



UNIVERSIDAD DE CHILE  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo  
Escuela de Pregrado  
Carrera de Geografía

INFLUENCIA DE LA OROGRAFÍA EN EVENTOS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA  
EN CHILE CENTRAL: REGIONES DE VALPARAÍSO, METROPOLITANA Y  
O'HIGGINS

Memoria para optar al título de Geógrafo

PABLO TOMÁS BUSTAMANTE MORALES

Profesor guía: Pablo Sarricolea Espinoza

SANTIAGO – CHILE  
2018

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

En toda circunstancia  
creo y confío ciegamente

# Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

## AGRADECIMIENTOS

Cada persona que aquí menciono ha sabido guiar mi camino en este proceso, como también ha influido en mi vida. Dudo que cada uno sea una simple casualidad y me es aún más difícil pensar que alguien no haya intercedido en eso, ese alguien, creo que es Dios, a quien también agradezco por este lindo tiempo y por todos ustedes.

En primer lugar, agradecer al profesor Pablo Sarricolea, quien ha sabido guiarme y aconsejar en muchos aspectos para sacar adelante esta memoria de título.

Quiero agradecer a mi familia, quienes han entregado fundamental apoyo y profundo cariño en todo momento. De este gran grupo, no puedo dejar de mencionar a los que más de cerca han apoyado mi formación. Entre ellos, mis dos madres, que, si bien no son tal, cumplen con especial amor aquel rol. La primera, mi abuela, ella supo darme un hogar, muchas enseñanzas y un cálido abrazo cuando el miedo ganaba. La segunda, tía Carolina, bondadosamente me ha dado su gran amor. Continuo con mi Papá, infinitas gracias por soportar un hijo tan difícil y desafiante, tu eterna compañía y fuerza, son tu mejor regalo. Agradecer también a mis hermanos, Constanza, Arturo, Daniela, Martín y Tomás. A ti Constanza, gracias por tu entrega, amistad y amor. Arturo, sin tenerte cerca, tu cariño ha superado las distancias. Los otros tres, siendo mis primos, lograr ser hermanos, Daniela y Martín, gracias por estar conmigo y aguantar mis bromas. Tomás, no vas a leer tanta cursilería todavía, pero pronto sabrás la alegría que me entrega tu pequeño cariño. No puedo dejar afuera a mi abuelo, con quien muchas veces no concuerdo, pero su afecto y respeto superan toda diferencia. Finalmente, agradecer a tía Juanita, tío Rodrigo y Carmen Luz, gracias por su gran ejemplo de vida.

Agradecer profundamente a mis amigos, sobre todo a los que hicieron más lindos estos años de universidad, especialmente, Renata, Nicole, Paz, Andrea, Claudia y Diego, gracias por las risas, apoyo y sobre todo paciencia. Además, particularmente quiero agradecer a dos personas fundamentales en este proceso, Camila y Rosita, gracias queridas amigas por compartir conmigo su casa, cariño, profunda paciencia, consejos, viajes y una increíble amistad. Debo sumar a estos agradecimientos a mis amigos del laboratorio de Geografía física, mención honrosa a Misael, este trabajo agradece tu apoyo cartográfico. Por último, importante mencionar a Rodrigo Rauld, gracias por prestar oído a mis dudas y estar presente gran parte de este tiempo.

Muchas gracias a “Corito”, todos importantes y necesarios para afinar el corazón, disculpen las tantas ausencias a ensayo por las cuales culpé a la universidad. De este grupito también es necesario nombrar a dos amigas, Natalia y Gisela, gracias por su inmenso cariño.

Finalmente, gracias a ti Angélica, por llegar a acompañarme en este último momento, donde tus palabras, amor y fe, fueron un gran presente para cerrar este ciclo.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

ÍNDICE

RESUMEN.....	9
CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN .....	12
1.1 INTRODUCCIÓN .....	12
1.2 ÁREA DE ESTUDIO.....	13
1.4 OBJETIVOS .....	18
1.4.1 Objetivo general .....	18
1.4.2 Objetivos específicos.....	18
1.5 HIPÓTESIS.....	18
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	19
2.1 SISTEMA CLIMÁTICO.....	19
2.1.1 Circulación de la atmósfera.....	20
2.1.2 Precipitaciones .....	21
2.1.2.1 Precipitación máxima .....	22
2.1.2.2 Año hidrológico.....	22
2.1.2.3 Precipitación acumulada .....	23
2.1.3 Sistema frontal.....	23
2.1.4 Ciclogénesis .....	26
2.1.4.1 Vientos del Oeste .....	26
2.1.4.2 Vaguada Circumpolar .....	26
2.1.5 Bajas segregadas .....	27
2.1.7 Clima de Chile -Zona central- .....	28
2.1.8 Comportamiento de las precipitaciones en la zona central de Chile .....	30
2.1.9 Influencia del relieve en las precipitaciones.....	31
2.1.10 Efecto de la cordillera de los Andes en la precipitación .....	32
2.1.11 Efecto de la cordillera de la Costa en la precipitación .....	33
2.2 ELEMENTOS ESTADÍSTICOS APLICADOS A LA CLIMATOLOGÍA .....	34
2.2.1 Muestra espacial.....	34
2.2.2 Distribución estadística de Gumbel Max .....	34
2.2.3 Probabilidad de excedencia.....	35
2.2.4 Periodo de retorno .....	35
2.2.5 Test de Kolmogorov – Smirnov .....	35
2.2.6 Chi-cuadrado .....	35

# Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

2.2.7 Prueba de Anderson-Darling.....	35
2.3 TOPOCLIMATOLOGÍA.....	36
2.3.1 Factores topoclimáticos.....	36
2.3.2 Efectos topoclimáticos .....	36
2.4 AMENAZA.....	37
2.4.1 Amenaza.....	37
2.4.2 Factores desencadenantes.....	37
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....	38
3.1 PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO .....	38
3.1.1 Etapas metodológicas.....	41
3.1.1.1 Primera etapa.....	42
3.1.1.2 Segunda etapa.....	42
3.1.1.3 Tercera etapa .....	42
3.1.1.4 Cuarta etapa.....	42
3.1.2 Datos y métodos utilizados .....	43
3.1.2.1 Datos .....	43
3.1.2.2 Selección de estaciones y reconstrucción de datos.....	43
3.1.3 Estimación de periodos de retorno .....	48
3.1.4 Imágenes satelitales.....	48
3.1.4.1 Cartografías y productos a partir de programas de información geográfica .....	49
3.1.4.2 Espacialización de variables estadísticas (Media estadística y desviación típica) .....	50
3.1.4.3 Análisis espacial estadístico .....	50
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	51
4.1 Análisis estadístico y eventos máximos .....	51
4.2 Parámetro de alfa (Desviación típica) .....	67
4.3 Periodo de retorno y mayores eventos registrados .....	78
4.4 Eventos extremos .....	95
4.4.1 Evento de precipitación máxima mayo 2000 .....	98
4.4.2 Evento de precipitación máxima Julio 2001 .....	98
4.4.3 Evento de precipitación máxima mayo 2002 .....	102
4.4.4 Evento de precipitación máxima junio 2002.....	104
4.4.5 Evento de precipitación máxima mayo 2003 .....	104
4.4.6 Evento de precipitación máxima agosto 2008.....	108
4.4.7 Evento de precipitación máxima agosto 2015.....	108

# Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

4.5 Exposición por municipio a eventos de precipitación máxima e intensidad de periodo de retorno. ....	109
4.5.1 Promedio parámetro $\mu$ por comuna.....	111
4.5.2 Promedio de precipitaciones para eventos de precipitación máxima en periodo de retorno. ....	116
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	126
5.1 Discusión.....	126
5.2 Conclusión.....	129
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Área de estudio.....	14
Figura N° 2: Componentes del sistema climático, interacciones y procesos climáticos) .....	20
Figura N° 3: Esquema de la dinámica atmosférica, circulación de la atmósfera .....	21
Figura N° 4: Frente frío y nubosidad asociada.....	24
Figura N° 5: Frente cálido y nubosidad asociada.....	24
Figura N° 6: Frente ocluido tipo frente frío .....	25
Figura N° 7: Frente ocluido tipo frente cálido .....	26
Figura N° 8: Vaguada circumpolar Antartica .....	27
Figura N° 9: Desarrollo de baja segregada ( <i>cut-off low</i> ) .....	28
Figura N° 10: Clasificación climática de Köppen-Geiger actualizada por Sarricolea et al. (2017), Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'higgins, .....	30
Figura N° 11: Precipitación orografía, efecto Foehn .....	31
Figura N° 12: Días lluviosos asociados a precipitación orográfica en época estival .....	32
Figura N° 13: Porcentaje de estaciones meteorológicas por región.....	38
Figura N° 14: Distribución de las estaciones meteorológicas en área de estudio .....	39
Figura N° 15: Esquema etapas Metodologia.....	41
Figura N° 16: Tabla bondad de ajuste, software EasyFit,.....	45
Figura N° 17: Tabla bondad de ajuste, software EasyFit.....	46
Figura N° 18: Histograma Gumbel Max, 24 horas estación Tobalaba.....	47
Figura N° 19: Histograma Gumbel Max, 48 horas estación Tobalaba.....	47
Figura N° 20: Figura N°24: Histograma Gumbel max, 72 horas estación Tobalaba .....	47
Figura N° 21: Imagen satelital TRMM .....	49
Figura N° 22: Media Estadística ( $\mu$ ) de eventos máximos, 24 Horas .....	56
Figura N° 23: Media estadística ( $\mu$ ) de eventos máximos, 48 horas.....	58
Figura N° 24: Media estadística ( $\mu$ ) de eventos máximos, 72 horas.....	60
Figura N° 25: Perfil topográfico N°1. Latitud 32°19' S .....	62
Figura N° 26: Perfil topográfico N°2. Latitud 32°46' S .....	63
Figura N° 27: Perfil topográfico N°3. El Roble La Campana Latitud 32°56' S .....	64
Figura N° 28: Perfil topográfico N°4. Latitud 33°31' S .....	65
Figura N° 29: Perfil topográfico N°5. Latitud 34°06' S .....	66
Figura N° 30: Perfil topográfico N°5. Latitud 34°33' S .....	67
Figura N° 31: Parámetro $\alpha$ eventos de precipitación máxima en 24 horas .....	70
Figura N° 32: Parámetro $\alpha$ eventos de precipitación máxima en 48 horas .....	72
Figura N° 33: Parámetro $\alpha$ eventos de precipitación máxima en 72 horas .....	73
Figura N° 34: Perfil topográfico N°1 y distribución de mayor evento pluviométrico .....	75
Figura N° 35: Perfil topográfico N°2 y distribución de mayor evento pluviométrico .....	76
Figura N° 36: Perfil topográfico N°3 y distribución de mayor evento pluviométrico .....	76
Figura N° 37: Perfil topográfico N°4 y distribución de mayor evento pluviométrico .....	77
Figura N° 38: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima en 24 horas (10 años).....	83
Figura N° 39: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima en 24 horas (50 años).....	84
Figura N° 40: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima en 24 horas (100 años).....	85
Figura N° 41: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima en 48 horas (10 años).....	87

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Figura N° 42: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima 48 horas (50 años) .....	88
Figura N° 43: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima en 48 horas (100 años).....	89
Figura N° 44: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima 72 horas (10 años) .....	91
Figura N° 45: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima 72 horas (50 años) .....	92
Figura N° 46: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima en 72 horas (100 años).....	93
Figura N° 47: Evento precipitación máxima, mayo 2000. ....	99
Figura N° 48: Evento de precipitación máxima Julio 2001.....	100
Figura N° 49: Evento de precipitación Máxima, mayo 2002.....	101
Figura N° 50: Evento de precipitación máxima, junio 2002.....	103
Figura N° 51: Evento de precipitación máxima, mayo 2003 .....	105
Figura N° 52: Evento de precipitación máxima, agosto 2008.....	106
Figura N° 53: Evento de precipitación máxima, agosto 2015.....	107
Figura N° 54: comunas Región de Valparaíso .....	109
Figura N° 55: comunas Región Metropolitana .....	110
Figura N° 56: comunas Región de Valparaíso .....	111
Figura N° 57: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 24 horas, en periodo de retorno de 10 años .....	117
Figura N° 58: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 24 horas, en periodo de retorno de 50 años .....	118
Figura N° 59: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 24 horas, en periodo de retorno de 100 años .....	119
Figura N° 60: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 48 horas, en periodo de retorno de 10 años .....	120
Figura N° 61: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 48 horas, en periodo de retorno de 50 años .....	121
Figura N° 62: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 48 horas, en periodo de retorno de 100 años .....	122
Figura N° 63: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 72 horas, en periodo de retorno de 10 años .....	123
Figura N° 64: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 72 horas, en periodo de retorno de 50 años .....	124
Figura N° 65: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 72 horas, en periodo de retorno de 100 años .....	125

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla N° 1: Información territorial (población y superficie) .....	13
Tabla N° 2: Estaciones meteorológicas.....	40
Tabla N° 3: $\mu$ por estación .....	51
Tabla N° 4: $\alpha$ por estación .....	53
Tabla N° 5: Mayor precipitación acumulada por evento. ....	54
Tabla N° 6: Parámetro $\alpha$ por estación .....	68
Tabla N° 7: Umbral por estación, periodo de retorno por estación, 10 años. ....	78
Tabla N° 8: Umbral por estación, periodo de retorno, 50 años.....	80
Tabla N° 9: Umbral por estación, periodo de retorno 100 años.....	81
Tabla N° 10: Precipitación en milímetros de cada evento máximo, por estación.....	96
Tabla N° 11: Fecha de eventos de precipitación máxima analizados .....	97
Tabla N° 12: Media estadística de eventos de precipitación máxima por comuna .....	112

# Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

## RESUMEN

El propósito de esta investigación es identificar y analizar la influencia que ejerce la orografía en la distribución de la precipitación, así como, en su intensidad y frecuencia en la zona Central de Chile, específicamente en las regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins. Esta área se caracteriza por presentar un relieve acusado, donde, predominan dos cordilleras (Los Andes y de la Costa), además de, valles y cordones transversales. El relieve influye en la pluviometría, factor gatillante de otros procesos, tales como amenazas hidrometeorológicas. Para ello se trabaja sobre una base de precipitación diaria (1965-2011) y se calculan periodos de retorno de 24, 48 y 72 horas; los eventos pluviométricos extremos de 72 horas son contrastados con información de la *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Entre los principales resultados obtenidos se tiene que la precipitación máxima posee diferencias entre eventos de periodo de retorno de 10 años y aquellos de 50 y 100 años; los primeros dan máximos en las planicies litorales y Cordillera de Los Andes mientras que los segundos suman parte del valle de la VI región. Las comparaciones de los eventos extremos con TRMM demuestran diferencias importantes en montos registrados y estimados, lo cual permite afirmar la necesidad de una red más densa de estaciones pluviométricas. Por último, los análisis agrupados a nivel comunal demuestran que Coinco, Coltauco, Los Andes, San José, San Vicente y Quilpué poseen mayor precipitación extrema, y comparten características del relieve que provoca forzamiento orográfico.

Palabras Clave: Precipitación máxima, Forzamiento Orográfico, *Tropical Rainfall Measuring Mission*, periodo de retorno

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

**ABSTRACT**

The purpose of this research is to identify and analyze the orography's influence on the precipitation distribution, such as, its intensity and frequency in the Central Zone of Chile specifically in the V Valparaíso Region, the Santiago Metropolitan Region and the VI Libertador General Bernardo O'Higgins Region. This area is characterized by presenting a pronounced relief where two mountain ranges (The Andes and Coast) predominate, in addition to, valleys and transverse cords. Geographical relieves influence rainfall, a trigger factor for other processes, such as hydrometeorological threats. For that purpose, work is done on a daily rainfall basis (1965-2016) with calculations of return periods of 24, 48 and 72 hours; the extreme rainfall events of 72 hours are contrasted with information from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Among the main results obtained, the maximum fluvial precipitation has differences between return period events of 10 years and some events between 50 and 100 years; the first data gives peaks in the coastal plains and Cordillera de Los Andes, while the second one sums parts of the VI region's valleys. The comparisons of extreme events with TRMM show important differences between recorded and estimated amounts, which allow to reaffirm the need for a dense network of rainfall stations. Finally, the analyzes grouped at a communal level show that Coinco, Coltauco, Los Andes, San José, San Vicente and Quilpué have higher extreme rainfall levels, and have a common geographical relief which causes orographic lift.

Keywords: Extreme precipitation, Orographic lift, *Rainfall Measuring Mission*, Return period

## RESUMO

O propósito desta investigação é identificar e analisar a influência que exerce a orografia na distribuição de precipitações, assim como, sua intensidade e frequência na zona central do Chile, especificamente nas regiões de Valparaíso, Metropolitana e O'Higgins. A área é caracterizada por apresentar um relevo marcante e irregular, onde predominam duas cordilheiras (Os Andes e da Costa), além de vales e serras transversais. O relevo influi na pluviometria, fator deflagrador de outros processos, tais como ameaças hidrometeorológicas. Para isto se trabalha sobre uma base de precipitação diária (1965-2011) e se calculam períodos de retorno de 24, 28 e 72 horas; os eventos pluviométricos extremos de 72 horas são contrastados com informação da *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Entre os principais resultados obtido entende-se que a precipitação máxima possui diferenças entre eventos de período de retorno de 10 anos e aqueles de 50 e 100 anos; os primeiros ocorrem máximos nas planícies litorais e Cordilheira dos Andes, enquanto que os segundos somam parte do vale da VI região. As comparações dos eventos extremos com TRMM demonstram diferenças importantes em valores registrados e estimados o qual permite afirmar a necessidade de uma rede mais densa de estações pluviométricas. Por último, as análises agrupadas a nível distrital, mostram que Coinco, Coltauco, Los Andes, San José, San Vicente e Quilpué possuem maior precipitação extrema e que tem em comum um relevo que eleva a umidade e nebulosidade, fortalecendo as frentes e gerando maior precipitação.

**Palavras-chave:** Precipitação Máxima, Barreira Orográfica, *Tropical Rainfall Measuring Mission*, Período de Retorno.

## **CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

Los eventos de precipitación extrema o máxima se caracterizan por su corta duración y gran intensidad, estos elementos determinan que este tipo de fenómeno meteorológico sea una potencial amenaza, ya que, el impacto territorial puede ser variado, además, de ser un factor desencadenante de otros procesos. Por este motivo, conocer cómo estos se distribuyen geográficamente y con distintas intensidades permiten estimar el potencial impacto que puede generar. No obstante, los alcances de esta memoria son de análisis de los componentes atmosféricos, sin contar con mayores datos de cómo estos eventos se pueden dar en la superficie, o más específicamente, como sería el comportamiento dependiendo de otras características locales, incluso en diferente escala. Se estudia una parte de Chile Central, y un punto importante para el área de estudio en cuestión, es que presenta como característica la concentración de precipitaciones en una parte específica del año, y con un importante periodo seco, generando que la zona caracterizada por eventos de precipitación máxima o extrema.

En el contexto mostrado, una relación a la cual se hizo referencia fue, cómo los eventos máximos pueden ser influenciados por la superficie y a modo general, comprender esta relación en la zona de estudio se torna complejo, conociendo el acusado relieve que presenta la geografía local. A partir de la interrogante planteada, esta investigación se funda en un análisis estadístico de datos de precipitación de los mayores eventos diarios (agregados por año) en el periodo 1965-2011, con el fin de revelar como los eventos más potentes se distribuyen en el territorio respecto a intensidad y frecuencia, así, establecer relaciones con el relieve predominante. Por otro lado, se calculan los periodos de retorno y se agregan a nivel comunal, determinando el grado de exposición ante esta amenaza.

## 1.2 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio de esta investigación (Figura N°1), corresponde a una parte de la zona central de Chile, compuesta por las regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins, ubicadas entre las latitudes 32°S-35°S y longitudes 71°O-69 O. Constituye una superficie de 48.186,2 Km<sup>2</sup>, lo que representa un porcentaje pequeño del total nacional. A pesar de la reducida extensión, ahí reside un número importante de la población nacional, lo que genera gran densidad poblacional, mayormente en las regiones Metropolitana y de Valparaíso (Tabla N°1). La Región Metropolitana, además, alberga el 40% del total de habitantes del país. Cabe mencionar que las dos mayores ciudades del país se encuentran situadas en esta área (Santiago y Gran Valparaíso) (Biblioteca Congreso Nacional ,2016).

Tabla N° 1: Información territorial (población y superficie).  
Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas, 2017.

Región	Capital	Superficie regional (Km <sup>2</sup> )	Población regional	Densidad de población (hab/Km <sup>2</sup> )
Valparaíso	Valparaíso	16396,1	1.790.219	109,1
Metropolitana	Santiago	15403,2	7.036.792	456,8
O'Higgins	Rancagua	16387,0	908.545	55,4

Respecto al medio físico, un elemento fundamental es su relieve, el cual se encuentra diferenciado en cuatro unidades; Planicies litorales, Cordillera de la Costa, franja entre cordillera de la Costa y de Los Andes (depresión intermedia), y, la cordillera de Los Andes.

Las planicies litorales, se ubican entre el océano Pacífico al oeste y la cordillera de la Costa al este, esta a su vez, presenta en esta zona altitudes que sobrepasan los 2000 metros (Altos de Cantillana, cerro el Roble), Entre las cordilleras de la Costa y Los Andes se encuentra una faja de relieve que se extiende paralela a ambas, denominada depresión intermedia. El área que concierne a esta investigación cuenta con otras unidades denominada valle transversal, cuales terminan en el cordón de Chacabuco dando paso a la cuenca del río Mapocho. La unidad más oriental es la cordillera de Los Andes, donde se encuentran las mayores cumbres (Ávila, 2012).

Las unidades morfológicas presentes en el área de estudio ejercen una influencia en los procesos atmosféricos, proporcionando particularidades al clima local. Un ejemplo de esto es el efecto barrera producido por las cordilleras, específicamente en la disminución de la influencia del océano (continentalidad) y la sombra pluviométrica. Tal como, hacen referencia Luebert y Pliscoff (2006), esto determina que algunos valles de la zona de estudio presenten el índice de continentalidad más elevado del país.

# Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

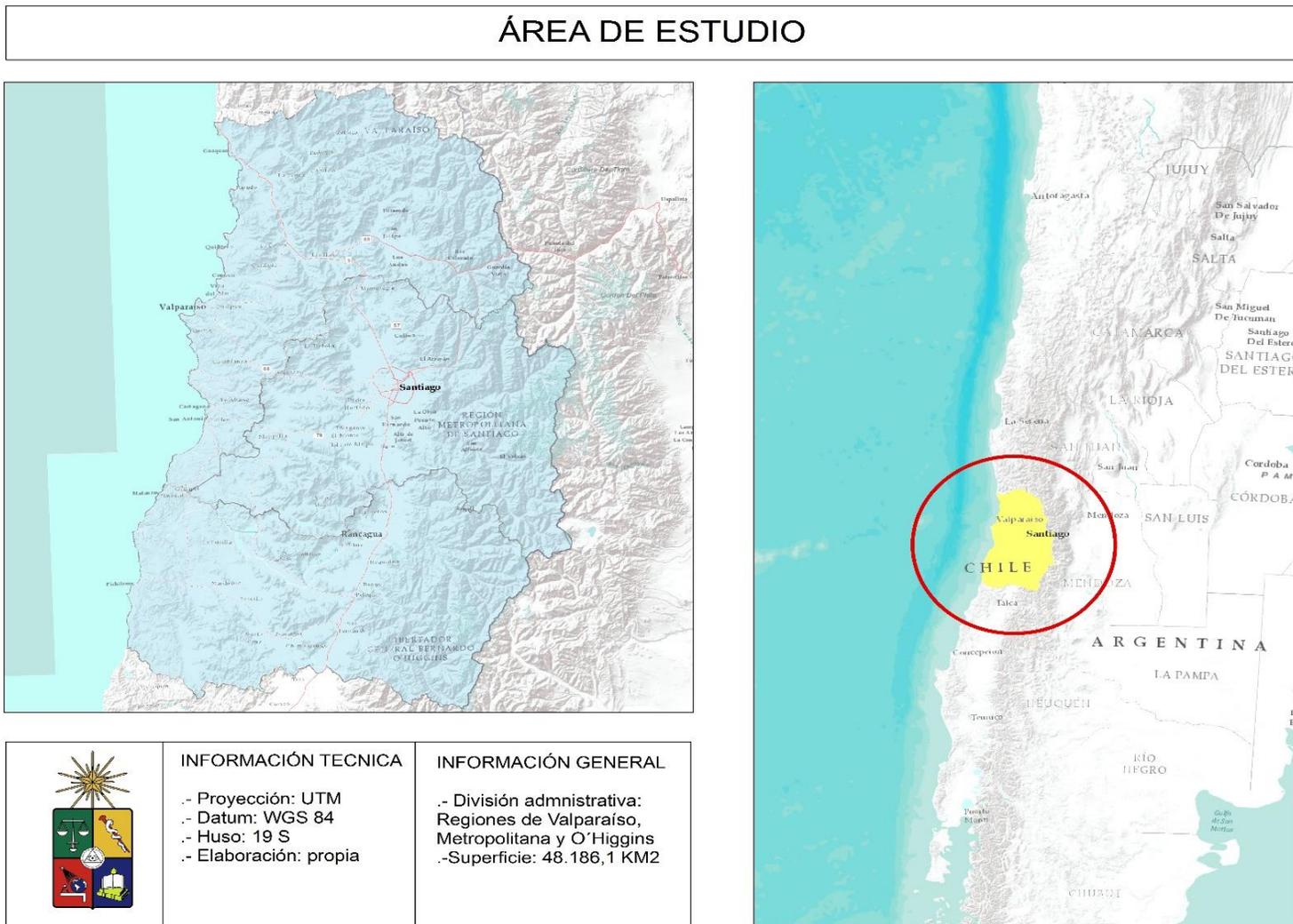


Figura N° 1: Área de estudio.  
Fuente: Elaboración propia.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Respecto a la predominancia sinóptica en la zona, existe una marcada influencia del anticiclón del pacífico suroriental, el cual bloquea a otras condiciones meteorológicas, generando escasas de precipitaciones especialmente en periodo estival. Este anticiclón migra al norte en periodo invernal, dando paso a precipitaciones (Sarricolea, Meseguer y Vide 2014). La predominancia de las condiciones sinópticas mencionadas, modulan las condiciones climáticas locales de carácter mediterráneo con algunas de sus variables como, costero o de altura. No obstante, también se presenta en el área entre los 32°S hasta 33°s (aproximadamente) el clima semiárido, principalmente en los valles, llegando hasta la cuenca del río Aconcagua por el norte. Según lo determinado por Pizarro *et al* (2007), se clasifica estos climas, como, “climas de transición” donde una de sus características importante son las precipitaciones escasas, pero donde episodios de precipitación concentrada se hacen presentes más habitualmente respecto a otras zonas climáticas

### 1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La zona central de Chile, al estar ubicada en latitudes medias se caracteriza por presentar climas de tipo templado, predominando el clima mediterráneo y sus variables isotermales (Sarricolea, Herrera y Meseguer 2017). Más allá de factores latitudinales, es el relieve el que influye con mayor fuerza en la variabilidad climática local. Tal es el caso del clima semiárido que se encuentra en el área norte de la región de Valparaíso y se prolonga hasta algunos valles de la región Metropolitana; junto con estos, la variable altitudinal determina la presencia de climas fríos por efecto de la altura en cordillera principal (Los Andes), más, la predominancia de las dos primeras clasificaciones climáticas es clara, y en ellas resalta un factor común, la marcada estacionalidad, que a su vez deriva en una importante concentración de las precipitaciones -aproximadamente un 80%- durante el periodo invernal (Muñoz, 2009). Esta característica, influye en que eventos pluviométricos extremos se generen en la zona.

El acusado relieve dividido en cuatro unidades morfo estructurales -ya mencionadas anteriormente, a partir de la descripción realizada por Rauld, 2011- tiene injerencia en factores meteorológicos, es así como la precipitación se distribuye inequitativamente en este territorio presentando mayores valores de precipitación acumulada aquellas zonas de mayor altitud y próximas al litoral, en oposición a los valles interiores y sectores situados a barlovento de la cordillera de la Costa.

A partir de lo descrito es posible aseverar que “el efecto del relieve en eventos de precipitación máxima ejerce influencia en su distribución espacial”. No obstante, distintos autores, coinciden en que dicha aseveración es arriesgada, ya que, el análisis horario de las precipitaciones es difícil de llevar a cabo por la escasez de instrumentos que pueden generar resolución (Viale y Garreaud, 2013). Según Garreaud (1997), el relieve disipa o potencian eventos meteorológicos a escala local, dependiendo del origen de la precipitación, además de factores como exposición y altitud. Es preciso mencionar que las características de las precipitaciones en el área de estudio, es esencialmente de origen frontal (en general frentes fríos).

La marcada periodicidad de las lluvias –Como ya se mencionó- aumente la exposición a eventos extremos repitiéndose más de una vez en el año y que según menciona Ávila (2012) algunos eventos han alcanzado el 20% del total anual en la zona, siendo factor gatillante de otros fenómenos que en conjunto se transforman en potenciales amenazas. Tomando en consideración lo planteado, se hace necesario generar investigación al respecto, más, una piedra de tope es la escasa información y bajo número estaciones meteorológicas repartidas por el territorio, lo cual produce trabas en el uso de modelos descriptivos, debido a la imposibilidad de aplicarlos en ausencia datos.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

En el escenario planteado, expandir el análisis a otros métodos se hace necesario, más, cuando dos escalas son consideradas -superficie y atmósfera- así establecer puentes entre elementos como, masas de aire, temperaturas, componentes de una cuenca, ya sea, localización, pendiente, exposición, altitud y vegetación presente (Vinagre y Romero, 1985); comprendiendo como distintos fenómenos influyen en la superficie, así como esta afecta en la atmósfera

Al postular la necesidad de hacer una investigación acabada sobre eventos pluviométricos extremos, en relación al relieve local, más allá, de la pesquisa, sino, apuntando a buscar respuesta, para una zona con tan particulares características, donde confluyen factores ambientales, con una gran concentración de habitantes en un área reducidas, proyectara la comprensión y mejor manejo ante potenciales amenazas derivando en una mejor comprensión del territorio.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

Caracterizar y describir la influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima y como induce variaciones en la intensidad, duración y distribución de estos fenómenos meteorológicos.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Analizar mediante variables estadísticas la distribución e intensidad de eventos de precipitación máxima y conocer el comportamiento de aquellos más intensos respecto a la orografía local.
2. Establecer periodos de retorno para eventos de precipitación máxima en 24, 48 y 72 horas para 10, 50 y 100 años y su distribución en el área de estudio, junto al comportamiento de los últimos eventos más intensos respecto a la orografía.
3. Determinar exposición a eventos de precipitación máxima y potenciales periodos de retorno, asociados al efecto ejercido en dichos fenómenos meteorológicos por la condición orográfica presente en cada municipio del área de estudio.

## **1.5 HIPÓTESIS**

Considerando los efectos termodinámicos que produce el relieve en las masas de aire, debido principalmente al ascenso y descenso de estas, donde en el primer caso propicia las condiciones para intensificar o reactivar un frente y en la contraparte debilita o disipa, es posible inferir, que la orografía local influye en la distribución de un evento de precipitación máxima, intensificado sus efectos y frecuencia en algunos lugares, así como, disminuyendo la intensidad y frecuencia en otros.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

A partir del siguiente análisis bibliográfico, el planteamiento teórico de esta investigación fue agrupado en cuatro pilares, esto debido a la necesidad abarcar un enfoque amplio que permita exponer, elementos atmosféricos, disciplinas a fines, análisis de datos y potenciales efectos territoriales, es así como, la estructura general se ordena de la siguiente forma: Sistema climático, elementos estadísticos aplicados a la climatología, Topoclimatología, y Amenaza Hidrometeorológicas.

Cabe destacar que en específico cada pilar se desenvuelve en subtemas, de este modo la información va desde lo general a lo particular, entregando enfoques y desarrollando la información de manera lógica, concatenando cada concepto en su contexto.

### **2.1 SISTEMA CLIMÁTICO**

Definir el sistema climático conlleva entender que este es una consecuencia de la unión de cinco elementos, el principal, la atmósfera, la cual interactúa con; cuerpos de agua, (mayormente océanos), capas de hielo (Criósfera), organismos vivos (Biosfera), y la superficie terrestre (Geósfera); la interconexión entre ellos genera movimiento de flujos energía y materia, su acción conjunta deriva en un sistema complejo (Departamento de Ciencias de la Atmósfera, U de Buenos Aires, 2004).

Un sistema -habitualmente- se encuentra en equilibrio, y, está compuesto por elementos de importancia, inputs (entrada), flujo (traspaso de energía o materia) y outputs (salida) o efectos, para el caso del sistema climático en los inputs encontramos energía radiante (sol), factores astronómicos (rotación, movimiento orbital), océanos, topografía terrestre, composición de la atmósfera; respecto a los flujos, estos se componen por los movimientos de masas de aire y distribución del calor. Finalmente, los outputs corresponden a la manifestación de los climas terrestres. (Pérez, 2010)

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

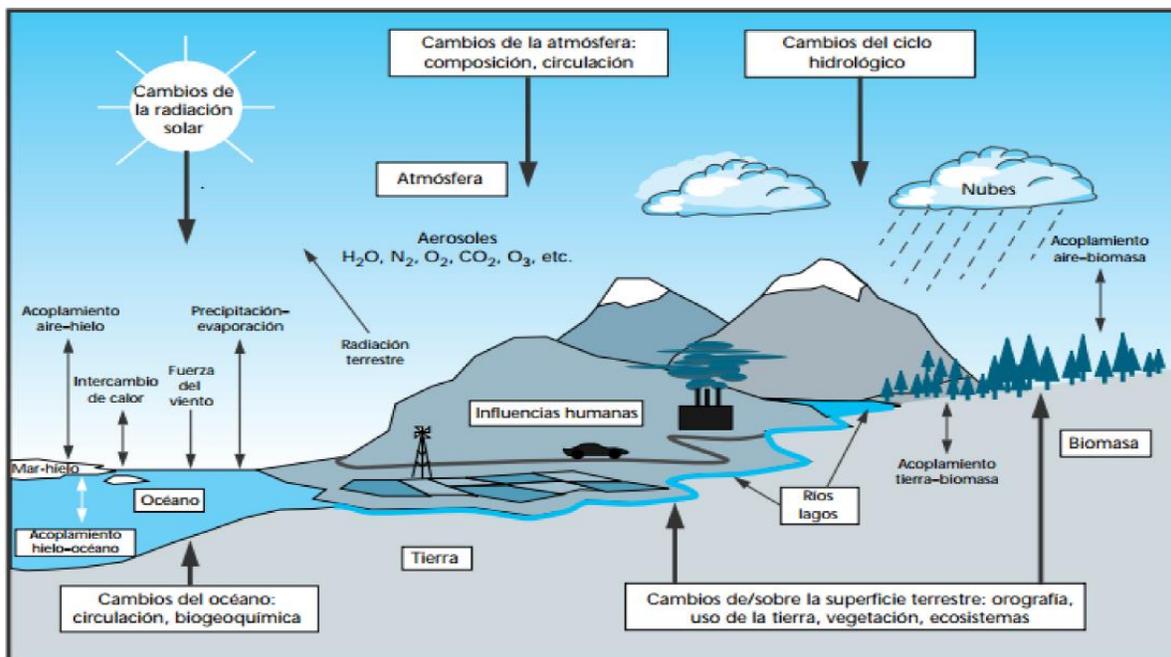


Figura N° 2: Componentes del sistema climático, interacciones y procesos en cuanto a cambios climáticos.

Fuente: Introducción a los modelos climáticos simples, segundo informe de evaluación IPCC (1997), en Figueroa, (2014)

### 2.1.1 Circulación de la atmósfera

La circulación de la atmósfera destaca en importancia por ser el mecanismo en que los vientos se distribuyen por el planeta, y, en consecuencia, las precipitaciones, este proceso deriva del “efecto invernadero” que a su vez se relaciona con el ingreso de radiación y la posterior devolución de esta -mediante la interacción de aerosoles y la superficie- fuera de la atmósfera, la circulación distribuye el calor que ingresa (principalmente en la zona ecuatorial) generando un equilibrio térmico (Thomson y Wallace, 2000)

Como se ha hecho referencia, la circulación de la atmósfera, tanto como del océano, distribuye la energía desde latitudes tropicales (menores) hasta latitudes altas, manteniendo equilibrio térmico, el transporte producido por las diferencias térmicas generan “celdas”, que para el movimiento de masas de aire, desde el ecuador hacia latitudes medias (30°S) son nombradas como “celda de Hadley”. Además, en latitudes medias se hacen presentes corrientes en chorro (flujos de aire que circulan a gran altura) las cuales tienden a ser fácilmente perturbadas amplificándose y generando vaguadas o dorsales que potencialmente pueden ser generadoras de sistemas frontales (ciclogénesis), este proceso es denominado ciclo de Rossby, determinando el transporte de calor de latitudes medias a altas, mantenido el ciclo de circulación de calor de la atmósfera, (Garreaud, 2005)

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

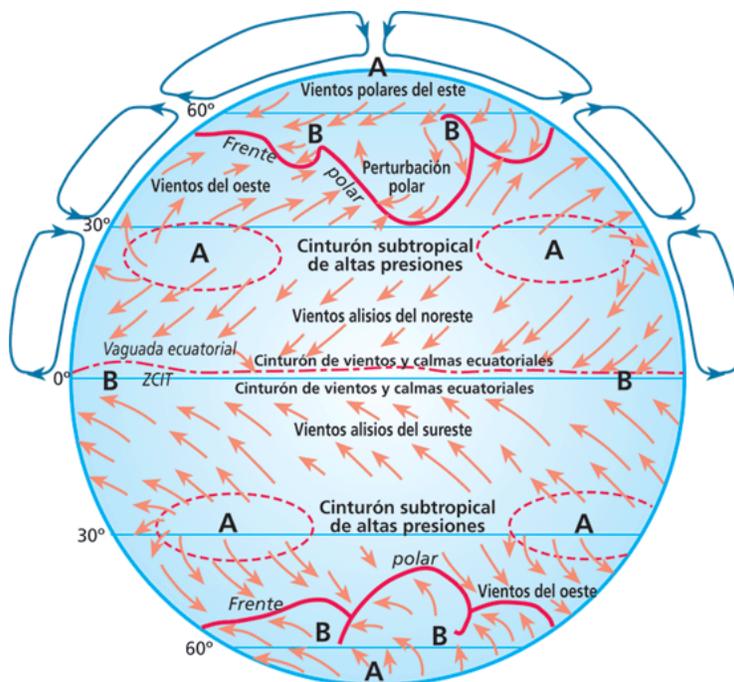


Figura N° 3: Esquema de la dinámica atmosférica, circulación de la atmósfera

Fuente: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. J. Thomson *et al* (2000)

### 2.1.2 Precipitaciones

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), clasifica las precipitaciones como: cualquier hidrometeoro proveniente de la atmósfera y tiene contacto con la superficie, puede ser sólida (ejemplo la nieve) o líquida (como lluvia), (OMM, 2016). Es importante destacar que esta organización también entrega una definición respecto a la lluvia cataloga como: Precipitación líquida cuyo diámetro es superior a 0.5 centímetros (OMM, 2016).

