevesich, P.; and Valdés, J. WEBSEIDF: A Web-Based System for the Estimation of IDF Curves in Central Chile. *Hydrology* 2018, 5, 40; doi:10.3390/hydrology5030040

Pizarro, R; Garcia-Chevesich, P; Valdes, R; Dominguez, F; Hossain, F; Ffolliott, P; Olivares, C; Morales, C; Balocchi, F; Bro, P. 2013. Inland water bodies in Chile can locally increase rainfall intensity. *Journal of Hydrology* 481 (2013) 56–63.

Pizarro, R., Valdés, R., García-Chevesich, P., Vallejos, C., Sangüesa, C., Morales, C., Balocchi, F., Abarza, A. and Fuentes, R. 2012. Latitudinal analysis of rainfall intensity and mean annual precipitation In Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research* 72(2) April-June 2012

Pizarro, R., Ausensi, P., León, L., Aravena, D., Sangüesa, C., & Balocchi, F. Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región del Maule, Chile. *Aqua-LAC: revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe*, 2009, 1(2), 172-184.

Pizarro, R., Cornejo, F., González, C., Macaya, K., y Morales C. Análisis del comportamiento y agresividad de las precipitaciones en la zona central de Chile. *Ingeniería hidráulica en México*, 2008. Vol. 23, N°. 2. p 91-110. ISSN 0186-4076

Puertas, O.; Carvajal, Y.; Quintero, M. Estudio de Tendencias de la Precipitación Mensual en la Cuenca Alta-Media del Río Cauca, Colombia. *Dyna*, 2011, 78 (169), 112-120. ISSN 0012-7353

Quintana, J.M. y Aceituno, P. Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S. *Atmósfera*, 2012, 25(1), 1-22.

Rojas, Y. Eventos extremos de precipitación diaria en Chile central. *Habilitación Profesional para optar al título de Geofísica*. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica. 2016, 87 p.

Rojas, O. Mardones, M. Arumí, J. L. y Aguayo, M. Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2014, 57: 177-192

Rubio-Álvarez, E. & McPhee, J. Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003, *Water Resources Research*, 2010, 46, W05514, doi: 10.1029/2009WR007982.

Sangüesa, C., Pizarro, R., Ibañez, A., Pino, J., Rivera, D., García-Chevesich, P. and Ingram, B. Spatial and Temporal Analysis of Rainfall Concentration Using the Gini Index and PCI. *Water* 2018, 10, 112; doi:10.3390/w10020112

Sarricolea, P. & Romero, H. Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2015, (62), 169-183. doi: 10.4067/S0718-34022015000300010.

Sarricolea, P.; Herrera, M.; Araya, C. Análisis de la concentración diaria de las precipitaciones en Chile central y su relación con la componente zonal (subtropicalidad) y meridiana (orográfica). *Investigaciones Geográficas de Chile*, 2013, 45, 37–50.

Sarricolea, P. y Martín-Vide, J. 2012. Distribución espacial de las precipitaciones diarias en Chile mediante el índice de concentración a resolución de 1 mm, entre 1965-2005. En: *Cambio climático, extremos e impactos*. (Ed.) J.M. Cuadrat, P. Dorta, M. J. Estrela, F. González Rouco, J. A. López Díaz, J. C. García Codrón, F. Sánchez Rodrigo, J. Martín Vide y R. García Herrera. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Salamanca, España, pp. 631-639.

Schultz, R.E.; Maharaj, R.; Lynch, S.D.; Howe, B.J.; Melvil-Thomsam, B. African atlas of agrohydrology and climatology. 1997. Section 4 precipitation. (En línea). Consultado 4 jun. 2007. Disponible en [http://www.iwmi.cgiar.org/pubs/working/wor76\\_sect2.pdf](http://www.iwmi.cgiar.org/pubs/working/wor76_sect2.pdf).

Singh, D., M. Tsiang, B. Rajaratnam, and N. S. Diffenbaugh. Precipitation extremes over the continental United States in a transient, high-resolution, ensemble climate model experiment, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013,118, 7063–7086. doi:10.1002/jgrd.50543.

Song, X., Song, S., Sun, W., Mu, X., Wang, S., Li, J. & Li, Y. Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960–2013. *Atmospheric Research*, 2015. 157, 137-152. doi: 10.1016/j.atmosres.2015.01.022

Spavorek, G.; De Jong, Q.; Dourado, D. Computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(2), 257-266. doi: 10.1002/joc.1384

Valdés-Pineda, R.; Valdés, J.; Diaz, H.; Pizarro, R. Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in South America-Chile and related ocean–atmosphere circulation patterns. *International Journal of Climatology*, 2015, 36(8), 2979-3001. doi: 10.1002/joc.4532.

Valdés-Pineda, R.; Pizarro, R.; García-Chevesich, P.; Valdés, J.; Olivares, C.; Vera, M.; Balocchi, F.; Pérez, F.; Vallejos, C.; Fuentes, R.; Abarza, A.; y Helwig, B. Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology* 2014, 519 2538–2567.

Wischmeier, W. H. and D. D. Smith, 1978. Predicting Rainfall Ero-sion Losses: A Guide to Conservation Planning. U.S. Dept.Agric., Agric. Handbook No. 537.

Yin, Y.; Yu Xu, C.; Chen, H.; Li, L.; Xu, H.; Li, H.; Jain, S. Trend and concentration characteristics of precipitation and related climatic teleconnections from 1982 to 2010 in the Beas River basin, India. *Global and Planetary Change*, 2016,145, 116-129. doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.08.011

Yue, S.; Pilon, P.; Cavadias, G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 2002, 259, 254-271. Doi: 10.1016/S0022-1694(01)00594-7

Zubieta, R. & Saavedra, M. “Distribución espacial del índice de concentración de precipitación diaria en los Andes centrales peruanos: Valle del río Mantaro”. *Revista Técnica* (2009) 19 (2), 13-22, ISSN: 2309-0413, Instituto General de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.

## ANEXO 1: Artículo publicado

Nombre del artículo: Spatial and Temporal Analysis of Rainfall Concentration Using the Gini Index and PCI.

Autores: Sangüesa, C., Pizarro, R., Ibañez, A., Pino, J., Rivera, D., García-Chevesich, P. and Ingram, B.

Revista: Water 2018, 10, 112; doi:10.3390/w10020112.

La revista Water MDPI se encuentra en el cuartil Q2, y posee un factor de impacto de 2,069



## Article

# Spatial and Temporal Analysis of Rainfall Concentration Using the Gini Index and PCI

Claudia Sangüesa <sup>1</sup>, Roberto Pizarro <sup>1</sup>, Alfredo Ibañez <sup>1</sup>, Juan Pino <sup>1</sup>, Diego Rivera <sup>2</sup> , Pablo García-Chevesich <sup>3,4,5,\*</sup> and Ben Ingram <sup>6</sup> 

<sup>1</sup> Technological Center of Environmental Hydrology, University of Talca, Talca 3462227, Chile; csanguesa@utalca.cl (C.S.); rpizarro@utalca.cl (R.P.); alfredoibacor@gmail.com (A.I.); jupino@utalca.cl (J.P.)

<sup>2</sup> Department of Water Resources, University of Concepción, Chillán 3812120, Chile; dirivera@udec.cl

<sup>3</sup> Faculty of Forest Sciences and Nature Conservancy, University of Chile, Santiago 8820808, Chile

<sup>4</sup> Department of Hydrology and Atmospheric Sciences & Department of Agricultural and Biosystems Engineering, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA

<sup>5</sup> International Hydrological Programme & International Sediment Initiative, UNESCO, Montevideo 11400 & 12400, Uruguay

<sup>6</sup> School of Water, Energy and Environment, Cranfield University, College Rd, Cranfield MK43 0AL, UK; ben.ingram@cranfield.ac.uk

\* Correspondence: pablogarciach@gmail.com; Tel.: +56-9-4444-6644

Received: 16 November 2017; Accepted: 22 January 2018; Published: 28 January 2018

**Abstract:** This study aims to determine if there is variation in precipitation concentrations in Chile. We analyzed daily and monthly records from 89 pluviometric stations in the period 1970–2016 and distributed between 29°12' S and 39°30' S. This area was divided into two climatic zones: arid–semi-arid and humid–sub-humid. For each station, the Gini coefficient or Gini Index (GI), the precipitation concentration index (PCI), and the maximum annual precipitation intensity in a 24-h duration were calculated. These series of annual values were analyzed with the Mann–Kendall test with 5% error. Overall, it was noted that positive trends in the GI are present in both areas, although most were not found to be significant. In the case of PCI, the presence of positive trends is only present in the arid–semi-arid zone; in the humid–sub-humid zone, negative trends were mostly observed, although none of them were significant. Although no significant changes in all indices are evident, the particular case of the GI in the humid–sub-humid zone stands out, where mostly positive trends were found (91.1%), of which 35.6% were significant. This would indicate that precipitation is more likely to be concentrated on a daily scale.

**Keywords:** precipitation concentration; rainfall Gini Index; precipitation trends; trends of monthly and daily precipitation; 24 h maximum intensity

## 1. Introduction

In recent years, on a global scale, there have been marked climatic variations that have influenced the spatio-temporal behavior of meteorological variables such as precipitation (mean, extreme, variability) [1,2]. Understanding future changes in the frequency, intensity, and duration of extreme events is important when formulating adaptation and mitigation strategies that minimize damage to natural and human systems [3]. Indeed, Zubieta & Saavedra [4] point out that one of the most important aspects of climate change that requires in-depth research is the characterization of precipitation in time and space.

Chile is not immune to climate change and variability, because the country has distinct climate types that vary from north to south. The Pacific anticyclone generally manifests itself in the northern territory of the country which causes a lack of rainfall that leads to arid and semi-arid conditions.

As one moves southwards, the influence of cold air masses manifest (commonly referred as 'polar fronts' due to their origin), which when interacting with warm air masses, they produce intense rainfall events [5,6]. This is why there is an extremely arid environment in the north of the country, while the south is humid. Therefore, if the country faces a phenomenon of climate change or high climatic variability, precipitation would be highly sensitive to these phenomena, because Chile is located in a climatic transition zone [7,8]. In contrast, rainfall in the central-southern part of the country is related to the dynamics of some events, such as El Niño–Southern Oscillation (ENSO) [9], which generally presents a warm phase in central Chile (30° S–35° S) associated with an increase in winter rainfall. In the southern zone (38° S–41° S), events are usually linked to reduced rainfall, especially in the following summer [10–16]. Nevertheless, in non-ENSO conditions there are several processes that generate rainfall in winter, such as blocking and orographic effects [17].

Both, the distribution and intensity of precipitation, as well as geomorphology, among other aspects, determine the sensitivity of the territory to meteorological hazards triggered by excessive levels of rainfall. These events can occur in the form of flooding of riverbeds, floods, alluvial floods, avalanches, landslides, and swells on coasts [18]. In this context, Favier et al. [19] noted that precipitation in the semiarid North Chico region of Chile, after a considerable decline before 1930, has remained almost unchanged to date. Likewise, Sarricolea & Romero [20] describe that precipitation trends in the arid zone of the Chilean plateau show a sharp decrease. The same situation is occurring in the humid–subhumid zone of the country, observing negative trends of rainfall [21] and a higher precipitation concentration in winter [12].

Precipitation concentration—i.e., a measure of temporal distribution of precipitation in a location—can be characterized by different models such as the Gini index (GI), the concentration index (CI) [22,23], and the precipitation concentration index (PCI) [24,25]. The first method is used to establish and assess the unequal distribution of precipitation. Martín-Vide [26] developed the concentration index (CI), which represents the theoretical frequency of the data. Similarly, the Gini index can also be used on the complete data series, or only on days with precipitation. Finally, the PCI assesses precipitation concentration based on the variability of monthly precipitation.

Research in Chile indicates that the CI has increased, verifying that rainfall occurs on fewer days of the year, with the arid region showing the highest value [22,27,28]. Pizarro et al. [25] and Valdés-Pineda et al. [15] verify the existence of certain trends, however these trends do not necessarily imply an explicit change in precipitation concentration. The high temporal concentration of precipitation is linked to the rapid rate of physical processes, such as convection in areas with a high degree of exposure to sunlight and warmer seas. In turn, the low rainfall concentration can be interpreted as a consequence of regular patterns (sea currents or highly recurrent storms) [22].

Similarly, a rainfall concentration study was developed in Mediterranean climates of Spain, using the PCI and considering a time period between 1946 and 2005 [29]. The authors concluded an annual increase of PCI values, a conclusion that was explained by an increase of winter precipitations. Using the CI, on the other hand, Li et al. [30] evaluated the concentration of daily rainfall and its trends in 50 meteorological stations in Xinjiang, northwest China. Although a spatial pattern was found in the daily concentration of rainfall, trends were not significant. Finally, a global rainfall concentration analysis was performed by Raha et al. [31], who analyzed 12,513 stations for the 1976–2000 period, using the Gini index (wet days). The index was analyzed through linear regressions, with negative trends (mostly) in South Asia, Central America, and Brazil, while trends were positive in the rest of South America.

In recent years, significant events have occurred in Chile that have caused natural disasters with human life, and economic and infrastructural losses. The disasters that have the greatest impact on the country have been mostly seismic (earthquakes and tsunamis) and climatic (droughts and floods). In the Mediterranean zone (32° S–38° S), floods are related to the presence of cold and warm frontal systems. Of the 227 river flood events recorded in Chile within the 1574–2012 period, 71% of them are associated with intense or persistent rainfall events [32].