Otra clasificación hace referencia a la formación de nubosidad y manera de precipitarse hacia la superficie; es así, como se encuentran precipitaciones de tipo, orográfica, convectiva y ciclónicas. Las primeras, se asocian a masas de aire ascendentes en zonas montañosas, este efecto derivado de las características geográficas presentes, ya que, el relieve induce a la humedad a ascender, condensándose obteniendo posteriormente lluvia. Otro tipo, es la convectiva, caracterizado por su corta duración, pero gran intensidad, son producidas por radiación solar que genera evaporación; al ascender, el aire se condensa formando nubes con gran desarrollo vertical y por consiguiente precipitación.

Una última clasificación hace referencia a la condición ciclónica de algunos eventos, asociados a masas de aire de diferente temperatura y porcentaje de humedad, al interactuar estos elementos, provocan periodos más largos de precipitaciones – este tipo, es común en latitudes medias, (Pizarro *et al*, 2007).

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Respecto a la distribución de precipitaciones (Tomando en cuenta las características presentes en el territorio Chileno), estas varía de norte a sur, aumentando a medida que crece la latitud (Aravena, 2006), aún más, su uniformidad durante el año también varía y en algunas zonas, tales como las con características áridas y semiáridas, su concentración varía de ausencia casi total a un periodo húmedo marcado, determinando el carácter torrencial de eventos de precipitación (Chow et al, en Aravena 2006).

### **2.1.2.1 Precipitación máxima**

Para generar una descripción de “precipitación máxima” es preciso considerar diferentes autores, ya que no hay una única aproximación al concepto, además, en la mayor parte de los casos, la literatura denomina a la precipitación máxima como “evento de precipitación extrema”, de este modo, algunos autores determinan que un evento extremo acontece cuando el 20% del total anual de precipitaciones cae en un día (Carvalho en Elmes, 2016), otra definición atribuye el concepto de precipitación extrema a un evento donde el 16% del total anual caen en un día. Es importante detallar que, si bien existe más de una definición, todas coinciden en la superación de un umbral propio para cada zona y además explicitan la necesidad de caracterizar las precipitaciones como una variable meteorológica con alta variabilidad y oscilación en un periodo de tiempo (Elmes, 2016)

### **2.1.2.2 Año hidrológico**

Si bien no existe una única definición, más bien, esta es potencialmente complementarle desde distintas disciplinas científicas que estudian fenómenos hidrológicos, La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), perteneciente al ministerio de obras públicas se refiere a este término como; aquel periodo comprendido entre estación lluviosa y el estiaje, (nivel de caudal mínimo alcanzado por un curso de agua superficial) (DOH, 2015). A diferencia de la primera definición, la agencia estatal de meteorología de España (AEMET) determina que término “año hidrológico” es referido al periodo de doce meses donde está comprendido un ciclo hidrológico completo comenzando en el mes donde los valores pluviométricos son más bajos. (AEMET, 2015). Finalmente, de ambas descripciones se puede obtener que, el término se refiere al periodo comprendido entre acumulación de precipitaciones extremas (más lluvioso y más seco), en periodo de doce meses.

### **2.1.2.3 Precipitación acumulada**

Existe diferencia entre fuentes, ya que, algunos autores definen este concepto como la sumatoria de precipitaciones acumuladas desde el mes que da inicio al periodo con mayor concentración pluviométrica. En relación al año hidrológico contraponiéndose con la definición que entrega la Dirección meteorológica de Chile, porque si bien concuerda en que “precipitación acumulada” es la sumatoria de precipitaciones, no mencionan nexo con “año hidrológico”, sino que es respecto al año terrestre (DMC, 2016).

### **2.1.3 Sistema frontal**

La atmósfera adquiere características termodinámicas de las zonas donde se encuentra posada, principalmente humedad y temperatura, estas peculiaridades son diferentes en otros lugares contiguos, a partir de esto, surgen las masas de aire con diferente densidad, la cual influye en su desplazamiento. Respecto a las áreas de origen, priman aquellas sobre continentes y océanos; las superficies de contacto entre dos masas de aire con diferentes características y densidad corresponden a sistemas frontales, que se expresan en gran nubosidad y/o precipitaciones. (DMC, 2016)

Respecto a la extensión de los frentes, es posible determinar que su longitud abarca aproximadamente desde los 500 kilómetros hasta los 5000 kilómetros, y una altitud que puede variar entre los tres y veinte kilómetros de desarrollo vertical. (Vargas y Cartes, 2010). Las masas de aire con diferentes características (humedad, temperatura, densidad) avanzan con velocidad desigual, empujándose unas a otras, habitualmente, la masa de aire más frío tiende a ser desplazadas por el de menor temperatura, (DMC, 2016), es por este motivo que se clasifican las masas de aire en distintos tipos e frente según sus características

#### **A) Frente frío**

Producto del empuje del aire frío que desplaza al aire caliente en superficie debido a la menor densidad del último, la masa fría obliga a la cálida a ascender generando gran desarrollo nuboso vertical, creando un frente. Se representan mediante líneas azules continuas (Vargas y Cartes 2010).

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

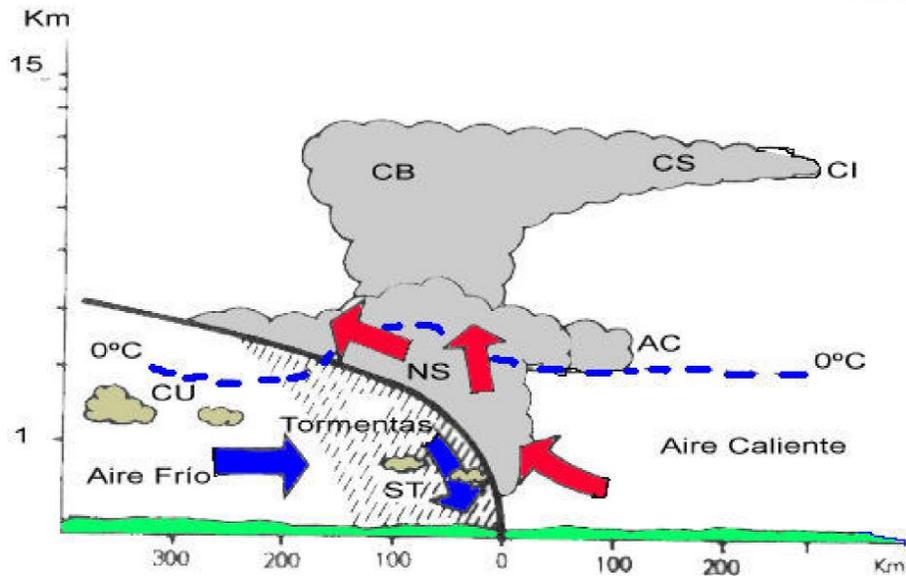


Figura N° 4: Frente frío y nubosidad asociada  
Fuente: Masas de aire y frentes, Bidegain (2010)

B) Frente cálido

El aire cálido alcanza al aire frío avanzando sobre él, dado que la masa fría es más densa, esta queda abajo, mientras que el aire cálido asciende por la superficie frontal (figura 5); si bien la masa fría se retira, no es removida totalmente, en general las precipitaciones asociadas son más suaves contratadas con los frentes fríos (Bidegain, 2010)

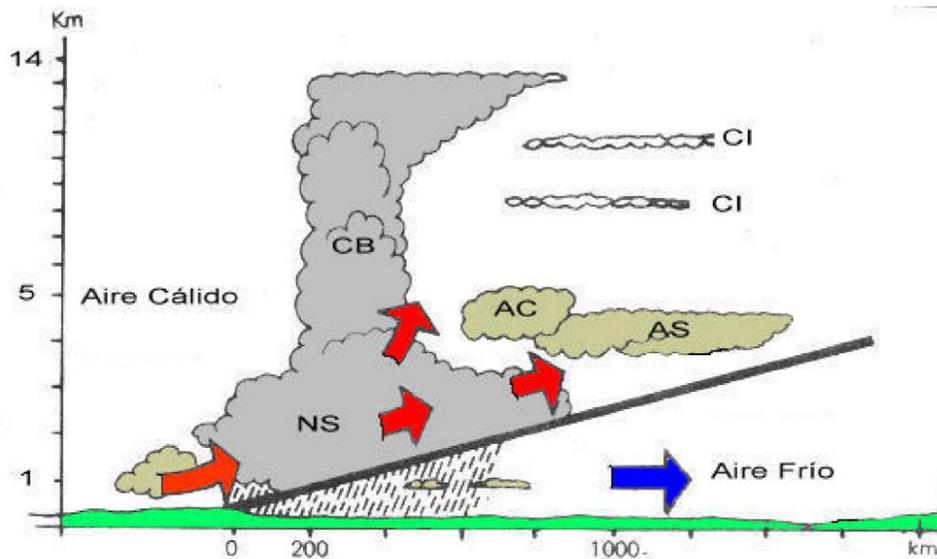


Figura N° 5: Frente cálido y nubosidad asociada  
Fuente: Masas de aire y frentes, Bidegain (2010)

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

### C) Frente ocluido

Tras una masa de aire frío, se hace presente otra de características más frías, debido a que una de sus particularidades es que se desplazan más rápidamente que las masas de aire cálido, estas se interceptan moviendo de la superficie al aire caliente renegándolo a zonas altas; esta masa de aire frío pueden ser lo suficientemente diferente entre ellas como para generar un nuevo frente, denominada oclusión o frente ocluido, (DMC, 2016), una oclusión puede tener características de frente frío o de frente cálido.

C1) Oclusión del tipo frente frío: una masa de aire frío que adelanto anteriormente a una cálida es alcanzada por aire con menor temperatura aún, al producir este contacto la más fría eleva generando una cuña. También se denomina como frente cálido en altura (DMC, 2016)

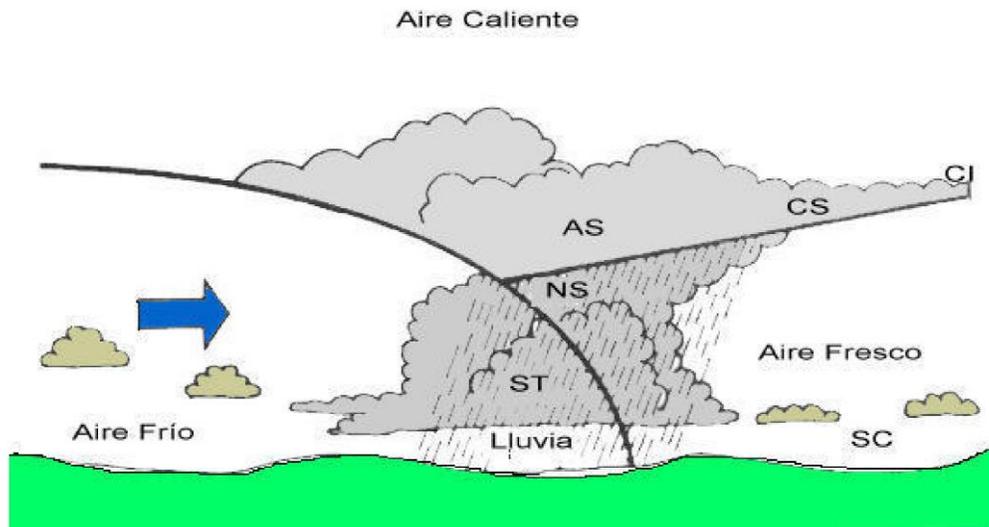


Figura N° 6: Frente ocluido tipo frente frío  
Fuente: Masas de aire y frentes, Bidegain (2010)

C2) Oclusión del tipo frente cálido: Proceso que ocurre cuando un frente cálido es alcanzado por una masa de aire fría que posee temperaturas mayores a la masa de aire fría presente, en este caso el aire menos frío trepa por aquella de menor temperatura, generando zonas de nubosidad y precipitaciones más extendida (Vargas y Cartes, 2010). (Figura N°7)

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

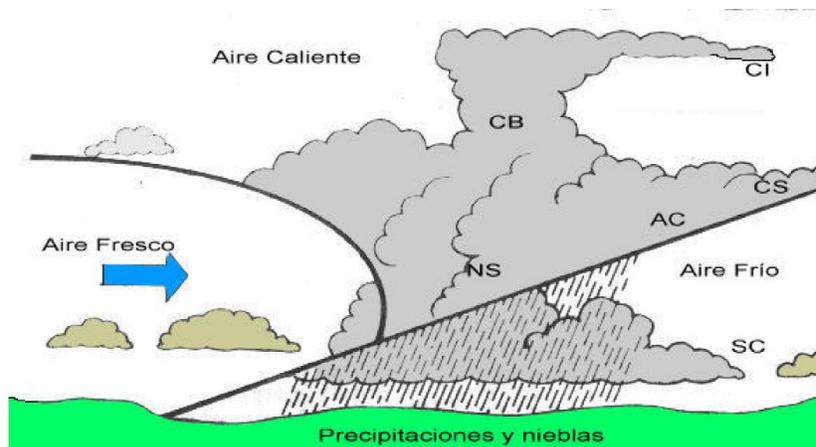


Figura N° 7: Frente ocluido tipo frente cálido  
Fuente: Masas de aire y frentes, Bidegain (2010)

### 2.1.4 Ciclogénesis

Definido como el desarrollo de circulación ciclónica donde antes no había (nacimiento de una zona de baja presión), que, además, apunta a la intensificación de un flujo ya existente (Caruso y Businger, 2006). La ciclogénesis se produce junto a la disminución en la presión atmosférica, lo que finalmente permite resumir este término como el inicio o intensificación de la circulación ciclónica (National snow and data center, 2015)

#### 2.1.4.1 Vientos del Oeste

El término viento hace referencia a movimientos horizontales del aire a diferentes escalas y altitudes, para el caso de los vientos alisios su circulación está supeditada a niveles bajos de la troposfera, en latitudes bajas; respecto a los vientos del oeste o *westerlies*, es posible notar su presencia en niveles medios - altos de la troposfera (Chandrasekar A, 2010), Los *westerlies* son vientos que fluyen desde altas presiones subtropicales hacia los polos, predominando entre los 35° y 65° latitud sur, respecto a los vientos alisios su fuerza es menor, pero en latitudes medias influyen en el desarrollo de tormentas. Otra denominación recibida por los *westerlies* es banda circumpolar de sistemas migratorios del oeste. (Wallace y Hobbs, 2010)

#### 2.1.4.2 Vaguada Circumpolar

Centro de bajas presiones que circunda el continente antártico, ubicado aproximadamente a 65° S (Figura N°8) (Hill, Haywood, Valdes, Francis, Lunt, Wade, 2013). Genera fuerte influencia en los vientos del oeste, sobre todo en el periodo invernal, aportando al desarrollo de frentes que afectan a Chile continental Tal como explicita Garreaud (1994), las precipitaciones invernales en Chile central están generalmente relacionadas al paso de perturbaciones extra tropicales que tienen origen en el frente polar (vaguada circumpolar) (Garreaud, 1994)

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

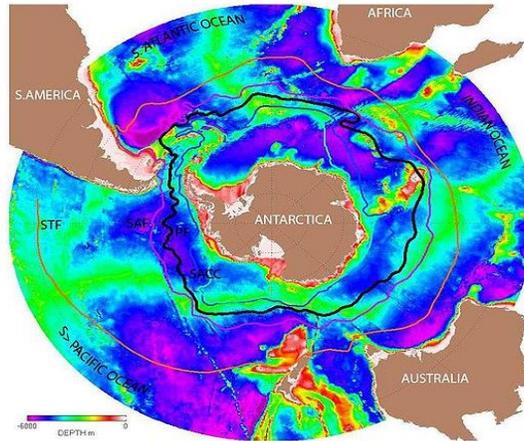


Figura N° 8: Vaguada circumpolar Antártica

Fuente: Paleogeographic control on the onset of the antarctic circumpolar current, Paleogeographic control on the onset of the antarctic circumpolar current. Hill *et al* (2013)

### 2.1.5 Bajas segregadas

Depresión segregada o *cutoff lows*, es un fenómeno meteorológico que presta relación a la interacción entre la vaguada polar y los vientos del oeste. Su mecanismo de generación se debe a la influencia de los westerlies en la circulación, estos “extienden” el área de dominio del frente polar, extrayendo baja presión que se traslada a latitudes más meridionales (llegando hasta los 20° aproximadamente), estas áreas de baja presión potencialmente pueden desencadenar ciclogénesis, por consiguiente tormentas. Entre sus particularidades destaca la carencia de bajas presiones en superficie y su rápido flujo, comúnmente este fenómeno (para el caso de Chile), se hace presente entre los 20° S y 55° S, la mayor densidad de eventos radica en los 38°S (Fuenzalida, Sánchez y Garreaud, 2005)

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

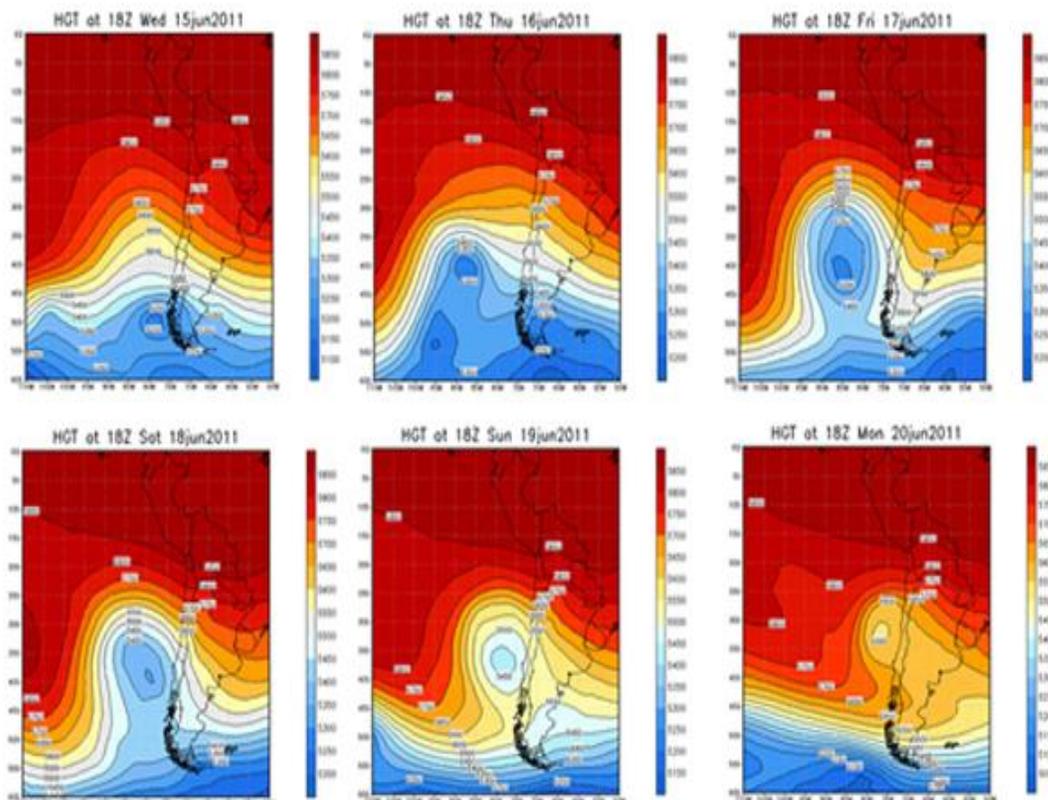


Figura 2. Evolución de la DANA entre el 15 y el 20 de junio de 2011. Fuente: NCEP de la NOAA.

Figura N° 9: Desarrollo de baja segregada (*cut-off low*) evento ocurrido entre el 17 y 20 de junio de 2011  
Fuente: Génesis de una <DANA>, entre el 17 y el 20 de junio de 2011, Sarricolea (2011)

### 2.1.7 Clima de Chile -Zona central-

El territorio que abarca Chile continental se caracteriza por su amplia extensión latitudinal que va desde los 17°S hasta 56°S, esto determina una gran variedad climática y fuertes contrastes entre regiones. Además, a pesar de poseer un desarrollo longitudinal acotado este es marcado por fuertes contrastes en el relieve, el cual va desde planicies costeras hasta cumbres que bordean los 6000 m.s.n.m. ambos factores mencionados generan una diversificación de climas. Sin embargo, no son los únicos elementos que determinan las características climáticas del territorio nacional, a escala sinóptica, los centros de acción atmosféricos influyen patrones de circulación en superficie generadores de diferentes condiciones según sea sus características, estos “centros” corresponden principalmente a; “anticiclón del pacífico suroriental (APSO) y el cinturón de vientos del oeste o bajas presiones subpolares (CBPP), el primero (APSO), predomina una parte importante del año en la zona centro-norte propiciando estabilidad climática y bajos niveles de precipitación, por su parte la CBPP para la zona en estudio genera un aumento de la precipitación en periodo invernal, esto se debe a variaciones estacionales, donde el APSO alcanza hasta los 35° S aproximadamente en periodo estival y se repliega hasta los 30° en otoño-invierno, posibilitando el paso de sistemas frontales (Sarricolea *et al*,2014).

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Respecto a la distribución sinóptica diaria y con base en la clasificación de Jenkinson y Collison, a partir de Lamb, se obtiene que los tipos anticiclónicos, advectivo del sur, advectivo del suroeste y anticiclón del sur, priman en la zona central, el primero en ser mencionado (anticiclónico) predomina por sobre los otros, abarcando la mayor cantidad de días durante el año, esto principalmente a la marcada influencia del anticiclón del pacífico suroriental (Sarricolea, *et al*, 2014)

La predominancia de condiciones sinópticas en una zona permite clasificar el clima de ese lugar, sopesando temperatura media y precipitación, ambas matizadas con información bioclimática y componente altitudinal tal como describe Köppen-Geiger en su clasificación climática, la cual es considerada actualmente y renovada por diferentes investigadores, llevado al caso de Chile, la última actualización fue realizada por Sarricolea *et al* (2017). A partir de lo antes mencionado, la zona central es encasillada en el primer orden de la clasificación, denominándola como “Macrorregión zona central” la cual abarca desde los 32°30’S (cuenca Río Aconcagua) hasta los 39°32’S (lago Calafquen), en ella predominan los climas templados especialmente los mediterráneos (Csb y Csc) además de sus variables isotermales como el mediterráneo de altura (Csb (h), junto con este otro de cuarto orden como Csb (i)). Para el área de estudio, aquella parte de la región de Valparaíso al norte de la cuenca del Río Aconcagua, hay presencia de climas semiáridos (Bsk) cuya peculiaridad es la proyección hacia la cuenca del Río Maipo específicamente en la parte norte de la misma. También hay presencia de clima de tundra (ET) restringido a la cordillera de Los Andes (Sarricolea, Herrera, Meseguer, 2017)

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

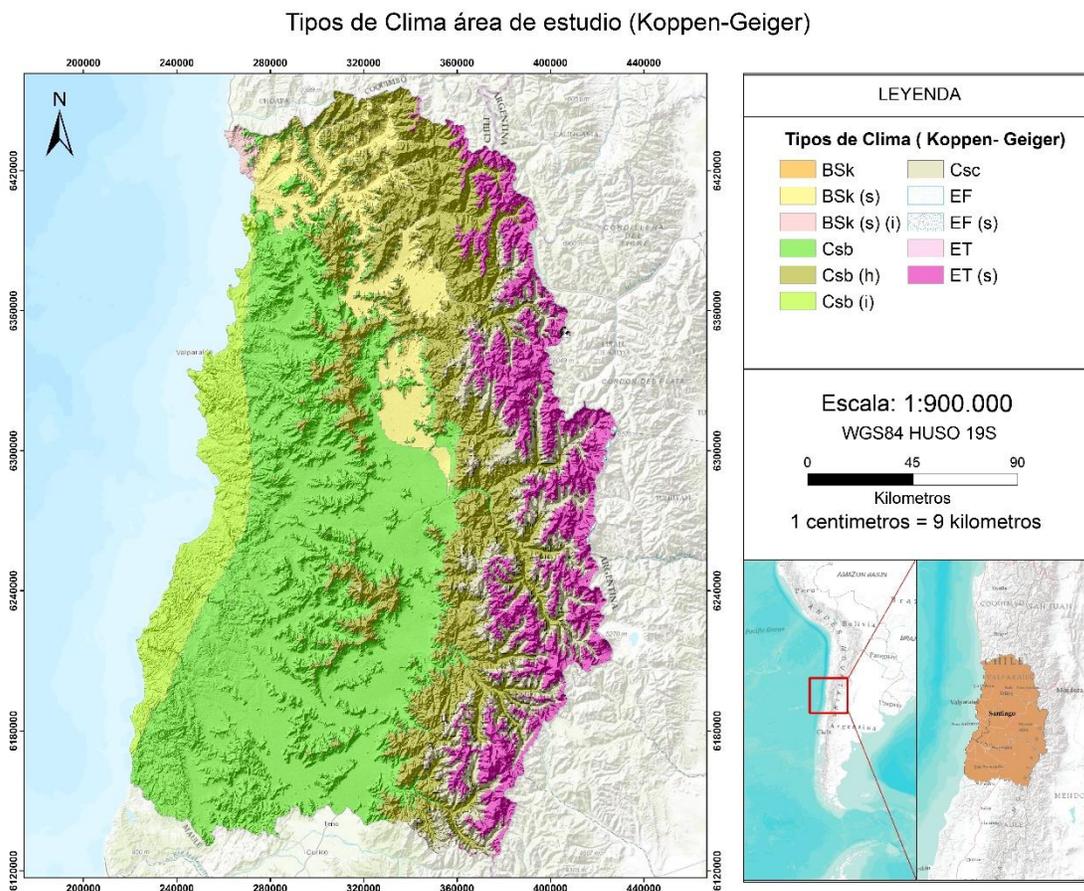


Figura N° 10: Clasificación climática de Köppen-Geiger actualizada por Sarricolea et al. (2017), Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'higgins,  
Fuente: Sarricolea et al. (2017)

### 2.1.8 Comportamiento de las precipitaciones en la zona central de Chile

Para definir esta relación es importante determinar que las precipitaciones en esta zona están influenciadas por otros procesos de carácter global, uno de ellos es la oscilación del sur, o ENSO, la cual según sea su fase (fría o cálida) tendrá efectos potencialmente significativos de aumento o ausencia de precipitaciones. Su influencia está relacionada con la estacionalidad y otros fenómenos de mayor escala, tal como la oscilación antártica AAO, la cual determina la variabilidad de la circulación en la troposfera en latitudes medias (Figuroa, 2014). Otros factores que poseen una influencia directa, pero a la vez dependen de los ya nombrados, son los vientos del oeste, el anticiclón subtropical del pacífico sur y el frente polar, ya que, los vientos del oeste influyen en el transporte y ciclogénesis de sistemas frontales provenientes de la vaguada circumpolar. Los bloqueos que ejerce el anticiclón del pacífico induce el efecto inverso a la ciclogénesis atenuando sistemas frontales, por ende, es importante destacar el efecto regional de estos sistemas climáticos que afectan el desarrollo de precipitaciones en la zona comprendida entre los 32° y 37° latitud sur (Garreaud, 1994)

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

De las características más relevantes respecto a las precipitaciones en el área en cuestión, es la predominancia de ellas en el periodo invernal, disminuyendo drásticamente en periodo estival, el 80% de las precipitaciones son acumuladas en invierno. Factores como la altitud y la sombra pluviométrica ejercida por la cordillera de la Costa a los valles interiores, entregan fluctuaciones pluviométricas locales, donde la acumulación y frecuencia de eventos de precipitación máxima priman (Garreaud, 1994)

### 2.1.9 Influencia del relieve en las precipitaciones

La variabilidad de las precipitaciones a nivel regional se encuentra determinada por diferentes factores en distintas escalas, a nivel atmosférico se encuentra la periodicidad y tipo de perturbación que genera eventos pluviométricos, así como, en superficie los factores geográficos infieren en la intensidad y distribución de las precipitaciones (Ávila, 2012). Desde la génesis de los eventos pluviométricos, el relieve da origen a un tipo de precipitación, es el caso de la “precipitación orográfica” (figura N°11) donde las barreras montañosas producen el ascenso de masas de aire que finalmente al saturarse precipitan (Mauro, 2002).

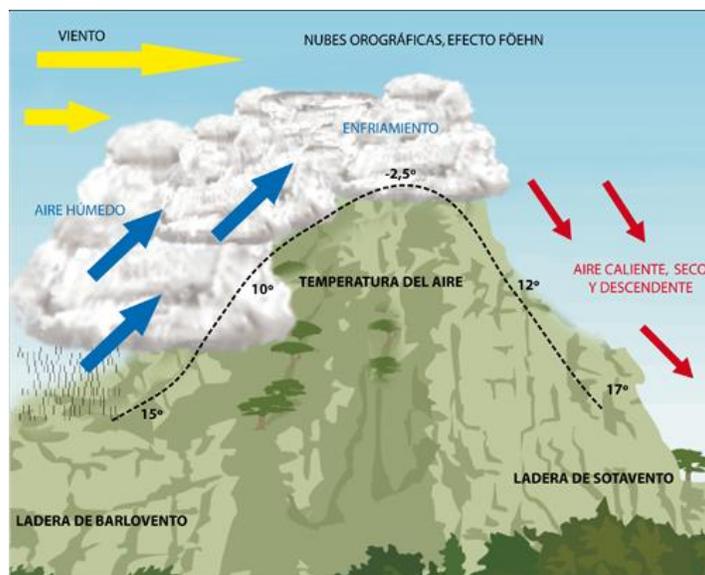


Figura N° 11: Precipitación orografía, efecto Föhn

Fuente: Balance hídrico superficial cuenca del Río Chicama, SENAMHI, (2013)

Hufty, 1984 en Ávila, 2012, relaciona específicamente los tipos de frente con la influencia ejercida por la geografía, determinando que frentes cálidos se despliegan con regularidad y aumentan con la altitud, no así los chubascos o precipitaciones asociadas a tormentas, cuya distribución en el territorio es aleatoria. (Hufty, 1984, en Ávila, 2012)

### 2.1.10 Efecto de la cordillera de los Andes en la precipitación

El sistema frontal, fenómeno natural en las latitudes medias, puede ser fuertemente perturbado cuando encuentran en su camino cordilleras, más, el efecto que el relieve tiene sobre los fenómenos meteorológicos, dependerá de la geometría (altura y envergadura) como también de las condiciones ambientales, en este sentido, Viales y Garreaud (2013) son concluyentes al determinar que para el caso de la cordillera de Los Andes, las precipitaciones provenientes de frentes son influenciadas por la misma, pero también esto va relacionado con la latitud, ya que en zonas al sur de los 35°S, la nubosidad se comporta de manera diferente que en el área de Los Andes subtropicales, más específicamente entre los 30° y 35°S, ya que se estima que desde el momento que la inestabilidad frontal arriba a la costa y se desplaza por el territorio hasta chocar con la cordillera, hay un aumento de la frecuencia de precipitaciones que va desde el 4% al 10%, los autores mencionados concluyen que asociado al avance de la banda nubosa de un frente, existe una disminución del grosor de la misma, debido al proceso adiabático de enfriamiento por ascenso. Respecto a la frecuencia de eventos de precipitación según plantea Viale *et al* no es diferente entre zonas “bajas” y “altas” pero en una escala subdiaria, la acumulación de precipitaciones es mayor en zonas de ascenso, por ende, en laderas la intensidad de precipitación es más marcada que en las altas cumbres. (Viale y Garreaud, 2013)

Otro elemento a destacar es la influencia de Los Andes en las precipitaciones de verano; a pesar del bajo porcentaje que aportan al acumulado anual (cerca del 10%) en la zona central, sus características cálidas generan riesgo debido a la ocurrencia de precipitación líquida en alta montaña donde sus suelos habitualmente reciben solo precipitación sólida; (figura N°12) el rol de la cordillera de Los Andes en este caso está relacionado con el origen de los eventos pluviométricos, ya que para esta época, en la cordillera se hacen presentes principalmente las precipitaciones de origen orográfico, debido a bajas presiones debilitadas trasladadas por vientos del oeste que son forjadas a ascender por la cordillera, activándose y produciendo precipitaciones, (Viale y Garreaud, 2013).

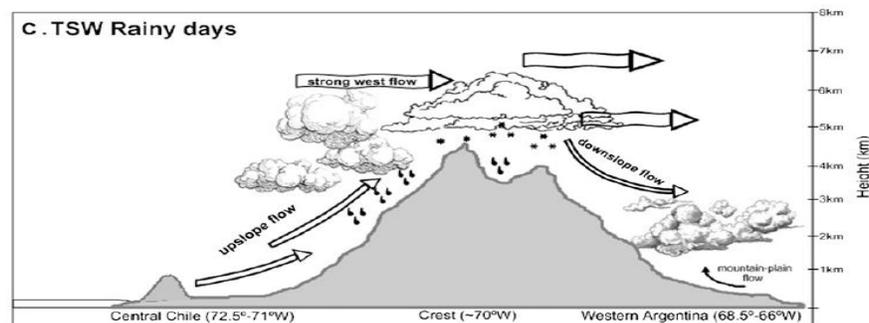


Figura N° 12: Días lluviosos asociados a precipitación orográfica en época estival

Fuente: Sumer precipitation events over the western slope of the subtropical Andes, Garreaud et al (2013)

### **2.1.11 Efecto de la cordillera de la Costa en la precipitación**

La cordillera de la Costa ejerce una fuerte influencia como barrera entre el océano y valles interiores, este grupo de montañas al contar con cumbres que se empinan hasta los dos mil metros de altitud en algunas zonas, atenúan el paso de nubosidad baja proveniente del litoral, produciendo “sombra pluviométrica”, esto produce disminución de la cantidad de precipitaciones en laderas orientales de la cordillera de la Costa.

La distribución de las precipitaciones en el territorio se encuentra supeditada a la influencia ejercida por la cordillera principal, tanto como la cordillera de la Costa, estas producen un reparto desigual de la precipitación, determinando características climáticas diferentes a un lado y otro de la cordillera dependiendo de la exposición (Viale y Garreaud, 2013)

## 2.2 ELEMENTOS ESTADÍSTICOS APLICADOS A LA CLIMATOLOGÍA

La descripción de procesos y fenómenos climáticos permiten inferir sobre dos variables que son componentes de este, variable espacial (regiones, zonas) como elementos temporales (interanual), a partir de esto, surge la incertidumbre, no obstante, desde la estadística es posible generar un diagnóstico y un pronóstico, que finalmente permite, describir datos, cuantificar y realizar predicciones. Para el caso particular del análisis de eventos extremos aparecen herramientas estadísticas como; análisis multivariante, estimaciones paramétricas, exploración de datos o series temporales, que finalmente permiten entregar una visión de escenarios climáticos futuros, infiriendo en potencial intensidad y frecuencia.

### 2.2.1 Muestra espacial

Para la Geografía, el análisis de variables en muchos casos no posee solo una característica. varía según la parte del territorio donde se exprese, esto genera un problema respecto a la escala, porque mientras mayor sea el territorio abarcado, la tendencia a error también puede aumentar, en este sentido, la muestra espacial intenta dar una descripción menor buscando precisión habitualmente es acompañado por material cartográfico que delimita y proporciona la información espacial necesaria. Por este motivo el muestreo espacial se vale de los muestreos sistemáticos y aleatorios, debido a que la información también puede ser presentada de manera ordenada y definida (sistemática) o sin seguir puntos específicos y repartidos de forma “desordenada” en el territorio (aleatoria). La decisión del método a utilizar se relaciona directamente con el objetivo a identificar; si las características son generales, abarcando una extensión mayor, es preciso utilizar muestra aleatoria, caso inverso se inclina por un método que utilice muestras sistemáticas. (Edbon, 1982)

### 2.2.2 Distribución estadística de Gumbel Max

La distribución de Gumbel Max (también denominada como distribución de valores extremos tipo 1 de Fisher y Tippett) es un modelo estadístico de asimetría constante igual a 1,139547, y su función de distribución de probabilidades es la siguiente.

$$P = (X \leq x) = e^{-e^{-\frac{(x-b)}{a}}}$$

Determinada para  $-\infty < x < \infty$ , donde (a) es un parámetro de escala (desviación típica) y (b) representa la media de la distribución (Ávila, 2012)

### **2.2.3 Probabilidad de excedencia**

Como explican Pizarro y Novoa (1986) en Cereceda (2008), “probabilidad de excedencia” es la probabilidad que un evento extremo sea igualado o superado en un periodo cronológico acotado a uno o más años, ósea, la probabilidad vinculada al periodo de retorno, más, este término puede también ser definido como la probabilidad de un valor de la variable aleatoria sea sobrepasado (Viessman et al, 2003 en Cereceda, 2008)

### **2.2.4 Periodo de retorno**

Para realizar análisis de frecuencia o inferencias de elementos climáticos, son utilizados modelos estadísticos que determinan valores máximos, habitualmente los más usados son Gumbel y Weibull, tal es el caso del cálculo de “periodo de retorno”, el cual corresponde a la frecuencia con la que se presenta un evento o bien el lapso temporal en que este será excedido (Elmes, 2016).

### **2.2.5 Test de Kolmogorov – Smirnov**

Prueba que determina el punto de mayor divergencia entre frecuencias (observada acumulada y observada teórica). Esta prueba no paramétrica mide la desviación de la distribución en el punto máximo: no obstante, para obtener la frecuencia observada acumulada y observada teórica, se debe acudir a la probabilidad de excedencia, para el caso de la frecuencia observada acumulada, se acude al modelo de Weibull. Para el caso de la frecuencia observada teórica se aplica el modelo de Gumbel. (Pizarro *et al*, 2007)

### **2.2.6 Chi-cuadrado**

Distribución de probabilidad continua que permite (entre otras funciones) realizar prueba de bondad de ajuste y estimación de varianza. Chi-cuadrado corresponde a una distribución de probabilidad continua cuyo componente  $K$  representa el grado de libertad de variables aleatorias (Edbon, 1982)

### **2.2.7 Prueba de Anderson-Darling**

Prueba estadística que determina el origen de una distribución específica, permite conocer si los datos son extraídos de una distribución de probabilidad, esta asume que no hay parámetros a determinar en el conjunto en prueba, considerando que el número de valores extremos siguen una distribución libre (Edbon, 1982)

## **2.3 TOPOCLIMATOLOGÍA**

La topoclimatología hace referencia a los nexos existentes entre la topografía y la climatología inherente a una zona en una escala local, a su vez otros factores geográficos influyen en la climatología, de estos se destacan la exposición, pendiente, latitud, longitud, distancia a cuerpos de agua, influencia de estos (continentalidad) y altitud. Junto con ellos, otros elementos también terminan por aportar características peculiares, determinando contrastes espaciales como son el suelo, evapotranspiración, vegetación temperatura y humedad del aire (Neira, 2010)

### **2.3.1 Factores topoclimáticos**

Las particularidades que posee un lugar están establecidas por los elementos topoclimáticos presentes en esa zona, determinando, por tanto, diferencias topo climáticas respecto a otras áreas, entre esos factores es posible encontrar. Altitud, geo formas (valles, pendientes de ladera, etc.), cuerpos de agua (ríos, lagos, embalses), propiedades físicas del suelo, orientación (exposición) cobertura vegetal. Las interacciones entre estos factores mencionados y la atmósfera generan cambios en los elementos determinando cambios en balances de calor como de masa. (Mauro, 2002)

### **2.3.2 Efectos topoclimáticos**

Las variables atmosféricas se ven influenciadas por dos factores fundamentalmente, estos son; la forma de la superficie y las propiedades físicas del suelo. Debido a que al interactuar relieve con la atmósfera actúan sobre la intensidad del viento, distribución de la radiación solar, modificando variables atmosféricas; respecto a la topografía, se observa que modifica la radiación derivando en una variación de los campos de vientos, todo esto se debe al desbalance de calor y de masa que ejerce la geografía local modificando flujos. (Mauro, 2002)

## **2.4 AMENAZA**

### **2.4.1 Amenaza**

Según la definición que entregan organismos como la oficina nacional de emergencias (desde ahora ONEMI), Amenaza es calificada como, probabilidad de ocurrencia de un evento que posiblemente sea catastrófico en un periodo y zona específica (SUBDERE, 2011). Más, a partir de la aseveración anterior otros autores entregan una descripción más profunda del concepto, tal es el caso Chardón quien en su aproximación describe “amenaza” como un fenómeno de origen natural ocurrencia, intensidad y magnitud (Chardón. 2011). Desde la óptica de Cardona, el “factor de riesgo externo”, se refiera a la amenaza de un sistema representada por un peligro subyacente adjunto a fenómenos de génesis natural o tecnológico que puede ocurrir en un sitio específico y momento determinado, generando afectaciones a la población, medio ambiente o bienes materiales (Cardona, 1992) En la misma tónica de los autores mencionados, Wilches-Chaux aporta con una categorización de la amenaza, clasificando tres tipos de esta.

- a) Naturales: Asociados a dinámicas Geológicas, geomorfológicas, atmosféricas y oceanográficas, originados en la dinámica del planeta, por lo cual no puede haber una intervención humana en su generación ni son capaces de eludir (PNUD,2003)
- b) Socio-naturales: Fenómenos asociados a eventos de origen natural, no obstante, acciones humanas aportan en la sucesión o agravamiento del impacto, debido a que procesos sociales producen o aumentan las condiciones de amenaza (PNUD,2003)
- c) Antrópicas: Generadas por directa acción humana, afectando al medio ambiente tanto como a la población (PNUD,2003)

### **2.4.2 Factores desencadenantes**

Como se hizo alcance anteriormente, una clasificación de amenaza es la de tipo natural, la cual se encuentra asociada a procesos terrestres que el ser humano no es capaz de eludir, en este sentido, se determina como “factores desencadenantes” aquellos que son capaces de generar otros eventos en relación “causa-efecto” un ejemplo de esto son las precipitaciones intensas las cuales debido a su magnitud, baja frecuencia además de una desigual distribución territorial, desencadenan procesos como movimientos en masa, inundaciones, cambios en cauces y llanuras aluviales (Beguera *et al* en Albornoz, 2017)

### CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

#### 3.1 PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

Esta investigación analiza la distribución espacial de eventos de precipitación máxima en el territorio, considerando el relieve como factor determinante en la variación y concentración pluviométrica. Para elaborar este análisis se utilizó información a partir de cincuenta y tres estaciones meteorológicas, pertenecientes a la Dirección meteorológica de Chile (DMC) y mayoritariamente a la Dirección General de Aguas (DGA), la totalidad de las estaciones se encuentran ubicadas en el área de estudio, la cual está comprendida entre los 32°S-35°S, pertenecientes administrativamente a las regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins (Figura N°13). Por su parte la serie de tiempo está comprendida entre los años 1965-2015, abarcando un periodo de tiempo de cincuenta años.

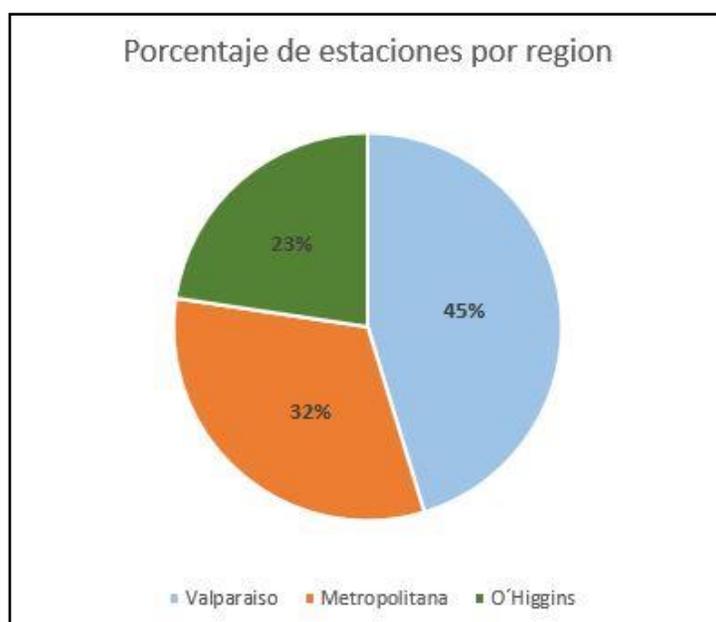


Figura N° 13: Porcentaje de estaciones meteorológicas por región  
Fuente: Elaboración propia

La mayor parte de las estaciones meteorológicas se encuentran ubicadas en la región de Valparaíso en total 24, las que corresponde al 45%, le sigue la región Metropolitana con 17 estaciones equivalentes al 32% del total y finalmente la región de O'Higgins con 12 estaciones aportando con el 23%. Como se puede apreciar, la distribución no es equitativa y a nivel territorial las zonas costeras y alta montaña concentran una menor cantidad de estaciones meteorológicas (Figura N°14)

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

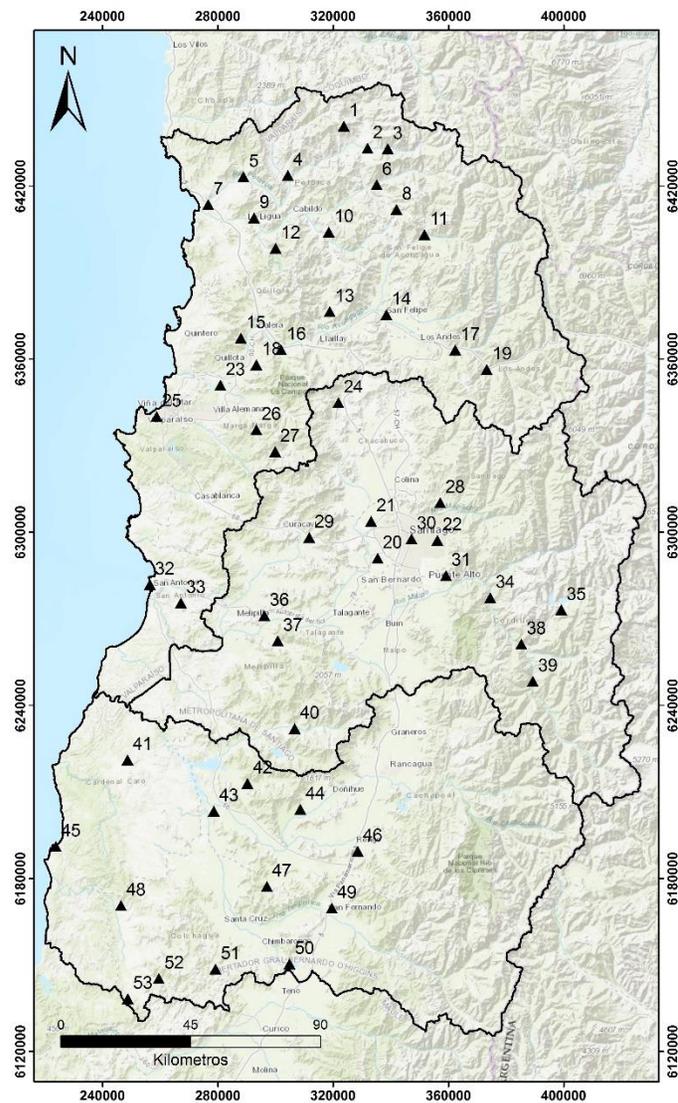


Figura N° 14: Distribución de las estaciones meteorológicas en área de estudio  
Fuente: elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Tabla N° 2: Estaciones meteorológicas  
Fuente: elaboración propia a partir de información de CR2

Región	N° de estación	Nombre de estación	Latitud	Longitud	Altitud
Valparaíso	1	Chalaco	-32,1836	-70,7833	880
Valparaíso	2	El Sobrante Hacienda	-32,2261	-70,7839	810
Valparaíso	3	El Trapiche	-32,2286	-70,7100	1180
Valparaíso	4	El Salvador	-32,3058	-71,0792	340
Valparaíso	5	Las Colmenas	-32,3075	-71,2425	80
Valparaíso	6	Alicahue	-32,3408	-70,7528	750
Valparaíso	7	Longotoma	-32,3919	-71,3750	20
Valparaíso	8	La Mostaza	-32,4186	-70,6808	1200
Valparaíso	9	Valle Hermoso	-32,4372	-71,2067	80
Valparaíso	10	Las Puertas	-32,4856	-70,9319	350
Valparaíso	11	Resguardo Los Patos	-32,4989	-70,5789	1220
Valparaíso	12	Las Pataguas	-32,5333	-71,1294	350
Valparaíso	13	Catemu	-32,7344	-70,9342	440
Valparaíso	14	San Felipe	-32,7472	-70,7247	640
Valparaíso	15	Lo Rojas	-32,8119	-71,2653	190
Valparaíso	16	Estero Rabuco	-32,8506	-71,1167	300
Valparaíso	17	Vilcuya	-32,8603	-70,4719	1100
Valparaíso	18	Quillota	-32,8958	-71,2092	130
Valparaíso	19	Riecillos	-32,9228	-70,3553	1290
Metropolitana	20	Quinta Normal	-33,445	-70,6828	527
Metropolitana	21	Pudahuel	-33,3919	-70,7944	482
Metropolitana	22	Tobalaba	-33,4544	-70,5478	650
Metropolitana	23	Los Aromos	-32,9578	-71,3450	100
Valparaíso	24	Rungue Embalse	-33,0194	-70,9081	700
Valparaíso	25	Rodelillo	-33,0503	-71,5833	110
Valparaíso	26	Lliu-Lliu Embalse	-33,0986	-71,2144	260
Metropolitana	27	Colliguay	-33,1686	-71,1467	490
Metropolitana	28	Cerro Calan	-33,395	-70,5367	848
Metropolitana	29	Los Panguiles	-33,4386	-71,0256	190
Metropolitana	30	Oficinas Dga	-33,4486	-70,6444	560
Metropolitana	31	Antupirén	-33,4964	-70,5164	904
Valparaíso	32	San Antonio (Pta. Panul)	-33,5747	-71,6250	80
Valparaíso	33	Cerrillos De Leyda	-33,6344	-71,5106	182
Metropolitana	34	San José De Maipo Reten	-33,6361	-70,3531	943
Metropolitana	35	El Yeso Embalse	-33,6767	-70,0886	2475
Metropolitana	36	Melipilla	-33,6803	-71,1997	168
Metropolitana	37	Carmen De Las Rosas	-33,7597	-71,1514	165
Metropolitana	38	San Gabriel	-33,7825	-70,2394	1266
Metropolitana	39	Las Melosas	-33,8994	-70,1981	1527
Metropolitana	40	Villa Alhue	-34,035	-71,0944	197
O'Higgins	41	Litueche	-34,1206	-71,7258	250

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Región	N° de estación	Nombre de estación	Latitud	Longitud	Altitud
O'Higgins	42	Cocalan	-34,2033	-71,2764	120
O'Higgins	43	Pichidegua	-34,2872	-71,4058	110
O'Higgins	44	Coltauco	-34,2875	-71,0800	253
O'Higgins	45	Pichilemu	-34,3844	-72,0044	5
O'Higgins	46	Rengo	-34,4217	-70,8667	310
O'Higgins	47	Millahue	-34,5264	-71,2122	200
O'Higgins	48	Nilahue Barahona	-34,5742	-71,7653	90
O'Higgins	49	San Fernando	-34,5983	-70,9686	350
O'Higgins	50	Convento Viejo	-34,7694	-71,1331	239
O'Higgins	51	La Candelaria	-34,7808	-71,4142	213
O'Higgins	52	El Membrillo	-34,8056	-71,6289	110
O'Higgins	53	Ranguili	-34,8661	-71,7486	120

### 3.1.1 Etapas metodológicas

Los pasos metodológicos utilizados en esta investigación fueron divididos en cuatro etapas (Figura N°15), las cuales abarcan desde la recolección de datos a partir de estaciones meteorológicas, hasta la elaboración de cartografía a partir de dicha información junto con diferentes procesos de análisis estadísticos, dichos pasos se describen a continuación.

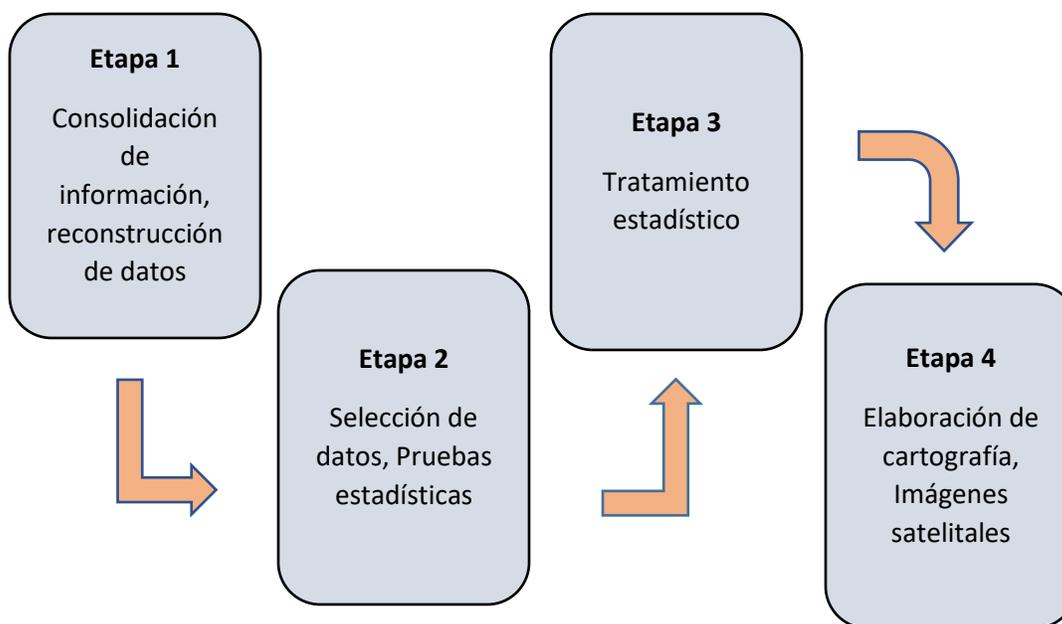


Figura N° 15: Esquema etapas Metodologia  
Fuente: Elaboracion propia

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

### **3.1.1.1 Primera etapa**

En primera instancia, a partir de la información pluviométrica extraída del Centro de ciencias del clima y la resiliencia (CR(2)) la cual es tributada por la red de estaciones meteorológicas tanto de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) como de la Dirección General de Aguas (DGA), se elaboró una base de datos de precipitación diaria de cada estación desde el 1 de enero de 1965 hasta el 31 de Diciembre de 2015; mas, debido a la falta de información en varias estaciones donde se presentaban vacíos o discontinuidad, fue necesario aplicar reconstrucción de datos, generada por Serrano (2017), mediante el programa R-project.

### **3.1.1.2 Segunda etapa**

Esta etapa consiste en la selección de datos a partir de la información proveniente de las estaciones meteorológicas, posterior a la reconstrucción aportada por Serrano (2017), mediante el programa Easy fit se aplicaron pruebas estadísticas, estas permiten confirmar resultados o conocer si estos son inconsistentes, de ser así, aquellas estaciones fueron desechadas, las pruebas aplicadas son, Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi-cuadrado.

### **3.1.1.3 Tercera etapa**

A partir del análisis de la información mediante el programa Easyfit, junto con obtener pruebas estadísticas, también se utilizó para el tratamiento estadístico de la información, con el fin de generar medidas estadísticas descriptivas, para este caso, la media estadística ( $\mu$ ) y la desviación típica ( $\alpha$ ), además, estas variables son necesarias para obtener distribución de Gumbell, la que permitió generar los rangos máximos de eventos para periodos de retorno. Es preciso destacar que el análisis fue llevado a cabo considerando rangos de tiempos en eventos de precipitación máxima de 24, 48 y 72 horas.

### **3.1.1.4 Cuarta etapa**

Por último, la información de las variables estadísticas descriptivas ( $\mu$  y  $\alpha$ ) tanto como los periodos de retorno, para fenómenos pluviométricos con duración de 24,48 y 72 horas, fueron espacializados en representaciones cartográficas. Junto con ello, mediante una categorización de aquellos eventos de precipitación máxima con más acumulación de precipitaciones, se contrasto la información proveniente de estaciones meteorológicas e imágenes satelitales TRMM, así analizar la distribución territorial de dichos eventos.

### **3.1.2 Datos y métodos utilizados**

#### **3.1.2.1 Datos**

A partir de los datos extraídos desde el CR(2), organismo que cuenta con información recopilada de las plataformas informáticas de la DMC y DGA, direcciones públicas que mantienen una cobertura a nivel nacional con sus estaciones meteorológicas, además, de bancos con registros históricos. La información proviene de estaciones ubicadas entre los 32°S y 35°S, dichos datos corresponden al periodo abarcado entre 1965 y 2015 (desde Enero de 1965 a Diciembre de 2015) a escala diaria, por esto, es preciso considerar los siguientes criterios temporales.

- La precipitación diaria, corresponde al agua caída en 24 horas, la que considera el intervalo de tiempo entre las 00:00 horas de un día y las 00:00 GTM del día siguiente, de este mismo modo, la precipitación máxima en 24 horas es aquella producida en el mismo periodo temporal (Elmes, 2016)
- Evento de 48 horas, hace referencia a eventos que en total tienen una duración de dos días consecutivos.
- Eventos de 72 horas, hace referencia a eventos que en total tienen una duración de tres días consecutivos.
- Para eventos específicos, se utiliza un máximo de 72 horas de duración, considerando los días con mayor cantidad de milímetros acumulados.

#### **3.1.2.2 Selección de estaciones y reconstrucción de datos**

Al momento de descargar la información de cada estación meteorológica, debido a que esta proviene de la base de datos de CR(2), fue preciso realizar un filtro de datos, primero aquellas que se encontraban entre los 32°S y 35°S, que además se ubicaran en la división administrativa correspondientes a la región de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins, luego, se descartaron las estaciones que no se encontraban activas el año 1965. Inicialmente se contó con 73 estaciones, ese número posteriormente disminuyó debido al segundo filtro aplicado el cual ya se hizo referencia, por último, las 65 estaciones seleccionadas en muchos casos no contaban con la totalidad de datos o series completas, esto generó la necesidad de realizar una nueva selección, mas, a partir del trabajo de Serrano (2017), las series fueron reconstituidas, lo que permitió entregar mayor número de información al análisis, no obstante, el último filtro fue realizado mediante pruebas estadísticas con el programa Easy Fit, a continuación se expone la reconstrucción propuesta por Serrano, tanto como, las pruebas estadísticas mencionadas.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

### A) Reconstrucción de datos

Con base en la metodología de reconstrucción de datos propuesta por Serrano en "Reconstrucción climática instrumental de la precipitación diaria en España"(2017), mediante el programa R-project, postula el siguiente proceso de reconstrucción.

- A partir de los datos aportados por las diez estaciones más cercanas, codificadas con una variable binaria (lluvia-no lluvia), robusteciendo esta información con variables de altitud, latitud y longitud, se lleva a cabo el cálculo por medio de una regresión logística multivariante (RLM) para obtener la probabilidad de ocurrencia de precipitación (PB), para un día y localización específica. Para los días "húmedos" se estima la magnitud de la precipitación (PM) con el mismo proceso pero luego de establecer una nueva escala que cataloga entre 0 y 1 las estaciones de este modo se disminuye el riesgo de "sobre-estimación" si fuera el caso que todas las covariables presentaran datos fuera de rango. Siendo 0 la mitad del valor observado y 1 entre máximo y el rango. Para ello se utiliza una regresión lineal múltiple quasi-binomial, incluyendo límites para valores extremos así evitar sub-sobrestimación, o un resultado que exprese precipitaciones negativas. Finalmente, en esta primera etapa es preciso determinar que valores PM y PB mezclados derivan en valores de referencia (VR).
- Con el fin de generar un control de calidad, se establecieron cinco criterios que determinan la veracidad de los valores de referencia, estos son (1) datos sospechosos (2) ceros sospechosos (3) extremos sospechosos (4) días húmedos (5) días secos sospechosos, posterior a la aplicación de esta prueba, los VR son recalculados con la base de información depurada, caso que nuevamente un dato sea considerado sospechoso, se vuelve aplicar el proceso mencionado, ya con la tabla de datos rellena es posible calcular nuevos VR para estaciones que carecen de información.
- A partir de los procesos generados en la reconstrucción de datos, es posible producir una climatología regional, considerando que no hay una superficie continua en el espacio, sino puntos que aportan información y que cuentan con singularidades, lo cual diferencia de otros lugares, por este motivo considerar factores locales como relieve u proximidad a cuerpos de agua debido a que estos afectan en ocurrencia y magnitud de eventos pluviométricos (Serrano, 2017)

### B) Selección de estaciones.

- Posterior a la reconstrucción de datos y considerando las 65 estaciones, se aplicó un nuevo filtro mediante pruebas estadísticas con apoyo del programa EasyFit v.5,6 por medio de estos análisis estadísticos se estima si la información posee información coherente y que permite análisis, dichas pruebas se mencionan a continuación.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

### 1B) Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov

Prueba estadística que contrasta la hipótesis nula de un conjunto de datos, esta es independiente de la distribución poblacional en la hipótesis nula (Escobedo, 2014)

### 2B) Prueba de Anderson-Darling

Se utiliza en datos cuya población posee una distribución específica, esta prueba calcula valores críticos a partir de la distribución mencionada, por este motivo es más específico y sensitivo para seleccionar información. (Escobedo, 2014)

### 3B) Chi-cuadrado

Usado para una muestra con distribución de población específica, permite aplicar esta prueba en varias distribuciones de una variable, permitiendo calcular la función de distribución acumulativa. Posterior a la aplicación de este test, es posible generar histogramas o tablas de frecuencia. (Escobedo, 2014)

Debido a que el software (EasyFit), realiza estas pruebas en conjunto y específicamente para funciones estadísticas, según como serían los resultados para cada caso, para esta investigación, fueron efectuados para la función de distribución estadística Gumbel Max. A continuación, se muestra un ejemplo del resultado obtenido en una estación posterior a la aplicación de las pruebas estadísticas, donde una fue rechazada y otra aceptada.

Gumbel Max [#1]					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	51				
Estadística	0,05695				
Valor P	0,99321				
Rango	2				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	0,14697	0,16796	0,18659	0,20864	0,22386
Rechazar?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					
Tamaño de la muestra	51				
Estadística	0,14789				
Rango	2				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	1,3749	1,9286	2,5018	3,2892	3,9074
Rechazar?	No	No	No	No	No
Chi-cuadrado					
Grados de libertad	5				
Estadística	1,5868				
Valor P	0,90284				
Rango	3				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	7,2893	9,2364	11,07	13,388	15,086
Rechazar?	No	No	No	No	No

Figura N° 16: Tabla bondad de ajuste, software EasyFit,  
Fuente: Elaboración propia con base en el programa EasyFit.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Gumbel Max [#1]					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	51				
Estadística	0,17083				
Valor P	0,0903				
Rango	1				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	0,14697	0,16796	0,18659	0,20864	0,22386
Rechazar?	Sí	Sí	No	No	No
Anderson-Darling					
Tamaño de la muestra	51				
Estadística	1,6891				
Rango	1				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	1,3749	1,9286	2,5018	3,2892	3,9074
Rechazar?	Sí	No	No	No	No
Chi-cuadrado					
Grados de libertad	3				
Estadística	25,138				
Valor P	1,4447E-5				
Rango	2				
$\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valor crítico	4,6416	6,2514	7,8147	9,8374	11,345
Rechazar?	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Figura N° 17: Tabla bondad de ajuste, software EasyFit  
Fuente: Elaboración propia con base en el programa EasyFit.

Es necesario destacar que el análisis de datos fue realizado por estación y para 24, 48, 72 horas -por separado- la obtención de los datos para 48 y 72 horas, fue a partir de datos diarios, los cuales con ayuda del programa Excel, se sumaron dos o tres días consecutivos que presentaban precipitaciones. Es por eso que se generó análisis estadístico para una misma estación con información a 24, 48, 72, tal como fue mencionado, no obstante, solo quedaron aquellas que pasaban las pruebas estadísticas en los tres casos, obteniendo finalmente las 53 estaciones consideradas para esta investigación. Además, se obtuvo información para desviación típica ( $\alpha$ ) y Media estadística ( $\mu$ ), como también histogramas de frecuencia de cantidades máximas para 24, 48, 72 horas junto con distribución de ajuste, a continuación, se ven ejemplos de cada caso, para una estación.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

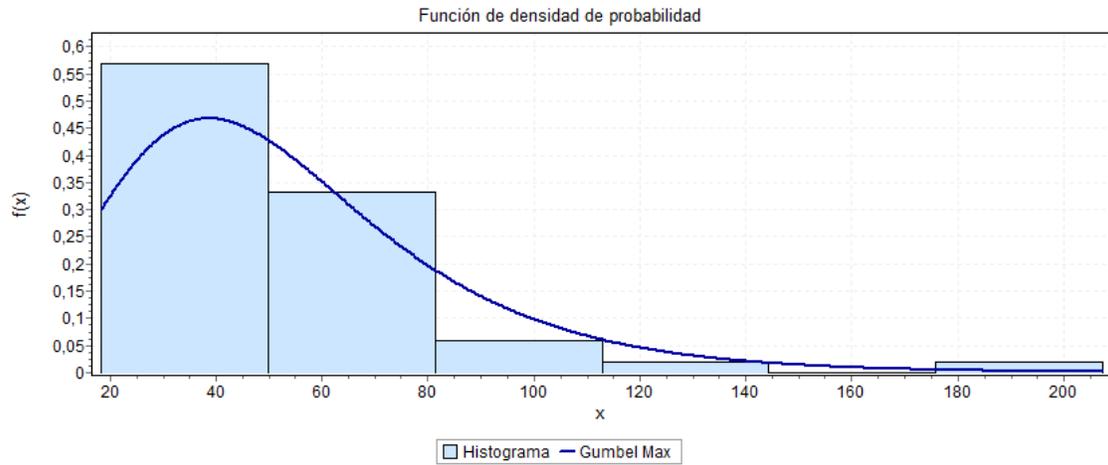


Figura N° 18: Histograma Gumbel Max, 24 horas estación Tobalaba  
Fuente: Elaboración propia con apoyo del programa Easy fit

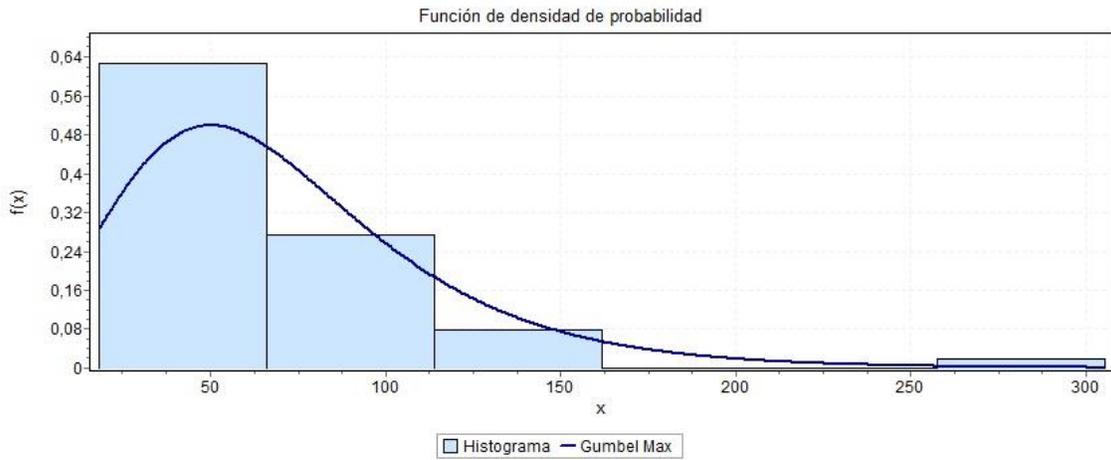


Figura N° 19: Histograma Gumbel Max, 48 horas estación Tobalaba  
Fuente: Elaboración propia con apoyo del programa Easy fit.

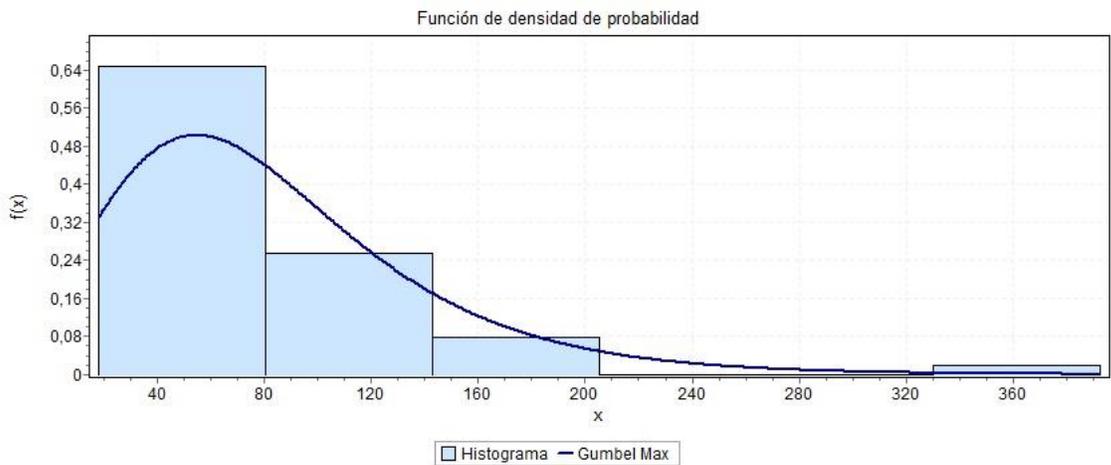


Figura N° 20: Figura N°24: Histograma Gumbel max, 72 horas estación Tobalaba  
Fuente: Elaboración propia con apoyo del programa Easy fit

### 3.1.3 Estimación de periodos de retorno

Con base en la metodología aplicada por Elmes (2016) para determinar periodos de retorno, quien fija los intervalos cronológicos de eventos de precipitación máxima en 10, 50 y 100, años considerando eventos de 24,48 y 72 horas, para cada periodo de retorno mencionado, para integrar la relación de periodo de retorno a la fórmula de cálculo de la precipitación media máxima por retorno se aplicó la formula a continuación.

$$-\text{Ln}(\text{Ln}(\text{Pr}/1-\text{Pr}))$$

Donde:

Ln: Corresponde a logaritmo natural del periodo de retorno

Pr: La cifra de cada periodo de retorno

Para el cálculo del periodo de retorno, se utilizó la formula a continuación, la cual entrega como resultado el promedio de un evento máximo de precipitaciones, para cada periodo de retorno, mediante la función de Gumbel Max

$$\mu + \alpha * Yt$$

Donde:

$\mu$ : Representa la media estadística

$\alpha$  : Representa desviación típica

Yt: Periodo de retorno

### 3.1.4 Imágenes satelitales

Para visualizar la distribución espacial de un evento de precipitación máxima, de este modo no solo conocer datos de estaciones, las cuales no cubren todo el territorio, fue necesario acudir a información proveniente de imágenes satelitales, la cual estime la cantidad de precipitación caída en una zona, para este propósito, se utilizó información proveniente del satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), misión de la NASA, cuyo objetivo es estudiar las precipitaciones y fenómenos meteorológicos asociados, debido a sus sensores este puede obtener información de la nubosidad factores asociados a precipitación. Necesario es determinar que su base de datos cuenta con información desde noviembre de 1997 hasta diciembre de 2015 y estos antecedentes se pueden descargar a diferentes escalas cronológicas, desde seis horas hasta 6 días; para esta investigación se extrajo desde la página de descarga, eventos que sumen tres días, equivalentes a la máxima duración de frentes que afectaron la zona; la biblioteca de archivos que proporcionó la imágenes satelitales corresponde a precipitación diurna cicle, la cual aporta información de fenómenos cuantificados asociado a ciclos de precipitación y sucesos convectivos, de esta forma se obtiene una imagen satelital como la que se ve a continuación (Figura N°21)

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

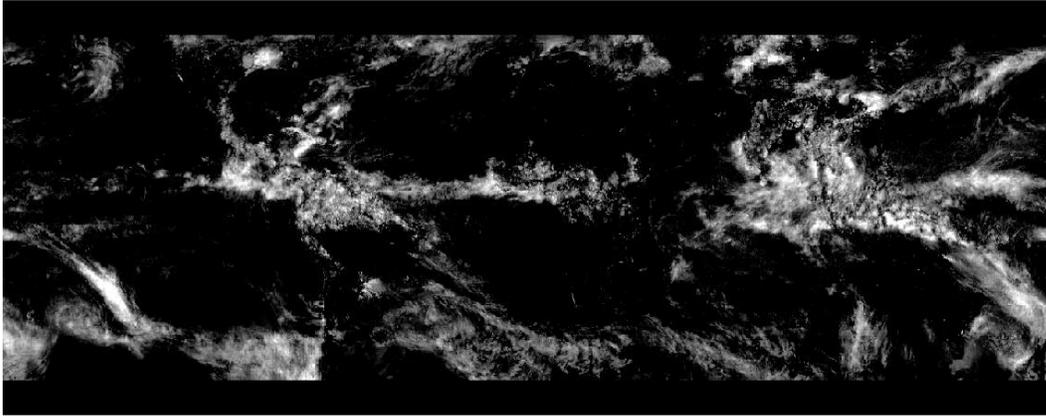


Figura N° 21: Imagen satelital TRMM  
Fuente: Goddard Space Flight Center, 2017

Respecto a especificaciones técnicas, es preciso mencionar que el tamaño de pixel es de  $0,25^\circ$  (en el Ecuador), lo que equivale a  $25 \times 25$  kilómetros ( $625 \text{ km}^2$ ), aproximadamente, además, los datos satelitales no presentan información en Milímetros

Es importante destacar que para generar cartografías a partir de estas imágenes satelitales, se utilizaron herramientas del software Arcgis 10.3, para primero proyectar información cartográfica y luego transformar a milímetros la información.

### **3.1.4.1 Cartografías y productos a partir de programas de información geográfica**

La elaboración de cartografía fue fundamental para la espacialización de variables utilizadas en la investigación, para tal fin, el software Arcgis 10.3 permitió generar información espacial e información estadística. Las herramientas utilizadas se describen a continuación, no obstante, esta descripción será a partir de la función específica en la que se empleó cada herramienta y sus especificaciones para cada caso.

### **3.1.4.2 Espacialización de variables estadísticas (Media estadística y desviación típica)**

Para visualizar el comportamiento de precipitaciones por estación y para generar un tramado que cubra la zona de estudio se acudió a métodos de interpolación, donde para este fin la herramienta Spline, fue seleccionada debido a su función de ajuste de puntos y calidad para suavizar la superficie de interpolación, específicamente la herramienta utilizada fue Spline tensión, esto debido a que Spline regularizado, crea una superficie suave con valores que pueden estar por fuera del rango de muestra, por su parte la primera herramienta mencionada, produce una superficie con mayor tensión pero restringida a los datos de la muestra; el factor de tensión fue de 0,4 determinado según la metodología de Sarricolea (2014). Aparte de utilizar este tipo de interpolación para media estadística y desviación típica, también se empleó en periodos de retorno y promedio de eventos de precipitación máxima para 24,48 y 72 horas.

### **3.1.4.3 Análisis espacial estadístico**

Dentro del contexto del tercer resultado el cual aborda la amenaza hidrometeorológica potenciada por factores del relieve, se buscó determinar mediante variables estadísticas zonas que presentaran mayor exposición a eventos de precipitación máxima, en este sentido, el análisis fue aplicado a nivel comunal mediante la herramienta zonal statics (estadísticas zonales) la cual genera descripciones estadísticas de una capa raster contrastada con otra cubierta, específicamente en este caso se calcularon las estadísticas zonales, en periodos de retorno y promedio de eventos, obteniendo así los siguientes parámetros.

- MEAN: promedio de las celdas raster dentro de la misma celda de salida
- MAJORITY: determina la moda en la celda raster
- MAMXIMUM: valor más alto dentro de una celda
- MEDIAN: determina media estadística de la celda raster
- STD: calcula la desviación estándar de las celdas

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

### 4.1 Análisis estadístico y eventos máximos

*“La precipitación es una de las variables meteorológicas que presenta mayor oscilación o variabilidad en el transcurso del tiempo (a veces se presenta en forma de chubascos cortos, pero intensos y otras veces se extienden en una racha de varios días), por lo que el análisis de su variabilidad temporal es de gran importancia en la caracterización del fenómeno”*

Ávila y Martín-Vide, 2013

Tal como mencionan Ávila y Martín-Vide, 2013, las precipitaciones presentan gran variabilidad temporal y sus efectos también varían según la intensidad. Considerando esta aseveración, a continuación se presenta el siguiente análisis mediante variables estadísticas  $\alpha$  y  $\mu$  las cuales proporciona información relativa a desviación típica ( $\alpha$ ) y media de la población de datos ( $\mu$ ), a partir de los mayores eventos de precipitación máxima anual entre 1965 y 2011, a escala temporal de 24,48 y 72 horas, así, conocer aquellas estaciones que presentan mayores (menores) valores de  $\alpha$  y  $\mu$ , establecer nexo con su ubicación en el territorio, más específicamente, respecto al relieve. En las siguientes tablas se presenta la media estadística en cada estación aplicada a escala temporal ya mencionada.

Tabla N° 3:  $\mu$  por estación

Fuente: Elaboración propia

Estación	$\mu$ 24h	$\mu$ 48 h	$\mu$ 72 h
Chalaco	32,107	42,112	44,802
El Sobrante Hacienda	29,145	36,296	39,089
El Trapiche	33,485	42,352	45,456
El Salvador	34,116	45,707	49,800
Las Colmenas	35,856	45,017	49,925
Alicahue	36,996	48,087	50,959
Longotoma	36,996	48,087	50,959
La Mostaza	45,568	60,639	64,314
Valle Hermoso	35,915	46,291	49,888
Las Puertas	33,877	46,194	49,900
Resguardo Los Patos	38,041	52,398	57,311
Las Pataguas	41,447	57,775	62,764
Catemu	32,654	46,993	50,940
San Felipe	30,056	38,053	40,974
Lo Rojas	56,675	76,539	83,112
Estero Rabuco	51,447	70,281	76,719
Vilcuya	41,448	55,808	60,717
Quillota	38,618	51,066	56,784
Riecillos	58,022	82,772	92,750
Quinta Normal	36,405	48,956	53,195
Pudahuel	32,154	41,393	44,051
Tobalaba	38,583	49,974	54,682
Los Aromos	50,148	64,547	70,996

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Estación	$\mu$ 24h	$\mu$ 48 h	$\mu$ 72 h
Rungue Embalse	47,494	63,249	69,112
Rodelillo	52,030	73,287	83,615
Lliu-Lliu Embalse	60,030	82,551	92,532
Colliguay	83,873	114,140	124,620
Cerro Calan	52,280	68,193	74,219
Los Panguiles	36,870	47,297	51,910
Terraza Oficinas Dga	36,894	48,937	53,793
Antupirén	51,469	69,078	78,068
San Antonio	58,981	52,723	60,308
Cerrillos De Leyda	48,327	64,416	74,831
San José De Maipo	58,180	83,437	95,786
El Yeso Embalse	56,012	79,131	90,116
Melipilla	39,536	52,287	56,939
Carmen De Las Rosas	48,811	66,599	74,584
San Gabriel	59,584	84,312	95,300
Las Melosas	74,760	106,310	122,490
Villa Alhue	49,873	63,874	70,478
Litueche	71,621	97,136	112,360
Cocalan	45,861	61,450	68,143
Pichidegua	49,091	64,987	73,406
Coltauco	62,233	84,687	94,265
Pichilemu	45,500	59,110	68,350
Rengo	46,442	64,170	73,144
Millahue	64,742	92,029	107,910
Nilahue Barahona	53,136	70,265	79,819
San Fernando	66,506	90,797	101,200
Convento Viejo	58,981	80,296	91,362
La Candelaria	65,933	92,288	105,930
El Membrillo	55,905	74,823	88,014
Ranguili	54,113	71,736	83,085

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Junto con la medida de tendencia central aplicada a la muestra, se obtuvo la dispersión típica de los datos, permitiendo así generar análisis que muestran la variabilidad del comportamiento de la población respecto a la media. Vislumbrando aquellas zonas que presentan eventos máximos más intensos y la ubicación respecto al relieve de estos sitios, afectados con mayor frecuencia por eventos drásticos. A continuación, se muestra la tabla con los datos para eventos de 24, 48 y 72 horas.