As previously mentioned, hydrological variables are sensitive to rainfall variability and/or change, which has recently generated major natural disasters, and commonly linked to changes in rainfall concentration. In this context, Westra et al. [33] analyzed the relationship between maximum daily rainfall and the global near-surface temperature, finding a positive relationship between both variables. Similarly, worldwide studies done by O'gorman [34] and Asadieh & Krakauer [35], found that the maximum daily precipitations are growing faster than the average annual precipitation, implying that rainfall intensity is generally increasing, which is similar to what Sarricolea & Martin-Vide [27] and Sarricolea et al. [28] found in Chile, through a CI analysis. Therefore, the objective of this study was to characterize in time and space the behavior and concentration of daily and monthly rainfall in two climatic zones (arid-semiarid and humid-subhumid) of the country.

2. Materials and Methods

The study area ranges from 29°12' S to 39°30' S and considers 89 rainfall stations (Figure 1). Based on the Verbist et al.'s [36] climatic classification map, two zones were identified: the arid-semiarid zone, which ranges from 29°12' S to 33°55' S, and the humid-subhumid zone, located between 34°44' S and 39°30' S. A transitional area (100 km) located between both climatic zones was excluded from the study.

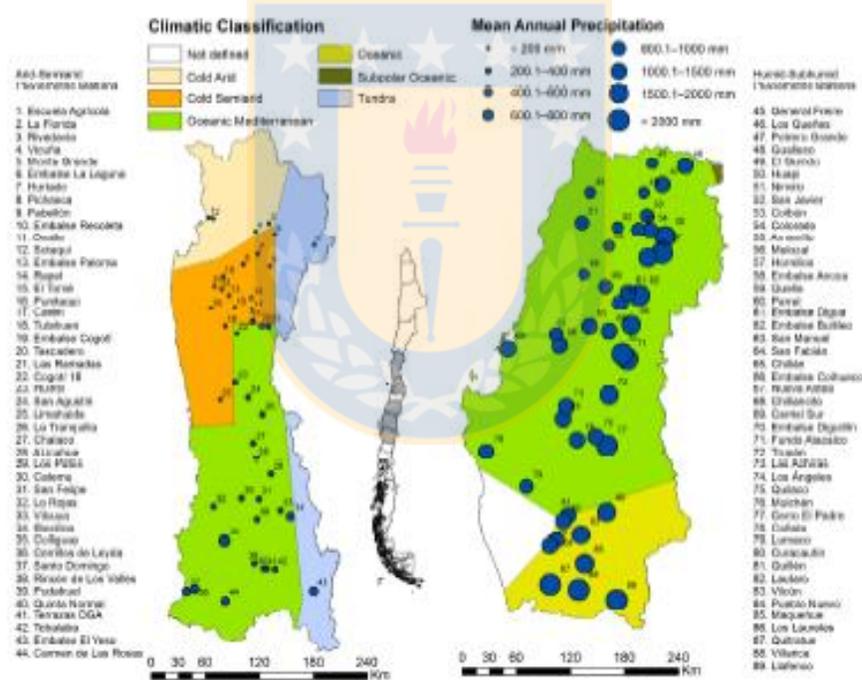


Figure 1. Study area and climate classification of Köppen-Geiger.

Both climatic zones have different sub-climates (Figure 1). In the arid-semiarid zone, for example, between latitudes 29°12' S and 30°00' S, there is a cold arid climate (Bwk) [37], where rainfall is scarce or non-existent, winters are cold, summers are warm, and vegetation is desert-like. Between latitudes 30°00' S and 32°00' S, the climate is semiarid cold (Bsk) and, like the cold arid climate, there is scarce rainfall and warm or temperate summers, but winter temperatures are usually less than 18 °C [38]. The predominant climate of this zone is Mediterranean oceanic type, with mild summers (Csb). This type of climate is characterized by the concentration of rainfall in the winter period and an

average temperature exceeding 10 °C for at least four months [37,38]. Finally, the Andean region presents a tundra (ET) climate, where the average temperature of the warmest month ranges from 0 to 10 °C [37,39] and vegetation is practically non-existent.

The humid-subhumid zone (33°55' S and 39°30' S), on the other hand, corresponds to a Mediterranean oceanic climate with mild summers. Between latitudes 38°30' S and 39°30' S, the climate is oceanic with mild summers (Cfb). This type of climate commonly lacks a dry period; however, in the Mediterranean climate of central Chile, the dry period is evident and lasts between two and four months and the greatest amount of precipitation occurs in winter. The average temperature of the warmest month does not exceed 22 °C [40,41] (Figure 1).

To analyze the concentration of daily precipitation in central Chile, the 1970–2016 period was considered (Figure 2). Rainfall records belong to the National Water Bank, managed by the General Water Directory of Chile (DGA), and to the Chilean Meteorological Directory (DMC). Both organizations (DGA and DMC) develop an exhaustive analysis of the quality of the obtained data, which are only available for scientific purposes, once the quality of the data has been validated.

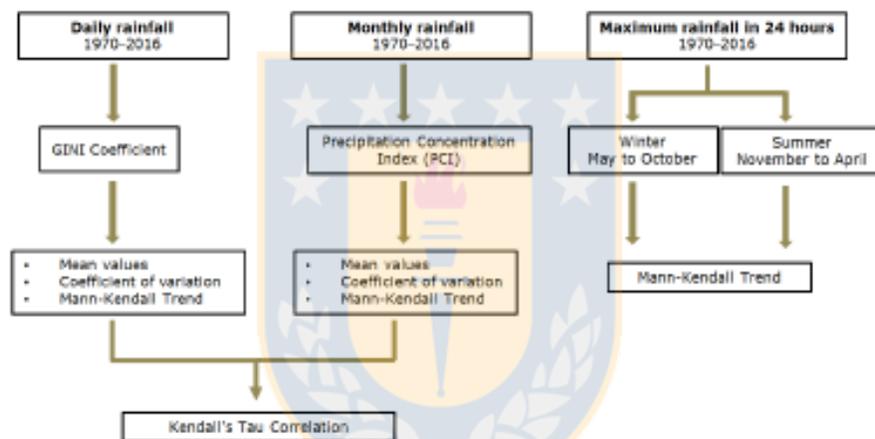


Figure 2. Outline of the methodology.

Only stations having 45 or more years of records were considered. Although there are methods for filling in missing data that produce good results [42], it was preferred not to use them because of possible introduction of sample biases. Additionally, the Alexandersson's homogeneity test [43] was applied to the annual rainfall records for all stations.

There are several methods for establishing precipitation concentration trends. In the field of hydrology, the rates of climatic aggressiveness have traditionally been used, but recently the Lorenz curve and the Gini index have been adopted from the field of econometrics. The Lorenz curve is a graphical representation of wealth concentration and indicates what percentage of accumulated wealth is in the possession of a given percentage of the population [44]. In ideal situations, the relationship between wealth and population is 1:1. The Gini Index originally estimates income inequality in the population and ranges between 0 and 1. When it is applied to daily rainfall, the value 1 indicates that a single day contributed to the yearly rainfall and the value 0 shows that yearly rainfall was uniformly distributed over the 365 days. Graphically, the Gini index is the ratio between the curve of perfect equity ( $y = x$ ) and the Lorenz curve ( $y(x)$ ), divided by the area under the equity curve (Figure 3).

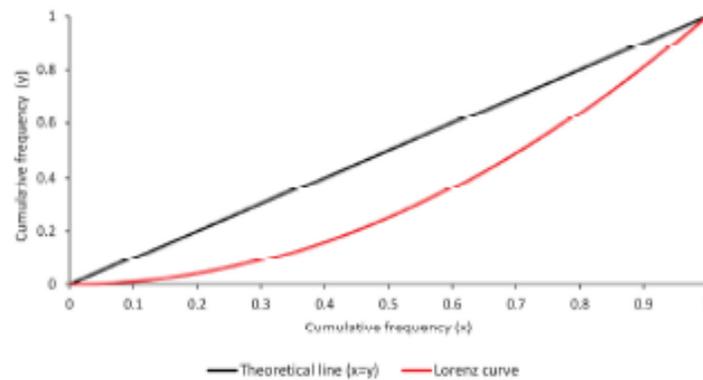


Figure 3. Graphical representation of the Gini index and the Lorenz curve.

The Gini index was applied in this study to daily rainfall values for each year, considering the 1970–2016 period and following the procedure by Yin et al. [23], who pointed out that the lack of precipitation is also an indicator for rainfall concentration. Thus, the Gini index is represented by the following expression, in which  $x$  and  $y$  are the cumulative proportions of the variables under study, and  $y(x)$  is the Lorenz curve

$$\text{Gini} = \frac{0.5xy - \int_0^1 y(x)dx}{0.5xy} \quad (1)$$

In addition, we worked with monthly precipitation values using the precipitation concentration index (PCI, Equation (2)), which explains the level of precipitation concentration during a given year [24]. Oliver [24] established that the value of this index fluctuates from 8.33% if rainfall is the same in all months, to 100% if all rainfall is concentrated in a single month. In other words, this index indicates whether rainfall in the rainy season is concentrated over a short or longer period of the year [45]. According to Oliver [24], the ranges for the PCI are the following: less than 10 suggests uniform distribution; between 11 and 20 denotes seasonal distribution; above 20 represents marked seasonal differences, with higher values being an indication of increasing monthly concentration.

$$\text{PCI}_j = 100 \frac{\sum_{i=1}^{12} P_{ij}^2}{P_j^2} \quad (2)$$

where  $\text{PCI}_j$  is the precipitation concentration index for year  $j$ , expressed as percent;  $P_{ij}$  is the precipitation of month  $i$  in the year  $j$ ; and  $P_j$  is the annual precipitation in the year  $j$ .

Additionally, the mean values for each rain gauge of the Gini index, PCI, and annual precipitation were correlated using the Kendall's tau coefficient. One of the advantages of this test is that it does not assume normality in the distribution of the data, making it advantageous to be used with hydro-meteorological variables. The values obtained from the test range between 1 and  $-1$ , and values above/below  $\pm 0.7$  indicate strong correlations between the variables [46]. The Kendall's tau coefficient,  $\tau$ , is calculated as

$$\tau = \frac{2(C - D)}{\sqrt{[n(n-1) \sum T_x(T_x - 1)] \times [n(n-1) \sum T_y(T_y - 1)]}} \quad (3)$$

where  $C$  and  $D$  are the concordant and discordant pairs values,  $T_x$  and  $T_y$  are the ties between the variables  $x$  and  $y$ , and  $n$  is the sample size.

Finally, temporal trends for maximum rainfall in 24 h at each of the 89 analyzed stations were evaluated. Maximum rainfall in 24 h was stratified in two periods, winter and summer, considering the period between April and September as winter, and between October and March as summer.

Temporal trends of the Gini index and PCI values were estimated for the entire 1970–2016 period and for each rain gauge. These trends were evaluated using the Mann–Kendall's non-parametric statistical test, which detects trends in time series and is widely used in the analysis of hydro-meteorological variables [47]. One of its advantages is that it does not require for data to be normally distributed [48]. To calculate it, this test first requires the Kendall's  $S$  statistic and its variance  $VAR(S)$ . With these values, a standardized  $Z$  statistic is obtained when the sample size is greater than or equal to 8 [49], whose sign and value will determine the orientation and significance of the trend, respectively. For the  $S$  statistic, we use the expression

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (4)$$

where the function  $\text{sign}(x_j - x_k)$  has the value 1 if  $x_j - x_k > 0$ ; value 0 if  $x_j - x_k = 0$ ; and value  $-1$  if  $x_j - x_k < 0$ , and where  $x_j$  and  $x_k$  are consecutive values of the variable under study.

Next, the variance  $VAR(S)$  is defined as

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

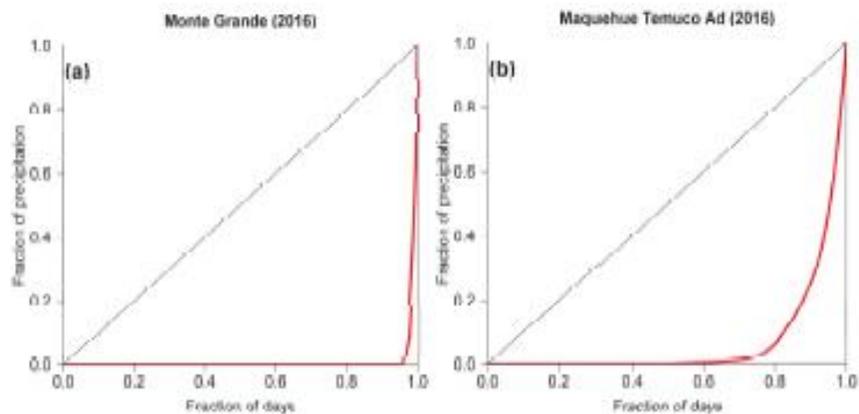
Finally, with both values, the  $Z$  value is calculated depending on the result of  $S$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}}; & \text{if } S > 0 \\ 0; & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}}; & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

All statistical analyses were done considering a 5% error.