Tabla N° 4:  $\alpha$  por estación  
Fuente: Elaboración Propia

Estación	$\alpha$ 24 h	$\alpha$ 48 h	$\alpha$ 72 h
Chalaco	13,706	23,769	26,829
El Sobrante Hacienda	12,056	19,610	22,588
El Trapiche	15,314	23,153	25,860
El Salvador	23,964	33,594	43,014
Las Colmenas	18,550	26,422	32,798
Alicahue	13,989	26,767	30,369
Longotoma	13,989	26,767	30,369
La Mostaza	22,208	34,977	42,507
Valle Hermoso	17,089	28,939	34,566
Las Puertas	24,601	36,435	45,470
Resguardo Los Patos	17,785	30,186	35,654
Las Pataguas	29,792	45,239	58,182
Catemu	15,309	23,643	29,578
San Felipe	14,177	24,437	27,761
Lo Rojas	22,997	36,604	48,355
Estero Rabuco	20,021	31,210	40,098
Vilcuya	14,347	26,096	31,328
Quillota	16,922	27,128	34,960
Riecillos	27,882	44,271	54,813
Quinta Normal	15,838	22,125	30,259
Pudahuel	21,424	30,794	41,182
Tobalaba	24,741	35,160	45,567
Los Aromos	22,200	31,259	41,432
Rungue Embalse	23,761	41,577	53,085
Rodelillo	26,828	33,593	36,216
Lliu-Lliu Embalse	31,798	52,642	68,809
Colliguay	29,898	49,511	63,380
Cerro Calan	25,483	32,805	43,247
Los Panguiles	18,344	26,500	34,359
Terraza Oficinas Dga	15,896	21,756	29,886
Antupirén	23,622	32,917	42,136
San Antonio	17,760	24,240	28,047
Cerrillos De Leyda	18,495	27,331	31,351
San José De Maipo	20,756	69,078	44,297
El Yeso Embalse	34,129	56,590	70,884
Melipilla	16,348	26,568	33,959

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Estación	$\alpha$ 24 h	$\alpha$ 48 h	$\alpha$ 72 h
Carmen De Las Rosas	16,890	27,586	34,295
San Gabriel	18,143	32,919	43,755
Las Melosas	35,930	49,042	61,272
Villa Alhue	22,953	35,611	39,801
Litueche	27,149	38,934	45,771
Cocalan	16,801	22,616	27,068
Pichidegua	20,724	28,037	31,114
Coltauco	38,908	53,785	60,454
Pichilemu	18,675	25,419	26,730
Rengo	15,539	26,211	30,718
Millahue	31,766	44,924	50,736
Nilahue Barahona	14,729	22,043	26,956
San Fernando	26,048	44,091	51,559
Convento Viejo	17,760	30,378	35,185
La Candelaria	25,664	38,287	47,117
El Membrillo	18,981	26,267	31,919
Ranguili	16,634	25,904	88,014

En la siguiente tabla, se presentan los mayores montos de precipitación acumulada en cada escala horaria (24,48 y 72 horas), por estación,

Tabla N° 5: Mayor precipitación acumulada por evento.  
Fuente: Elaboración propia.

Estación	Máximo 24h	Máximo 48 h	Máximo 72 h
Chalaco	81,000	157,000	157,000
El Sobrante Hacienda	76,700	113,500	133,300
El Trapiche	120,000	150,000	158,000
El Salvador	195,710	253,900	320,700
Las Colmenas	130,000	185,500	210,500
Alicahue	91,000	164,500	184,500
Longotoma	91,000	164,500	184,500
La Mostaza	182,090	269,240	344,346
Valle Hermoso	139,000	235,000	267,000
Las Puertas	184,270	255,810	322,955
Resguardo Los Patos	120,000	183,500	203,500
Las Pataguas	236,550	372,030	472,740
Catemu	130,000	133,000	143,300
San Felipe	92,800	166,000	175,900
Lo Rojas	143,500	280,000	330,000
Estero Rabuco	150,000	175,400	253,000
Vilcuya	106,500	190,500	210,500
Quillota	109,500	207,500	252,500
Riecillos	163,600	244,000	273,500
Quinta Normal	111,100	167,300	211,800

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Estación	Máximo 24h	Máximo 48 h	Máximo 72 h
Pudahuel	173,950	254,400	333,690
Tobalaba	207,250	305,170	392,140
Los Aromos	135,600	195,500	280,500
Rungue Embalse	154,500	261,500	313,500
Rodelillo	178,000	190,700	209,000
Lliu-Lliu Embalse	174,850	318,500	369,890
Colliguay	221,000	336,000	430,700
Cerro Calan	150,910	223,010	285,360
Los Panguiles	121,500	180,500	222,000
Oficinas Dga	109,400	160,900	210,900
Antupirén	168,046	237,150	265,190
San Antonio	112,200	147,000	156,000
Cerrillos De Leyda	108,000	176,000	176,000
San José De Maipo	146,500	216,090	276,422
El Yeso Embalse	256,500	250,500	498,000
Melipilla	96,800	176,000	233,000
Carmen De Las Rosas	103,800	173,000	218,600
San Gabriel	115,630	193,000	292,000
Las Melosas	252,590	291,500	342,500
Villa Alhue	127,000	225,000	257,000
Litueche	182,000	251,500	251,500
Cocalan	142,760	170,350	166,500
Pichidegua	160,680	190,020	190,020
Coltauco	292,620	312,620	331,220
Pichilemu	161,570	173,500	181,200
Rengo	91,910	166,470	166,470
Millahue	283,970	302,900	319,430
Nilahue Barahona	112,500	179,000	232,900
San Fernando	144,290	266,220	296,300
Convento Viejo	125,130	228,250	228,250
La Candelaria	180,970	244,500	274,600
El Membrillo	136,520	163,980	197,400
Ranguili	126,091	183,000	195,500

Los datos expuestos en las tablas muestran información respecto a una estación que marca un punto específico en el territorio. Por este motivo, generar una capa continua que cubra la zona de estudio fue necesario para comprender como se distribuyen las diferentes variables estadísticas ya mencionadas, así como, los eventos mayores anuales, sumado a lo anterior, fue complementado el análisis comparando la distribución de la precipitación respecto al territorio mediante perfiles topográficos, trazados en distintas latitudes del área de estudio.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

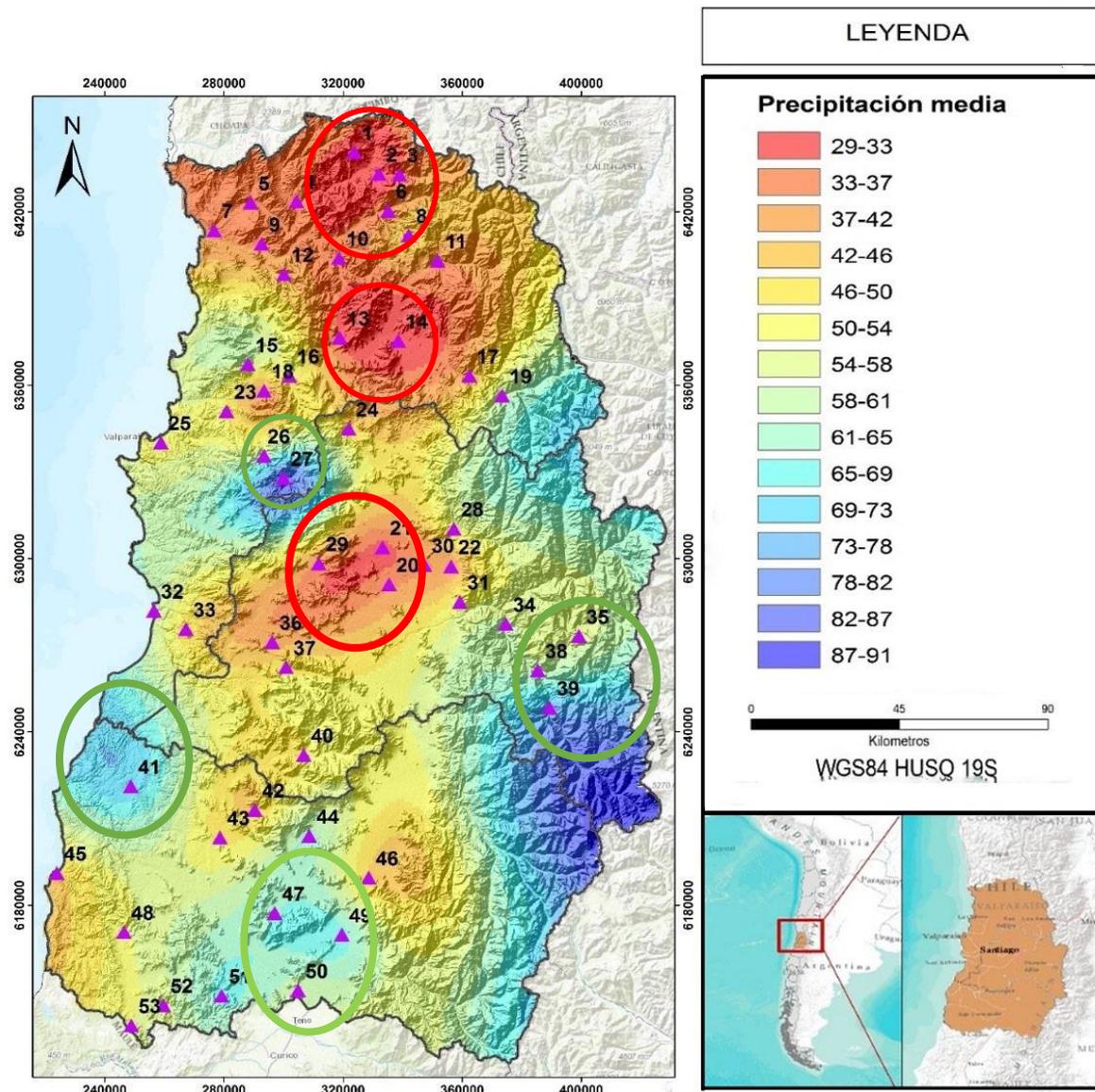


Figura N° 22: Media Estadística ( $\mu$ ) de eventos máximos, 24 Horas

Fuente: Elaboración propia

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

En la Figura N°22, la distribución de la media estadística es irregular, los mayores valores se presentan en la alta cordillera de Los Andes, y valores más bajos en la zona interior principalmente el valle de Aconcagua, Petorca y el área poniente de la cuenca del Río Maipo (zonas demarcadas con círculos rojos). La estación El Sobrante, tiene el valor medio más bajo del registro de precipitaciones máximas en 24 horas con 29,145 mm, esta estación, se encuentra en la cuenca del río Petorca. A continuación de la estación mencionada, dentro de los registros menores, San Felipe marca una media de 30,056 mm, ubicada en el valle del río Aconcagua. A nivel general, los valores menores se presentan en la región de Valparaíso, mayormente en valles transversales. Una característica común es la ubicación de estas áreas a barlovento de cordones montañosos.

Respecto a los mayores valores de  $\mu$  (enmarcadas con círculos de color verde) se encuentran en zonas con relieve acusado, asociado a mayores altitudes, a barlovento y en puntos de la costa. Los valores más altos son alcanzados en las estaciones N°27 (Colliguay) con una media de 83,873 mm y la N°39 (Las Melosas) con 74,76 mm. Ambas se encuentran en ambientes montañosos, la primera en la cordillera de la Costa y la segunda en la cordillera de Los Andes. Es importante destacar que la cartografía está hecha en base a un modelo de interpolación (spline) y las zonas de alta montaña asociadas a la cordillera principal, no presentan una densidad de estaciones meteorológicas importante a diferencia de valles y costa, por lo que podría haber una sobreestimación de información. Junto con esto, se debe mencionar que, en áreas montañosas las precipitaciones de tipo sólido son más típicas que las líquidas y no hay instrumentos que entreguen el total de agua acumulada que aporta la nieve.

La distribución general de la media estadística para eventos de 24 horas muestra que el sector norte del área de estudio presenta menos precipitación acumulada por evento. Luego este va aumentando gradualmente hacia el sur -tal como se aprecia en la figura N°22- La región de O'Higgins, alcanza una media estadística más elevada, respecto a la región de Valparaíso (a nivel general); esto concuerda con la descripción realizada por Luebert y Pliscoff (2006), donde se afirma el aumento de las precipitaciones derivadas de la gradiente latitudinal. Pero la escala de análisis es diferente, ya que, en esta investigación se consideran solo eventos mayores anuales y no el promedio total, mas, considerando la diferencia de escala, existe aparente similitud. A pesar de esto, el elemento que sesga mayormente la distribución de las precipitaciones es el relieve, comparando la distribución de la media estadística de la región de O'Higgins, donde el relieve es menos acusado y de menor altitud, respecto a la región de Valparaíso o Metropolitana, donde hay un relieve acusado y con diferencias altitudinales importantes, los eventos distribuyeron sus precipitaciones de forma discontinua y variable, incluso en algunos puntos (fuera de la cordillera de Los Andes) con mayor intensidad que la Región de O'Higgins.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

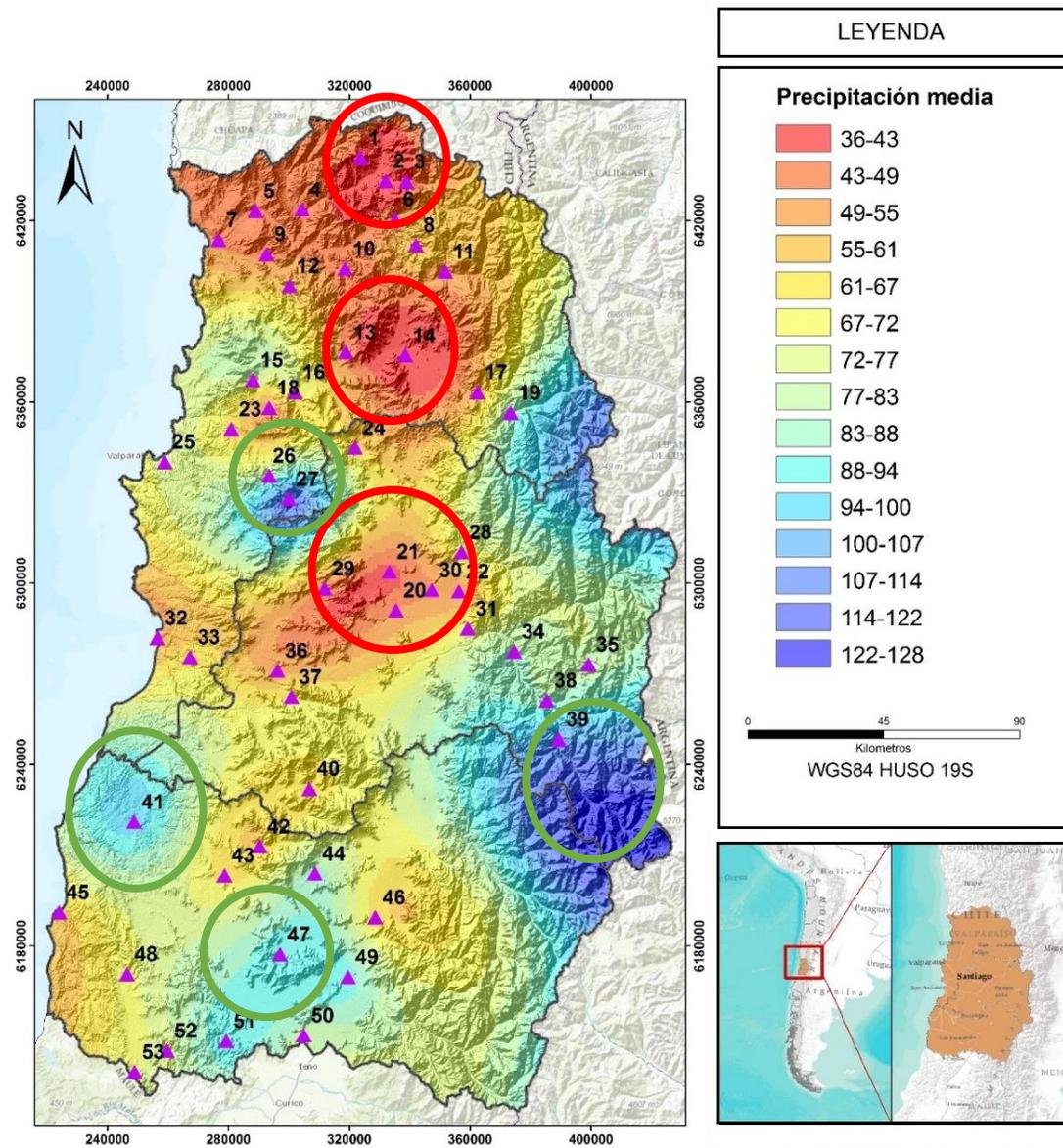


Figura N° 23: Media estadística ( $\mu$ ) de eventos máximos, 48 horas  
Fuente: Elaboración propia

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

El parámetro  $\mu$  para eventos de 48 horas, proporciona resultados no muy diferentes a los anteriores. Las zonas donde se muestran los valores extremos respecto a la distribución de la media estadística es similar en la figura N°22. Nuevamente,  $\mu$  es menor en los valles de Aconcagua, Petorca y la zona oeste de la cuenca del río Maipo (remarcadas con un círculo rojo), en el otro extremo, nuevamente aquellas zonas con mayor media estadística corresponden a las mayores cumbres de la cordillera principal y algunas en la cordillera de la Costa (puntos remarcados con círculo verde). En comparación con eventos de 24 horas, se evidencian leves diferencias respecto al análisis visual, esto dado que los lugares que reciben mayor precipitación atenúan su área de influencia, y en algunos casos, como el área donde se ubica la estación meteorológica N° 41, comparada con los datos observados para eventos de 24 horas (considerando que proporcionalmente la acumulación de precipitación por evento es diferente) el área con valores mayores es más amplia. Similar situación se evidencia en el área donde se ubican las estaciones N° 47, 50 y 51.

Es posible observar, que en puntos con mayor media estadística hay diferencias importantes en la acumulación de precipitaciones entre 24 y 48 horas, por ejemplo, las estaciones N° 27 y 39, en el caso de la primera,  $\mu$  es de 114,140 mm, y la segunda, 106,310 mm, mostrando una importante diferencia respecto a lo acontecido en 24 horas, donde la estación N° 27 tiene valor de  $\mu$ , 83,873 mm y la N°39°, 71,760 mm, encontrando diferencias de más de 30 puntos. Importante variación si se considera que en puntos ubicados en valles, principalmente, del Río Petorca y Valle del Aconcagua algunas estaciones como la N°2 (estación con menor valor de  $\mu$ ) para eventos de 48 horas, el valor es de 36,296 mm, variando poco respecto a la media en 24 horas en el mismo punto, el que marca 29,145 m -menos de 10 décimas- similar caso ocurre con la estación N°14 ubicada en el valle del Aconcagua, donde para eventos de 48 horas la media es de 38,053 mm, y en el caso de 24 horas la media registrada es de 30,056 mm; esto podría ser causa del efecto adiabático asociado a la gradiente altitudinal que según Garreaud (2005), reactiva eventos de precipitación exponiendo a mayor intensidad a zonas altas y a barlovento

Existe una relación proporcional al aumento de la gradiente altitudinal con aumento de la media estadística de eventos máximos. Para eventos de 48 horas, zonas ubicadas en las cumbres de la cordillera principal como de la Costa, la tendencia al alza es aún más marcada y se extiende más marcadamente en laderas a barlovento, respecto a valles donde el aumento es leve, junto a esto, es posible observar –nuevamente- el aumento de las precipitaciones proyectadas en dirección norte-sur, no obstante, continúa primando puntos de con mayores valores de media asociado al relieve por sobre el gradiente latitudinal.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

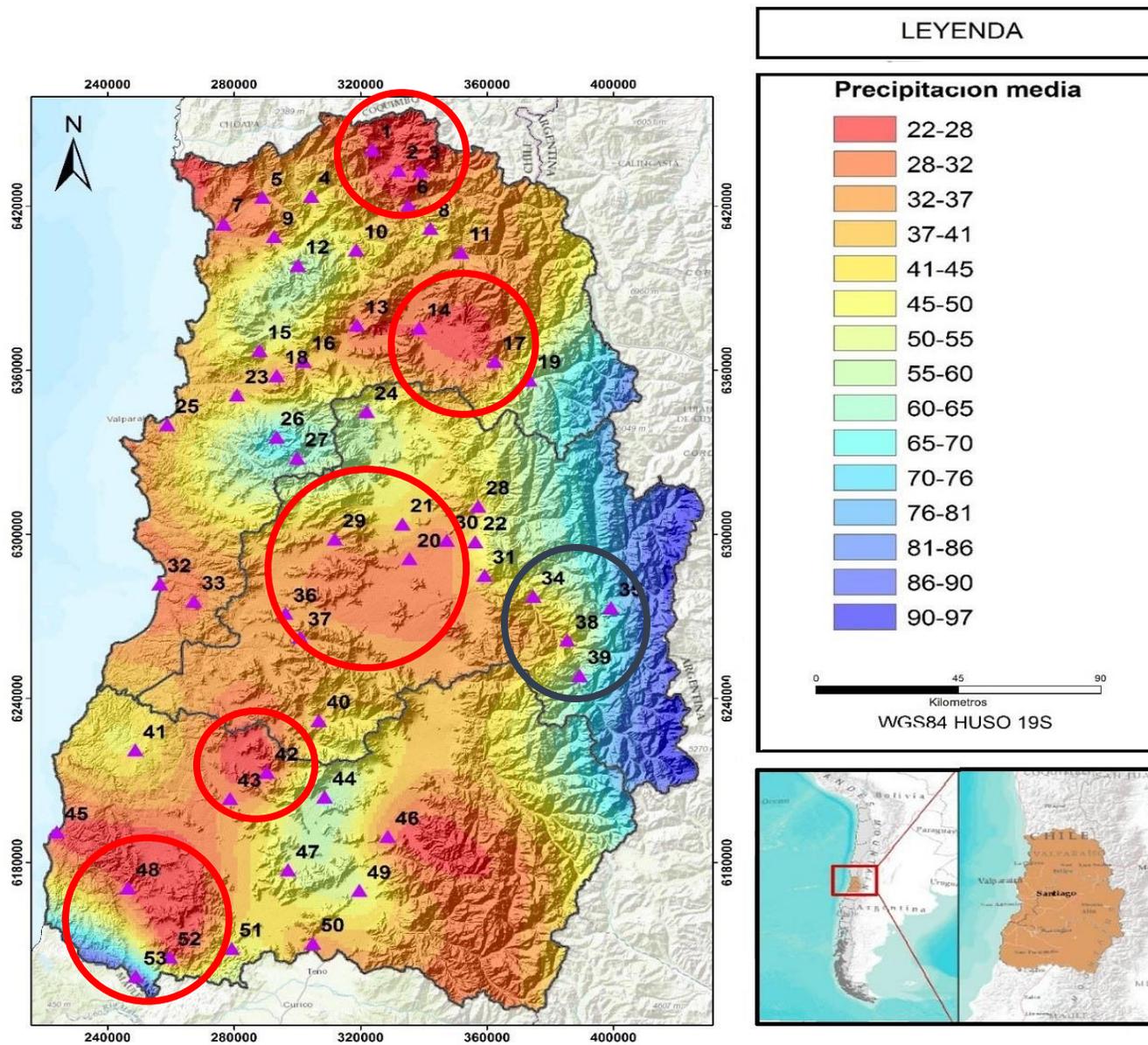


Figura N° 24: Media estadística ( $\mu$ ) de eventos máximos, 72 horas  
Fuente: elaboración propia

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Los datos de  $\mu$  para eventos de 72 horas, como se puede apreciar, repite “patrones” de distribución vistos anteriormente, si bien, algunas áreas muestran similitud en la distribución de  $\mu$  respecto a los casos anteriores, el aumento general de  $\mu$  es menor -en relación con la variación dada entre eventos de 24 y 48 horas- incluso en aquellas estaciones ubicadas en zonas altas, (en cordillera de Los Andes como de la Costa). Los valores obtenidos para eventos en 48 horas no son tan diferentes respecto a eventos de 72 horas, demostrando que en su gran mayoría los frentes concentran sus precipitaciones dentro de las primeras 48 horas. Existe una continuidad respecto a las zonas que concentran mayores valores de  $\mu$ , siendo la cordillera de Los Andes y de la Costa, aquellas que resaltan por sobre otras áreas. Es preciso destacar que en los tres análisis realizados (cada escala horaria), el punto N°27, ubicado en las inmediaciones del parque nacional la Campana (cordillera de la Costa), prima por sobre aquellos ubicados en la cordillera Los Andes, a pesar que se podría inferir que, por encontrarse a mayor altitud debería ser diferente este dato, según menciona Viale y Garreaud (2013), los frentes se reactivan por efecto del ascenso altitudinal, pero se disipan en las cumbres, ya que, la cobertura nubosa se torna más delgada, disminuyendo las precipitaciones comparado con lo que acontece en la cordillera de la Costa,

Sobre las principales variaciones, respecto a aquellas zonas con menores valores de  $\mu$ , nuevamente, los valles del río Petorca, Aconcagua y Maipo, resaltan por sobre otras y para el caso del valle del río Maipo, ya no solo  $\mu$  es menor en el poniente, sino que los valores decrecen al oriente, ejemplo de estos se aprecian en las estaciones N° 34, 38 y 39 (Zona demarcada con círculo plomo).

Sobre valores de los eventos de 48 horas, para 72 horas, la variación de  $\mu$ , es menor, mostrando una tendencia general, que incluso alcanza aquellas zonas de mayor concentración de precipitaciones por evento – Las cuales presentaban grandes variaciones, entre eventos de 24 y 48 horas-. Esto puede estar relacionado al potencial debilitamiento de frentes posterior a 48 horas.

Es importante agregar que, a diferencia de los otros casos, en eventos de 72 horas,  $\mu$  no muestra un aumento de las precipitaciones de norte a sur, sino que, la distribución es aleatoria, e incluso algunas zonas de la región de O'Higgins, tienen datos menores, que zonas ubicadas en el norte. Además, la relación planteada anteriormente sobre la distribución en relación con factores de relieve, no se cumple de manera total. Si bien las mayores altitudes continúan manteniendo valores de  $\mu$  altos, zonas con presencia de relieve menos acusado presentan datos de  $\mu$  menores, acrecentando el área con valores de  $\mu$  más bajos.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Para realizar un análisis específico y que ejemplificará mejor lo antes expuesto, a continuación, se muestra el comportamiento de  $\mu$ , a partir de perfiles topográficos, permitiendo observar con mayor detalle el comportamiento de esta variable estadística respecto al relieve.

### - Perfil N°1

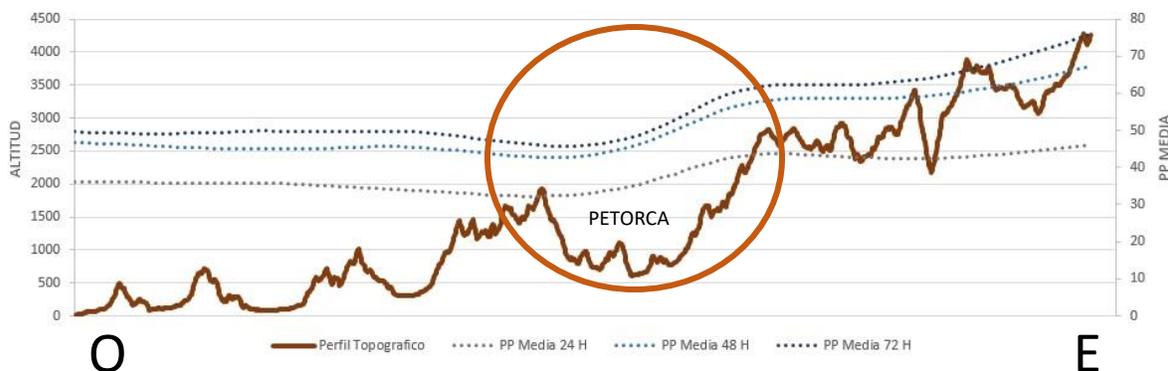


Figura N° 25: Perfil topográfico N°1. Latitud 32°19' S

Fuente: elaboración propia

El perfil N°1 corresponde a la zona más meridional del área de estudio, aquí predominan valles transversales y tal como se aprecia en el perfil topográfico, este es acusado. Sin poder distinguir la presencia de la cordillera de la Costa o valles ubicados entre esta y la cordillera de Los Andes. Respecto al parámetro  $\mu$  este no presenta mayores variaciones en la distribución, sí existe una disminución poco notoria desde la costa hasta el primer macizo (demarcado con un círculo anaranjado) en esta zona hay un descenso mayor de  $\mu$ , hasta alcanzar el menor valor para las tres escalas horarias antes de la cordillera de Los Andes, donde repuntan los valores de  $\mu$ , evidenciando al relación directamente proporcional entre el ascenso altitudinal y el aumento de las precipitaciones, asociado a la reactivación de los frentes por el factor altitudinal. Importante destacar la marcada diferencia general entre la media estadística en eventos de 24 horas, y 48 horas, donde la variación es de 20 milímetros y se mantiene constante en el territorio, a diferencia de lo que acontece entre 48 y 72 horas, donde la disonancia es leve.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

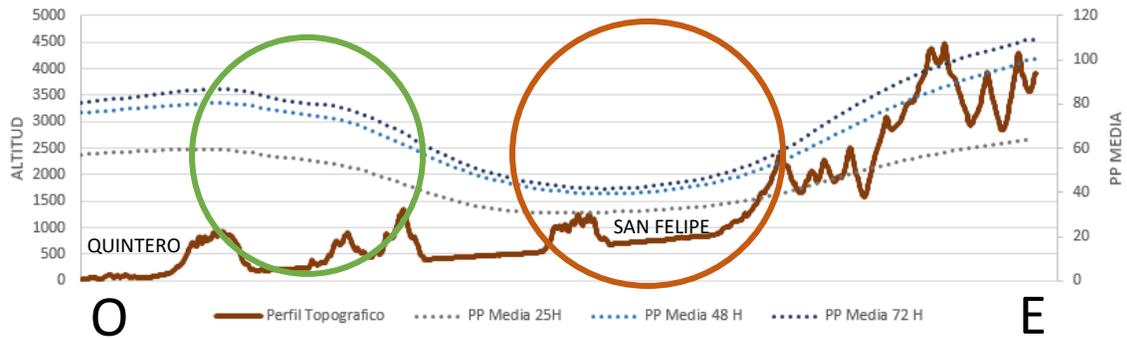


Figura N° 26: Perfil topográfico N°2. Latitud 32°46' S

Fuente: Elaboración propia

El perfil topográfico N°2, comparte similitudes con el perfil N°1, en primer lugar la unidad de relieve predominante son los valles transversales, junto con esto, ambos se encuentran en la región meridional del área de estudio. A pesar de compartir estas similitudes, la primera divergencia que resalta es el aumento del umbral del parámetro  $\mu$ , donde, si bien, hay similitudes con el perfil N°1, los valores más bajos bordean los 40 mm, los máximos alcanzan los 120 mm en algunas zonas, determinando un aumento de  $\mu$  en todas las variables cronológicas. Es importante destacar que el relieve en este perfil, es menos acusado y se presenta mayor desarrollo longitudinal en los valles, junto con eso, es posible evidenciar que existen variaciones importantes en la distribución del acumulado de precipitaciones por evento. Desde la costa, hasta el primer macizo, se aprecia una leve alza en la media en las tres variables cronológicas (demarcado con un círculo verde) tras esta zona, en valles, existe una disminución importante de la media e incluso, se acorta la brecha entre eventos de 24 horas y 48 horas. Nuevamente, es posible notar la escasa diferencia entre la media de eventos en 48 horas y 72 horas, (demarcado con un círculo anaranjado).

Los mayores valores alcanzados, al igual que en el primer caso, se presentan en mayores altitudes, -exactamente en la cordillera de Los Andes-. Recalcando el efecto de la gradiente altitudinal con el aumento de las precipitaciones.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

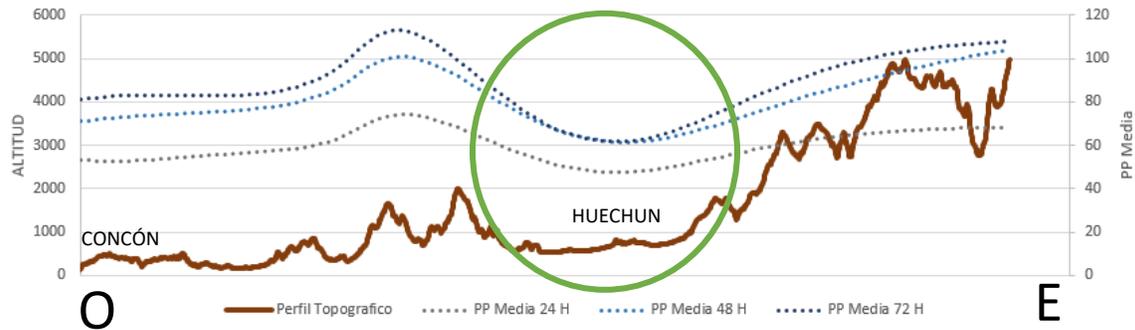


Figura N° 27: Perfil topográfico N°3. El Roble La Campana Latitud 32°56' S  
Fuente: elaboración propia

El perfil N°3, a diferencia de los dos anteriormente descritos no cuenta con predominancia de los valles transversales y el relieve es menos acusado. Sin embargo, las altitudes alcanzadas en la cordillera de la Costa bordean los 2000 metros, generando una diferencia de altitud marcada con los valles ubicados entre dicha cordillera y de Los Andes. Como se puede apreciar, los valles nuevamente marcan los valores de  $\mu$  más bajos, acortando en ellos, la diferencia entre eventos en 24 horas y 48 horas e igualando los valores en 48 y 72 horas. No obstante, los valores son mayores respecto al perfil N°2, superando los 40 milímetros, en algunas zonas. A su vez, también para el caso de eventos de 48 y 72 horas  $\mu$  es más alta respecto al perfil N°2. Un elemento que resalta es que  $\mu$ , alcanza mayor valor en las cumbres de la cordillera de la Costa respecto a la cordillera de Los Andes, como se ha visto anteriormente.

Un elemento importante, es la variación de  $\mu$  en vertientes a barlovento de ambas cadenas montañosas, donde, el aumento de las precipitaciones es abrupto en la cordillera de la Costa, -tal como muestra la gráfica- diferente es el caso de la zona occidental de la cordillera de Los Andes, en que el aumento de  $\mu$ , como se aprecia en la gráfica, es moderado y suave. Es preciso determinar que los frentes se debilitan tras el paso de barreras como la que pone la cordillera de la Costa, y se reactivan con el ascenso altitudinal, esto puede ser la causante que los macizos de la cordillera de la Costa capten los frentes con mayor humedad provenientes desde el océano, e induzcan precipitaciones más intensas.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

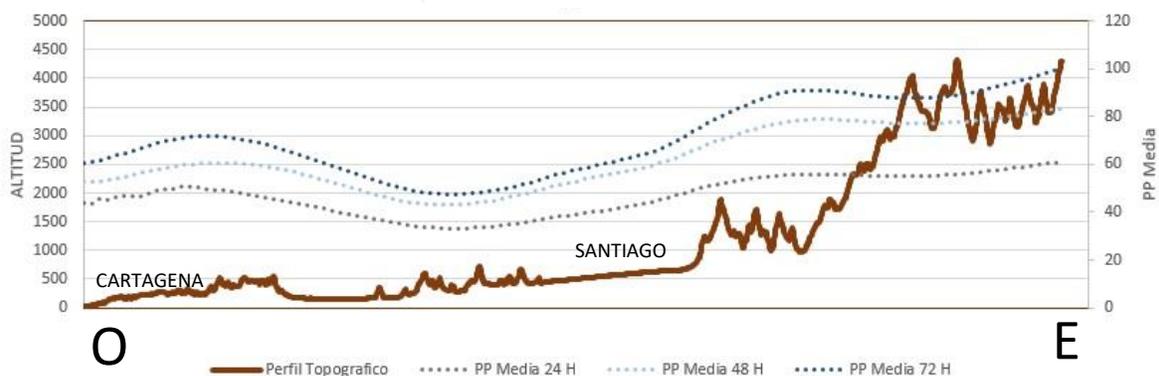


Figura N° 28: Perfil topográfico N°4. Latitud 33°31'S

Fuente: Elaboración propia

El perfil N°4, presenta unidades de relieve mayormente diferenciada, reconociendo valles, cordillera de la Costa y cordillera de Los Andes. No obstante, es preciso recalcar que, para el caso de la cordillera de la Costa, las altitudes son menores respecto al perfil N°3, el cual comparte condiciones geográficas similares. El patrón de distribución de precipitaciones es similar, destacar que este perfil, atraviesa la cuenca del río Maipo y como se aprecia en la figura N°28, en la zona oeste de la cuenca presenta uno de los valores de  $\mu$  menores para las tres variables cronológicas utilizadas. Es posible notar que los valores más bajos se encuentran precisamente en esta zona, tras la cordillera de la Costa. Además, mencionar que si bien existen convergencias con el perfil N°3, respecto a la orografía local, algunos elementos en la distribución de las precipitaciones no concuerdan entre ambos. El primero, es la atenuación de las variaciones de distribución de precipitaciones, permitiendo establecer un nexo con el relieve menos acusado en la zona, e incluso, destacar que la pendiente de los gráficos es menor respecto al gráfico N°3, donde se podía apreciar un aumento de  $\mu$  brusco en la zona de los macizos de la cordillera de la Costa y más tenue ante el ascenso de la gradiente altitudinal por efecto a la cordillera de Los Andes.

A diferencia de los perfiles anteriores, la variación entre eventos de 24,48 y 72 horas, es menor, respecto a casos anteriores entre  $\mu$  de eventos de 24 horas y 48 horas, y levemente mayor entre eventos de 48 y 72 horas. Sin embargo, la diferencia entre la media de eventos en 24 horas y 48 horas aumenta su variación en la zona cordillera de Los Andes, caso similar a lo ocurrido anteriormente. Específicamente, en esta gráfica es posible apreciar que también hay una variación mayor entre eventos de 48 horas y eventos de 72 horas, no obstante, continúa siendo mayor entre eventos de 24 horas y 48 horas, respecto a eventos de 72 horas.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

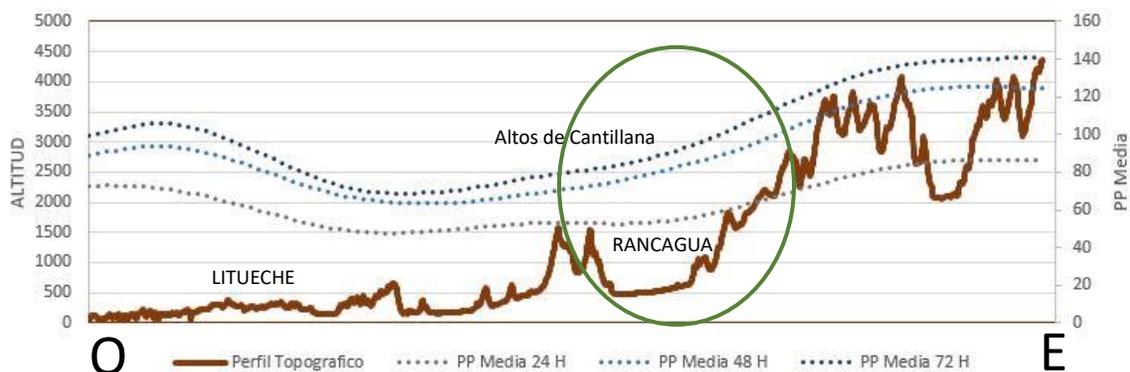


Figura N° 29: Perfil topográfico N°5. Latitud 34°06'S

Fuente: Elaboración propia

El perfil N°5, cuenta con elementos particulares que diferencia su análisis. En este, la cordillera de la Costa presenta un relieve más uniforme y con menos variaciones altitudinales, hasta los “Altos de Cantillana”, donde en el perfil se puede identificar nuevamente el relieve acusado. Si bien, a pesar de esta descripción, se encuentran algunos elementos disonantes respecto a gráficos anteriores, ya que, la distribución de  $\mu$  por eventos, para todas las escalas cronológicas, no presenta mayores variaciones al encontrarse con un macizo, como si ocurre en el gráfico N° 3, y si bien, la altitud de este es considerable, el impacto en los eventos no es drástico, los mayores valores para esta área se encuentran en la costa, descienden hacia el interior. Para eventos en 48 y 72 horas hay un paulatino ascenso de los valores desde el macizo de “Altos de Cantillana” (demarcado con círculo verde), en este sentido, la línea relacionada a eventos de 24 horas no presenta grandes variaciones a lo largo del perfil, incluso, desde la costa, hasta la cordillera de Los Andes.

Finalmente, algo a destacar es que, en este gráfico como en anteriores, hay un patrón espacial de disminución de  $\mu$  hacia el interior, decreciendo desde la costa y nuevamente un aumento hacia la cordillera, incluso en esta zona, donde, la cordillera de la Costa es más baja y las mayores cumbres se encuentran cercanas a la cordillera de Los Andes.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

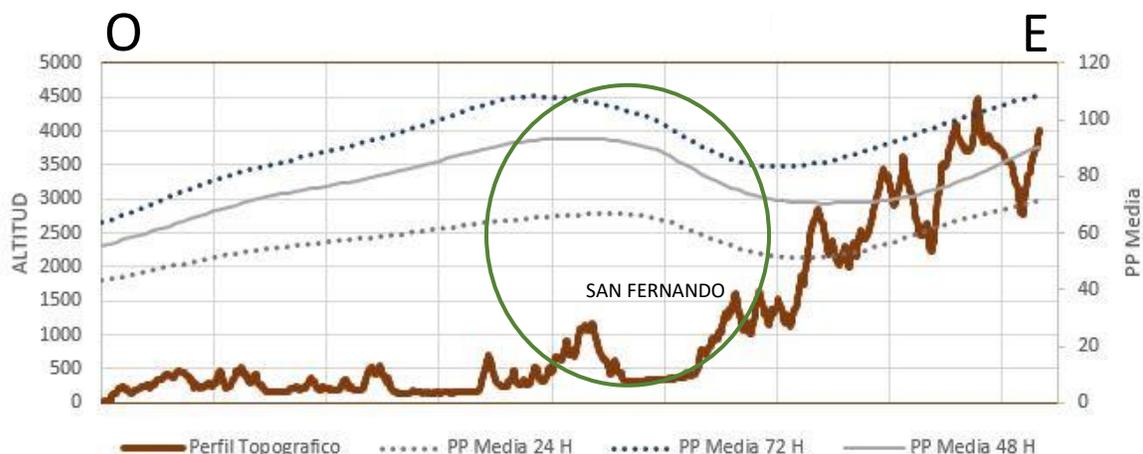


Figura N° 30: Perfil topográfico N°5. Latitud 34°33' S  
Fuente: Elaboración propia

El perfil N°6, corresponde al más austral del área de estudio y como se puede ver a simple vista, las líneas poseen una distribución diferente al resto, aquí, desde la costa hacia el interior, las precipitaciones aumentan. Sin embargo, en concordancia con el aumento del relieve, como se puede apreciar, sobre el macizo ubicado en el centro del perfil,  $\mu$  es mayor (demarcado con un círculo verde), nuevamente disminuyendo en el valle a continuación y ascendiendo conjunto con el aumento de altitud de la cordillera principal. Respecto al comportamiento de eventos por variable cronológica, nuevamente, tal y como sucedió en otros perfiles, la variable de 24 horas es considerablemente menor y poco fluctuante, sobre la media de eventos en 48 y 72 horas, es posible apreciar que la diferencia de valores entre ellas no es tan marcada como entre 24 y 48 horas, pero es mayor que en otros casos.

Un elemento particular se presenta en la costa, ya que, no hay mayor diferencia de valores entre  $\mu$  de 24 y de 48 horas, no así, al interior, donde la variación es más acentuada. Cabe destacar, que si bien, este es el perfil más austral y en relación a la información climatológica, el monto de precipitaciones acumulado anual, es mayor, los eventos de precipitación máxima son más tenues respecto a otras zonas, sobre todo en aquellas con relieve más acusado. Según se aprecia en las cartografías y perfiles asociados a  $\mu$ .

### 4.2 Parámetro de alfa (Desviación típica)

Con el fin de realizar un análisis exhaustivo de la información, a continuación, mediante el parámetro  $\alpha$ , se puede conocer la distribución de los datos, no solo respecto a medidas de tendencia central, sino que, a su comportamiento en dicha distribución, respecto a la dispersión de la población. Así, es posible conocer aquellas zonas que presentan mayores variaciones respecto a la media, mostrando una tendencia significativa a ser afectada por eventos extremos. La escala de análisis se remite nuevamente a escala cronológica, de 24, 48 y 72 horas y debido al tamaño reducido del área de estudio es posible establecer relaciones.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Tabla N° 6: Parámetro  $\alpha$  por estación  
Fuente: elaboración propia

N°	Estación	24h	48h	72h
1	Chalaco	13,7	23,8	26,8
2	El Sobrante	12,1	19,6	22,6
3	El Trapiche	15,3	23,2	25,9
4	El Salvador	24,0	33,6	43,0
5	Las Colmenas	18,6	26,4	32,8
6	Alicahue	14,0	26,8	30,4
7	Longotoma	14,0	26,8	30,4
8	La Mostaza	22,2	35,0	42,5
9	Valle Hermoso	17,1	28,9	34,6
10	Las Puertas	24,6	36,4	45,5
11	Resguardo Los Patos	17,8	30,2	35,7
12	Las Pataguas	29,8	45,2	58,2
13	Catemu	15,3	23,6	29,6
14	San Felipe	14,2	24,4	27,8
15	Lo Rojas	23,0	36,6	48,4
16	Estero Rabuco	20,0	31,2	40,1
17	Vilcuya	14,3	26,1	31,3
18	Quillota	16,9	27,1	35,0
19	Riecillos	27,9	44,3	54,8
20	Quinta Normal	15,8	22,1	30,3
21	Pudahuel	21,4	30,8	41,2
22	Tobalaba	24,7	35,2	45,6
23	Los Aromos	22,2	31,3	41,4
24	Rungue Embalse	23,8	41,6	53,1
25	Rodelillo	26,8	33,6	36,2
26	Lliu-Lliu Embalse	31,8	52,6	68,8
27	Colliguay	29,9	49,5	63,4
28	Cerro Calan	25,5	32,8	43,2
29	Los Panguiles	18,3	26,5	34,4
30	Oficinas Dga	15,9	21,8	29,9
31	Antupirén	23,6	32,9	42,1
32	San Antonio	17,8	24,2	28,0
33	Cerrillos De Leyda	18,5	27,3	31,4
34	San José De Maipo	20,8	69,1	44,3
35	El Yeso Embalse	34,1	56,6	70,9
36	Melipilla	16,3	26,6	34,0
37	Carmen De Las Rosas	16,9	27,6	34,3
38	San Gabriel	18,1	32,9	43,8
39	Las Melosas	35,9	49,0	61,3
40	Villa Alhue	23,0	35,6	39,8
41	Litueche	27,1	38,9	45,8
42	Cocalan	16,8	22,6	27,1
43	Pichidegua	20,7	28,0	31,1

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

44	Coltauco	38,9	53,8	60,5
45	Pichilemu	18,7	25,4	26,7
46	Rengo	15,5	26,2	30,7
47	Millahue	31,8	44,9	50,7
48	Ñlahue Barahona	14,7	22,0	27,0
49	San Fernando	26,0	44,1	51,6
50	Convento Viejo	17,8	30,4	35,2
51	La Candelaria	25,7	38,3	47,1
52	El Membrillo	19,0	26,3	31,9
53	Ranguili	16,6	25,9	88,0

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

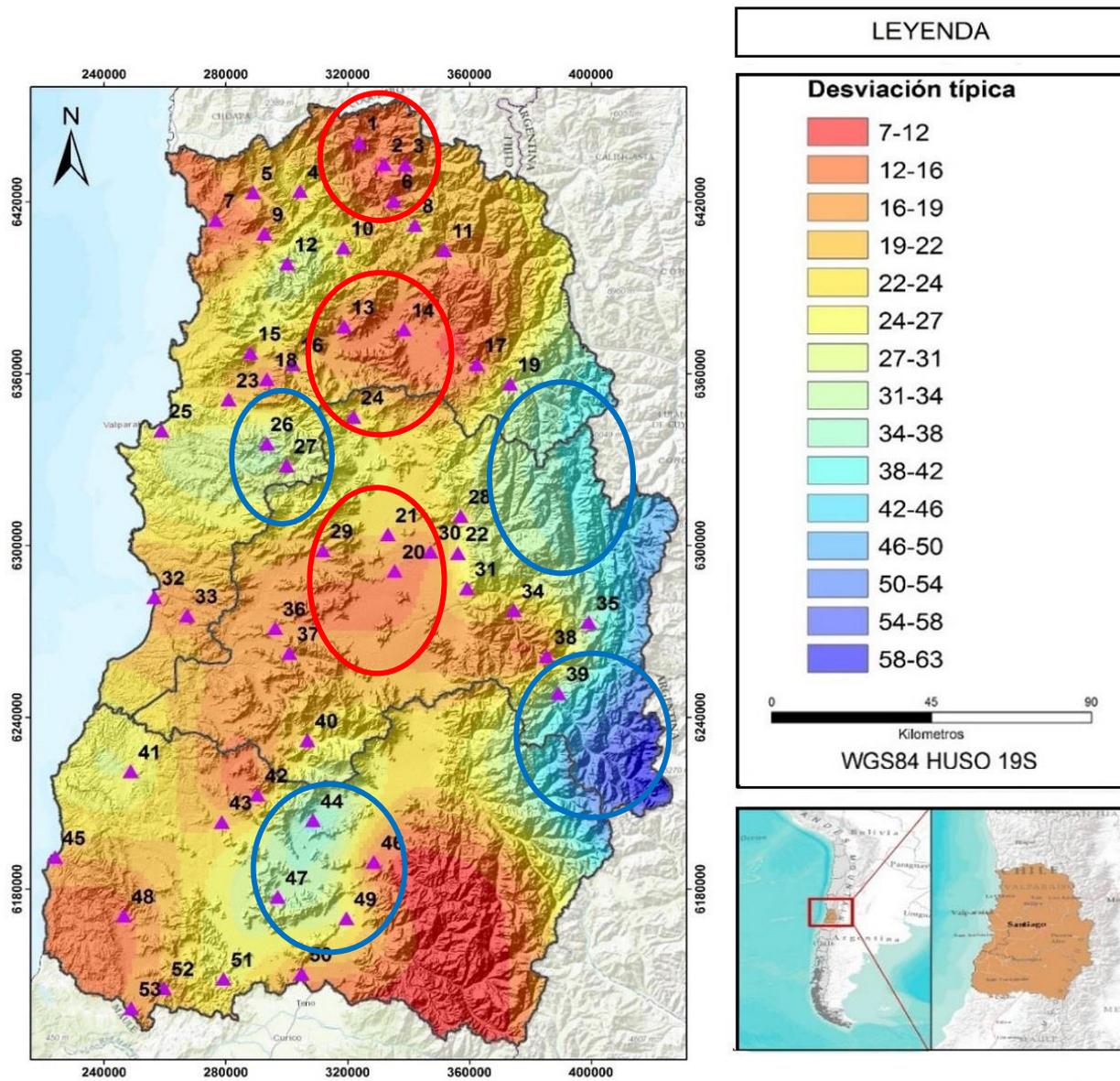


Figura N° 31: Parámetro  $\alpha$  eventos de precipitación máxima en 24 horas

Fuente: Elaboración propia

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Si bien el análisis estadístico es diferente, es posible establecer una relación relativa entre los resultados obtenidos respecto a la media estadística ( $\mu$ ) y la desviación típica ( $\alpha$ ). Como se aprecia en las figuras asociadas a  $\mu$ , - específicamente, para  $\mu$  en 24 y 48 horas- (Figuras N° 23 y 24), las zonas donde se aprecian los menores valores de  $\mu$ , coinciden con aquellos donde  $\alpha$  es menor; esto se da en valles y áreas rodeadas por relieve acusado, por ende, aquí se presentarían eventos con una menor cantidad de precipitaciones acumuladas y cercana a los rangos medios. Si se comparan los resultados de  $\alpha$  con los resultados de los perfiles topográficos, en algunos casos, precisamente aquellos perfiles que pasan por las zonas con menor valor de  $\mu$ , (perfil topográfico N°1, 2 y 3), es posible evidenciar aún más, la fuerte relación existente entre lugares con valores menores de  $\mu$  y  $\alpha$ , todos estos, ubicados en valles interiores.

Es preciso mencionar que el parámetro  $\alpha$ , no solo mide el alejamiento de datos por sobre la media, sino que también menores a la misma, por ende, zonas de mayor altitud pueden tener recurrencia a eventos más intensos, así como, más débiles, por esto, también es posible vislumbrar que las precipitaciones son más constantes, respecto a valles y vertientes ubicadas a sotavento.

Entre las figuras N° 31 y 32, el parámetro  $\alpha$ , para las cumbres, es mayor en eventos de 48 horas (figura N°32), excediendo de manera importante al mismo parámetro en 24 horas. Ejemplo de esto, lo muestra la estación N°39, donde para la primera figura (N°31) el valor de  $\alpha$  es 35,9 y para la segunda figura (N°32)  $\alpha$  es de 49, determinando una importante variación. Caso contrario, aquellas estaciones con menores valores de  $\alpha$  (principalmente ubicada en valles) no tienen variaciones mayores: ejemplo de esto, es la estación N°2, en la cual para parámetro  $\alpha$  asociado a 24 horas, el valor es de 12,1 y en el caso de  $\alpha$  de 48 horas, el valor es de 19,6, diferencia bastante acortada en relación con el caso de la estación N°39. Solo en la cuenca del río Maipo,  $\alpha$  presenta variaciones más drásticas entre 24 y 48 horas. Otra particularidad entre escalas horarias es que, si bien los valores de  $\alpha$  son más altos en un punto específico de la cordillera de la Costa, (estaciones N°26 y 27) a nivel general, la tendencia muestra que, la cordillera de los Andes tiene un parámetro  $\alpha$  más elevado.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

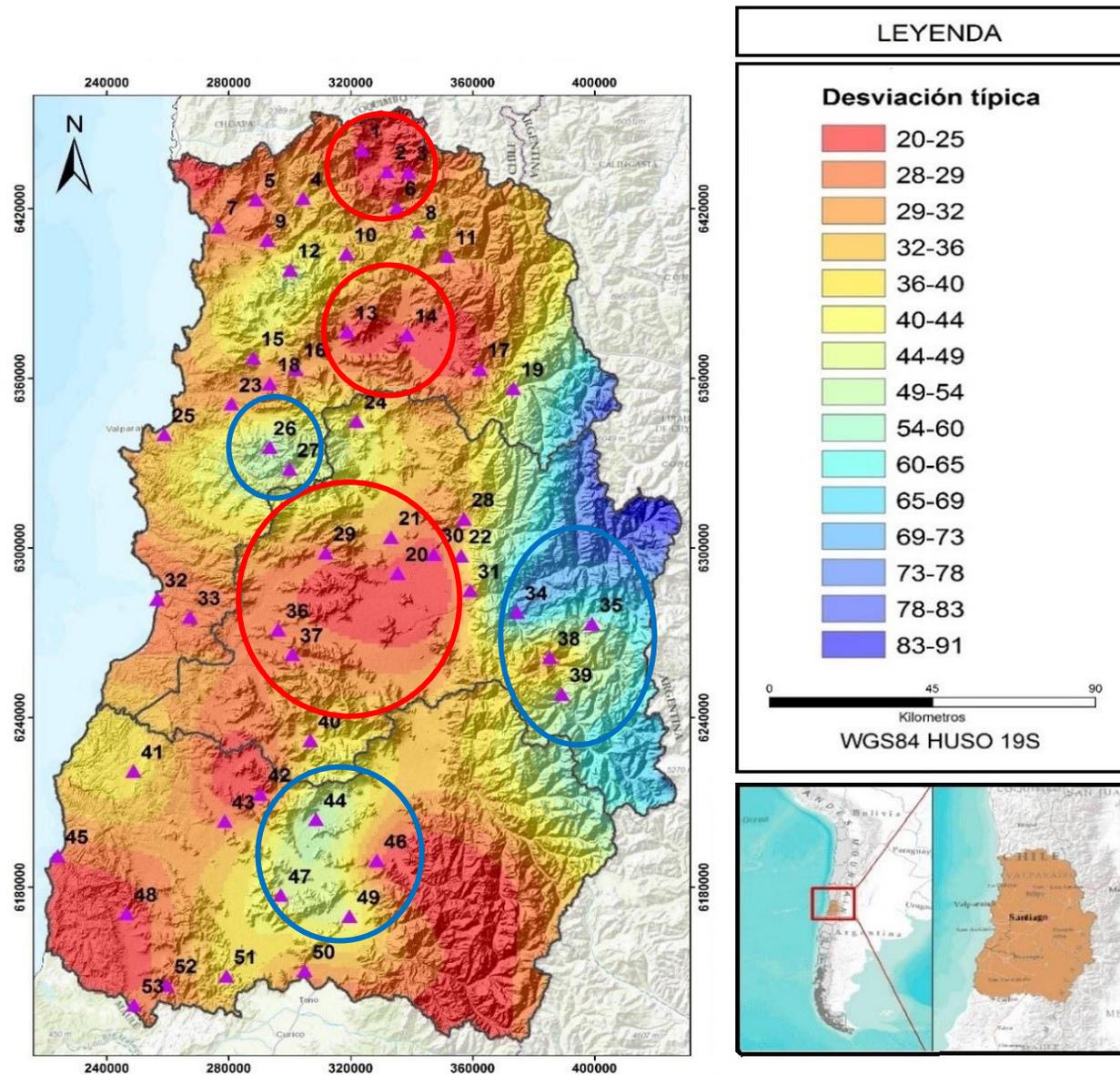


Figura N° 32: Parámetro  $\alpha$  eventos de precipitación máxima en 48 horas

Fuente: Elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

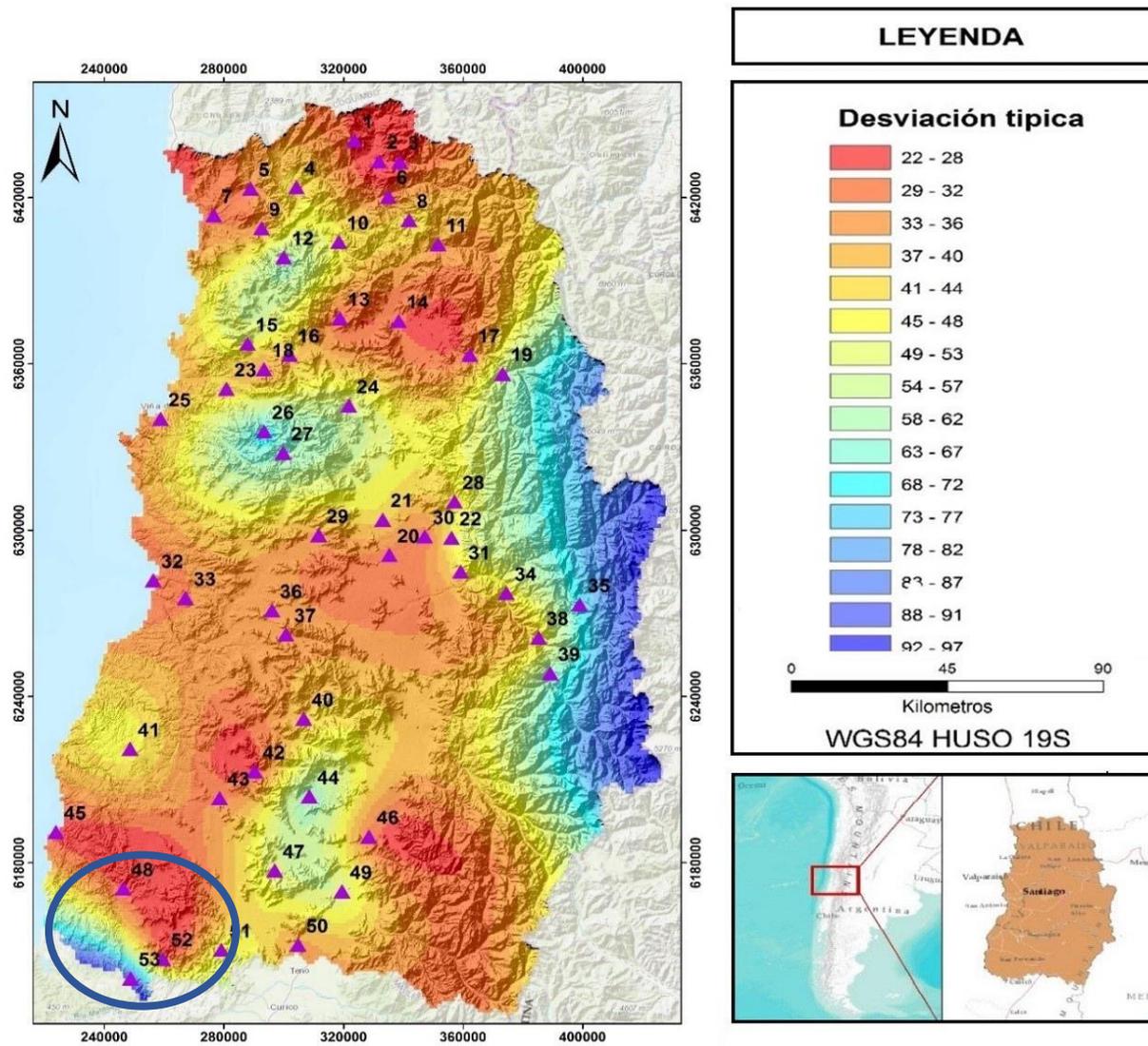


Figura N° 33: Parámetro  $\alpha$  eventos de precipitación máxima en 72 horas  
Fuente: Elaboración propia

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Respecto al análisis de  $\alpha$  para la figura asociada a eventos en 72 horas, esta, presenta leves diferencias con las anteriores. Si bien, desde una perspectiva visual, estos no son evidentes, tomando como ejemplo algunas estaciones, en este caso, la N°26 y N°39 (ubicadas ambas en cumbres),  $\alpha$  varía fuertemente, donde, en la primera estación mencionada,  $\alpha$  en 48 horas, marca un valor de 52,6 y para 72 horas 68,8 (muy por encima de lo observado entre  $\alpha$  para 24 y 48 horas). La diferencia es aún más fuerte en la estación N°39 donde  $\alpha$  para 48 horas tiene un valor de 49,05 y 66,2 en 72 horas. Estas considerables diferencias, tal como se mencionó anteriormente, confirman que en altas cumbres eventos de precipitación máxima poseen mayor variación, saliendo del promedio más constantemente, intensificándose en eventos de 72 horas en relación con 24 y 48 horas. Mas, se hizo referencia a dos estaciones ubicadas cercanas a cumbres y a barlovento, pero, en valles y lugares a sotavento, las variaciones para  $\alpha$  son más acotadas. Ejemplo de esto, son las estaciones N°14 y N°20, donde, no hay un mayor contraste si se compara con las estaciones N°26 y 39, pero, respecto al comportamiento de  $\alpha$  en 24 y 48 horas, para 72 horas es más grande (ver tabla N°6). Por ende, se establece como una constante, que eventos de 72 horas independiente del relieve, poseen mayor variación de parámetro  $\alpha$  respecto a  $\mu$ , concluyendo de esta manera que en esta escala cronológico los eventos son más fluctuantes respecto a la intensidad.

Un elemento importante que diferencia  $\alpha$  para eventos de 72 horas, respecto a las otras variables cronológicas, se aprecia a simple vista en la figura N° 33, donde las áreas de influencia abarcan un espectro más amplio, principalmente, en aquellas zonas donde los valores de  $\alpha$  son más altos, como en cumbres y cordilleras, no siendo tan notorio en valles. Sin embargo, al sur de la región de O'Higgins, se ve una variación considerable, ya que, en el área que rodea la estación N°53, (remarcada con círculo azul) la variable estadística en cuestión avanza ampliamente a diferencia de cómo se comportó en variables cronológicas anteriores, determinando para esta área mayor variación en la intensidad de eventos para 72 horas.

A partir de lo analizado, es posible afirmar que la intensidad de los frentes es mayormente variable para eventos de 72 horas y esto se acentúa en altas cumbres, y relativamente en áreas a sotavento, respecto a eventos de 24 y 48 horas.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Las variables estadísticas analizadas y su importancia para establecer relaciones entre la orografía, e influencia en la distribución de las precipitaciones, a continuación, se verá comparada con datos del mayor evento pluviométrico en la zona. De este modo, relacionar información estadística con datos concretos, con el fin de validar lo postulado. Para esto, se utilizaron algunos de los perfiles topográficos, mostrados anteriormente y las mismas escalas cronológicas.

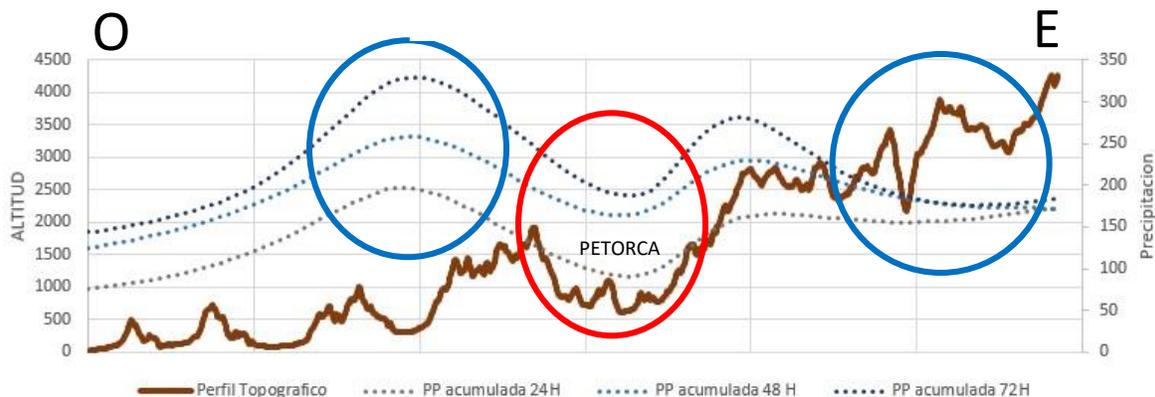


Figura N° 34: Perfil topográfico N°1 y distribución de mayor evento pluviométrico

Fuente: elaboración propia

Para el perfil N°1, es posible ver que, los eventos pluviométricos mayores para cada escala cronológica no están distribuidos tan uniformemente en relación con el parámetro  $\mu$ . Si bien, las zonas con mayores valores de  $\mu$ , coinciden con los valores más altos mostrados en este perfil, aquí, son más acentuado, tanto para cumbres (demarcado con círculo azul), como para valles, en las tres escalas cronológicas.

Respecto a las peculiaridades en la distribución de los eventos extremos, esta confirmaría lo mencionado anteriormente, ya que, su avance desde la costa hacia el interior, aumentan su intensidad producto del ascenso adiabático, al encontrarse con la cordillera de la Costa, incluso en esta zona, donde predominan valles transversales. Sumado a esto, también se puede apreciar que, tal como muestran las curvas, en las mayores cumbres de la cordillera Los Andes, hay una disminución de la cantidad acumulada por evento máximo, esto se puede atribuir a dos fenómenos. El primero, asociado a la disipación de los frentes al llegar a las cúspides, por el “adelgazamiento” de la cobertura nubosa, tal como propone Garreaud (2005). El otro factor corresponde al debilitamiento de los frentes, tras el paso de los valles. Importante destacar que, en las cumbres mayores, la precipitación es de tipo sólido, por ende, también puede que los instrumentos subestimen la cantidad de precipitación recibida.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

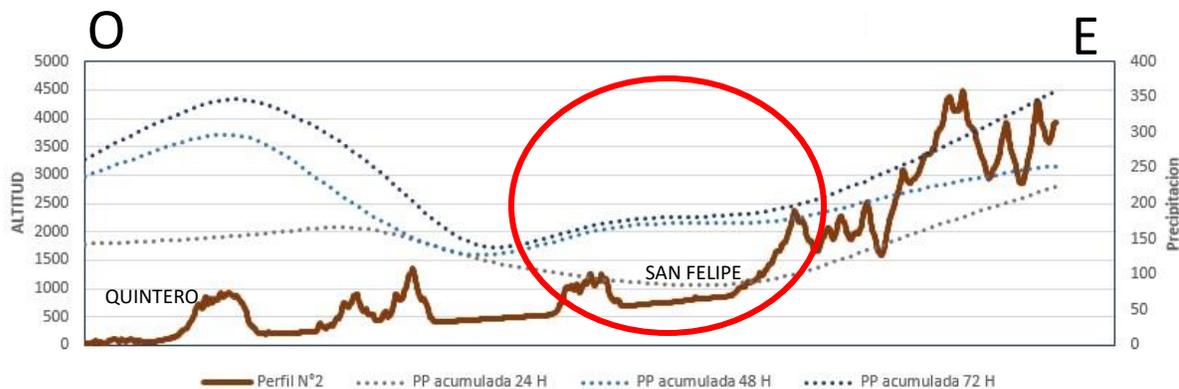


Figura N° 35: Perfil topográfico N°2 y distribución de mayor evento pluviométrico  
Fuente: elaboración propia

Respecto al Perfil N°2, es posible diferenciar tres grandes particularidades. La primera, es que la distribución vista en el perfil N°2, para el parámetro  $\mu$ , respecto a curvas de 48 y 72 horas, tienen un aumento en la intensidad relativo al ascenso orográfico de la cordillera de Los Andes, levemente diferente a lo observado en esta figura (N°35), donde, hay un aumento de la intensidad al interior del valle del Aconcagua, la cual fluctúa suavemente y finalmente, aumenta la intensidad de manera tenue. En segundo lugar, a diferencia de la distribución del parámetro  $\mu$ , en el perfil en cuestión. Se puede apreciar que el aumento de las precipitaciones no es tan acusado desde el ingreso del frente al continente hasta llegar a la cordillera de la Costa. No obstante, el descenso es brusco al llegar a los valles.

Finalmente, el máximo evento para 24 horas presenta grandes variaciones respecto al comportamiento de los eventos extremos en las otras dos escalas horarias (48 y 72 horas), el cual, solo se asemeja a las otras curvas, en la cordillera de Los Andes.



Figura N° 36: Perfil topográfico N°3 y distribución de mayor evento pluviométrico  
Fuente: elaboración propia

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

El perfil N°3, atraviesa las mayores altitudes de la cordillera de la Costa en la zona central. Este, cuenta con la particularidad que el parámetro  $\mu$ , presenta los mayores valores generales, para las tres escalas horarias. No obstante, el comportamiento, de los eventos máximos, tiene algunas diferencias respecto a  $\mu$ , donde, para el evento de 24 horas, la variación es menor. Disímil a los eventos de 48 y 72 horas, donde, sí hay un fuerte aumento de las curvas, sobre la cordillera de la Costa, concordando –relativamente- con lo observado en  $\mu$ . Importante agregar que, como ya ha sido una constante, los eventos en 48 y 72 horas son similares y tienen una marcada diferencia con eventos de 24 horas, incluso en el parámetro  $\mu$ .

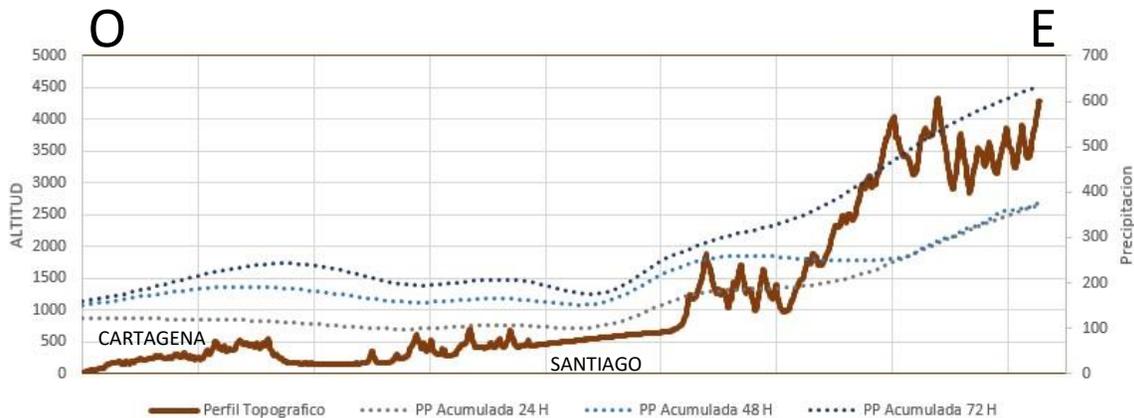


Figura N° 37: Perfil topográfico N°4 y distribución de mayor evento pluviométrico

Fuente: elaboración propia

Respecto al perfil N°4, esta atraviesa la zona donde se encuentra la ciudad de Santiago, y, tal como se aprecia, hay mayor similitud entre los valores de las curvas. Concordando con la disminución de la diferencia de altitudes en el relieve. Sin embargo, la variación de la distribución del frente respecto al parámetro  $\mu$ , es menor en contraste con lo visto en otros perfiles. Solo que, para el parámetro  $\mu$ , en el perfil N°4 tiene valores levemente más extremos.

Resumiendo, los resultados obtenidos, para este punto, es posible identificar algunos elementos comunes, entre el parámetro  $\mu$  y eventos máximos en cada escala cronológica. Los cuales también alcanzan cierta similitud con el parámetro  $\alpha$ . El primer elemento común, es la relación entre intensidad, parámetro  $\mu$  y altas cumbres. Donde, los valores máximos para los datos numéricos en cada escala cronológica, son más elevados, respecto al territorio. Solo que el parámetro  $\mu$ , en la mayor parte de los casos, tiende a entregar valores más extremos que los datos de eventos máximos. A lo anterior, se suma otra concordancia entre variables, y, ésta corresponde a la diferencia marcada entre eventos de 24 y 48 horas, junto con, la similitud entre eventos de 48 y 72 horas. Lo que lleva a inferir que entre 24 y 48 horas en general los eventos de precipitación máxima se fortalecen y tienen a disminuir hacia 72 horas, bajando la intensidad. Por último, se hace notoria la relación entre zonas con relieve acusado y mayor variabilidad de las precipitaciones, respecto a zonas, con orografía más “uniforme”, donde eventos extremos, tienen menores variación de intensidad y distribución.

### 4.3 Periodo de retorno y mayores eventos registrados

Considerando que fenómenos de precipitación máxima, son generadores de otros procesos. Distintos autores clasifican a los umbrales críticos de precipitación, apuntando generalmente a la capacidad de generación de remoción en masa. Es así como, para el área de estudio, Hausser (1997) en Elmes (2016), determina que el umbral máximo de precipitaciones para la región Metropolitana corresponde a 60 mm en 24 horas. No obstante, la variación cronológica de un evento también puede agravar los efectos ya percibidos, por precipitaciones intensas, sobrepasando los umbrales establecidos. Por lo anterior, a partir de los datos obtenidos de cada estación, y, con base en elementos estadísticos, ya expuestos, se calcularon periodos de retorno, para cada escala cronológica presente en esta investigación (24,48 y 72) y para periodos de retorno de eventos de 10,50 y 100 años.

A continuación, las siguientes tablas contienen el umbral de precipitación acumulada, para cada periodo de retorno por estación:

Tabla N° 7: Umbral por estación, periodo de retorno por estación, 10 años.  
Fuente: Elaboración propia.

Estación	Umbral P. retorno 24h	Umbral P. retorno 48h	Umbral P. Retorno 72h
Chalaco	62,95	85,59	95,16
El Sobrante Hacienda	56,28	76,19	84,60
El Trapiche	67,95	93,24	103,93
El Salvador	88,04	127,62	144,35
Las Colmenas	77,60	108,24	121,19
Alicahue	68,48	91,58	101,35
Longotoma	68,48	91,58	101,35
La Mostaza	95,54	132,22	147,73
Valle Hermoso	74,37	102,60	114,53
Las Puertas	89,24	129,87	147,05
Resguardo Los Patos	78,06	107,44	119,85
Las Pataguas	108,49	157,69	178,49
Catemu	67,10	92,39	103,08
San Felipe	61,96	85,37	95,27
Lo Rojas	108,43	146,41	162,46
Estero Rabuco	96,50	129,57	143,55
Vilcuya	73,73	97,43	107,45
Quillota	76,70	104,65	116,46
Riecillos	120,77	166,82	186,28
Quinta Normal	72,05	98,20	109,26
Pudahuel	80,37	115,75	130,71
Tobalaba	94,26	135,12	152,40
Los Aromos	100,11	136,77	152,27
Rungue Embalse	100,96	140,21	156,80
Rodelillo	112,40	156,71	175,44
Lliu-Lliu Embalse	131,59	184,10	206,31
Colliguay	151,15	200,53	221,41

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Estación	Umbral P. retorno 24h	Umbral P. retorno 48h	Umbral P. Retorno 72h
Cerro Calan	151,15	151,71	169,51
Los Panguiles	109,63	108,45	121,26
Oficinas Dga	78,15	98,92	110,02
Antupirén	104,63	143,64	160,13
San Antonio (Pta, Panul)	98,95	128,28	140,68
Cerrillos De Leyda	89,95	120,49	133,41
San José De Maipo Reten	104,89	139,17	153,66
El Yeso Embalse	132,81	189,18	213,01
Melipilla	76,33	103,32	114,74
Carmen De Las Rosas	86,82	114,71	126,51
San Gabriel	100,41	130,38	143,04
Las Melosas	155,62	214,96	240,04
Villa Alhue	101,53	139,43	155,46
Litueche	132,72	177,55	196,51
Cocalan	83,67	111,42	123,15
Pichidegua	95,73	129,95	144,42
Coltauco	149,79	214,05	241,22
Pichilemu	81,41	118,37	131,41
Rengo	136,23	107,07	117,92
Millahue	136,23	188,69	210,87
Nilahue Barahona	86,28	110,61	120,89
San Fernando	125,12	168,14	186,33
Convento Viejo	98,95	128,28	140,68
La Candelaria	123,69	166,07	183,99
El Membrillo	98,62	129,97	143,22
Ranguili	91,55	119,02	130,63

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Tabla N° 8: Umbral por estación, periodo de retorno, 50 años.  
Fuente: Elaboración propia.