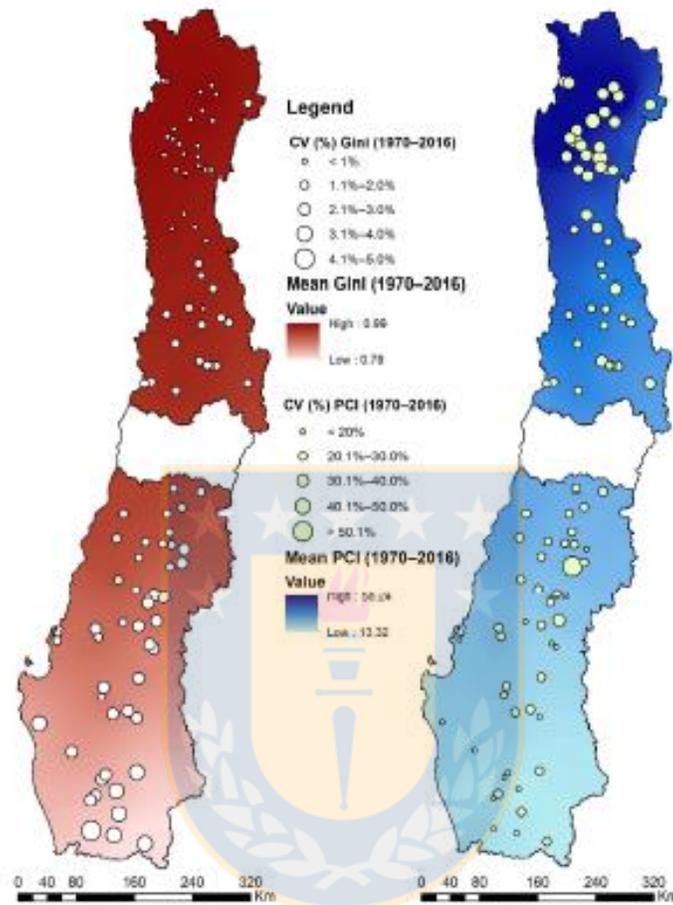
### 3. Results

The Alexandersson's test revealed that, out of the 89 analyzed stations, 94.4% of them were homogeneous; as a consequence, the whole sample was accepted for the analysis. Figure 4 shows the Lorenz curve for the Monte Grande station in the arid-semiarid zone, with a high concentration (the Gini Index value is almost 1) and the Maquehue Temuco station in the humid-subhumid zone, with a lower concentration of precipitation, both for 2016.



**Figure 4.** Lorenz curve for two pluviographic stations for the year 2016, in the study area. (a) Monte Grande pluviographic station; (b) Maquehue Temuco Ad pluviographic station.

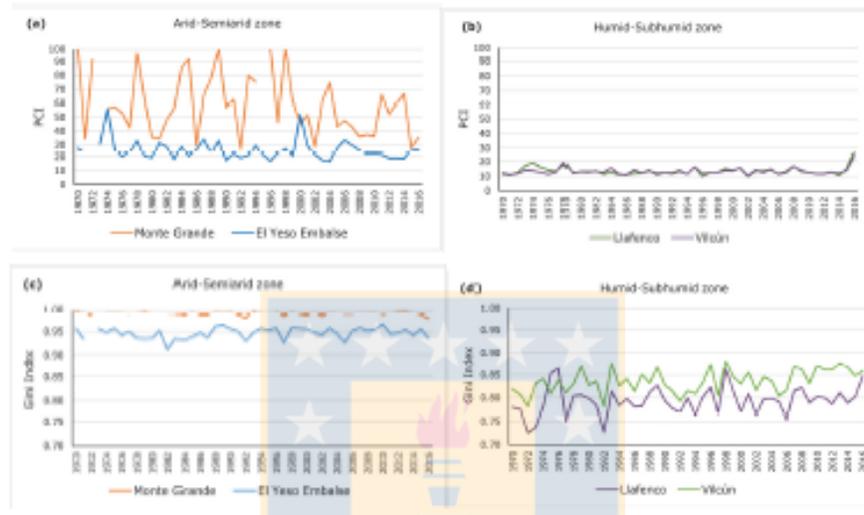
As shown in Figure 5, the Gini index is high in the arid–semi-arid zone (higher concentration of precipitation) and decreases for stations as one moves towards the humid–subhumid zone (lower concentration of precipitation). When averaging the values of the Gini index in the studied period, it was observed that there was a low dispersion in both zones. However, the arid–semi-arid zone normally presents a high concentration of precipitation, while the humid–subhumid zone has a greater variability in such variable, which was reflected by the Gini index.



**Figure 5.** Results of the average value of the coefficients of Gini and PCI for the studied period (1970–2016) in the arid–semi-arid and humid–subhumid zones.

In terms of the PCI, it is shown that as one moves latitudinally from the arid–semi-arid zone, the values of this indicator tend to decrease by up to 30 percentage points in humid–subhumid zone stations. In fact, it was observed that in the arid–semi-arid zone the PCI reached a value of 33.6%, whereas in the humid–subhumid zone it was remarkably reduced to 16.4%. This accounts for the great difference that exists between one zone and another, where the values of this indicator fluctuated between 20.7% and 58.6% in the arid–semi-arid zone, and between 13.3% and 19.6% in the humid–subhumid zone. For the Gini index, calculated with daily data, it was determined that the index decreases almost two-tenths when moving from north to south, but increasing its coefficient of variation (CV) by three percentage points (Figure 5), with CV values fluctuating between 0.91 and 0.99 in the arid–semi-arid zone, and between 0.79 and 0.91 in the humid–subhumid zone. The Gini index uses daily data, and therefore includes days when there is zero precipitation, which is more frequent in the arid–semi-arid zone than in the humid–subhumid zone. Both indices decrease their value as we advance from the arid–semi-arid zone ( $29^{\circ}12'S$  to  $39^{\circ}30'S$ ) to the humid–subhumid ( $34^{\circ}44'S$  to  $39^{\circ}30'S$ ) zone, denoting a lower concentration of precipitation at a monthly scale (PCI) and a daily (Gini) scale in the latter zone. Pizarro et al. [25] and Sarricolea & Martín-Vide [27] found similar relationships of higher

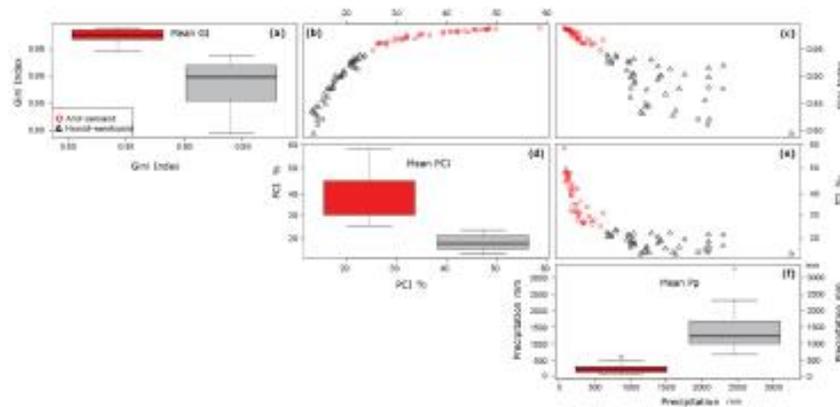
concentration of rainfall towards the arid-semiarid zone, and decreases toward the south. However, Sarricolea et al. [28] did not find differences in the north-south gradient for the calculated IC values, for 16 stations located in a smaller territory (between 32°50' S and 34°12' S), compared to this study. As an example, Figure 6 shows the series of annual values of both indices for two stations in each zone, where their inter-annual variability is observed.



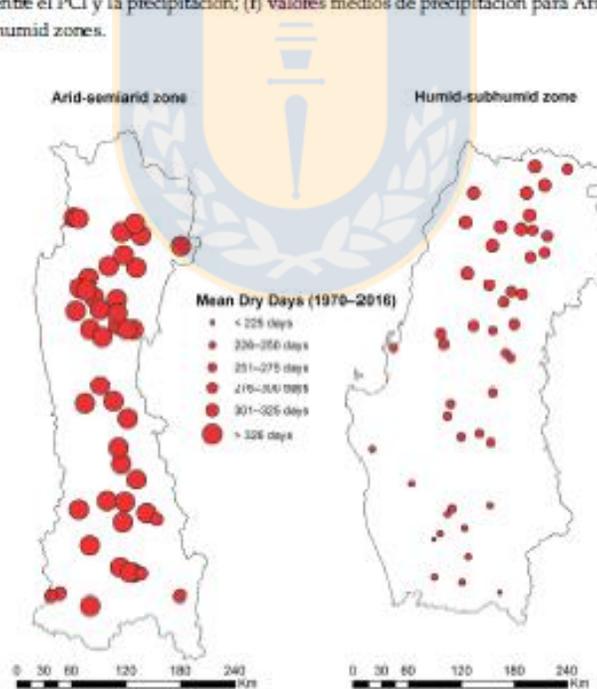
**Figure 6.** Examples of annual PCI and Gini values for two stations located in the arid-semiarid zone and two in the humid-subhumid zone. (a) Valores anuales de PCI para las estaciones Monte Grande y El Yeso Embalse en Arid-Semiárid zone; (b) Valores anuales de PCI para las estaciones Llafenco y Vilcún en Humid-subhumid zone; (c) Valores anuales de Gini Index para las estaciones Monte Grande y El Yeso Embalse en Arid-Semiárid zone; (d) Valores anuales de Gini Index para las estaciones Llafenco y Vilcún en Humid-subhumid zone.

Figure 7 shows the PCI, GI, and precipitation behaviors, as well as the relationship among them. A clear difference is highlighted by the values of precipitation and their relationships with PCI and GI, comparing both climatic zones, corroborating the separation made between them.

When relating the Gini index to average annual precipitation (Figure 7c), it was observed that in the arid-semiarid zone there is a decrease in the value of this coefficient as average annual precipitation increases, in a range of low values. With respect to the humid-subhumid zone, a decrease in the Gini index value is also indicated as precipitation increases, but in a wider range than in the arid-semiarid zone. This is due to the fact that since there is more precipitation, a greater number of days with rainfall occurs (Figure 8), increasing the 'equity' of precipitation as the Gini index decreases. As the amounts of precipitation in the arid-semiarid zone are low (generally less than 350 mm per year), the variation of the index in that zone is minimal, at the level of 4-to-5 hundredths (0.91–0.99). In the humid-subhumid zone, on the other hand, the variation of the Gini index is more accentuated (15 hundredths) towards a greater equity in the concentration of precipitation, derived from rainfall amounts that reach up to the annual means of 3200 mm.



**Figure 7.** Relationship between the mean Gini index (GI), PCI coefficient, and the mean annual precipitation (Pp) for each climatic zone in the period 1970–2016. The red boxes and circles indicate arid–semiarid zone and the black boxes and triangles indicate the humid–subhumid zone. The diagonal charts show the mean GI, PCI, and Pp values for each zone, while the rest of the charts illustrate the relationship among these parameters. (a) valores medios de Gini Index para Arid-Semiarid and Humid-Subhumid zones; (b) relación entre el Gini Index y el PCI; (c) relación entre Gini Index y precipitación; (d) valores medios de PCI para Arid-Semiarid and Humid-Subhumid zones; (e) relación entre el PCI y la precipitación; (f) valores medios de precipitación para Arid-Semiarid and Humid-Subhumid zones.



**Figure 8.** Average annual number of rain-free days for the period analyzed.

With respect to the relationship between PCI and the mean annual precipitation, Figure 7e shows that for the arid-semiarid zone, PCI decreases 33 percent as precipitation increases. The same happens in the humid-subhumid zone, but this decrease is not so pronounced (slightly higher than 10 decimal points). The above suggests that as precipitation increases in the arid-semiarid zone, there is a decrease in the concentration of precipitation. However, in the humid-subhumid zone, the decrease in the PCI as a function of the increase in precipitation is not so noticeable, since in this zone precipitation is notably more abundant and, therefore, the normal concentration is relatively low in relation to the arid-semiarid zone.

Comparing the average annual values of the Gini index, the average annual PCI, and the average annual precipitation using the Kendall's tau coefficient, a strong correlation was observed between the average Gini value and the PCI for the two studied areas, with 0.91 and 0.86, respectively (Table 1). The above suggests that the pattern of precipitation concentration in the country is described in the same way by both the daily and monthly resolution, since both indices have similar behaviors. As for the relationship of both indices (Gini and PCI) with the average annual precipitation, it was observed that in the arid-semiarid zone the correlation is strong and inversely proportional, with values of  $-0.83$  and  $-0.74$ , respectively, while in the humid-subhumid zone the correlations decrease to  $-0.41$  and  $-0.32$ , respectively, although it remains inversely proportional.

Table 1. Correlations (Kendall's tau coefficient)

Zone	Index	Gini	PCI	PP
Arid-semiarid	Gini		0.91 *	$-0.83$ *
	PCI	0.91 *		$-0.74$ *
	PP	$-0.83$ *	$-0.74$ *	
Humid-subhumid	Gini		0.86 *	$-0.41$ *
	PCI	0.86 *		$-0.32$ *
	PP	$-0.41$ *	$-0.32$ *	

\*  $p < 0.01$ .

Regarding the temporal behavior of the Gini index and the precipitation concentration index, for the 1970–2016 period the Mann–Kendall trend analysis shows that the Gini index in the arid-semiarid zone presents mostly positive trends (59.1% of stations), although only one of these was significant (Figures 9 and 10). In the same area, 38.6% of stations showed negative tendencies, although only one of them was significant. A small proportion of significant trends can be observed, which allows us to state that there are no major changes in the precipitation concentration in this macro-zone over time.

When analyzing the humid-subhumid zone, it can be seen that trends are predominantly positive (91.1% of stations); however, significant trends are not most frequent, although they explain an important proportion (35.6% of stations) of the results. Values obtained in the humid zone indicate that annual precipitation is concentrating on fewer days. This concentration of precipitation could be explained by the changes in Chile's climate regime since the 1970s [50].