Estación	Umbral P. retorno 24h	Umbral P. retorno 48h	Umbral P. retorno 72h
Chalaco	95,60	134,86	151,45
El Sobrante Hacienda	80,43	112,81	126,50
El Trapiche	94,45	132,69	148,86
El Salvador	121,31	176,79	200,24
Las Colmenas	104,48	148,11	166,56
Alicahue	108,32	152,53	171,22
Longotoma	108,32	152,53	171,22
La Mostaza	139,35	197,12	221,54
Valle Hermoso	111,41	159,21	179,41
Las Puertas	128,19	188,36	213,80
Resguardo Los Patos	120,33	170,18	191,26
Las Pataguas	159,58	234,29	265,88
Catemu	100,20	139,25	155,75
San Felipe	93,05	133,40	150,47
Lo Rojas	158,91	219,37	244,92
Estero Rabuco	140,51	192,06	213,85
Vilcuya	114,53	157,63	175,85
Quillota	112,11	156,92	175,86
Riecillos	182,40	255,51	286,43
Quinta Normal	98,75	135,29	150,73
Pudahuel	110,69	161,55	183,05
Tobalaba	129,10	187,17	211,72
Los Aromos	134,89	186,52	208,34
Rungue Embalse	156,81	225,48	254,51
Rodelillo	148,88	204,36	370,72
Lliu-Lliu Embalse	201,01	287,96	324,71
Colliguay	225,56	307,33	341,90
Cerro Calan	142,02	196,20	219,10
Los Panguiles	106,93	150,70	169,20
Oficinas Dga	97,90	133,83	149,02
Antupirén	143,15	197,52	220,50
San Antonio (Pta, Panul)	107,27	147,31	266,77
Cerrillos De Leyda	125,92	171,06	190,14
San José De Maipo Reten	238,89	352,98	401,21
El Yeso Embalse	206,48	299,94	339,45
Melipilla	112,07	155,95	174,50
Carmen De Las Rosas	128,68	174,24	193,50
San Gabriel	158,39	212,76	235,74
Las Melosas	216,67	297,67	331,91
Villa Alhue	144,01	202,83	227,69
Litueche	184,75	249,05	276,24
Cocalan	112,34	149,70	165,49
Pichidegua	128,08	174,39	193,96
Coltauco	205,72	294,55	332,11

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Estación	Umbral P. retorno 24h	Umbral P. retorno 48h	Umbral P. retorno 72h
Pichilemu	116,31	158,29	176,04
Rengo	123,15	166,44	184,74
Millahue	193,12	267,32	298,69
Ñlahue Barahona	119,87	156,28	171,67
San Fernando	190,02	262,84	293,62
Convento Viejo	148,66	198,83	220,04
La Candelaria	178,45	241,68	268,41
El Membrillo	133,93	177,32	195,66
Ranguili	130,03	172,81	190,90

Tabla N° 9: Umbral por estación, periodo de retorno 100 años.  
Fuente: Elaboración propia.

Estación	Umbral P. retorno 24h	Umbral P. retorno 48 h	Umbral P. retorno 72h
Chalaco	105,18	149,49	168,22
El Sobrante Hacienda	89,92	127,23	143,00
El Trapiche	103,65	146,36	164,42
El Salvador	146,60	217,64	247,67
Las Colmenas	123,73	177,90	200,80
Alicahue	119,30	169,46	190,66
Longotoma	119,30	169,46	190,66
La Mostaza	159,97	230,17	259,85
Valle Hermoso	127,67	184,76	208,90
Las Puertas	152,22	227,32	259,07
Resguardo Los Patos	137,55	196,43	221,32
Las Pataguas	193,69	289,79	330,41
Catemu	117,50	166,35	187,00
San Felipe	103,45	149,30	168,68
Lo Rojas	191,93	271,79	305,55
Estero Rabuco	166,95	233,18	261,18
Vilcuya	131,22	182,96	204,83
Quillota	135,46	193,20	217,61
Riecillos	216,10	306,63	344,90
Quinta Normal	121,29	171,26	192,39
Pudahuel	136,73	204,74	233,49
Tobalaba	157,22	232,48	264,30
Los Aromos	164,23	232,66	261,59
Rungue Embalse	188,57	276,25	313,31
Rodelillo	165,11	224,93	250,21
Lliu-Lliu Embalse	247,38	361,02	409,06
Colliguay	267,25	371,92	416,18
Cerro Calan	171,54	242,97	273,16
Los Panguiles	129,23	185,98	209,97
Oficinas Dga	121,05	170,41	191,27
Antupirén	172,89	242,48	271,90

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Estación	Umbral P. retorno 24h	Umbral P. retorno 48 h	Umbral P. retorno 72h
San Antonio	123,42	169,75	189,33
Cerrillos De Leyda	145,38	197,16	219,05
San José De Maipo	195,47	268,63	299,56
El Yeso Embalse	249,63	366,70	416,19
Melipilla	133,36	189,44	213,16
Carmen De Las Rosas	151,76	208,40	232,35
San Gabriel	193,76	266,03	296,58
Las Melosas	260,37	361,57	404,35
Villa Alhue	160,04	225,78	253,57
Litueche	215,36	290,96	322,91
Cocalan	129,06	173,76	192,66
Pichidegua	143,42	194,81	216,54
Coltauco	230,31	330,15	372,36
Pichilemu	128,50	172,65	191,31
Rengo	142,27	193,00	214,45
Millahue	222,08	305,88	341,30
Nilahue Barahona	140,48	185,00	203,82
San Fernando	217,23	302,38	338,38
Convento Viejo	170,54	228,65	253,22
La Candelaria	211,96	289,78	322,68
El Membrillo	159,84	212,56	234,85
Ranguili	281,15	426,51	487,96

A continuación, para realizar una evaluación que considere la distribución territorial, se optó por graficar la información aportada por las estaciones –mediante herramientas de interpolación- generando cartografía, las cuales, espacializan los periodos de retorno, con el fin de establecer relaciones entre dicha distribución y orografía.

Periodo de retorno precipitaciones maximas en 24 horas (10 años)

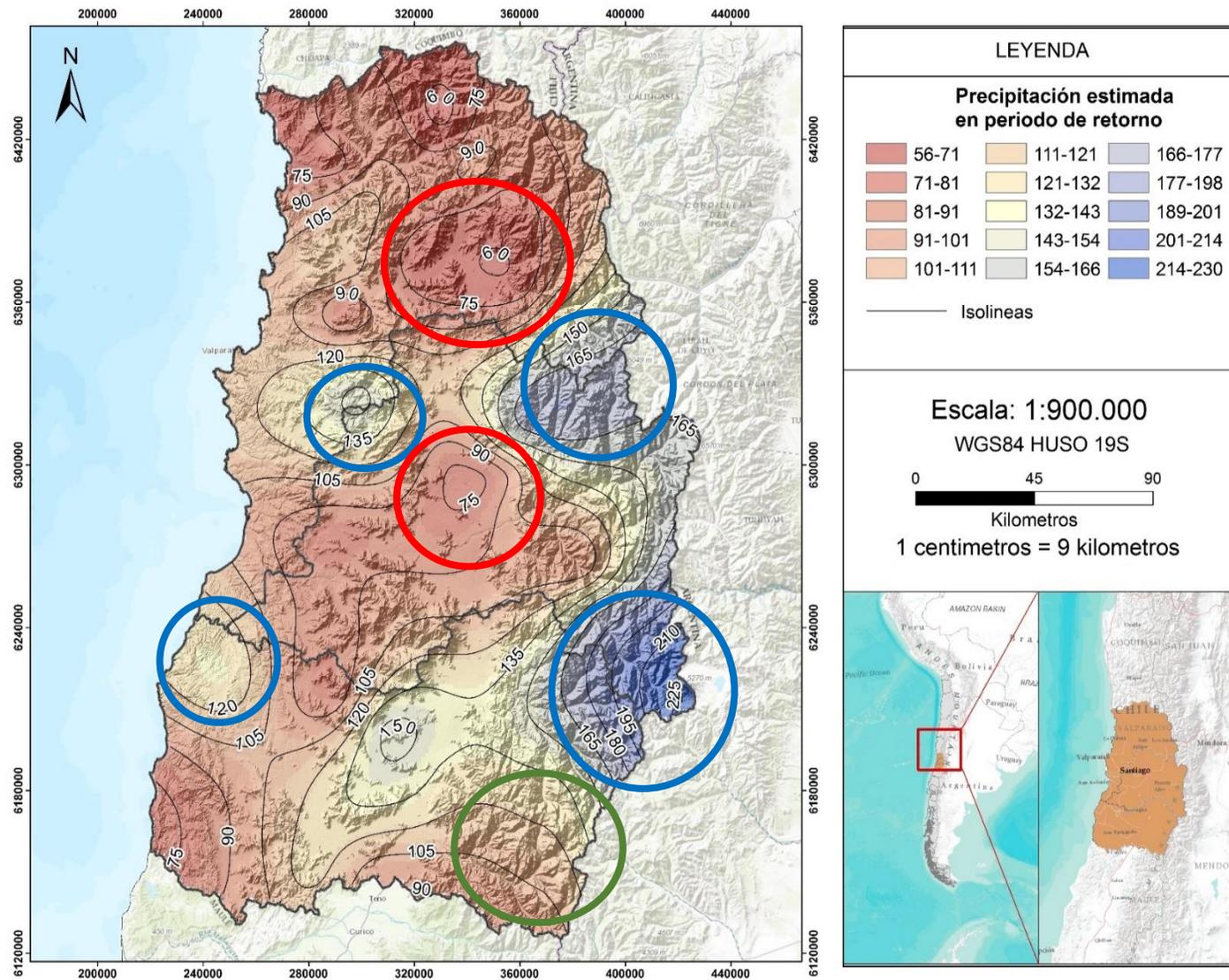


Figura N° 38: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima en 24 horas (10 años)

Fuente: Elaboración propia

Periodo de retorno precipitaciones máximas en 24 horas (50 años)

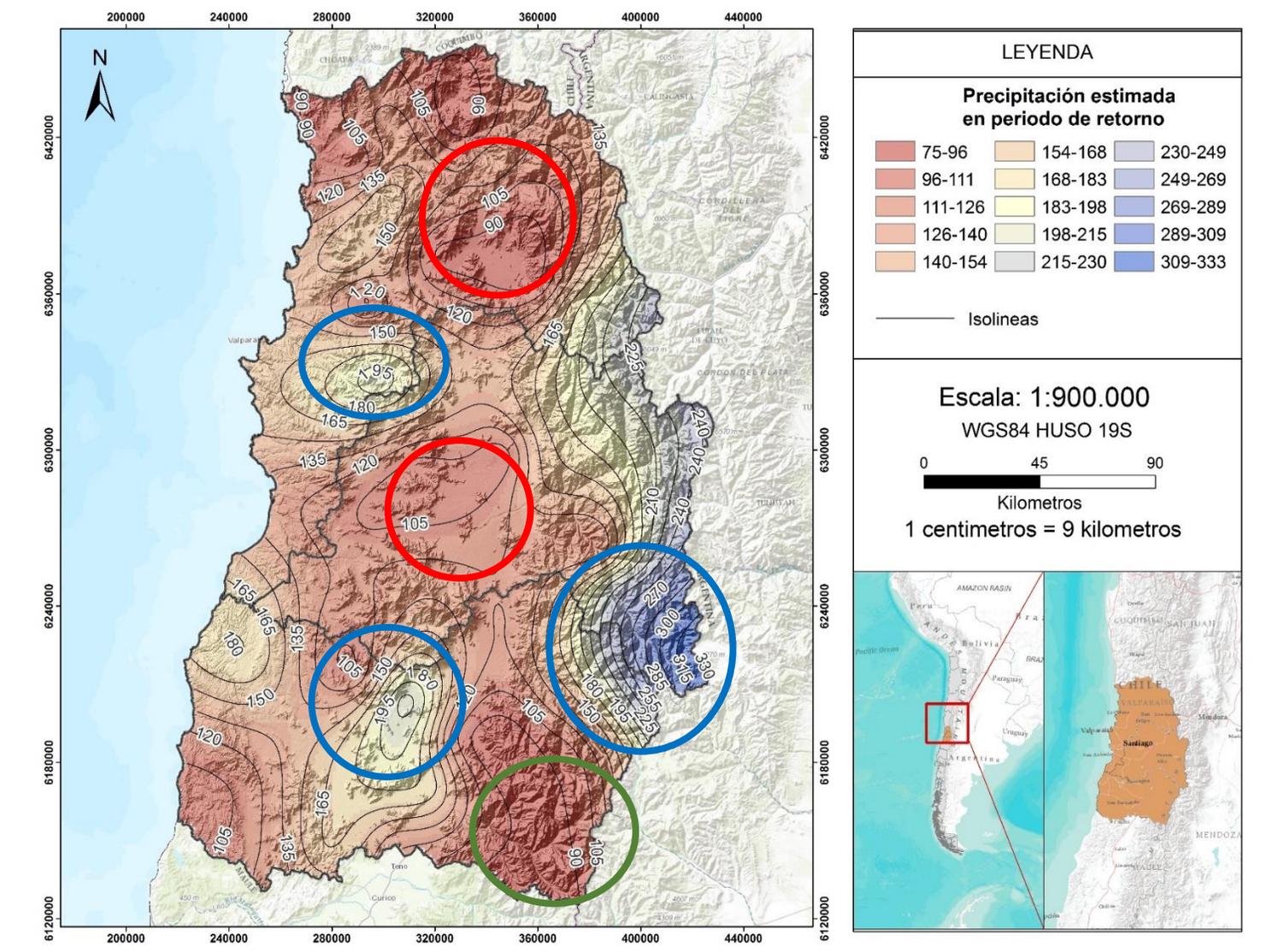


Figura N° 39: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima en 24 horas (50 años)

Fuente: Elaboración propia

Periodo de retorno precipitaciones máximas en 24 horas (100 años)

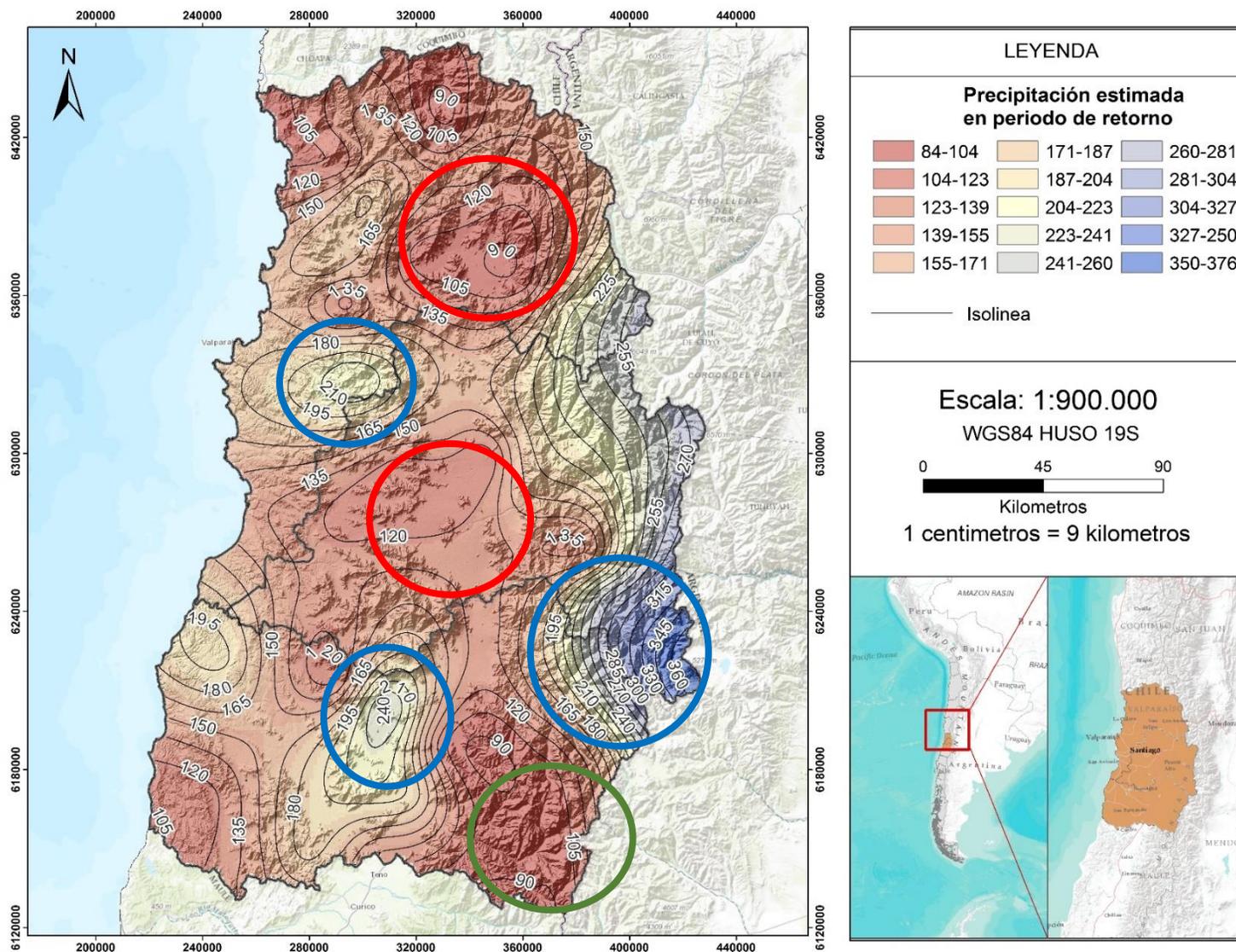


Figura N° 40: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima en 24 horas (100 años)

Fuente: Elaboración propia

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Las primeras 24 horas de un evento de precipitación máxima, son las que acumulan la mayor cantidad de precipitaciones, en zonas con las características climáticas del área de estudio, tal como menciona Pizarro *et al* (2007). Sumado a esto, la distribución de las precipitaciones es desigual, influenciada por la orografía, lo que quedó demostrado con el análisis de variables estadísticas, ya expuesto. El último factor mencionado, se expresa también para periodos de retorno, donde, como se ve en las figuras N° 38, 39 y 40, hay un gran contraste entre valles y zonas rodeadas por cordones montañosos. Ejemplo de esto, es que, los montos de precipitación en los valles de la cuenca del río Aconcagua, Petorca y La Ligua, presentan rangos entre 56 y 71 mm, para periodos de retorno de 10 años, (zonas demarcadas con círculo rojo, Figura N°38). Y no fluctúan mayormente en las otras escalas temporales (posteriormente se hará referencia a los otros periodos de retorno estimados). En contraposición se encuentran las altas cumbres, donde es posible apreciar valores para periodo de retorno de 10 años, que varían entre los 150 mm y 230 mm, (zonas demarcadas con círculo azul). Variando por un amplio margen entre puntos extremos del relieve.

Respecto al periodo de retorno para 50 años, los menores valores vistos en la figura fluctúan entre los 75 y 96 mm, nuevamente ubicados en valles. Esta oscilación, no es tan lejana a los montos de precipitación, para periodos de retorno en 10 años. De manera preliminar, se puede establecer que en zonas donde los valores de periodo de retorno presentan variaciones menores –En gran medida en valles- hay un equilibrio en la distribución de precipitaciones, incluso entre periodos temporales distanciados. Diferente es el caso para zonas altas, donde los valores pueden tener una variación entre periodo de retorno de 10 y 50 años que bordean los 50 mm, por ejemplo, utilizando como referencia la estación, Las melosas. Un evento en periodo de retorno para 10 años llega a 155 mm y para 50 años alcanza 214 milímetros. Similar ejemplo, pero realizado en el valle de Aconcagua, (estación de referencia San Felipe) muestra que, para periodo de retorno de 10 años, se estiman 56 mm, en tanto para la misma estación en periodo de retornos de 50 años, la cantidad probable de agua caída es de 75 mm.

Respecto a periodo de retorno para eventos estimados cada 100 años, en 24 horas, la variación general no es tan marcada respecto a las dos escalas cronológicas que la anteceden. Además, ciertos patrones se vuelven a repetir. Es el caso de la alta diferencia, en cumbres, laderas y algunos puntos de las zonas costeras, donde, la precipitación estimada en cada periodo de retorno, supera ampliamente la estimada para retornos de 50 años. Por el contrario, en valles, los valores no tienen mayor variación.

Es preciso agregar, que, la estimación de periodos de retorno en alta cordillera no es exacta, ya que, el resultado de la fórmula utilizada muestra montos de precipitación líquidas, las cuales son menos comunes en las cimas de Los Andes. Por ende, se puede estar en frente de una sobrestimación o subestimación de la acumulación pluviométrica, para cada periodo de retorno, en 24 horas. Más aún, la baja red de estaciones meteorológicas, en alta cordillera, tampoco aporta a mejorar los resultados. Un ejemplo de esto, son los bajos valores mostrados en Los Andes de la región de O'Higgins (Zona demarcada con círculo verde), discordante con otros datos proyectados para periodo de retorno, en áreas de esta unidad geomorfológica.

Periodo de retorno precipitaciones maximas en 48 horas (10 años)

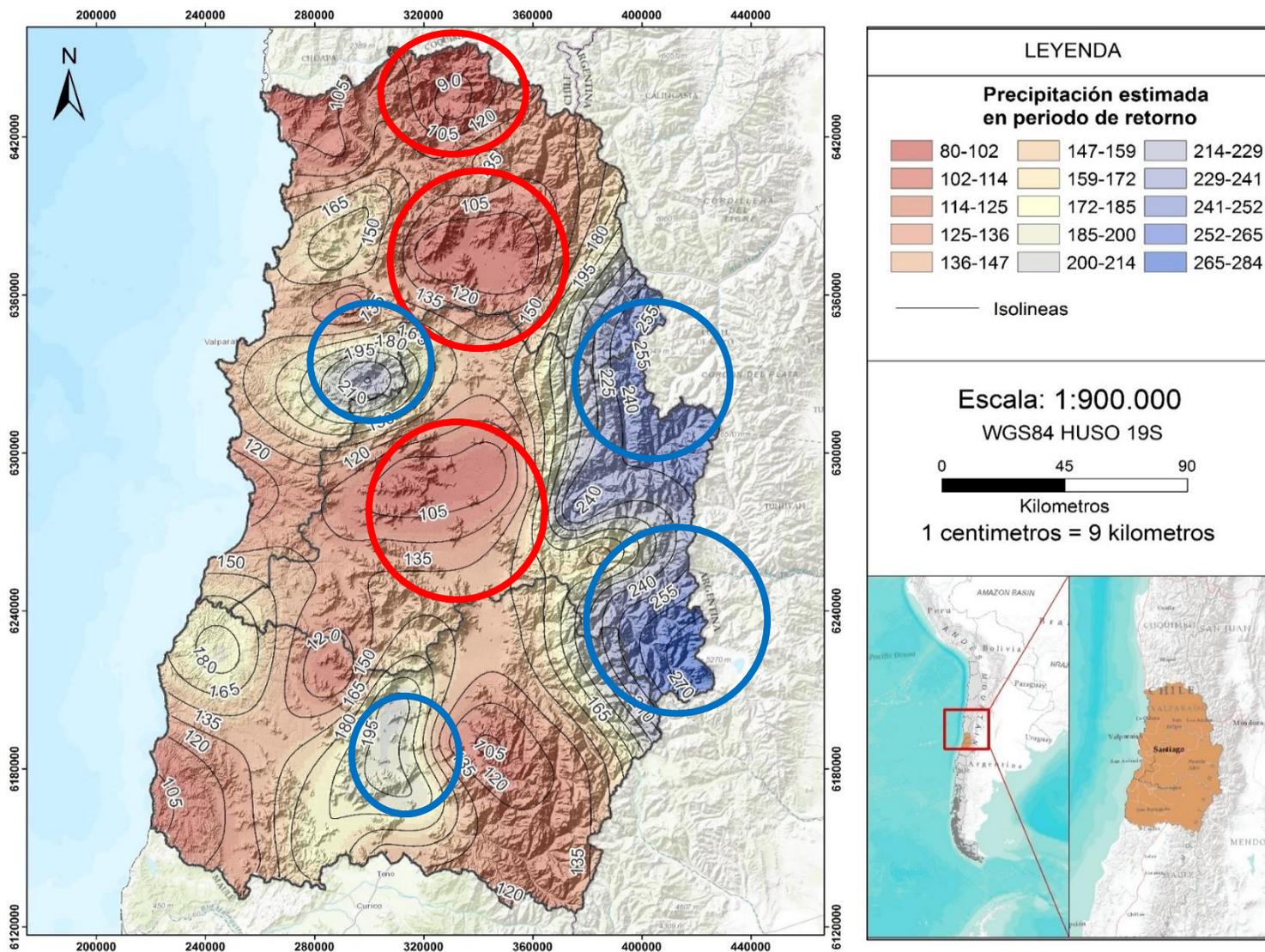


Figura N° 41: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima en 48 horas (10 años)

Fuente: Elaboración propia.

Periodo de retorno precipitaciones máximas en 48 horas (50 años)

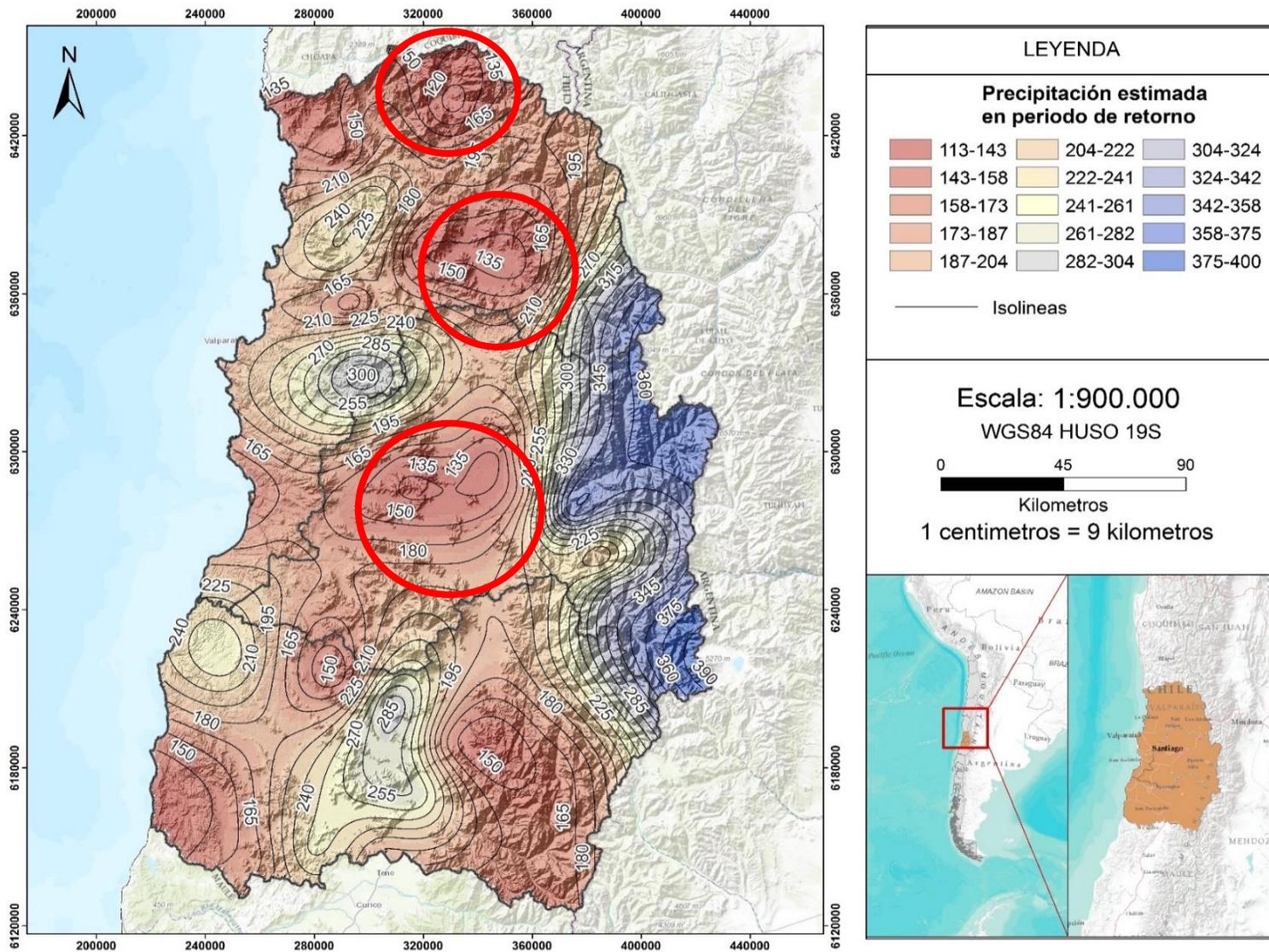


Figura N° 42: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima 48 horas (50 años)

Fuente: Elaboración propia.

Periodo de retorno precipitaciones maximas en 48 horas (100 años)

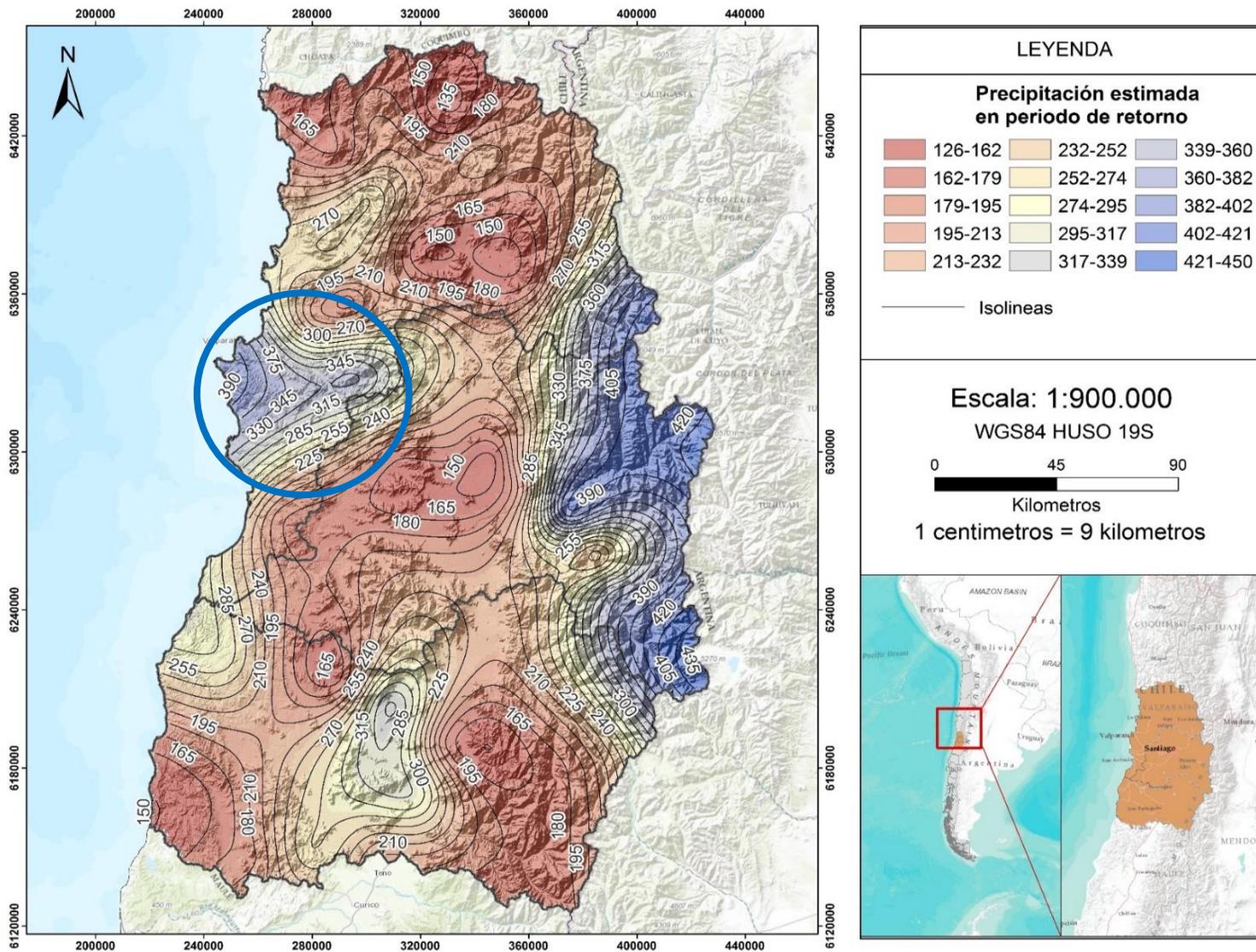


Figura N° 43: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima en 48 horas (100 años)

Fuente: Elaboración propia

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Considerando que, gran parte de las clasificaciones para eventos de precipitación máxima, hacen hincapié en las primeras 24 horas, respecto a la pluviosidad acumulada. Esta investigación proyecta un periodo temporal aún más extenso, con la idea de conocer cuánta precipitación continúa acumulándose, posterior a las primeras 24 horas. En las figuras N° 41, 42 y 43, se muestran los periodos de retorno estimados para 48 horas, donde, se reproduce un patrón similar, al observado para periodos de retorno de 24 horas. Los valles a los cuales se ha hecho referencia anteriormente vuelven a marcar menores cantidades de precipitación acumulada; incluso, en la escala temporal más acotada (24 horas), la diferencia no supera los 20 mm. A modo de ejemplo, el valle del río Maipo, para periodo de retorno de 10 años, la cantidad de agua caída (estimada) estaría entre 75 y 90 mm. Tanto que, para el periodo de retorno de 10 años en eventos de prolongación de 48 horas; la estimación de precipitación recibida esta entre los 100 y 135 mm. (las otras zonas donde se puede observar menores diferencias se encuentran marcadas con un círculo rojo, figura N°41). Sin embargo, la diferencia de precipitación estimada para periodo de retorno, entre eventos de duración 24 horas y 48 horas, aumenta gradualmente en los otros dos periodos (50 y 100 años), para el caso de las zonas con estimación de precipitación más reducida. En las zonas con mayores montos de precipitación -nuevamente coincidentes con la cordillera de la Costa y Los Andes- la variación fue considerablemente mayor, para todos los montos estimados en cada periodo de retorno y en todas las escalas horarias (zonas demarcadas con círculo azul, Figuras N°41 y 42)

Un elemento que particularmente llama la atención, sobre el análisis de eventos de 48 horas; es lo acontecido con el periodo de retorno para 100 años, donde, la zona costera de la región de Valparaíso -particularmente, donde se ubica la ciudad de Valparaíso- presenta un aumento considerable de milímetros estimados (Demarcado con círculo azul). Esto rompe con la relación establecida, para los mayores valores; los cuales, se asocian a zonas altas o laderas occidentales de ambas cordilleras. Mas, a lo anterior se suma que, los valores promedios estimados de precipitación se encuentran muy por encima a los considerados en eventos de 24 horas en 100 años, y, particularmente en la costa, del área de estudio, hay un crecimiento considerable de los montos pronosticados. Esto lleva a inferir que un evento pluviométrico de gran magnitud, tiene implicancias más fuertes en la costa, cada 100 años, afectando mayormente la región de Valparaíso, No obstante, para contemplar esta aseveración, es necesario explicar que gran parte de la zona costera del área de estudio, no cuenta con estaciones pluviométricas, no así, el área de la ciudad de Valparaíso, por ende, puede ser que la información para otras áreas costeras, del área de estudio, estén siendo sesgadas, desestimando los potenciales montos de precipitación en periodo de retorno de 100 años,

A modo general, es preciso complementar que, para eventos de 48 horas, en la cordillera de Los Andes, más notoriamente en la región Metropolitana, se aprecia un aumento de los valores de precipitación para todos periodos de retorno, acrecentando los montos de precipitación estimada hasta laderas y valles.