On the other hand, the PCI showed that the ratio between positive and negative trends for both areas under study is lower than the Gini index (in the PCI, positive and negative trends are almost 1:1, while for the Gini index the ratio is 3:1). This difference would be a function of the nature of both indices, as the PCI uses monthly precipitation data and Gini index uses daily data, and hence has many zero values, which would be ignored when estimating monthly values. These values create a Lorenz curve with very little accentuation, so the Gini values are closer to 1. This same reason would also explain why there is little fluctuation in the Gini index at the arid-semiarid zone, since in this area the seasons are relatively long, with almost no precipitation. This difference in the data's time scale was also found by Valdés-Pineda et al. [15], who analyzed seasonal trends (SR) of precipitations

between 35° S and 40° S (humid-subhumid zone), finding negative trends in autumn and positive trends in winter

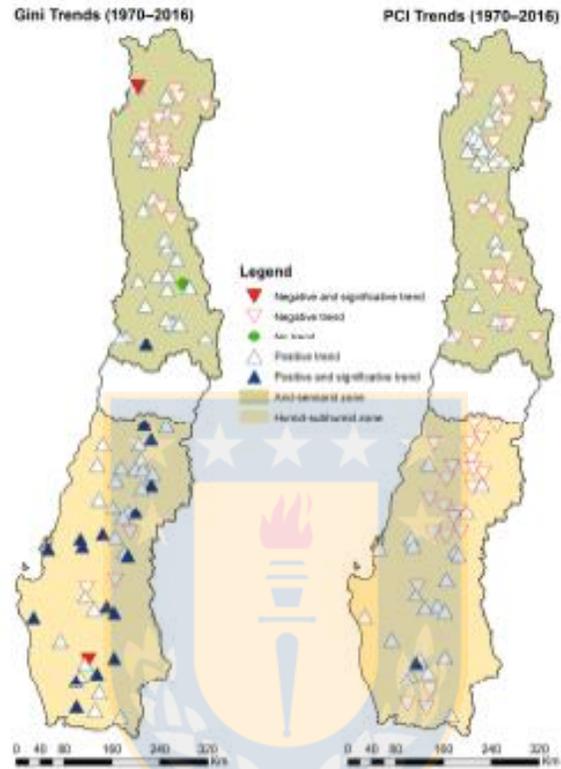


Figure 9. Trends in the Gini and PCI coefficients based on the Mann-Kendall test.

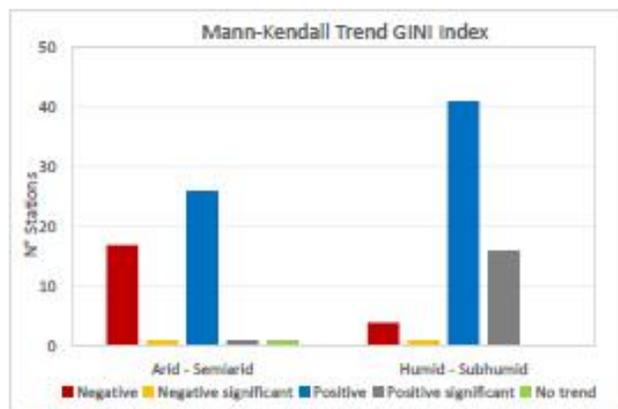


Figure 10. Mann-Kendall trends found for the Gini coefficient.

Analyzing the PCI trends (Figure 11), it can be seen that there is no greater difference between the two climatic areas under study. In the arid-semiarid zone, 21 stations showed negative trends and 23 stations had positive trends, while in the humid-subhumid zone the situation is inverted, with 23 stations having negative trends against 22 with positive trends.

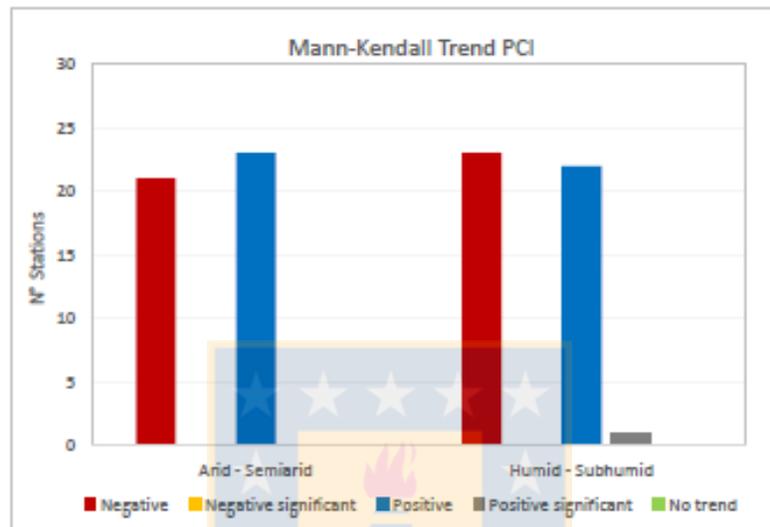


Figure 11. Trends of the Mann-Kendall test in PCI for both zones.

Analyzing trends in maximum precipitation over 24 h, separating them into summer and winter periods (Table 2), it was observed that in the arid-semiarid zone, and for both periods, the negative and positive trends are similar, although those with statistical significance are very small, not exceeding 1.5%.

The humid-subhumid zone shows greater number of negative trends for both periods (at least 30 percent points), and there is a higher statistical significance than in the arid-semiarid zone, especially in the case of negative trends, which rise to 10%.

Table 2. Trends in 24-h maximum precipitation for each period (summer and winter)

Zone	Period	Negative	Negative Significant	Positive	Positive Significant	No Trend
Arid-semiarid	summer	140 (53.0%)	1 (0.4%)	114 (43.2%)	4 (1.5%)	10 (3.8%)
	winter	129 (48.9%)	4 (1.5%)	132 (50.0%)	3 (1.1%)	3 (1.1%)
Humid-subhumid	summer	210 (77.8%)	9 (3.3%)	57 (21.1%)	0 (0%)	3 (1.1%)
	winter	175 (64.8%)	27 (10.0%)	94 (34.8%)	10 (3.7%)	1 (0.4%)

#### 4. Conclusions

As expected, obtained results indicate that precipitation concentration decreases as one moves from north to south; i.e., precipitation concentration is higher on both, daily and monthly scales in the arid-semiarid zone, compared to the humid-subhumid zone.

The Gini index and the PCI are positively correlated in both climatic zones, suggesting that both areas are relevant despite of their differences in the data's temporal resolution. The Gini index determined that there is a predominance of positive trends in both areas, with a greater proportion in the humid-subhumid area, an indication that there is an increase in the concentration of rainfall. Although generally speaking there was no significance for the Gini Index, the humid-subhumid zone showed greater prevalence of positive trends, with statistical significances that was not negligible,

an indication that rainfall is becoming more concentrated at the daily level in the humid–subhumid zone, not being the case for the arid–semi-arid zone.

Both climatic zones show similar positive and negative trends for the PCI, allowing to conclude that annual rainfall concentration has remained relatively stable in both regions. Results obtained for the PCI in both areas under study suggest that, on an annual scale, there is no evidence of increases or decreases in the concentration of annual precipitations over time.

Finally, obtained results in the analysis of maximum precipitation trends over a 24-h period indicate that there were no major changes in maximum precipitation in the arid–semi-arid zone. Likewise, there was a decrease of maximum precipitation in 24 h for the same period in the humid–subhumid zone, although with low statistical significance. This makes it possible to conclude that there is no clear evidence of a change in maximum precipitation over the last 47 years in both areas.

**Acknowledgments:** The authors of this study sincerely thank the Technological Center of Environmental Hydrology (University of Talca), the Faculty of Agricultural Engineering's Department of Water Resources (University of Concepción), and the Faculty of Forest Sciences and Nature Conservancy (University of Chile). This study was partially funded by project CONICYT/FONDAP-15130015. This research is part of project FONDECYT 1160656.

**Author Contributions:** Claudia Sangüesa and Alfredo Ibañez processed the data gathered; Claudia Sangüesa and Roberto Pizarro analyzed the results and write the paper; Diego Rivera, Alfredo Ibañez, and Juan Pino made the plots; Diego Rivera, Pablo García-Chevesich, and Benjamin Ingram provided their insight and expertise in the analysis of the results and helped editing the paper; Juan Pino helped to analyze the results and write the paper.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest. The founding sponsors had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, and in the decision to publish the results.

## References

1. Puertas, O.; Carvajal, Y.; Quintero, M. Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca Alta-Media del Río Cauca, Colombia. *Dyna* **2011**, *78*, 112–120.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Pachauri, R.K., Meyer, L.A., Eds.; Climate Change 2014: Synthesis Report; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014; p. 151.
3. Singh, D.; Tsang, M.; Rajaratnam, B.; Diffenbaugh, N.S. Precipitation extremes over the continental United States in a transient, high-resolution, ensemble climate model experiment. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2013**, *118*, 7063–7086. [CrossRef]
4. Zubieta, R.; Saavedra, M. Distribución espacial del índice de concentración de precipitación diaria en los Andes centrales peruanos: Valle del río Mantaro. *Textos* **2009**, *19*, 13–22. (In Spanish) [CrossRef]
5. Pizarro, R.; Valdés, R.; García-Chevesich, P.; Vallejos, O.; Sangüesa, C.; Morales, C.; Balocchi, F.; Abarza, A.; Fuentes, R. Latitudinal analysis of rainfall intensity and mean annual precipitation in Chile. *Quil. J. Agric. Res.* **2012**, *72*, 252–261. [CrossRef]
6. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Documento País “Análisis de Riesgos de Desastres en Chile 2010”. VI Plan de Acción Dirección General de Ayuda Humanitaria y Protección Civil (DIPECHO) en Sudamérica. Available online: <http://dipecholac.net/docs/files/315-documento-pais-chile-2010.pdf> (accessed on 14 November 2011). (In Spanish)
7. Gameaud, R. Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. Available online: [http://dgg.uchile.cl/rene/PUBS/inia\\_RGS\\_final.pdf](http://dgg.uchile.cl/rene/PUBS/inia_RGS_final.pdf) (accessed on 14 November 2011). (In Spanish)
8. Montecinos, A.; Díaz, A.; Aceituno, P. Seasonal diagnostic and predictability of rainfall in subtropical South America based on tropical Pacific SST. *J. Clim.* **2000**, *13*, 746–758. [CrossRef]
9. González, A. Ocurrencia de eventos de sequías en la ciudad de Santiago de Chile desde mediados del siglo XIX. *Revista de geografía Norte Grande* **2016**, *64*, 21–32. [CrossRef]
10. Ortlieb, L. Las mayores precipitaciones históricas en Chile central y la cronología de eventos ENOS en los siglos XVI–XIX. *Rev. Chil. Hist. Nat.* **1994**, *67*, 463–485.
11. Escobar, E.; Aceituno, P. Influencia del fenómeno ENSO sobre la precipitación nival en el sector Andino de Chile central durante el invierno. *Bulletín de l'Institut Français d'Études Andines* **1998**, *27*, 753–759. (In Spanish)

12. González, A.; Muñoz, A. Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años. *Bosque* **2013**, *34*, 191–200. [[CrossRef](#)]
13. Acosta-Jamett, G.; Gutiérrez, J.; Kelt, D.; Meserve, P.; Previtali, M. El Niño Southern Oscillation drives conflict between wild carnivores and livestock farmers in a semiarid area in Chile. *J. Arid Environ.* **2016**, *126*, 76–80. [[CrossRef](#)]
14. González-Reyes, Á.; McPhee, J.; Christie, D.; Le Quesne, C.; Szejner, P.; Masiokas, M.; Crespo, S. Spatiotemporal Variations in Hydroclimate across the Mediterranean Andes (30°–37° S) since the Early Twentieth Century. *J. Hydrometeorol.* **2017**, *18*, 1929–1942. [[CrossRef](#)]
15. Valdés-Pineda, R.; Valdés, J.; Díaz, H.; Pizarro, R. Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in South America-Chile and related ocean-atmosphere circulation patterns. *Int. J. Climatol.* **2013**, *36*, 2979–3001. [[CrossRef](#)]
16. Barrett, B.S.; Garreaud, R.D.; Falvey, M. Effect of the Andes Cordillera on Precipitation from a Midlatitude Cold Front. *Mon. Weather Rev.* **2009**, *137*, 3092–3109. [[CrossRef](#)]
17. Montecinos, A.; Kurgansky, M.V.; Muñoz, C.; Takahashi, K. Non-ENSO interannual rainfall variability in central Chile during austral winter. *Theor. Appl. Climatol.* **2011**, *106*, 557–568. [[CrossRef](#)]
18. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Documento País “Análisis de Riesgos de Desastres en Chile 2012”. VII Plan de Acción Dirección General de Ayuda Humanitaria y Protección Civil (DIPECHO) en Sudamérica 2011–2012. Available online: <http://www.unesco.org/filesadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Santiago/pdf/Analisis-de-riesgos-de-desastres-en-Chile.pdf> (accessed on 14 November 2011).
19. Faviet, V.; Falvey, M.; Rabatel, A.; Praderio, E.; López, D. Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile’s North Chico region (26–32° S). *Water Resour. Res.* **2009**, *45*, W02424. [[CrossRef](#)]
20. Sarricolea, P.; Romero, H. Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. *Revista de geografía Norte Grande* **2015**, *62*, 169–183. [[CrossRef](#)]
21. Rubio-Álvarez, E.; McPhee, J. Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003. *Water Resour. Res.* **2010**, *46*, W05514. [[CrossRef](#)]
22. Morjo, R.; Martín-Vide, J. Daily precipitation concentration around the world according to several indices. *Int. J. Climatol.* **2016**, *36*, 3828–3838. [[CrossRef](#)]
23. Yin, Y.; Xu, C.-Y.; Chen, H.; Li, L.; Xu, H.; Li, H.; Jain, S. Trend and concentration characteristics of precipitation and related climatic teleconnections from 1982 to 2010 in the Beas River basin, India. *Glob. Planet. Chang.* **2016**, *145*, 116–129. [[CrossRef](#)]
24. Oliver, J. Monthly precipitation distribution: A comparative index. *Prof. Geogr.* **1980**, *32*, 300–309. [[CrossRef](#)]
25. Pizarro, R.; Comejo, E.; González, C.; Macaya, K.; Morales, C. Análisis del comportamiento y agresividad de las precipitaciones en la zona central de Chile. *Ingeniería hidráulica en México* **2008**, *23*, 91–110. (In Spanish)
26. Martín-Vide, J. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. *Int. J. Climatol.* **2004**, *24*, 959–971. [[CrossRef](#)]
27. Sarricolea, P.; Martín-Vide, J. *Distribución Espacial de las Precipitaciones en Chile Mediante el Índice de Concentración a Resolución de 1 mm, Entre 1965–2005*; Climático, C., Impacto, E., Eds.; Spanish Climatology Association: Salamanca, Spain, 2012; pp. 631–639. (In Spanish)
28. Sarricolea, P.; Herrera, M.; Araya, C. Análisis de la concentración diaria de las precipitaciones en Chile central y su relación con la componente zonal (subtropicalidad) y meridiana (orográfica). *Investig. Geogr. Chile* **2013**, *45*, 37–50. [[CrossRef](#)]
29. De Luis, J.; González-Hidalgo, M.; Brunetti, M.; Longares, A. Precipitation concentration changes in Spain 1946–2006. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2011**, *11*, 1259–1265. [[CrossRef](#)]
30. Li, X.; Jiang, F.; Li, L.; Wang, G. Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China. *Int. J. Climatol.* **2011**, *31*, 1679–1693. [[CrossRef](#)]
31. Rajah, K.; O’Leary, T.; Turner, A.; Petrakis, G.; Leonard, M.; Westra, S. Changes to the temporal distribution of daily precipitation. *Geophys. Res. Lett.* **2014**, *31*, 8887–8894. [[CrossRef](#)]
32. Rojas, O.; Mardones, M.; Arumi, J.L.; Aguayo, M. Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, periodo 1874–2012: Causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de geografía Norte Grande* **2014**, *57*, 177–192. [[CrossRef](#)]