Periodo de retorno precipitaciones maximas en 72 horas (10 años)

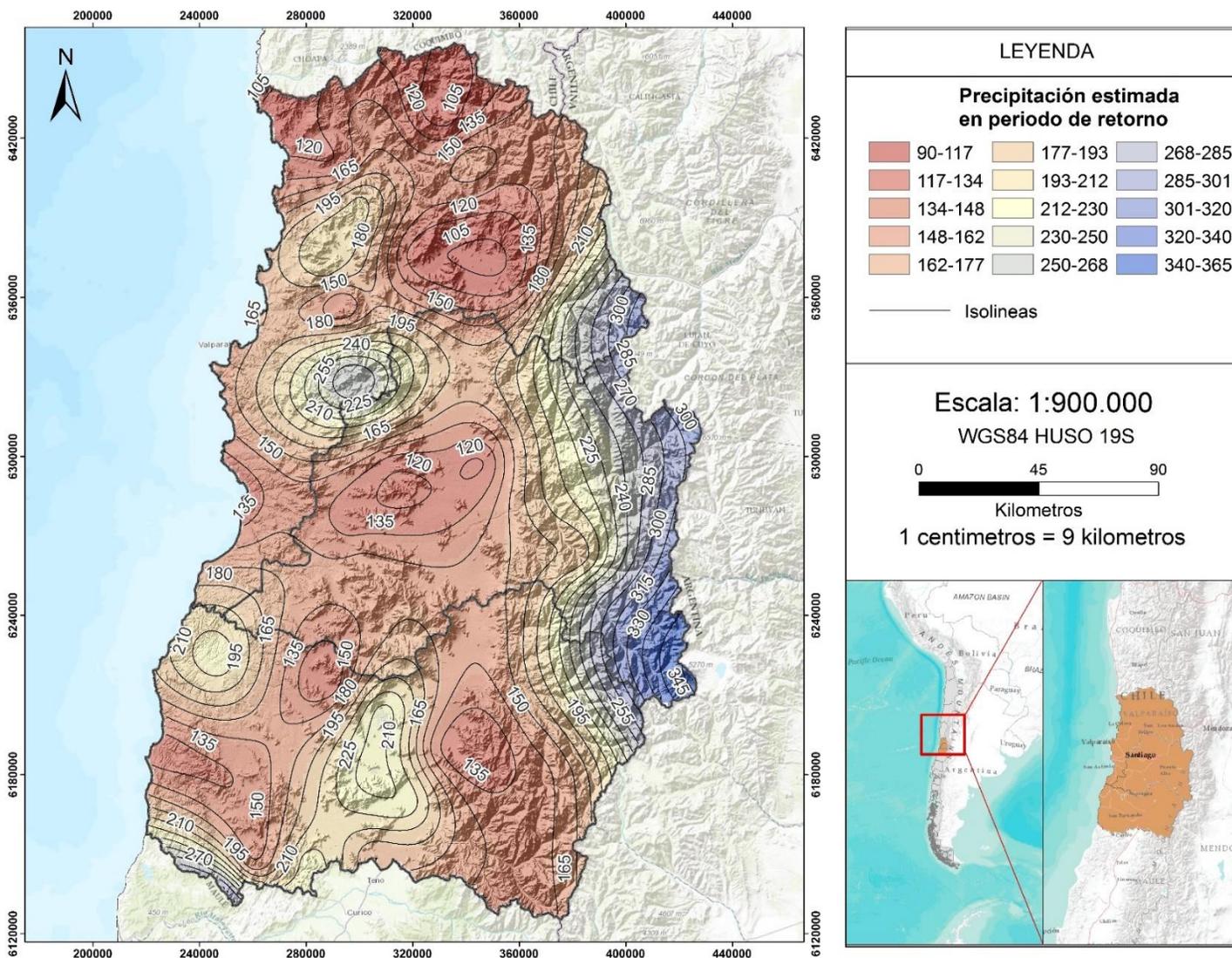


Figura N° 44: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima 72 horas (10 años)

Fuente: Elaboración propia

Periodo de retorno precipitaciones maximas en 72 horas (50 años)

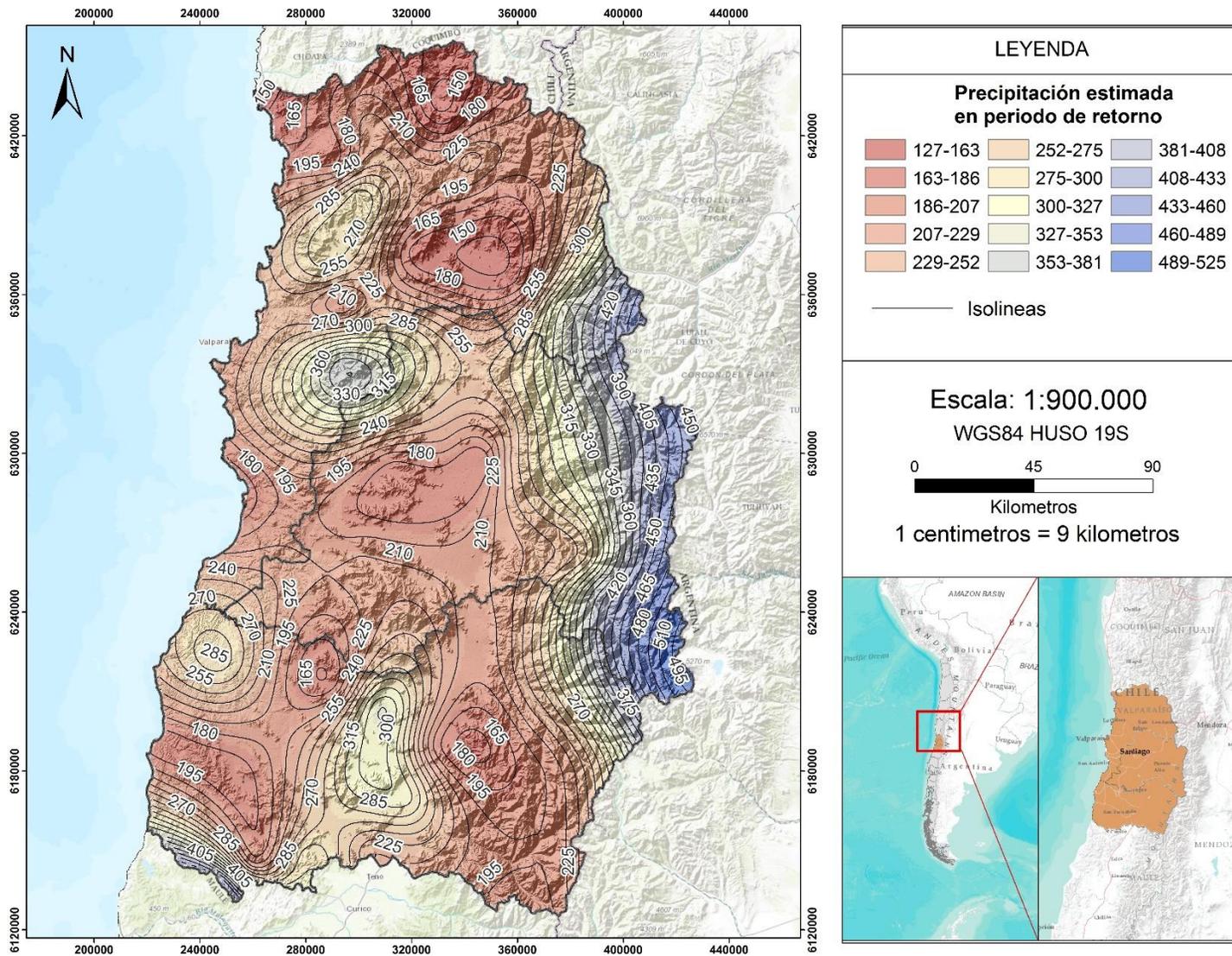


Figura N° 45: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima 72 horas (50 años)

Fuente: Elaboración propia

Periodo de retorno precipitaciones máximas en 72 horas (100 años)

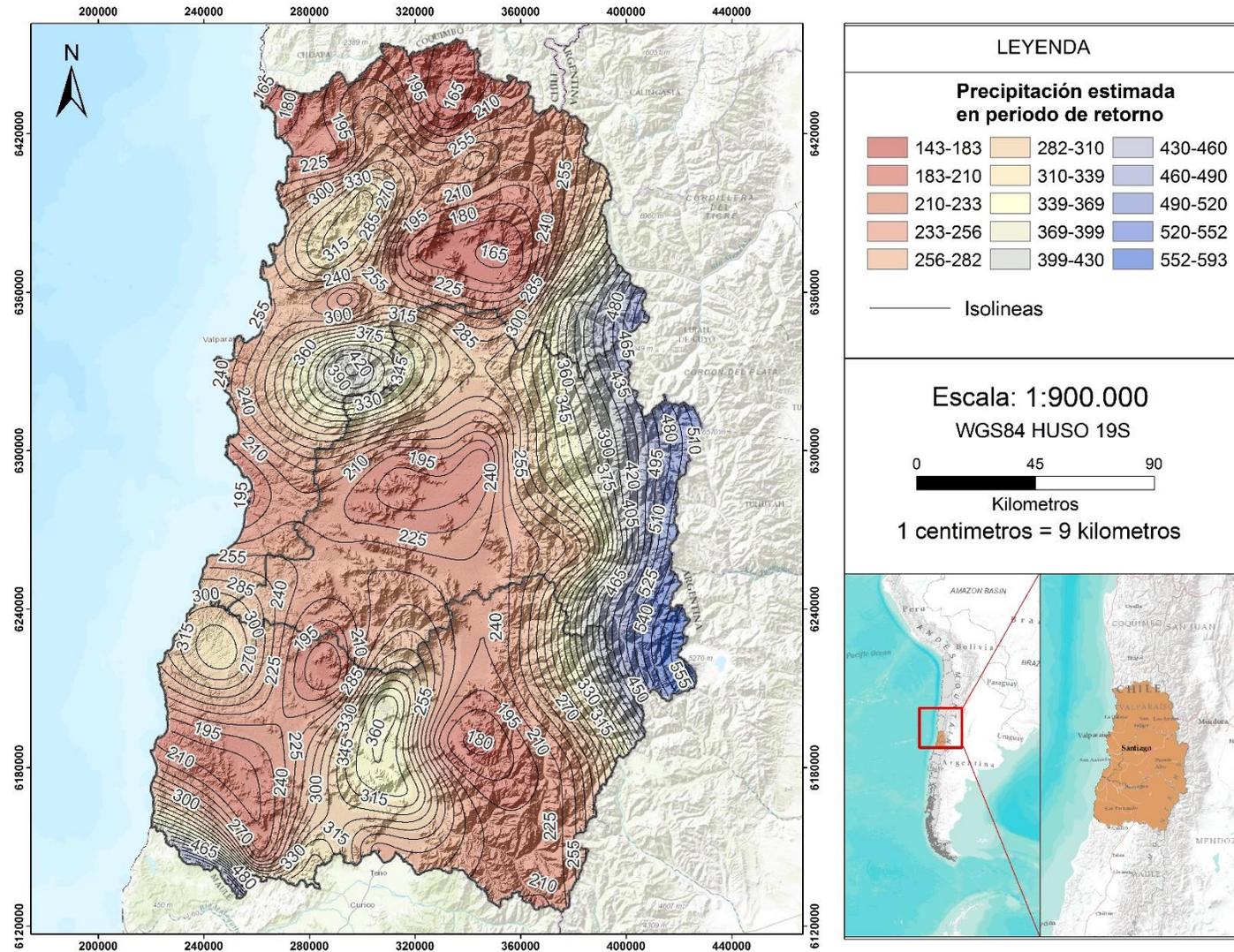


Figura N° 46: Periodo de retorno, evento de precipitación máxima en 72 horas (100 años)

Fuente: Elaboración propia

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Como se hizo hincapié anteriormente, gran parte de las definiciones de evento extremo, no abarcan periodos de tiempo mayores a 24 horas. Por otro lado, la duración de un evento de precipitación puede variar su prolongación e intensidad. Por este motivo, se estima el periodo de retorno hasta 72 horas, así, apreciar la cantidad de precipitaciones que podrían caer en la zona, en un periodo prolongado y que se proyecta más allá de las primeras horas, denominadas “críticas”, en la acumulación de agua caída en un evento.

Identificando un potencial patrón, nuevamente, valles y zonas ubicadas entre cordilleras, obtienen las menores variaciones respecto al periodo cronológico anterior. Un ejemplo de esto; tomando los datos de periodo de retorno en 10 años, para el valle de Aconcagua – específicamente en la estación de San Felipe- se estima que la precipitación caída seria de, 93 mm en eventos de 48 horas y para 72 horas, 103 mm. Comparado con otras zonas, la variación no es sustancial y esta “baja oscilación” se extiende también, para periodos de retorno en 50 y 100, tanto en la estación utilizada como ejemplo, así también, en otras áreas interiores. Ahora, en zonas altas, se puede apreciar una mayor diferencia entre periodos de retorno y escala cronológica. Utilizando como ejemplo un punto en la cordillera de la Costa, la estación Lliu-lliu, para periodos de retorno en eventos de 48 horas cada 10 años, promedia 201 mm, y para eventos de 72 horas, mismo periodo de retorno, proyecta 247 mm. Datos considerablemente menores, en función a la diferencia de estimación de agua caída entre 24 y 48 horas.

A nivel general, para las variables estadísticas utilizadas en esta investigación (específicamente para el parámetro  $\mu$ ), se pudo observar, que los valores promedio de agua caída no variaban mayormente entre eventos de 48 y 72 horas. Lo anterior se repite en la estimación de precipitaciones para periodos de retorno. Logrando inferir que existe un debilitamiento en eventos de precipitación máxima, posterior a las 48 horas. Y, esto no se diferencia entre zonas con distinto relieve, sino que, es constante para el territorio. Más, para valles y zonas entre relieve acusado es más marcado que en cumbres y lugares a barlovento.

Finalmente, para periodos de retorno, la distribución general determina valores mayores en cumbres y más débiles en valles; replicando esta situación en todos los periodos de retorno y en cada escala cronológica. Donde, solo un caso se escapa de la condición general, el cual muestra periodos de retorno más intensos en costa, específicamente, para eventos de 48 horas en 100 años.

#### 4.4 Eventos extremos

A partir de la información de precipitaciones que aporta el satélite TRMM (Tropical rainfall measuring mission), y, los datos de precipitación acumulada, por estación, en los eventos extremos que afectaron el área de estudio en la última década del periodo cronológico utilizado en esta investigación. Se comparó la distribución de montos de precipitación que estima el satélite, con los valores que muestra cada estación. El fin de realizar este símil, tiene dos objetivos. En primer lugar, determinar si, la información satelital coincide con los datos de las estaciones. Segundo, reconocer, sí, la relación propuesta por el satélite TRMM, la cual establece, una relación directamente proporcional entre cobertura nubosa y concentración de precipitaciones; tendría un potencial nexo con la influencia de la orografía.

Sobre el satélite TRMM, este entrega una aproximación a la cantidad de precipitación recibida en cada zona, mediante un hidroestimador. La imagen satelital permite una aproximación del comportamiento de la cobertura nubosa, respecto a la superficie, para finalmente, estimar la precipitación, a nivel general. Barret, Bastine y Barlow (2011), señalan que el método utilizado por el satélite genera problemas en zonas con orografía acusada, derivando en, mayores niveles de error para la estimación de precipitación acumulada; sobrestimando o subestimando montos de agua caída. A lo anterior, se suma un problema técnico proveniente del tamaño del pixel de la imagen satelital (correspondiente a 25 km<sup>2</sup>). Ya que, la información presenta menor detalle en comparación con datos aportados por una estación meteorológica específica. No obstante, al no poseer una red consolidada de estaciones meteorológica, produciendo escasos de datos, el TRMM, puede ser una importante herramienta.

A continuación, en la tabla N° 10 se presenta el total de precipitación acumulado por estación en cada uno de los mayores eventos registrados. Luego se analiza en detalle estos eventos con su respectiva representación cartográfica junto al *downscaling* de la imagen satelital aportada por el TRMM.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Tabla N° 10: Precipitación en milímetros de cada evento máximo, por estación.  
Fuente: Elaboración propia

N°	Estación	Junio,2000	Julio,2001	Mayo,2002	Junio,2002	Mayo,2003	Agosto,2008	Agosto,2015
1	Chalaco	60,0	40,0	91,0	154,0	80,0	10,0	98,0
2	El Sobrante Hacienda	61,0	46,1	79,5	133,0	40,7	44,3	68,5
3	El Trapiche	62,0	70,0	73,9	150,0	60,0	40,0	81,3
4	El Salvador	74,5	54,6	104,5	167,1	83,9	50,1	102,1
5	Las Colmenas	85,5	50,0	96,0	210,0	70,0	31,5	103,0
6	Alicahue	77,5	50,0	95,0	143,0	85,0	53,0	79,0
7	Longotoma	77,5	50,0	95,0	143,0	85,0	53,0	79,0
8	La Mostaza	80,0	87,0	97,0	174,0	103,0	81,0	94,5
9	Valle Hermoso	98,8	78,0	131,8	267,0	63,0	51,0	83,5
10	Las Puertas	76,0	78,0	84,9	179,0	70,0	48,0	89,0
11	Resguardo Los Patos	85,0	92,0	89,0	157,5	92,0	52,0	83,0
12	Las Pataguas	153,2	61,2	98,9	230,7	85,5	55,0	102,0
13	Catemu	110,0	55,6	65,4	174,0	53,8	62,3	79,9
14	San Felipe	82,0	52,1	78,7	175,9	65,0	35,9	72,4
15	Lo Rojas	251,5	89,0	167,0	330,0	94,3	94,5	126,0
16	Estero Rabuco	206,0	80,0	141,5	238,6	83,0	78,0	73,0
17	Vilcuya	84,0	79,5	106,5	159,0	88,5	56,0	109,0
18	Quillota	161,0	52,5	117,0	252,5	69,0	71,0	84,6
19	Riecillos	143,1	128,5	179,1	244,7	120,7	50,0	105,0
20	Quinta Normal	144,5	57,7	102,3	211,8	78,9	78,3	72,7
21	Pudahuel	106,9	46,7	84,9	189,5	53,0	45,8	63,0
22	Tobalaba	178,4	54,8	98,7	194,1	64,0	83,1	72,5
23	Los Aromos	242,0	53,5	127,0	280,5	90,0	78,0	122,5
24	Rungue Embalse	182,5	117,5	136,0	313,5	92,8	100,5	93,0
25	Rodelillo	199,0	44,0	52,0	209,0	78,0	127,0	135,8
26	Lliu-Lliu Embalse	372,5	96,0	143,0	361,0	91,0	139,0	108,2
27	Colliguay	162,0	175,2	171,9	430,7	118,7	132,2	185,1
28	Cerro Calan	186,0	63,7	112,1	235,8	65,1	100,5	95,3
29	Los Panguiles	221,0	44,0	117,0	222,0	76,5	86,5	65,9
30	Oficinas Dga	149,9	58,0	108,2	210,9	77,6	77,7	74,5
31	Antupirén	169,5	56,4	105,0	202,5	90,0	100,0	81,5
32	San Antonio	93,0	42,8	32,0	127,1	92,9	59,0	67,3
33	Cerrillos De Leyda	154,2	74,5	14,3	115,9	101,3	73,4	104,2
34	San José De Maipo	211,5	67,0	114,0	178,5	89,5	93,0	92,4

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

N°	Estación	Junio,2000	Julio,2001	Mayo,2002	Junio,2002	Mayo,2003	Agosto,2008	Agosto,2015
35	El Yeso Embalse	498,0	132,0	82,5	304,5	92,0	148,5	96,9
36	Melipilla	153,0	55,0	117,6	233,0	86,0	81,5	121,2
37	Carmen De Las Rosas	211,0	70,0	112,0	182,0	105,5	84,0	87,5
38	San Gabriel	292,0	79,0	117,0	136,0	86,5	90,0	69,7
39	Las Melosas	257,8	45,5	133,0	145,0	90,3	95,0	106,0
40	Villa Alhue	257,0	96,0	129,2	141,0	120,0	81,0	87,0
41	Litueche	208,5	98,0	83,0	143,0	150,0	104,0	103,5
42	Cocalan	328,5	29,0	106,0	101,0	116,0	50,5	105,5
43	Pichidegua	147,4	65,0	166,0	92,0	120,0	56,6	107,0
44	Coltauco	328,5	157,2	136,0	190,0	164,0	148,3	154,7
45	Pichilemu	118,0	24,0	43,0	46,4	30,6	44,0	137,2
46	Rengo	146,0	71,8	91,0	144,0	63,0	89,0	107,0
47	Millahue	268,5	84,0	125,3	187,7	84,0	71,0	115,2
48	Nilahue Barahona	118,0	36,0	62,5	60,0	99,5	5,1	98,0
49	San Fernando	296,3	141,7	114,6	196,2	124,6	113,0	123,9
50	Convento Viejo	177,0	69,5	124,3	105,5	108,0	78,0	107,5
51	La Candelaria	147,2	93,4	123,8	138,3	123,0	37,1	151,6
52	El Membrillo	120,0	60,0	90,0	67,7	60,0	60,0	78,0
53	Ranguili	109,0	63,0	51,5	68,0	97,0	69,0	74,5

Tabla N° 11: Fecha de eventos de precipitación máxima analizados  
Fuente: Elaboración propia

AÑO	MES	Días del evento hidrometeorológico
2000	MAYO	12,13, y 14
2001	JULIO	17,18 y 19
2002	MAYO	25,26 y 27
2002	JUNIO	2,3,4 y 5
2003	MAYO	20,21 y 22
2008	AGOSTO	14,15 Y 16
2015	AGOSTO	4,5,6 y 7

#### **4.4.1 Evento de precipitación máxima mayo 2000**

El evento de mayo de 2000, afectó intensamente a la región de Valparaíso, principalmente en cordillera y la cuenca del Río Aconcagua, donde se alcanzaron los mayores valores de precipitación acumulada. (Figura N°47)

Comparando la información proveniente de la imagen satelital, con la registrada por las estaciones, es posible notar diferencias considerables entre ambas fuentes, respecto a la distribución de las precipitaciones. Las estaciones determinan que la mayor parte del agua caída se registra en cordilleras (Los Andes y de la Costa), como también en la región de O'Higgins. En cambio, para la imagen satelital, las precipitaciones son más intensas en la cordillera de Los Andes, pero mayormente sobre el valle del río Aconcagua, zona, donde, los valores son los más bajos registrados para este evento (Figura N°47). A modo de ejemplo, la estación N° 12, (ubicada en el valle de Aconcagua) recibió 62 mm, muy por debajo de lo estimado por el satélite. En contraparte, la estación N°46 (ubicada en la región de O'Higgins) acumuló 90 mm, muy por encima de lo mostrado en la imagen satelital, para esta zona.

Finalmente, es posible notar que, nuevamente se repite un "patrón" en la distribución de precipitaciones, similar a lo observado en las variables estadísticas y periodos de retorno. Ya que, los mayores montos de precipitación registrado, por estaciones meteorológicas, se alcanzan en cordilleras y los valores menores, en valles.

#### **4.4.2 Evento de precipitación máxima Julio 2001**

Si bien el evento ocurrido en julio de 2001 fue menos severo comparado con el de mayo de 2000; este presenta una distribución diferente y muestra ciertas variaciones con elementos identificados antes descritos. Ya que, como muestra la figura N°48, el evento presenta mayor homogeneidad en el territorio, siendo leves las variaciones entre zonas alta y valles, incluso en costas. Sin embargo, nuevamente los mayores valores fueron alcanzados en zonas altas o cumbres, destacando cordillera de la Costa donde la estación N°26 acumuló 174,5 mm, muy por encima de otras estaciones, e incluso, por aquellas ubicadas a mayor altitud en la cordillera de los Andes. Respecto a los valores menores, estos se hacen presente en la cuenca del río Maipo, principalmente en el poniente de esta la estación N°20 posterior a estos tres días de lluvia alcanza 46,2 mm, contrastando con los valores mayores al oriente de la misma cuenta.

A diferencia del primer caso analizado -para este evento de precipitación máxima- la relación entre los datos entregados por las estaciones meteorológicas coincide en cierta medida con la imagen satelital, principalmente en la zona de la cuenca del río Maipo, (Ver tabla N°10). Más, como fue mencionado, él parecido es parcial y en algunos casos, donde, según las estaciones meteorológicas aledañas el agua caída es mayor, la imagen TRMM, difiere. Ejemplo de esto, es lo visto en la cordillera de Los Andes de la región de Valparaíso. (Ver Figura N°48)

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

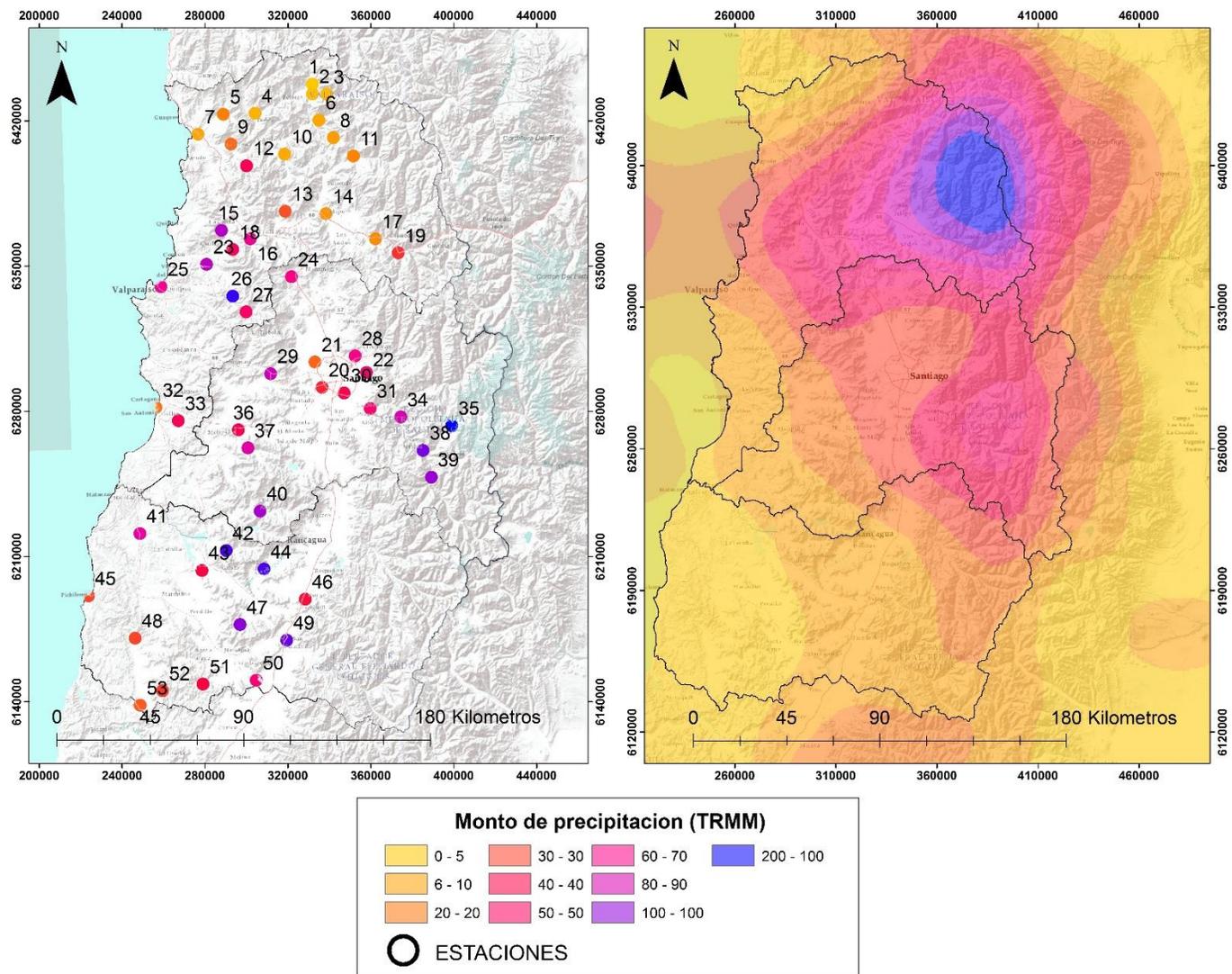


Figura N° 47: Evento precipitación máxima, mayo 2000.  
Fuente: Elaboración propia.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

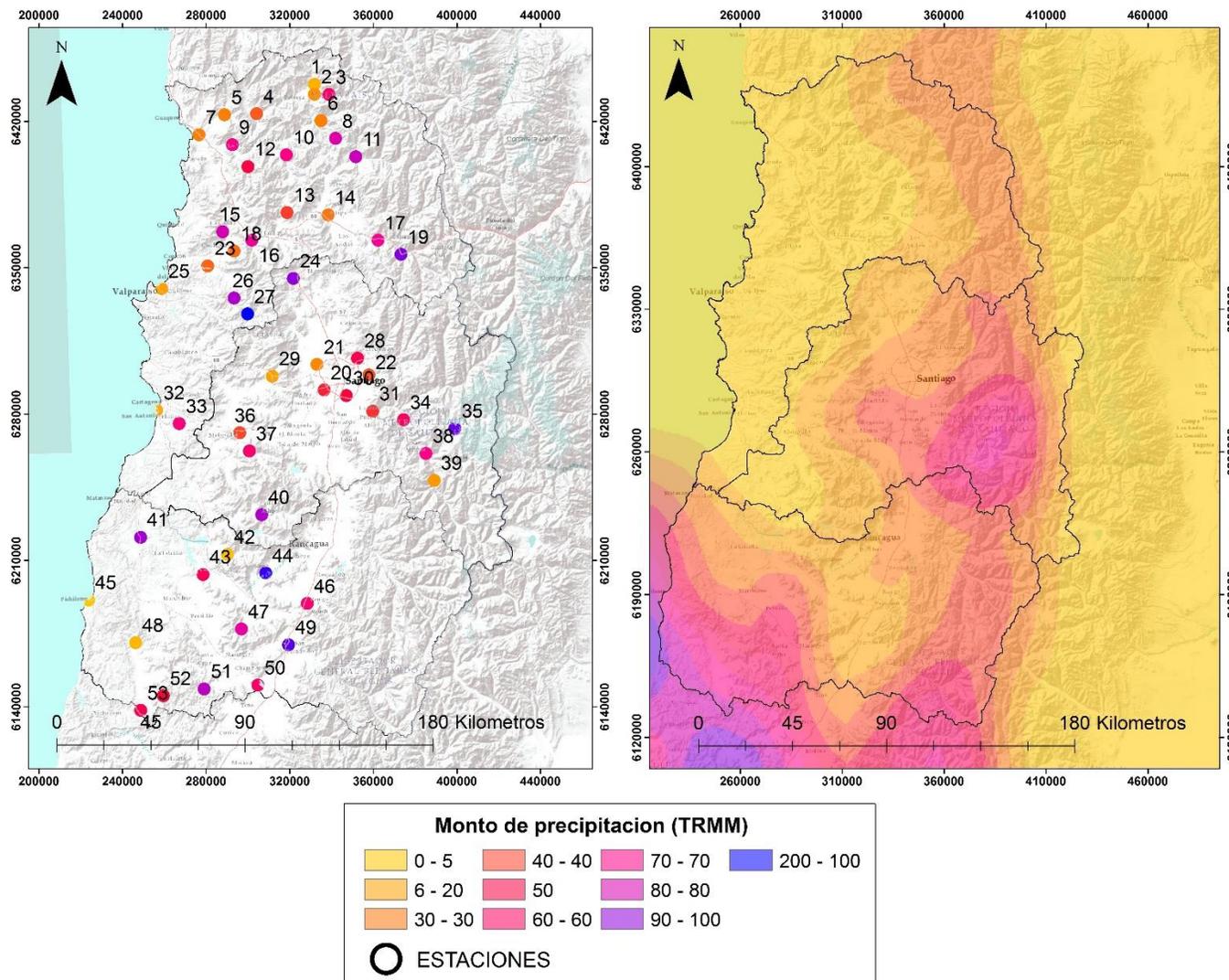


Figura N° 48. Evento de precipitación máxima Julio 2001  
Fuente: Elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

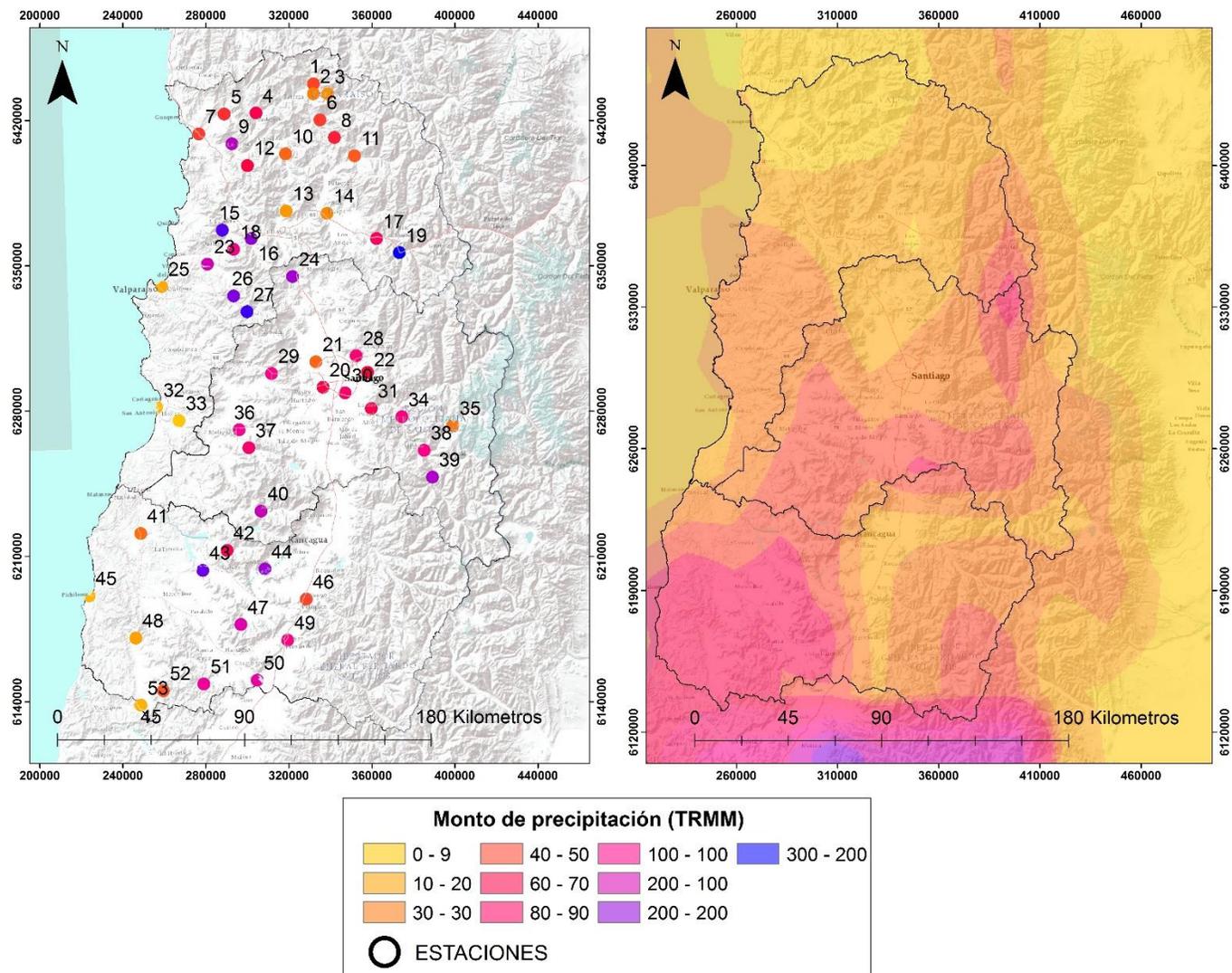


Figura N° 49: Evento de precipitación Máxima, mayo 2002  
Fuente: Elaboración Propia

#### **4.4.3 Evento de precipitación máxima mayo 2002**

El año 2002, para la zona central de Chile, se caracterizó por dejar un importante superávit de precipitaciones, presentando más de un evento extremo. En particular, dos intensos sistemas frontales afectaron el área. El primero de estos sucede entre los días 25 y 27 de mayo, perturbando principalmente a la región de Valparaíso, mayormente en la zona costera; tanto en litoral como en Cordillera de la Costa. Por ejemplo, la estación N°22 alcanzó 127 mm, y, según la información proporcionada por “DESINVENTAR” -repositorio de desastres y sus efectos - el mayor problema fue la activación de Esteros, como el Santa Julia, generando, anegamientos y el desborde de este (Desinventar,2017).

Sobre la comparación entre la información pluviométrica de la imagen, y, la aportada por las estaciones meteorológicas, nuevamente la concordancia es baja. La imagen satelital muestra una concentración importante de precipitaciones en la costa de la región de O'Higgins, datos que no coinciden con los aportados por las estaciones de la zona. Ejemplo de esto, son las estaciones N°45 y 48, las cuales concentran valores de agua caída, muy por debajo de lo estimado por el satélite TRMM (ver Tabla N°10 y Figura N°49). Así también, estaciones ubicadas en el valle del río Maipo, superan ampliamente a las estimaciones realizadas por el satélite.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

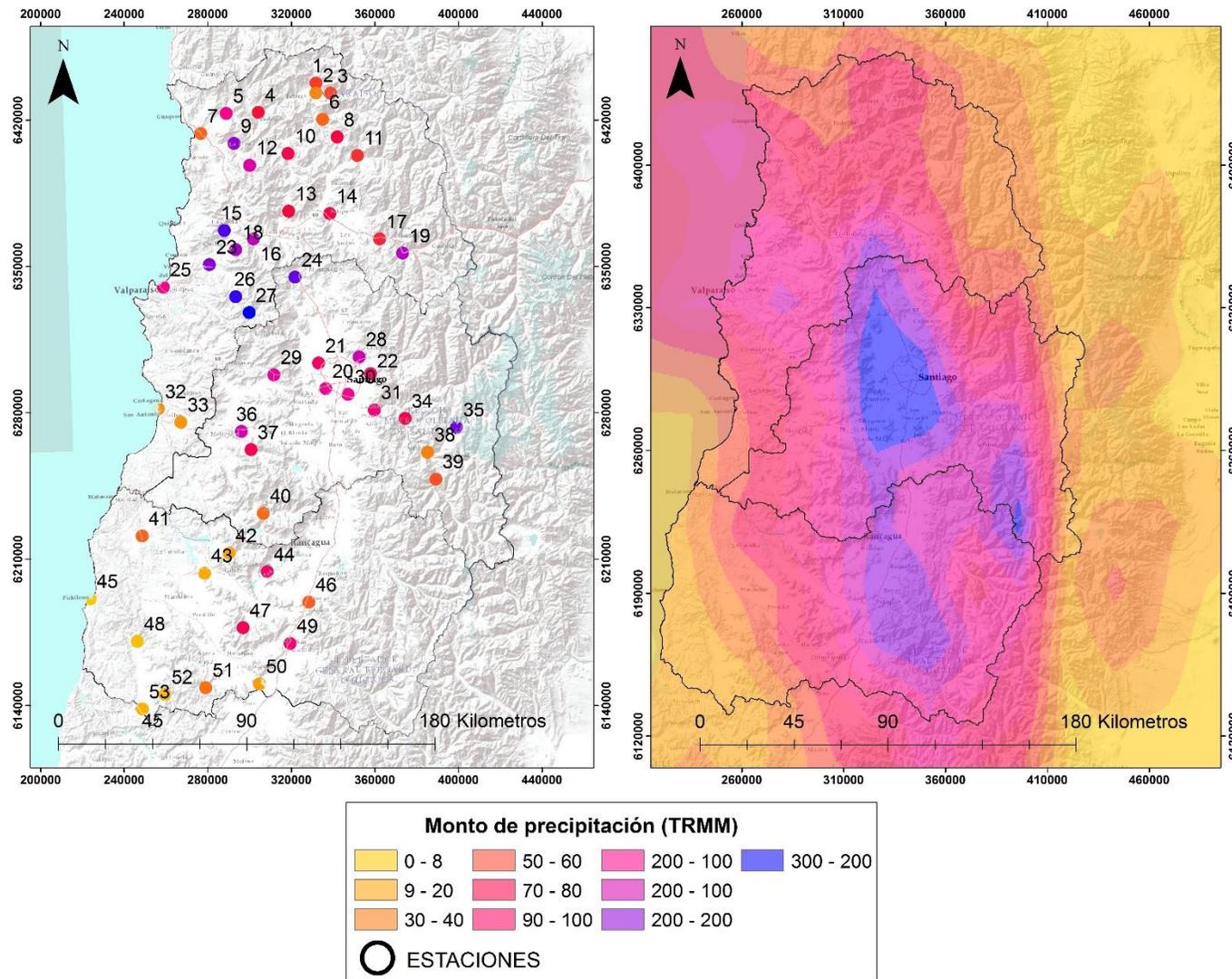


Figura N° 50: Evento de precipitación máxima, junio 2002.

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.4.4 Evento de precipitación máxima junio 2002**

Según la oficina nacional de emergencia (ONEMI), éste evento fue el más intenso que afectó a la zona central, desde 1987, alcanzando valores elevados; luego de tres días de intensa precipitación entre el 2 y 5 de junio. La distribución de este sistema frontal en la zona central se concentró principalmente en valles ubicados entre la cordillera de la Costa y de los Andes, donde, incluso algunas estaciones meteorológicas muestran valores de precipitación mayores que en alta cordillera y costa. (Ver Figura N°50). Como ejemplo de esto, la estación N°22 recibió 211,8 mm durante el evento; a diferencia de la estación N°24, ubicada en la costa la cual acumuló 209 mm. Sin embargo, la cordillera de la Costa, específicamente la zona aledaña al parque nacional la Campana, supera, la cantidad de precipitaciones acumuladas, respecto a valles, costa y cordillera de Los Andes, recibiendo en la estación N°26, 430,7 mm. Con lo cual se llega al umbral del periodo de retorno de 100 años, para eventos de 72 horas

A diferencia de los casos anteriormente expuestos, la relación entre la imagen satelital y los datos pluviométricos de las estaciones coincide relativamente. Sin embargo, el satélite sobrestima valores, en algunas zonas, y en otras, sobreestima. A modo de Ejemplo, las estaciones N°20, 21 y 28 (todas asentadas en el valle del río Maipo), alcanzaron valores entre 200 y 230 mm (ver Tabla N°10). Sin embargo, el TRMM, estima que esta área recibió en promedio 300 mm; muy por encima de los valores observados en dichas estaciones.