33. Westra, S.; Alexander, L.; Zwiers, F. Global Increasing Trends in Annual Maximum Daily Precipitation. *J. Clim.* **2013**, *26*, 3904–3918. [CrossRef]
34. O’Gorman, P. Precipitation extremes under climate change. *Curr. Clim. Chang. Rep.* **2015**, *1*, 49–59. [CrossRef] [PubMed]
35. Asadih, B.; Krakauer, N. Impacts of changes in precipitation amount and distribution on water resources studied using a model rainwater harvesting system. *J. Am. Water. Resour. Assoc.* **2016**, *52*, 1450–1471. [CrossRef]
36. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). *Atlas of Arid and Semi Arid Zones of Latin America and the Caribbean*; Technical Documents of the UNESCO PHI-LAC, N25; UNESCO: Montevideo, Uruguay, 2010; ISBN 978-92-9089-164-2.
37. Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, E. World map of the Köppen-Geiger classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* **2006**, *15*, 259–263. [CrossRef]
38. Peel, M.C.; Finlayson, B.L.; McMahon, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2007**, *11*, 1633–1644. [CrossRef]
39. Spavonek, G.; De Jong, Q.; Dourado, D. Computer assisted Koeppen climate classification: A case study for Brazil. *Int. J. Climatol.* **2007**, *27*, 257–266. [CrossRef]
40. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). *Atlas Climático Ibérico*; Agencia Estatal de Meteorología (Spain); Instituto de Meteorología de Portugal: Madrid, Spain, 2011; ISBN 978-7837-079-5.
41. Kalvová, J.; Halenka, T.; Bezpalcová, K.; Nemešová, I. Köppen climate types in observed and simulated climates. *Stud. Geophys. Geol.* **2003**, *47*, 185–202. [CrossRef]
42. Pizarro, R.; Ausensi, P.; León, L.; Aravena, D.; Sangüesa, C.; Balocchi, F. Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región del Maule, Chile. *Aqua-LAC* **2009**, *1*, 172–184. (In Spanish)
43. Alexandersson, H. A homogeneity test applied to precipitation data. *Int. J. Climatol.* **1986**, *6*, 661–675. [CrossRef]
44. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura (FAO). *Inequality Analysis: The Gini Index*; FAO: Roma, Italy, 2005.
45. Schultz, R.E.; Maharaj, R.; Lynch, S.D.; Howe, B.J.; Melvil-Thomsan, B. African Atlas of Agrohydrology and Climatology. Section 4 Precipitation. 1997. Available online: [http://www.iwmi.cgiar.org/pubs/working/wat76\\_sect2.pdf](http://www.iwmi.cgiar.org/pubs/working/wat76_sect2.pdf) (accessed on 4 June 2007).
46. Helsel, D.; Hirsch, R. *Statistical Methods in Water Resources: Book 4, Chapter A3*; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 1992.
47. Ahmad, L.; Tang, D.; Wang, T.; Wang, M.; Wagan, B. Precipitation Trends over Time Using Mann-Kendall and Spearman’s rho Tests in Swat River Basin, Pakistan. *Adv. Meteorol.* **2015**, *2015*, 431860. [CrossRef]
48. Song, X.; Song, S.; Sun, W.; Mu, X.; Wang, S.; Li, J.; Li, Y. Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960–2013. *Atmos. Res.* **2015**, *157*, 137–152. [CrossRef]
49. Yue, S.; Pilon, P.; Cavadas, G. Power of the Mann-Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrol.* **2002**, *259*, 254–271. [CrossRef]
50. Jacques-Coper, M.; Garreaud, R. Characterization of the 1970s climate shift in South America. *Int. J. Climatol.* **2015**, *35*, 2164–2179. [CrossRef]



© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## ANEXO 2: Artículo en revisión

Nombre del artículo: Spatial and temporal behavior of annual maximum subhourly rainfall intensities from 15-minute to 24-hour durations in central Chile

Autores: Sangüesa, C., Rivera, D., Pizarro-Tapia, R., García-Chevesich, P., Ibáñez, A., Pino, J.

Revista: International Journal of Climatology, enviado a revisión el 6 de julio de 2018

La revista International Journal of Climatology se encuentra en el cuartil Q1, y posee un factor de impacto de 3,1



**Spatial and temporal behavior of annual maximum sub-hourly rainfall intensities from 15-minute to 24-hour durations in central Chile**

Journal:	<i>International Journal of Climatology</i>
Manuscript ID:	JOC-18-0513
Wiley - Manuscript type:	Research Article
Date Submitted by the Author:	06-Jul-2018
Complete List of Authors:	Sangüesa, Claudia; Universidad de Talca, Centro Tecnológico Hidrología Ambiental Rivera, Diego; University of Concepcion, Water Resources Pizarro-Tapia, Roberto; University of Talca, Technological Center of Environmental Hydrology García-Chevesich, Pablo; universidad de Chile, Faculty of Forest Sciences and Nature Conservancy; university of arizona, 4Department of Hydrology and Atmospheric Sciences & Department of Agricultural and Biosystems Engineering Ibáñez, Alfredo; Universidad de Talca, Centro Tecnológico Hidrología Ambiental Pino, Juan; Universidad de Talca, Centro Tecnológico Hidrología Ambiental
Keywords:	Maximum sub-daily rainfall intensities, Maximum sub-hourly rainfall intensities, Trend of rainfall intensities, Spatial behavior of rainfall intensities
Country Keywords:	Chile

SCHOLARONE™  
Manuscripts

<http://mc.manuscriptcentral.com/joc>

**Spatial and temporal behavior of annual maximum sub-hourly rainfall intensities from 15-minute to 24-hour durations in central Chile.**

**Annual maximum rainfall intensities from 15-minute durations in Chile**

**Claudia SANGÜESA<sup>1,\*</sup>, Diego RIVERA<sup>2</sup>, Roberto PIZARRO<sup>1</sup>, Pablo GARCÍA-CHEVESICH<sup>3,4</sup>,  
Alfredo IBAÑEZ<sup>1</sup> and Juan PINO<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Technological Center of Environmental Hydrology, University of Talca, Talca, Chile;

<sup>2</sup> Department of Water Resources, Laboratory of Comparative Policy in Water Resources Management, CONICYT/FONDAP-15130015, University of Concepcion, Chillán, Chile;

<sup>3</sup>Faculty of Forest Sciences and Nature Conservancy, International Hydrology Research Group, University of Chile, Santiago, Chile;

<sup>4</sup>Department of Hydrology and Atmospheric Sciences & Department of Agricultural and Biosystems Engineering, University of Arizona, Tucson, USA;

\*e-mail: [csanguesa@utalca.cl](mailto:csanguesa@utalca.cl)

**Abstract**

Maximum rainfall intensity is an interesting factor to analyze when determining whether temporal and spatial changes have occurred. Data gathered from 11 rain gauges were used to determine annual maximum rainfall intensities for the Maule Region (central Chile), for durations from 15-minute to 24-hour durations, between 1974 and 2009. Statistical tests of position and dispersion were applied to this dataset, along with the non-parametric Mann-Kendall test to identify tendencies. Results showed that the highest intensities occurred at gauging stations with greater orographic influence and in areas near bodies of water. Additionally, the statistical analysis revealed that maximum rainfall intensities did not seem to show spatial or temporal tendencies through time.

<http://mc.manuscriptcentral.com/joc>

Instead, results suggest that intensities have remained stable within historic ranges and have not manifested important changes.

**Key words:** Maximum sub-daily rainfall intensities; Maximum sub-hourly rainfall intensities; Trend of rainfall intensities; Spatial behavior of rainfall intensities.

## 1. INTRODUCTION

The Maule region in Chile (34°41' S and 36°33' S) shows a the Mediterranean climate and experiences average annual precipitation fluctuating between 600 and 2,300 mm. Annual precipitation increases southward and with terrain elevation. It shows a strong seasonality with a dry summer and 5 months (May to September) concentrating up to 90% of the total annual precipitation (Carrasco, Casassa & Quintana, 2005; Valdés-Pineda, Valdés, Diaz, & Pizarro, 2013). Winter precipitation occurs due to extratropical fronts arriving to the continent when the Pacific Anticyclone and the midtrack low pressure areas are in their northern position (Garreaud et al., 2009; Valdés-Pineda et al, 2013). Rainfall patterns are related to the dynamics atmospheric processes such as El Niño Southern Oscillation (ENSO) (González 2016), The warm phase in central Chile (between 30°S and 35°S) is associated with an increase in winter rainfall (Ortlieb, 1994; Barret, Garreaud,&Falvey, 2009). Nevertheless, in non-ENSO conditions there are several processes that generate rainfall variability in winter, such as blocking and orographic effects (Montecinos, Kurgansky, Muñoz&Takahashi, 2011).

Both, the distribution and intensity of precipitation, as well as geomorphology, among other aspects, determine the sensitivity of the territory to meteorological hazards triggered by rainfall, such as flooding of riverbeds, floods, alluvial floods, avalanches, landslides, and swells on coasts (Unesco, 2012). As hydro-climatological events affect social and natural systems, understanding potential changes on frequency, intensity, and duration of extreme events could provide to decision makers with strategies for mitigation and adaptation (Singh,Tsiang, Rajaratnam,&Difffenbaugh, 2013; Zubieta & Saavedra, 2009). For instance, the rainfall intensity used for designing waterworks -the maximum value of precipitation expected to occur in a given time frame and associated with a

<http://mc.manuscriptcentral.com/joc>

certain return period- is crucial. Rainfall intensity values are obtained from the analysis of records kept by traditional pluviographic stations that register the amount of precipitation over time on a strip of paper, also known as a "pluviographic strip chart". In Chile, these records are traditionally collected weekly, though there are also daily and monthly records. However, it is unknown whether current gauging networks suffice to capture changes in precipitation patterns, or how current design parameters will be affected by short-term variability and long-term changes.

It is assumed that precipitation intensities in Chile have changed over the last 35 years, as this variable detects the presence of changes in the behavior of rainfall patterns, both temporally and spatially (Jacques-Coper & Garreaud, 2015). Several authors have suggested that precipitation intensities have increased in recent years in several parts of the world, along with the consequences of such increase, including changes to the temporal distribution of rainfall and changes in the impact on precipitation-runoff processes (Dhaka & Tharu, 2018; Bartolini, Grifoni, Magno; Torrigiana, & Gozzinia, 2017; Fowler & Hennessy, 1995; Gong & Wang, 2000). Other authors suggest that the increasing trend for intensity of rainfall mostly emerges on shorter time frames (less than an hour), since at such scale rainfall is more sensitive to local atmospheric changes (Westra et al., 2014; IPCC, 2007; Beck et al., 2015). For the specific case of Chile, Jacques-Coper & Garreaud (2015) documented that, beginning in the year 1976, there was a change in rainfall patterns within the country (mainly south of 44°S latitude), suggesting a differential situation that should be detectable by statistical methods and mathematical analyses that evaluate the behavior of climatic data.

The Maule Region exhibits Mediterranean features, such as sub-humid Mediterranean, highland temperate rainforest, and warm-temperate (DMC, 2001), defining in time and space rainfall patterns, which, as has been pointed out, show notable differences in mean annual rainfall. Pizarro et al. (2008) characterized rainfall behavior using 63 pluviographic stations along Chile (15 of them located in the Maule region), concluding that annual precipitation tends to increase latitudinally, with the highest precipitation values being recorded in the Andean mountain range. On revising rainfall's temporal trends, a decreasing trend of rainfall was observed during the 1990s with a strong decadal

variability (Quintana & Aceituno, 2012). Regarding the temporal concentration of rainfall, this has not been manifested as a change in annual rainfall structure. Pizarro et al. (2008) also points out that there are clear spatial patterns and temporal trends for climate aggressiveness, the Fournier Index (FI), the Modified Fournier Index (MFI), and the Precipitation Concentration Index (PCI) derived by Oliver (1980). However, increases in the annual amount of rainfall tend to increment FI and MFI, meaning that as the annual amount of precipitation increases, and so does climate aggressiveness. Similarly, it can be assumed that a higher amount of annual rainfall tends to cause a decrease in rainfall concentration, thus causing a decrease in PCI (Pizarro et al., 2008).

Also recently, Sangüesa et al. (2018) analyzed daily and monthly records from 89 pluviometric stations in the 1970-2016 period, in a geographical area enclosed by latitudes 29°12'S and 39°30'S. In that study, 18 out of 19 rainfall stations showed increasing trends on daily rainfall concentration as estimated by the GINI index. For monthly data, 16 out of 19 rainfall stations show increasing values for the Precipitation Concentration Index. Thus, differences between daily and monthly concentration trends poses a question regarding changes at sub-daily scales.

The analysis of rainfall intensity can often become costly and complex. Data comes mostly from pluviographic strips for a limited number of stations, at different geographical areas. Obtaining rainfall intensity records has normally been considered a tedious process, being limited to durations larger than 1 hour, due to the difficulty of estimating the intensities with human eyes when analyzing paper strips (Deidda, Mascaro, Piga & Querzoli, 2007; Jaklič, Šajn, Derganc, & Peer, 2016). In fact, most pluviographic stations in the country record rainfall data in strip charts using graph paper on a weekly basis. The dimensions of charts are approximately 44 by 13 cm, where 2 hours of rain are denoted by a 5 mm line drawn horizontally. This explains why it has been possible to obtain measures of precipitation up to a minimum period of 1 hour in visual form. Moreover, (Unesco, 2007) determined the maximum annual intensities and the rainfall intensity-duration-frequency (IDF) curves for stations located in several regions within the country in this same visual form, which, aside from being a long and tedious process, it does not allow for retrieving values for durations of less than 1 hour.

This study analyzes temporal and spatial behaviors of rainfall intensities, for different durations, in order identify changes and trends over the last decades.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Study Area

The study was conducted in the Maule region, located in the south-central zone of Chile. The Maule region is located between latitudes 34°43' S and 36°32' S, enclosing 30,296 km<sup>2</sup> (Figure 1). Its climate is largely Mediterranean, but it varies West-East (from the coast to the Andes), becoming more humid closer to the Andes mountain range.

The Maule region has limited rainfall records, with a total of 18 meteorological stations possessing a continuous data through weekly pluviographic strip charts (Figure 1). Beginning in 2010, stations using pluviographic strip charts were replaced by stations with continuous digital recording systems. Newer stations were set to deliver information discreetly every hour, due to the high volume of data that would otherwise be generated if records were taken every 0.2 mm of rainfall. This change has led to a reduction in the temporal resolution of available information, as records are taken hourly in integer values, losing inter-annual data and data recorded in durations of less than 1 hour. For the case of the Maule region, the 18 pluviographic stations have continuous strip charts from 1960 until 2009, although several of these stations have periods with a substantial lack of information (Figure 1). Therefore pluviographic stations used in this study were located mainly in the central valley and at the foothills of the Andes, at elevations varying from 55 to 668 masl. Annual precipitation in the area varies from 599 to 2,172 mm (Figure 1).

Figure 1. Available pluviographic stations in the Maule region and their time spans. The stations used in the study are shown in red, while those shown in yellow were not included in the study due to a lack of continuous information over time. Stations: 1: Penciahue, 2: Talca, 3: Curicó, 4: Melozal, 5: San Javier, 6: Parral, 7: El Lirio (Colbún), 8: Potrero Grande, 9: Los Queñes, 10: Desagüe Laguna Invernada, 11: Colorado, 12: San Manuel en Perquilauquén, 13: Casa Maquinista, 14:

<http://mc.manuscriptcentral.com/joc>

Ancoa Embalse, 15: Digua Embalse, 16: Bullileo Embalse, 17: Melado en la Lancha, and 18: Armerillo.

## 2.2 Data Processing

The Technological Center for Environmental Hydrology at the University of Talca developed a pluviographic strip chart processor that allows for the digitization and processing of weekly records (Unesco, 2013). The device interprets the line drawn by the pluviograph and uses the numerical values to obtain the maximum rainfall over time (Figure 2). The maximum resolution that can be obtained is 15 minutes, due to the line width. Even so, this tool allows for the gathering of information not previously counted and provides greater certainty regarding quantitative data estimations.

Figure 2. Flowchart of the pluviographic strip chart processor: a) Weekly pluviographic strip chart; b) Automatic feed scanner; c) Software application used to process charts; d) Processed strip chart; e) Data table generated by the processor and sorted on an electronic screen.

The study used pluviographic strip charts collected from 18 pluviographic stations located in the Maule region. The stations belong to one of the following 3 institutions: General Water Directory (DGA), the Chile's Meteorological Directory (DMC), and the National Electricity Company (ENDESA). The quantity of archived records varied as the station with the largest recording time has 44 years of data, while the station with the smallest records has 15 years (Figure 1). In addition to the above, some of these stations were closed in the 1990s, mostly those located at the foothills of the Andes. For the purpose of this study, only records between 1974 and 2009 were considered, as this period included the largest number of stations with continuous data. Thus, data collected in a 36-year period were obtained from a total of 11 pluviographic stations (Figure 1).

The pluviographic charts for 10 of the selected stations were weekly strip charts, while those from the remaining stations were monthly strip charts. In order to identify the maximum annual

intensity value of a defined duration, continuous sampling was conducted in the selected interval, with a displacement time of 5 minutes, so the cumulated rainfall was recorded in that time interval. Thus, time series were built by picking the highest intensity for each year. With the resulting data, it was possible to analyze the behavior of annual maximum rainfall intensities for durations of 15, 30, and 45 minutes, as well as for 1, 2, 4, 6, 12, and 24 hours, for stations located in the Maule region, with the exception of the Curicó station, where intensities with durations of less than one hour could not be obtained due to the format of its pluviographic strip charts.

In order to describe the behavior of the annual maximum intensities, inferential and descriptive statistics were used for each duration: (1) An exploratory data analysis (boxplot) was conducted in order to depict the distribution of the intensity values of each data series, each duration, and for the 11 stations considered. The stations were sorted in terms of their average annual rainfall; (2) The mean, standard deviation, and coefficient of variation were calculated for all stations. The values were placed on a map to analyze the variability with respect to spatial location. Additionally, the Alexandersson's homogeneity test (Alexanderson, 1986) was applied to all time series and all durations; (3) Annual maximum rainfall intensities for different durations were correlated with annual rainfall using the Pearson's correlation coefficient; (4) Afterwards, temporal trends of the maximum annual intensities were analyzed for each duration and station examined, with the purpose of determining whether the variable had shown significant changes in tendencies over the 36-year study period. This analysis was conducted using the non-parametric Mann-Kendall test. This test verifies the existence of tendencies (positive, negative, or none), while also determining the trend's statistical significance to a certain level of confidence; (5) The complete set of records (1974-2009) was further split into two sub-sets (1974-1991 and 1992-2009), and a Gumbel distribution was fitted to obtain return periods of 20 years for each one of the 9 durations previously listed.

For the calculation of the Mann-Kendall test, it is required the Kendall's S-statistic and its variance  $VAR(S)$ . With both values, the standardized Z-value can be obtained when the sample size is greater or equal to 8 (Yue, Pilon, & Cavadas, 2002). The sign and value of the Z-value

determines the orientation and meaning of the derived tendency, respectively. For the S-statistic, the following equation was used:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (1)$$

where the function's  $\text{sign}(x_j - x_k)$  is defined as:

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{if } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{if } x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (2)$$

where  $x_j$  and  $x_k$  are consecutive values of the variable being studied.

Then, the variance  $\text{VAR}(S)$  is defined as:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^n t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (3)$$

Finally, using both values, the Z-value was calculated using one of the following equations, depending on the S-value:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}; & \text{if } S > 0 \\ 0; & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}; & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Once the Mann-Kendall's Z-values were obtained, a qualitative spatial analysis was conducted. In addition to the above, three time periods were determined for each series: 1974-1991, 1992-2009, and the complete period (1974-2009). The Gumbel's probability distribution function was adjusted using the Method of Moments to each time period, determining the value to be reached by the variable "intensity", for a 20-year return period, i.e.  $P(x \leq X) = 0.95$ , for all durations (Pizarro et al., 2013).

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The values obtained for the maximum annual rainfall intensities, in mm/h, for the 9 durations previously listed, are shown in Figure 3. Average values were included, along with the maximum and minimum of each series, showing the high variability of the data over the years. As can be observed in Figure 3, among the average annual maximum rainfall intensity values of each duration, Péncahue was the station with the lowest intensity (19 mm/h), whereas Bullileo was the station with the greatest intensity (31.4 mm/h). For maximum values in each series are analyzed instead, other stations, as the Digua Embalse, showed maximum values for the 15- and 30-minute durations of 77.0 and 45.4 mm/h, respectively. Thus, highest intensities were found at the Andes' foothills, while lower values were in the west part of the central valley. Therefore, the spatial patterns of annual maximum rainfall intensities showed a decreasing mountains-to-coastal gradient, most likely due to a strong orographic influence and corroborating the findings by Garreaud (2009).

An exception to the above was the Melozal station, which despite of being located in the central valley and far from any body of water, it registered a maximum value for 15-min duration of 64.5 mm/h, being it the third highest value. This is relevant when considering the design rainfall intensity for hydraulic works.

Figure 3. Annual maximum intensity values for durations of 15, 30 and 45 min and 1, 2, 4, 6, 12, and 24 h, for the 1974-2009 period.

In terms of the standard deviation (Figure 4), the highest values were located in the area with the highest elevations, where annual rainfall and their intensities are greater. Upon analyzing the coefficient of variation linked to the intensities of each duration, a variation between 0.28 (45-minute duration) and 0.41 (24-hour duration) was observed (Figure 5). In general, it was observed that as the duration increases, the coefficient of variation tends to increase slightly, especially for durations greater than 1 hour.

Figure 4. Maximum annual rainfall intensities for different durations, as mean values and their respective standard deviation, between the 1974-2009 period.

Figure 5. Coefficients of variation for annual maximum intensities, for each duration, calculated with mean values from all stations, for the 1974-2009 period.

When establishing a relationship between annual maximum rainfall intensities and mean annual rainfall for each station, a positive correlation between both variables was observed. Highest correlation (0.4) was found for 24-hour durations, while 15-minute durations showed the lowest correlation value (-0.27, Figure 6). Despite the above, once the correlation coefficient was calculated, the values obtained were low (rarely rising above 0.5). Even for the Colorado station, the coefficient became negative for the 15-min duration and 0 for the 30-min duration. It is also noteworthy that Los Queñes station had a correlation of 0.58 for the 15-min duration, which contradicts the assumption that the sub-hourly intensities would be more connected to an orographic phenomenon than frontal systems. Stations Parral, Bullileo, and Los Queñes showed correlation values above 0.5 for 24-hour durations (0.58, 0.53 and 0.52, respectively).

Figure 6. Correlation coefficients between the annual maximum intensity and annual precipitation for durations of 15 minutes and 1, 12, and 24 hours, between 1974 and 2009.

In relation to the boxplot graphs, as the amount of annual maximum rainfall increased, the intensities tend to increase for the different durations considered in this study (Figure 7). Similarly, the highest intensities were reached in stations experiencing greater orographic influence (i.e. those located in the foothills of the Andes), as well as those near bodies of water, as previously mentioned, corroborating the studies conducted by Pizarro et al. (2013).

In addition to the above, it was observed that, among the durations greater than 1 hour, 2 groups of stations could be distinguished. The first group is composed by stations located in the

Central Valley (Pencahue, Curicó, Melozal, San Javier, and Parral), whereas the second is composed by stations located at the foothills of the Andes (P. Grande, Los Queñes, Colorado, Ancoa E., Digua E. and Bullileo E.). The central valley group of stations showed less rainfall, while simultaneously having lower annual maximum rainfall intensities (stations Pencahue, Curicó, Melozal, San Javier, and Parral). It should be noted that Parral, which had one of the highest annual rainfalls for the central valley (1,000 mm/year), was not among the highest rainfall intensities. The Bullileo station was the station that showed the highest intensities for all durations, emphasizing the small dispersion of its data, as well as the large number of outliers for 15-minute durations. A possible explanation of such behavior is the fact that the station is located very close to a body of water (the Bullileo reservoir), agreeing, once again, with the findings by Pizarro et al. (2013).

Figure 7. Boxplot graphs for the average annual maximum intensity, for durations of 15, 30, and 45 minutes, and for 1, 2, 4, 6, 12, and 24 hours, between 1974 and 2009, for pluviographic stations sorted by annual precipitation from smallest to greatest.

For 15-minute, 30-minute, 1-hour, and 2-hour rainfall durations, annual maximum rainfall intensities occur more frequently during winter months (May, June, and July), although it is noteworthy that summer months showed a negligible frequency of intensities (Figure 8). This fact is relevant for planning in the face of extreme events, such as floods and landslides.

Figure 8. Frequency of occurrence for maximum annual intensities at all stations, under different durations.

Based on the Mann-Kendall analysis (Figure 9), the Digua Embalse station stood out as it showed a positive and significant trend ( $p < 0.05$ ), for durations ranging from 15 minutes to 2 hours.

However, the behavior of this location obeys to local-scale characteristics, not suggesting a spatial pattern (Pizarro et al., 2013).

The stations Parral, Melozal, Pencahue, and Colorado, on the other hand, showed negative trends for all durations, but very few of them were significant. Results from the analysis indicate that other stations had mostly negative, non-significant, trends except for Pencahue and Potrero Grande, which tended to show positive, non-significant trends. Given the above, it can be said that, from an annual perspective, there are no clear rainfall behavior patterns within the study area.

A total of 96 time series were tested for data derived from 11 stations (10 with 9 durations, and 1 station with 6). Among them, 62 (64.6%) were negative trends and 34 (35.4%) were positive trends. However, it is worth noting that, over a 36-year period, only 13 (13.5%) of the trends were significant, 6 of which (6.3%) were positive and the remaining 7 (7.3%) were negative (Figure 10). In other words, it is not possible to say that annual maximum rainfall intensities have changed; in fact, most series (77%) showed that rainfall intensities for durations between 4 and 24 hours have decreased. In terms of rainfall durations shorter than 60 minutes, the number of positive and negative tendencies were similar (46% and 54%, respectively), even though other studies suggest that short-term rainfall intensities are increasing (Westra et al., 2014; Vasiljevic, McBean, & Gharabaghi, 2012; Valdés-Pineda et al., 2013). Differences on trends and spatial distribution must be closely analysed in order to unravel potential changes on the direction, trajectories and precipitable water. Also, preliminary results suggest that maximum intensities within the year also occur during summer time, having a potential effect on the design of waterworks and irrigations system, but also affecting the preparedness of productive systems.

Figure 9. Trend map (Mann-Kendall) of maximum rainfall intensities, for 15-, 30-, and 45-minute, and 1-, 2-, 4-, 6-, 12-, and 24-hour durations.

Figure 10. Trend values for the entire data set analyzed, as percentages.

The above results suggest that annual maximum rainfall intensities from the 11 analyzed stations have not changed significantly (positive or negative trends). Similarly, the analysis under different time periods (obtained from the fitted Gumbel function) showed no differences among the three groups (1974-1991, 1992-2009, and 1974-2009), with the exception of a few stations (Colorado and Digua Embalse) (Figure 11).

Figure 11. Comparison of annual maximum rainfall intensities for a 20-year return period, applied to the three timeframes (1974-1991, 1992-2009, and 1974-2009), considering each duration and station.

It is not possible to unravel the reasons why there is a high differential on annual maximum rainfall intensities between both time periods, based on our current database. However, one explanation could be the geographical location of the stations (near bodies of water), as suggested by Pizarro et al. (2013).

Such differential is only expressed in durations equal or shorter than one hour, an indication of the need for further analysis, with more information, to be able to find more results. It is suggested to explore synoptic patterns for rainfall and other relevant climatological fields.

#### 4. CONCLUSIONS

A relevant number of annual maximum rainfall intensities in the Maule region showed largely non-significant, negative trends. For intensities of less than one hour, there was no clear tendencies through time or space; however, for intensities longer than four hours, most stations showed a tendency to decrease over time, though such tendencies weren't statistically significant. This means that, considering the period analyzed, it is not possible to infer changes in temporal behavior patterns for annual maximum rainfall intensities.

Finally, the trend analysis showed that, for the 11 stations and different durations studied, the intensities between 1974 and 2009 did not display patterns of spatial or temporal behavior. The results instead show that the intensities have stayed within known ranges and have not shown any

significant changes. However, it is advisable to expand the work performed in this study to other latitudinal areas of the country, in order to add more information to the data used in this study, which could then be used to either confirm or rule out the existence of significant changes to behavioral patterns of annual maximum rainfall intensities.

#### Acknowledgments

The authors of this study sincerely thank the Technological Center of Environmental Hydrology (University of Talca) and the Faculty of Agricultural Engineering's Department of Water Resources (University of Concepción). This study was funded by project CONICYT/FONDAP-15130015 and FONDECYT 1160656.

On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

#### References

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Int. J. Climatol.* 6, 661–675. doi:10.1002/joc.3370060607.
- Barrett, B., Garreaud, R., & Falvey, M. (2009). Effect of the Andes Cordillera on Precipitation from a Midlatitude Cold Front. *Mon Weather Rev* 137, 3092-3109.
- Bartolini, G., Grifoni, D., Magno, R., Torrigiana, T., & Gozzinia, B. (2017). Changes in temporal distribution of precipitation in a Mediterranean area (Tuscany, Italy) 1955–2013. *Int. J. Climatol.* 38, 1366-1374 DOI: 10.1002/joc.5251
- Beck, F., Bárdossy, A., Seidel, J., Müller, T., Sanchis, E., & Hauser, A. (2015). Statistical analysis of sub-daily precipitation extremes in Singapore. *J. Hydrol: Regional Studies* 3, 337-358. doi: 10.1016/j.ejrh.2015.02.001
- Carrasco, J., Casassa, G., & Quintana, J. (2005). Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century / Changements de l'isotherme 0°C et de la ligned'équilibre des neiges dans le Chili central durant le dernier quart du 20ème siècle. *Hydrol .Sci. J.* 50, 933-948. doi: 10.1623/hysj.2005.50.6.933

- Dhakal, N., & Tharu B. (2018). Spatio-temporal trends in daily precipitation extremes and their connection with North Atlantic tropical cyclones for the southeastern United States. *Int. J. Climatol.* 2018;1–10. doi: 10.1002/joc.5535
- Deidda, R., Mascaro, G., Piga, E., & Querzoli, G. (2007). An automatic system for rainfall signal recognition from tipping bucket gage strip charts. *J. Hydrol.* 333, 400-412. doi: [10.1016/j.jhydrol.2006.09.011](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.011)
- DMC (Dirección Meteorológica de Chile). (2001). *Climatología Regional (2001)*, Available online: [http://164.77.222.61/climatologia/publicaciones/Climatologia\\_regional.pdf](http://164.77.222.61/climatologia/publicaciones/Climatologia_regional.pdf) (access on 04-04-2017).
- Fowler, A., & Hennessy, K. (1995). Potential impacts of global warming on the frequency and magnitude of heavy precipitation. *Nat. Hazards.* 11, 283-303. doi: 10.1007/BF00613411.
- Garreaud, R., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281 180–195.
- Garreaud, R. (2009). The Andes climate and weather. *Adv. Geosci.* 22, 3-11.
- Gong, D., & Wang, S. (2000). Severe summer rainfall in China associated with enhanced global warming. *Clim. Res.* 16, 51-59. doi: [10.3354/cr016051](https://doi.org/10.3354/cr016051)
- González, A. (2016). Ocurrencia de eventos de sequías en la ciudad de Santiago de Chile desde mediados del siglo XIX. *Rev. Geogr. Norte. Gd.* 64, 21–32.
- IPCC, (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J van der Linden and C.E Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jacques-Coper, M., & Garreaud, R. (2015). Characterization of the 1970s climate shift in South America. *Int. J. Climatol.* 35, 2164-2179. doi: [10.1002/joc.4120](https://doi.org/10.1002/joc.4120).

<http://mc.manuscriptcentral.com/joc>

- Jaklič, A., Šajin, L., Derganc, D., & Peer, P. (2016). Automatic digitization of pluviograph strip charts. *Meteorol. Appl.* 23, 57-64, doi: [10.1002/met.1522](https://doi.org/10.1002/met.1522)
- Montecinos, A., Kurgansky, M., Muñoz, C., & Takahashi, K. (2011). Non-ENSO interannual rainfall variability in central Chile during austral winter. *Theor. Appl. Climatol.* 106, 557-568.
- Oliver, J. (1980). Monthly precipitation distribution: a comparative index. *Prof. Geogr.* 32, 300-309. doi: [10.1111/j.0033-0124.1980.00300.x](https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1980.00300.x)
- Ortlieb, L. (1994). Las mayores precipitaciones históricas en Chile central y la cronología de eventos ENOS en los siglos XVI-XIX. *Rev. Chi. Hist. Nat.* 67, 463-485.
- Pizarro, R., Comejo, F., González, C., Macaya, K., & Morales, C. (2008). Análisis del comportamiento y agresividad de las precipitaciones en la zona central de Chile. *Ingeniería Hidráulica en Mexico* 23, 91-109.
- Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdes, R., Domínguez, F., Hossain, F., Ffolliott, P.,... & Bro, P. (2013). Inland water bodies in Chile can locally increase rainfall intensity. *J. Hydrol.* 481, 56-63. doi: [10.1016/j.jhydrol.2012.12.012](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.012)
- Quintana, J. (2004). Factors involved in the interdecadal precipitation variability in Chile. M.S. thesis, Department of Geophysics, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Quintana, J., & Aceituno, P. (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S. *Atmósfera.* 25, 1-22.
- Sangüesa, C., Pizarro, R., Ibañez, A., Pino, J., Rivera, D., García-Chevesich, P., & Ingram, B. (2018). Spatial and Temporal Analysis of Rainfall Concentration Using the Gini Index and PCI. *Water* 10, 112. doi: [10.3390/w10020112](https://doi.org/10.3390/w10020112).
- Singh, D., Tsiang, M., Rajaratnam, B., & Diffenbaugh, N. (2013). Precipitation extremes over the continental United States in a transient, high-resolution, ensemble climate model experiment. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 7063-7086.

- UNESCO. 2007. Curvas Intensidad- Duración – Frecuencia, para la zona centro sur de Chile, ed. Publisher: PHI-LAC, Uruguay.
- UNESCO. 2012. Documento País "Análisis de Riesgos de Desastres en Chile 2012". VII Plan de Acción Dirección General de Ayuda Humanitaria y Protección Civil (DIPECHO) en Sudamérica 2011–2012. Available online: <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Santiago/pdf/Analisis-de-riesgos-de-desastres-en-Chile.pdf> (accessed on 14 November 2017).
- UNESCO. 2013. Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas, ed. Publisher: PHI-LAC, Uruguay.
- Valdés-Pineda, R., Valdés, J., Diaz, H., Pizarro, R., 2013. Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in South America-Chile and related ocean-atmosphere circulation patterns. *Int. J. Climatol.* 36, 2979-3001. doi: [10.1002/joc.4532](https://doi.org/10.1002/joc.4532)
- Vasiljevic, B., McBean, E., &Gharabaghi, B.(2012). Trends in rainfall intensity for stormwater designs in Ontario. *J. Water. Clim. Change.* 3, 1-10. doi: 10.2166/wcc.2012.125
- Viale. M.,&Nuñez, M.(2011). Climatology of Winter Orographic Precipitation over the Subtropical Central Andes and Associated Synoptic and Regional Characteristics. *J. Hydrometeorol.* 12, 481-507. doi: 10.1175/2010JHM1284.1
- Westra, S., Fowler, H., Evans, J., Alexander, L., Berg, P., Johnson, F., ...&Lenderink, G., Roberts, N.(2014). Future changes to the intensity and frequency of short duration extreme rainfall. *Rev. Geophys.* 52, 522-555, doi:10.1002/2014RG000464
- Yue, S., Pilon, P.,&Cavadias, G.(2002). Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho test for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrol.* 259, 254-271. doi: [10.1016/S0022-1694\(01\)00594-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7)

Zubieta, R., & Saavedra, M. (2009). Distribución espacial del índice de concentración de precipitación diaria en los Andes centrales peruanos: Valle del río Mantaro. *Tecnia* 19, 13–22.



<http://mc.manuscriptcentral.com/joc>

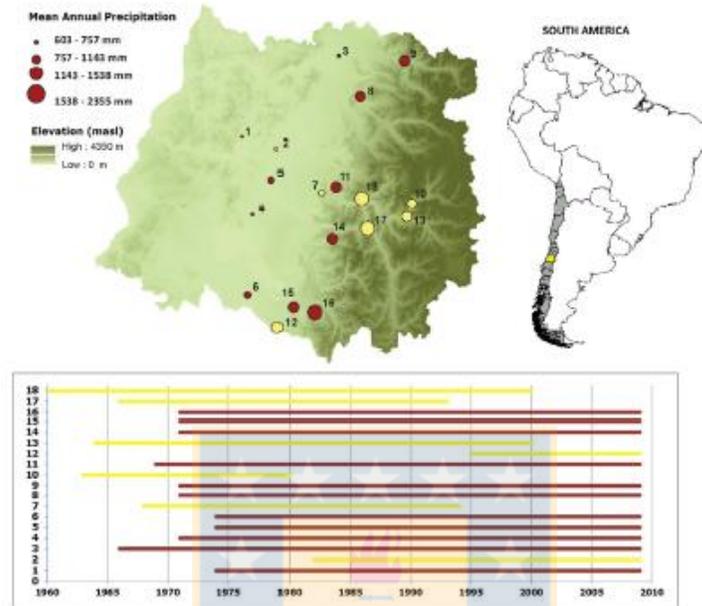


Figure 1. Available pluviographic stations in the Maule region and their time spans. The stations used in the study are shown in red, while those shown in yellow were not included in the study due to a lack of continuous information over time. Stations: 1: Penciahue, 2: Talca, 3: Curicó, 4: Melozal, 5: San Javier, 6: Parral, 7: El Lirio (Colbún), 8: Potrero Grande, 9: Los Queñes, 10: Desaguë Laquna Invernada, 11: Colorado, 12: San Manuel en Perquilauquén, 13: Casa Maquinista, 14: Ancoa Embalse, 15: Diqua Embalse, 16: Bullileo Embalse, 17: Melado en la Lancha, and 18: Armerillo.

257x223mm (150 x 150 DPI)

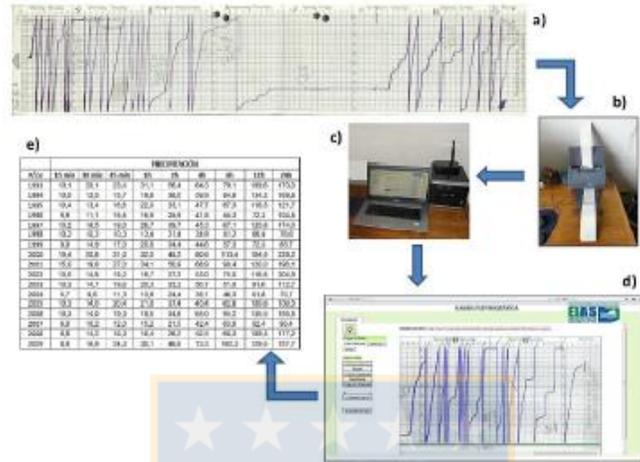


Figure 2. Flowchart of the pluviographic strip chart processor: a) Weekly pluviographic strip chart; b) Automatic feed scanner; c) Software application used to process charts; d) Processed strip chart; e) Data table generated by the processor and sorted on an electronic screen.

279x215mm (300 x 300 DPI)

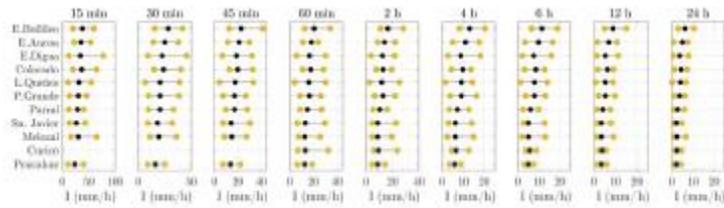


Figure 3. Annual maximum intensity values for durations of 15, 30 and 45 min and 1, 2, 4, 6, 12, and 24 h, for the 1974-2009 period.

451x126mm (72 x 72 DPI)



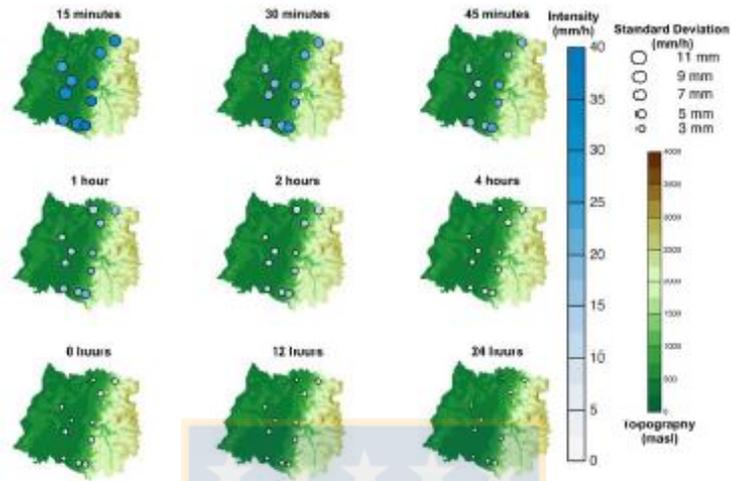


Figure 4. Maximum annual rainfall intensities for different durations, as mean values and their respective standard deviation, between the 1974-2009 period.

451x307mm (72 x 72 DPI)

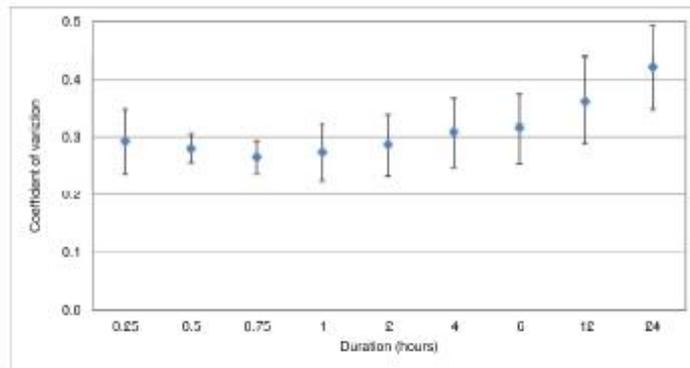
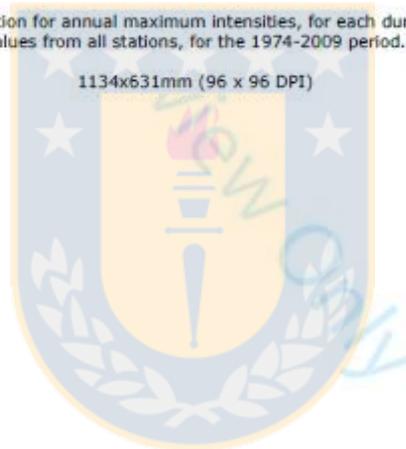


Figure 5. Coefficients of variation for annual maximum intensities, for each duration, calculated with mean values from all stations, for the 1974-2009 period.



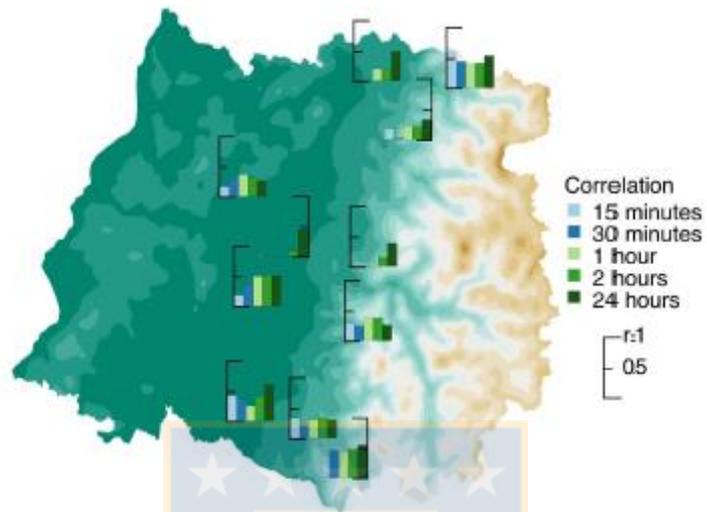


Figure 6. Correlation coefficients between the annual maximum intensity and annual precipitation for durations of 15 minutes and 1, 12, and 24 hours, between 1974 and 2009.

166x118mm (300 x 300 DPI)

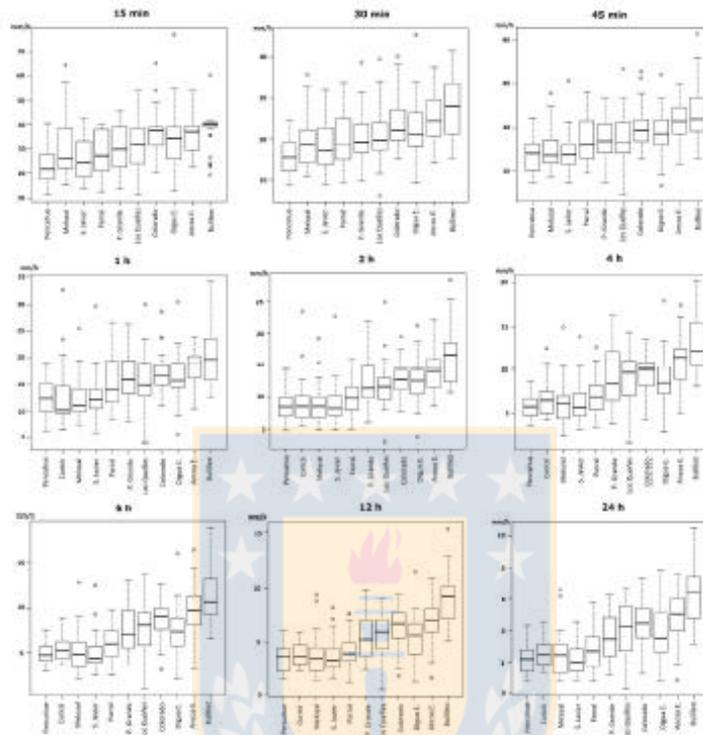


Figure 7. Boxplot graphs for the average annual maximum intensity, for durations of 15, 30, and 45 minutes, and for 1, 2, 4, 6, 12, and 24 hours, between 1974 and 2009, for pluviographic stations sorted by annual precipitation from smallest to greatest.

1004x1023mm (96 x 96 DPI)

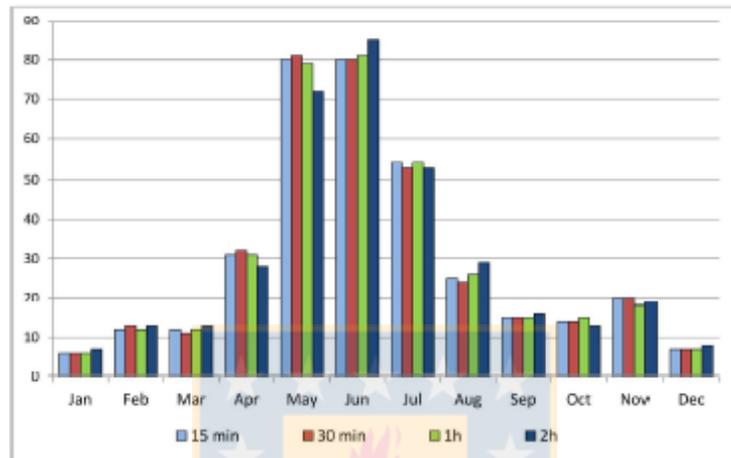


Figure 8. Frequency of occurrence for maximum annual intensities at all stations, under different durations.

279x215mm (300 x 300 DPI)

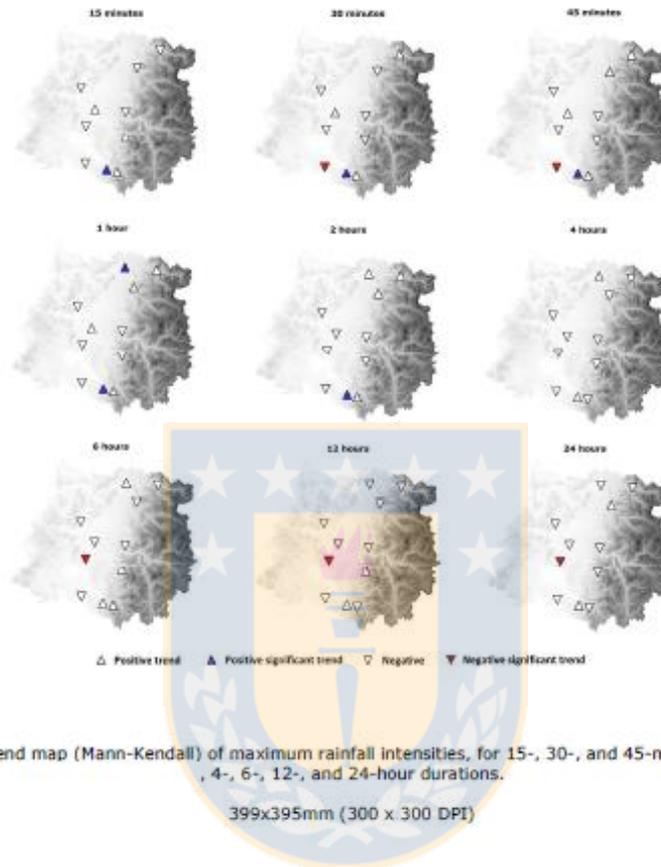


Figure 9. Trend map (Mann-Kendall) of maximum rainfall intensities, for 15-, 30-, and 45-minute, and 1-, 2-, 4-, 6-, 12-, and 24-hour durations.

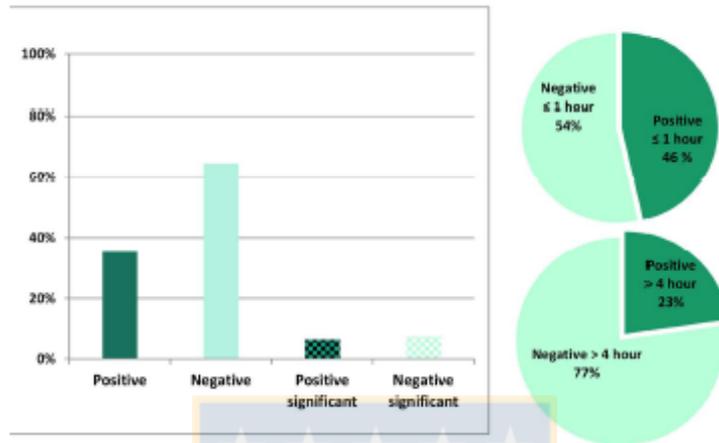


Figure 10. Trend values for the entire data set analyzed, as percentages.

257x223mm (150 x 150 DPI)

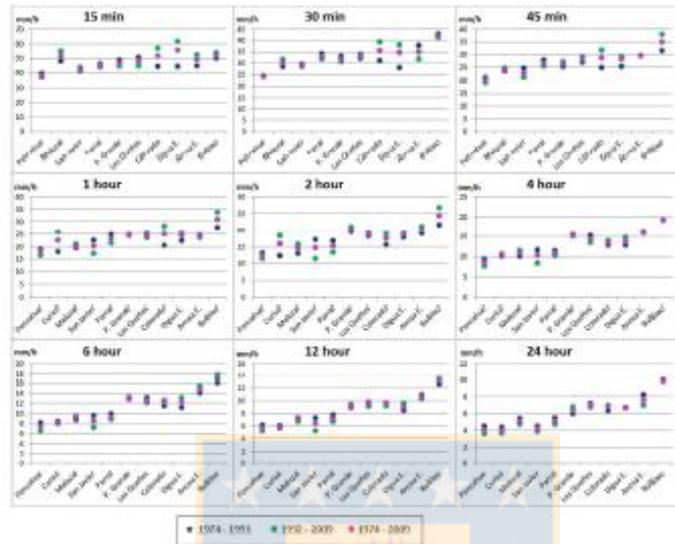


Figure 11. Comparison of annual maximum rainfall intensities for a 20-year return period, applied to the three timeframes (1974-1991, 1992-2009, and 1974-2009), considering each duration and station.

332x273mm (96 x 96 DPI)

## Graphical Table of Contents

**Spatial and temporal behavior of annual maximum sub-hourly rainfall intensities from 15-minute to 24-hour durations in central Chile.**

Claudia Sangüesa\*, Diego Rivera, Roberto Pizarro, Pablo García-Chevesich, Alfredo Ibáñez and Juan Pino

Results showed that the highest intensities occurred at gauging stations with greater orographic influence and in areas near bodies of water. Additionally, the statistical analysis revealed that maximum rainfall intensities did not seem to show spatial or temporal tendencies through time. Instead, results suggest that intensities have remained stable within historic ranges and have not manifested important changes.