#### **4.4.5 Evento de precipitación máxima mayo 2003**

El evento ocurrido entre el 20 y 22 de mayo, afectó principalmente a la zona centro norte de Chile, desde la IV hasta la VI región, siendo más intenso entre la región de Valparaíso y O'Higgins, según datos de ONEMI. A diferencia del evento de mayo de 2002, la mayor concentración de precipitaciones fue en la zona costera. No obstante, los valores más elevados del evento fueron alcanzados nuevamente en ambas cordilleras. A diferencia de casos anteriores, la región de O'Higgins, fue la que recibió los mayores montos. Por ejemplo, la estación N°43, alcanzó 164 mm; cifra cercana a los umbrales estimados en periodo de retorno de 50 años para eventos de 72 horas.

Respecto a la relación entre la imagen satelital, y, los datos de las estaciones, para este evento específico, al igual que el de junio de 2002, hay algunos elementos coincidentes, pero, nuevamente no es una relación próxima, sino que, la información satelital, subestima los montos de agua caída, respecto a lo proporcionado por las estaciones.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

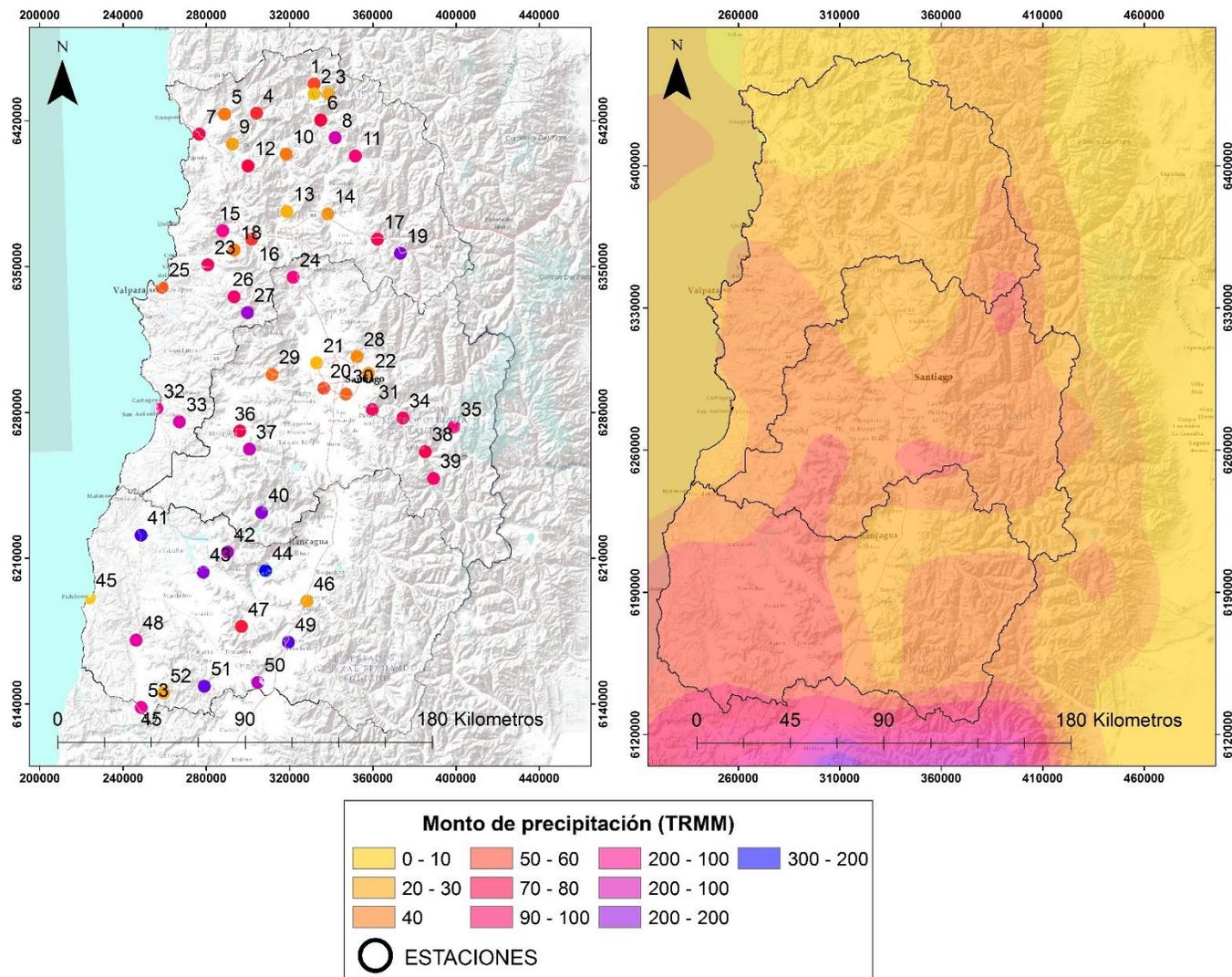


Figura N° 51: Evento de precipitación máxima, mayo 2003  
Fuente: Elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

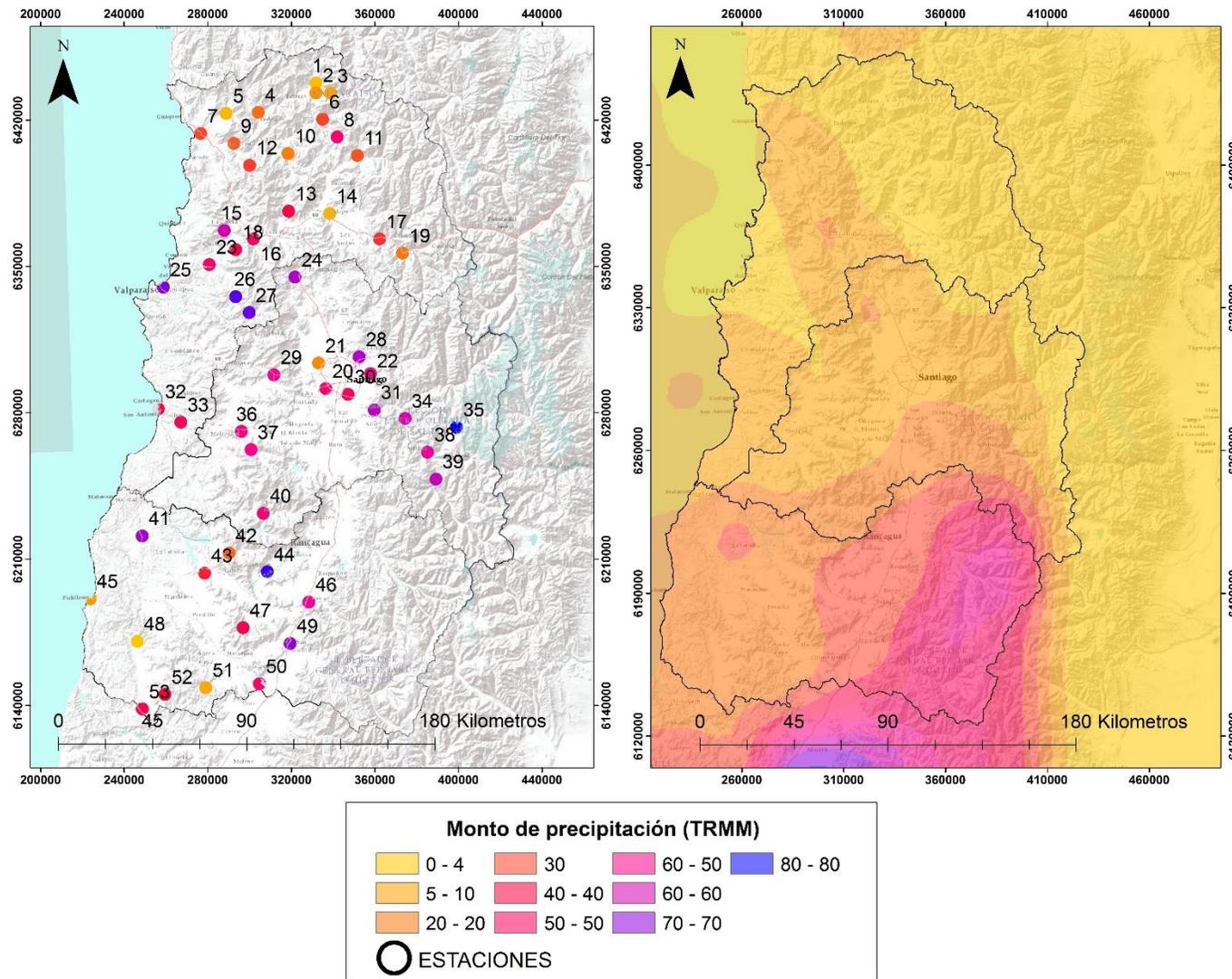


Figura N° 52: Evento de precipitación máxima, agosto 2008  
Fuente: Elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

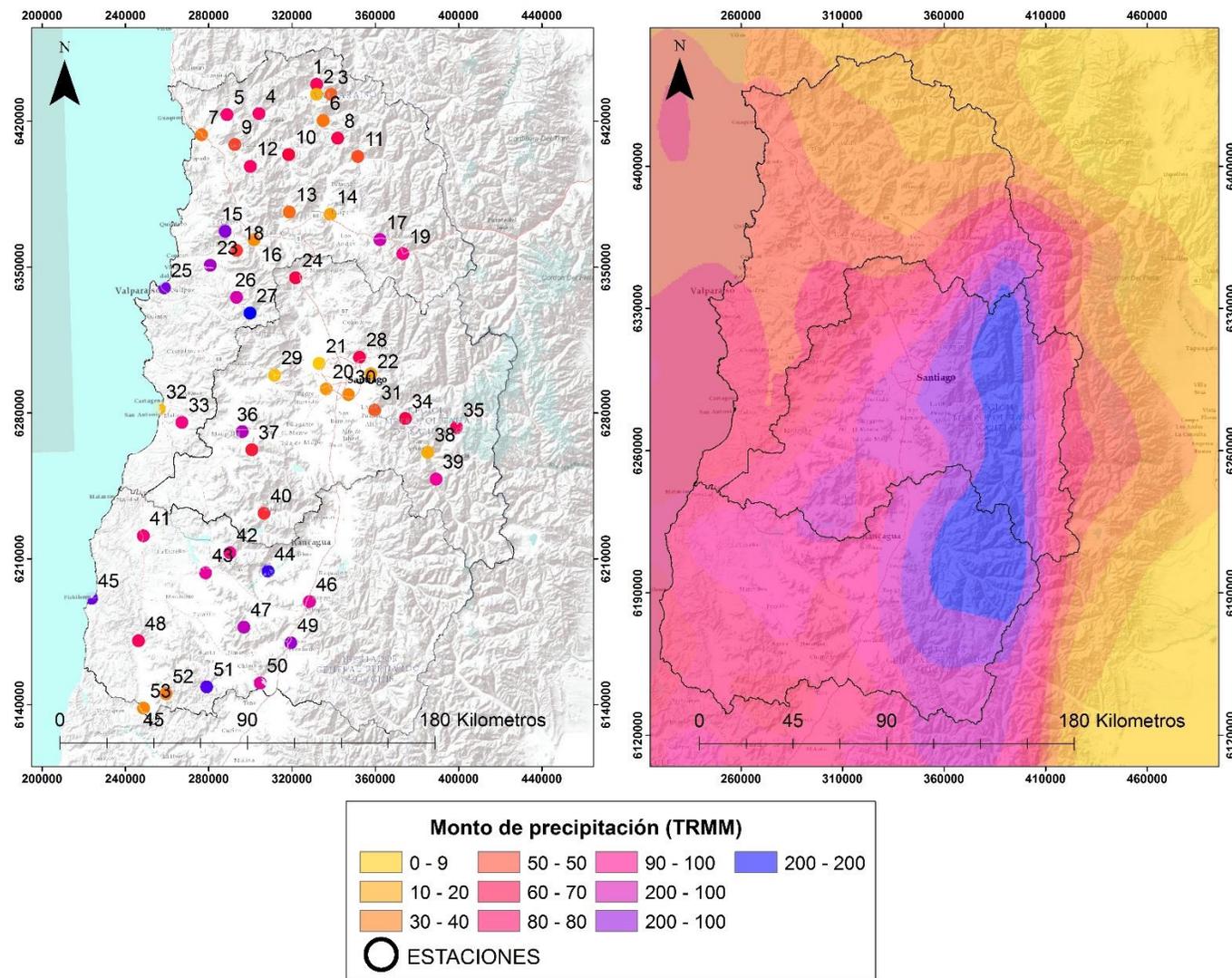


Figura N° 53: Evento de precipitación máxima, agosto 2015  
Fuente: Elaboración Propia

#### **4.4.6 Evento de precipitación máxima agosto 2008**

Este evento ocurrió entre los días 14 y 16 de agosto, la mayor cantidad de agua caída fue en la zona costera de la región de Valparaíso, alcanzando en la estación N°24, 135 mm, solo superado por algunas estaciones de la cordillera de la Costa. Cabe destacar que la información descriptiva de este fenómeno es escasa.

Según muestra la imagen satelital, la mayor cantidad de precipitaciones afecto a la cordillera de Los Andes en la región de O'Higgins. Esta información es difícil de comparar, debido a que no hay estaciones pluviométricas en la zona mencionada. No obstante, para el resto de la región hay una relación relativa entre la imagen satelital y datos pluviométricos. Nuevamente el hidroeestimador del TRMM, subestima la cantidad de precipitación acumulada durante el evento.

#### **4.4.7 Evento de precipitación máxima agosto 2015**

Si bien, el estudio en cuestión considera información hasta el año 2011, el evento de agosto de 2015 es considerado como relevante, debido principalmente a la intensidad con que este afecto a la zona central del país, golpeando mayormente las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana. Como se mencionó, la región de Valparaíso fue una de las más afectadas, donde, la estación N°24 registro 135,8 mm. Hacia el interior, particularmente en los valles, las precipitaciones disminuyen. Pero, este evento, según la información aportada por las estaciones meteorológicas, es menor en comparación a otros ocurridos y expuestos en esta investigación. Sin embargo, los montos de agua caída son cercanos a los umbrales de periodo de retorno de 10 años, con duración cronológica de 72 horas.

La relación mostrada por la imagen satelital no coincide mayormente con los datos pluviométricos. Siendo esta imagen la que menos relación encuentra con los datos aportados por las estaciones meteorológicas y los datos del TRMM.

#### 4.5 Exposición por municipio a eventos de precipitación máxima e intensidad de periodo de retorno.

Conociendo los resultados de parámetros estadísticos, y, estimación de umbrales de periodo de retorno. Es posible aplicar esta información, reconociendo cuales son las zonas mayormente expuestas ante amenazas hidrometeorológicas, principalmente, aquellas donde, la intensidad de un evento de precipitación puede golpear con más fuerza.

Como se mencionó, el fin de esta parte de la investigación es reconocer, cuales municipios son los más expuestos ante amenazas hidrometeorológicas, y, donde estos se asientan, en relación con la orografía predominante en el territorio comunal. Para comenzar con el análisis, en las figuras N° 54, 55 y 56, se presentan las comunas que componen cada región.

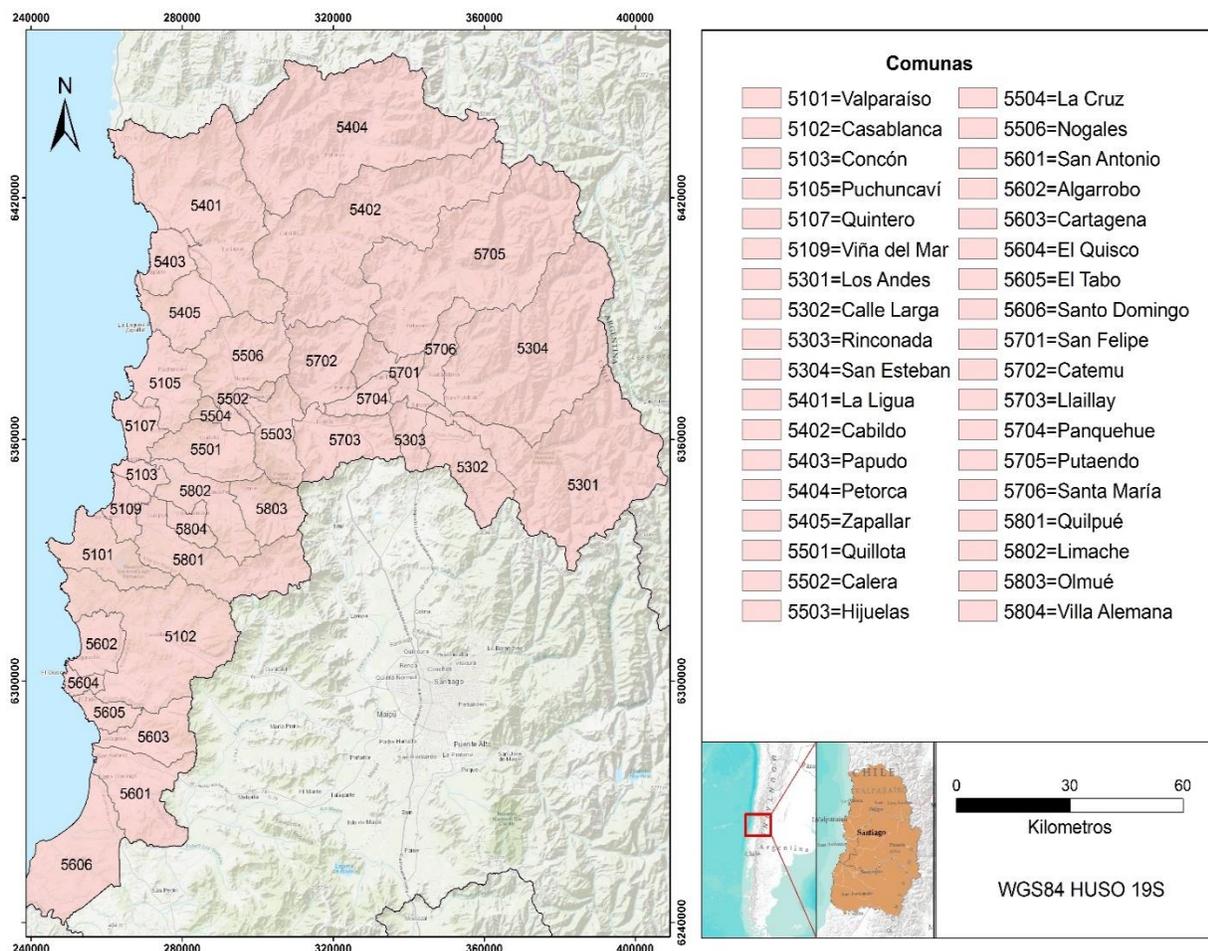


Figura N° 54: comunas Región de Valparaíso  
Fuente: elaboración propia

# Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

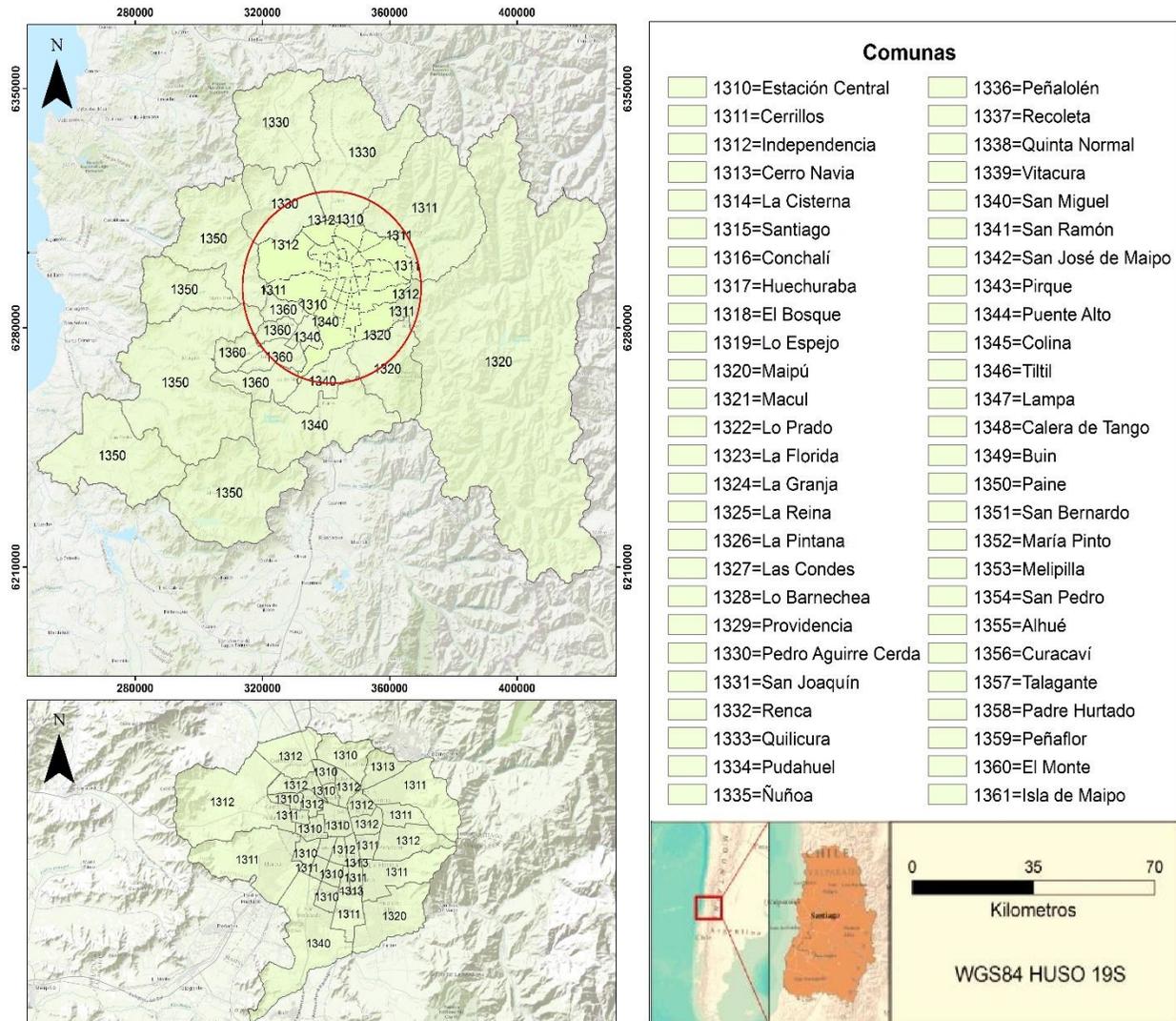


Figura N° 55: comunas Región Metropolitana

Fuente: elaboración propia

Ya anteriormente mencionado, las regiones de Valparaíso y Metropolitana, albergan aproximadamente el 50% de la población del total nacional, siendo algunas comunas, las más pobladas de Chile.

# Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

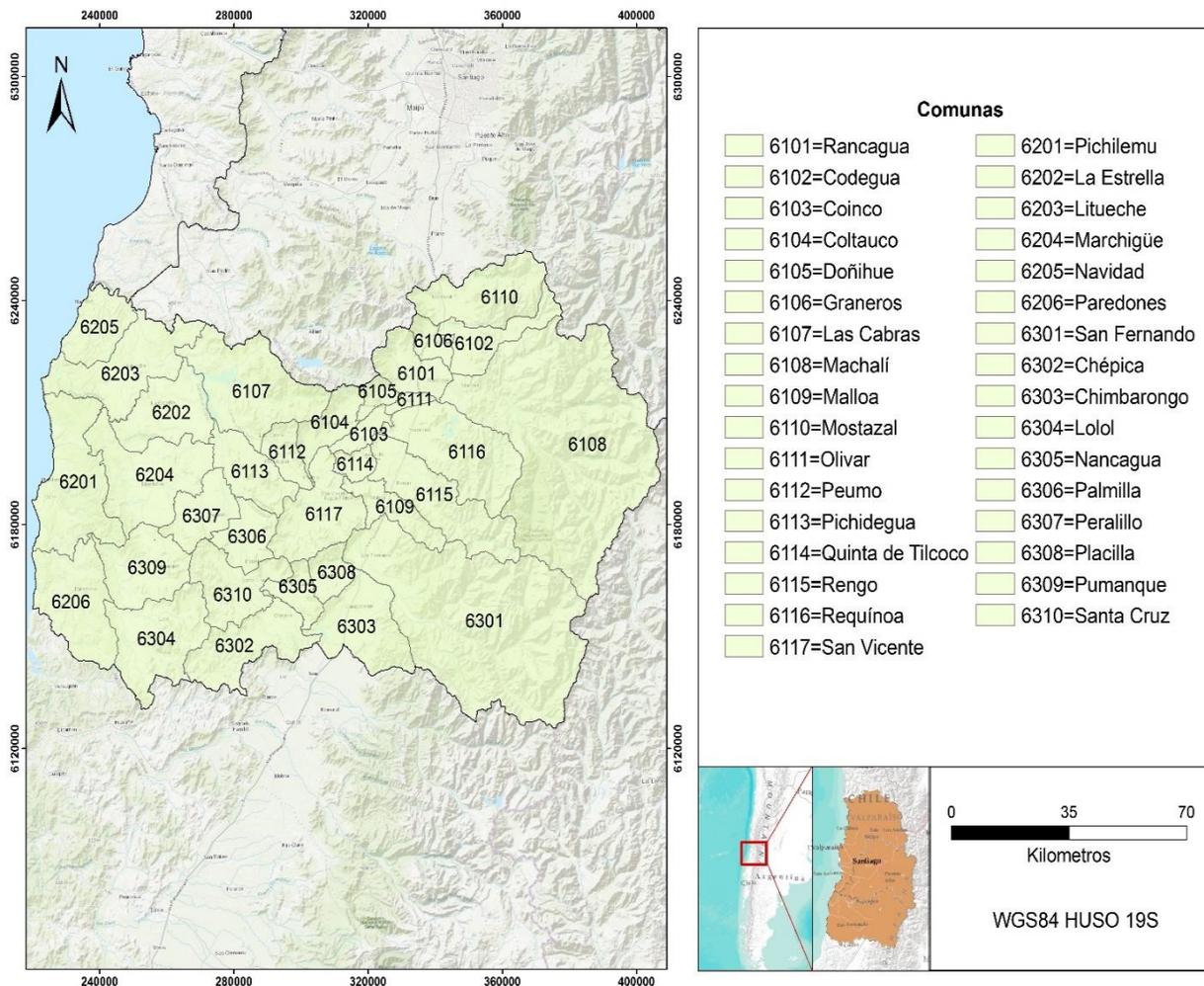


Figura N° 56: comunas Región de Valparaíso  
Fuente: elaboración propia

## 4.5.1 Promedio parámetro $\mu$ por comuna

A continuación, las tablas que aquí se presentan, contienen el promedio por comuna del parámetro  $\mu$ , el fin de esto, es reconocer cuales municipios reciben con mayor intensidad eventos de precipitación máxima. Cada estación presenta un promedio en las diferentes escalas cronológicas (24,48 y 72 horas). Aquellas que se encuentren dentro del 10% mayor, para cada escala, se encuentran identificadas con una barra roja en las casillas donde aparece el dato del promedio.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Tabla N° 12: Media estadística de eventos de precipitación máxima por comuna

Fuente: elaboración propia

COMUNA	Media 24H	Media 48H	Media 72H
Algarrobo	36,20	60,49	63,39
Alhué	40,04	51,28	66,92
Buín	31,83	51,63	72,71
Cabildo	40,41	41,18	50,08
Calera	44,38	52,74	72,81
Calera de Tango	28,56	43,46	59,13
Calle Larga	38,09	46,06	58,96
Cartagena	33,50	48,82	59,19
Casablanca	43,84	61,43	74,53
Catemu	34,55	34,70	50,01
Cerrillos	28,90	37,64	50,50
Cerro Navia	34,74	35,60	43,60
Chépica	44,70	63,11	87,51
Chimbarongo	39,12	60,12	81,59
Codegua	41,83	60,06	88,99
Coinco	52,12	56,27	77,17
Colina	44,88	50,27	64,19
Coltauco	55,30	59,45	80,13
Conchalí	34,27	37,92	49,07
Concón	39,11	53,38	72,11
Curacaví	43,05	53,47	70,67
Doñihue	47,99	54,03	72,13
El Bosque	29,79	43,59	58,87
El Monte	31,68	41,37	55,27
El Quisco	31,07	60,92	55,53
El Tabo	30,94	57,46	58,76
Estación Central	29,42	36,05	47,85
Graneros	39,67	52,68	75,42
Hijuelas	41,79	48,20	66,41
Huechuraba	37,11	41,90	53,95
Independencia	31,29	36,91	48,25
Isla de Maipo	32,82	47,95	65,39
La Cisterna	30,04	41,04	55,11
La Cruz	44,35	52,55	70,89
La Estrella	35,11	58,39	79,25
La Florida	41,92	46,91	61,93
La Granja	32,90	42,79	57,08
La Ligua	36,09	37,12	48,43
La Pintana	31,67	47,38	64,06

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

La Reina	46,62	47,89	52,28
Lampa	47,93	48,73	61,91
Las Cabras	31,38	49,80	66,98
Las Condes	48,27	45,71	58,89
Limache	54,51	54,65	73,25
Litueche	41,71	66,98	90,17
Llailay	38,60	39,86	54,77
Lo Barnechea	56,56	58,98	78,54
Lo Espejo	28,96	39,55	53,22
Lo Prado	30,93	35,05	46,18
Lolol	43,01	56,72	75,74
Los Andes	64,08	62,71	92,96
Machalí	48,83	70,76	95,77
Macul	35,86	39,49	52,03
Maipú	30,84	35,71	47,43
Malloa	36,89	51,67	72,27
Marchigüe	28,63	55,70	74,51
María Pinto	35,24	42,46	55,13
Melipilla	33,82	45,04	61,48
Mostazal	39,34	59,51	88,29
Nancagua	43,27	63,88	89,21
Navidad	44,01	72,17	92,44
Nogales	51,94	51,94	72,88
Nuñoa	37,04	37,80	49,47
Olivar	40,81	50,16	69,01
Olmué	57,29	56,35	76,17
Padre Hurtado	29,43	36,69	48,69
Paine	35,79	54,28	76,97
Palmilla	39,91	62,03	86,27
Panquehue	29,43	31,99	43,48
Papudo	34,83	41,40	54,87
Paredones	59,12	60,32	62,64
Pedro Aguirre Cerda	29,01	37,98	50,81
Peñaflor	29,03	39,37	52,72
Peñalolén	40,99	42,95	55,75
Peralillo	29,44	57,01	77,21
Petorca	31,02	33,72	44,20
Peumo	46,59	57,66	78,07
Pichidegua	39,23	55,47	75,17
Pichilemu	30,59	51,69	67,68
Pirque	34,94	58,25	82,79

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Placilla	49,16	66,09	91,60
Providencia	34,23	37,84	49,50
Puchuncaví	45,98	57,84	77,29
Pudahuel	37,40	39,04	42,89
Puente Alto	37,48	51,87	69,92
Pumanque	26,25	55,29	73,54
Putendo	36,09	39,40	54,58
Quilicura	39,78	40,48	46,89
Quillota	40,01	45,77	60,49
Quilpué	57,83	68,54	92,59
Quinta de Tilcoco	51,55	57,05	79,87
Quinta Normal	31,22	35,42	46,40
Quintero	39,13	56,29	74,87
Rancagua	41,59	52,06	71,30
Recoleta	33,20	38,47	50,07
Renca	35,23	36,72	44,85
Rengo	29,59	48,18	65,73
Requinoa	31,80	49,24	67,22
Rinconada	32,20	35,44	44,61
San Antonio	32,10	48,86	64,91
San Bernardo	29,37	46,20	63,30
San Esteban	39,60	44,67	64,41
San Felipe	28,14	30,27	39,29
San Fernando	34,22	59,89	78,17
San Joaquín	32,51	39,37	52,27
San José de Maipo	71,89	77,41	95,89
San Miguel	30,16	38,77	51,76
San Pedro	33,71	55,09	76,05
San Ramón	31,36	43,11	57,82
San Vicente	53,14	63,79	89,70
Santa Cruz	36,77	63,71	88,51
Santa María	28,08	32,26	42,09
Santiago	29,69	36,96	48,93
Santo Domingo	35,78	62,99	77,99
Talagante	30,31	44,33	60,29
Tiltil	51,62	49,65	66,21
Valparaíso	39,90	55,90	73,52
Villa Alemana	56,65	57,42	73,58
Viña del Mar	40,05	53,04	73,47
Vitacura	40,60	44,43	57,15
Zapallar	45,98	49,68	67,22

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

La tabla de distribución del parámetro  $\mu$  por comuna (Parámetro relativo a la media estadística), expone como elemento más notorio, que, por comuna, no hay una continuidad respecto al tamaño del comportamiento de  $\mu$  en cada escala cronológica por comuna. Es decir, los municipios que alcanzan mayores valores en una escala cronológica, la mayoría no vuelve a repetir esta tendencia en las otras. De esta manera complejiza el análisis, dejando entrever que la intensidad de las precipitaciones no es constante en el territorio, ni en escala cronológica, ni en la superficie donde afectan.

Las comunas que presentan los mayores valores de  $\mu$  son. Quilpué, San José de Maipo y San Vicente. Ninguna colindante entre sí, pero con un elemento en común, asociado precisamente a su ubicación. Para todas estas comunas, parte del territorio comunal, o en su totalidad se encuentran en zonas montañosas. La primera (Quilpué), se ubica en la cordillera de la Costa, cercana al parque nacional la campana, lugar donde están los mayores valores  $\mu$  a nivel general. No obstante, la extensión del municipio, no se encuentra totalmente en zonas montañosas, sino que también en valle, pero debido al tipo de análisis, todo el territorio comunal obtiene un alto promedio de  $\mu$ . Sobre San José de Maipo, además de su gran extensión, la totalidad de su territorio se ubica en la cordillera de los Andes, lugar donde comparte los altos valores de  $\mu$  con la cordillera de la Costa. Por último, la comuna de San Vicente, a diferencia de las anteriores, se encuentra en la zona denominada como "valle intermedio", donde habitualmente la precipitación es menor en relación con cumbres o zonas a barlovento, más, parte de la comuna se encuentra en el cordón montañoso de Millahue, lugar que en la región de O'Higgins muestra mayor intensidad en las precipitaciones. Otros municipios con altos valores promedio en  $\mu$  son: Villa Alemana, Olmué (Ambas colindantes a Quilpué), Coinco, Coltauco, Los Andes y Lo Barnechea. Es importante destacar que la comuna de Los Andes se ubica en el mismo valle que San Felipe, la comuna con el menor valor  $\mu$  para eventos de precipitación máxima, en todas las escalas cronológicas. Sin embargo, Los Andes tiene parte importante de su territorio esta en altas cumbres de la cordillera del mismo nombre.

Algo que llama particularmente la atención es que, a nivel general, los valores más elevados de  $\mu$  para eventos de 48 horas, pertenecen a comunas ubicadas en zonas costeras o en la cordillera de la Costa, únicamente Machalí es parte del 10% de las comunas con los valores más altos para  $\mu$  de 48 horas. Para eventos de 72 horas, nuevamente se cumple una condición similar a aquella observada para 48 horas. Las comunas que se ubican en zonas costeras presentan los valores más altos. (Ver Tabla N°10)

Respecto a los valores más bajos para el parámetro  $\mu$ , estos corresponden a las comunas de San Felipe y Petorca, estas, poseen las menores cifras para todas las escalas cronológicas. Dicha condición, también se extiende a algunas comunas ubicadas en el valle del río Mapocho, como Pudahuel o Quinta Normal. En la región de O'Higgins, aquellos municipios con cifras menores son, Pumanque, Marchihue y Paredones.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Entablando una relación entre comunas y habitantes; todas aquellas que cuentan con los mayores valores de  $\mu$  (10% superior en cada escala), no poseen gran cantidad de población a nivel general. Sin embargo, algunas están integradas a áreas urbanas más densamente pobladas; tal es el caso de Quilpué y Villa Alemana, parte del Gran Valparaíso o Lo Barnechea, parte del Gran Santiago. No obstante, es importante destacar que si bien algunos municipios con mayor tendencia a recibir altas intensidades de precipitaciones no son parte de grandes centros urbanos. Si son aledañas, y, potenciales fenómenos originados en estas, pueden terminar afectando de igual forma a otras comunas. Un ejemplo son las zonas con mayor concentración de precipitaciones asociadas a la cordillera de la Costa, contiguas al gran Valparaíso. Donde tal como se hizo referencia en el análisis de los eventos más potentes que han afectado a la zona, intensas precipitaciones en cordillera de la Costa, genera escorrentía que de igual manera afectan a la ciudad mencionada.

### **4.5.2 Promedio de precipitaciones para eventos de precipitación máxima en periodo de retorno.**

Si bien, el análisis anterior considera otra variable, ya se ha observado la relación entre los parámetros  $\alpha$  y  $\mu$ , y periodos de retorno. Nuevamente se cumple este nexo, y esto lo evidencian las comunas que alcanzaron un promedio del parámetro  $\mu$  elevado (todas dentro del rango del 10% mayor, en más de dos escalas cronológicas). Estas son, Coinco, Coltauco, Los Andes, San José, San Vicente y Quilpué. En el otro extremo, nuevamente con cifras menores, se encuentran San Felipe y Petorca.

Tal como se hizo referencia, hay similitudes entre variables, tanto para parámetros mencionados como específicamente entre periodos de retorno. Más, algo que se hace notorio, es la variación en la distribución de periodos de retorno de 50 años. Donde Comunas cercanas a la costa, como el Tabo. La Cruz, La Calera extienden se suman al área de influencia de valores más intensos.

En la cuenca del Río Maipo, municipios ubicados próximos a cordillera o en pre cordillera, si bien, no llegan a los mismos valores que alcanzan comunas como San José de Maipo o Lo Barnechea, sus promedios de umbrales para cada periodo de retorno. Dichas comunas corresponden a Las Condes, La Reina, Peñalolén, Puente Alto, La Florida, estas además de estar expuestas a eventos intensos de precipitación, aumentan su exposición debido a que son contiguas, a otras zonas con umbrales de periodos de retorno más intensos.

Sobre la región de O'Higgins y la escasez de estaciones meteorológicas en la cordillera, genera relativa incertidumbre en los resultados mostrados, específicamente para Machalí y San Fernando, aunque esta última, si cuenta con estación meteorológica en los valles mejorando relativamente los datos, pero, la zona de alta cordillera queda desprovista, hecho que afecta aún más los datos para Machalí, ya que, esta cuenta con gran parte de su territorio en alta cordillera. Por lo anterior, se encerró en un círculo verde la comuna de Machalí, en los mapas a continuación, con el fin de evidenciar esta situación.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

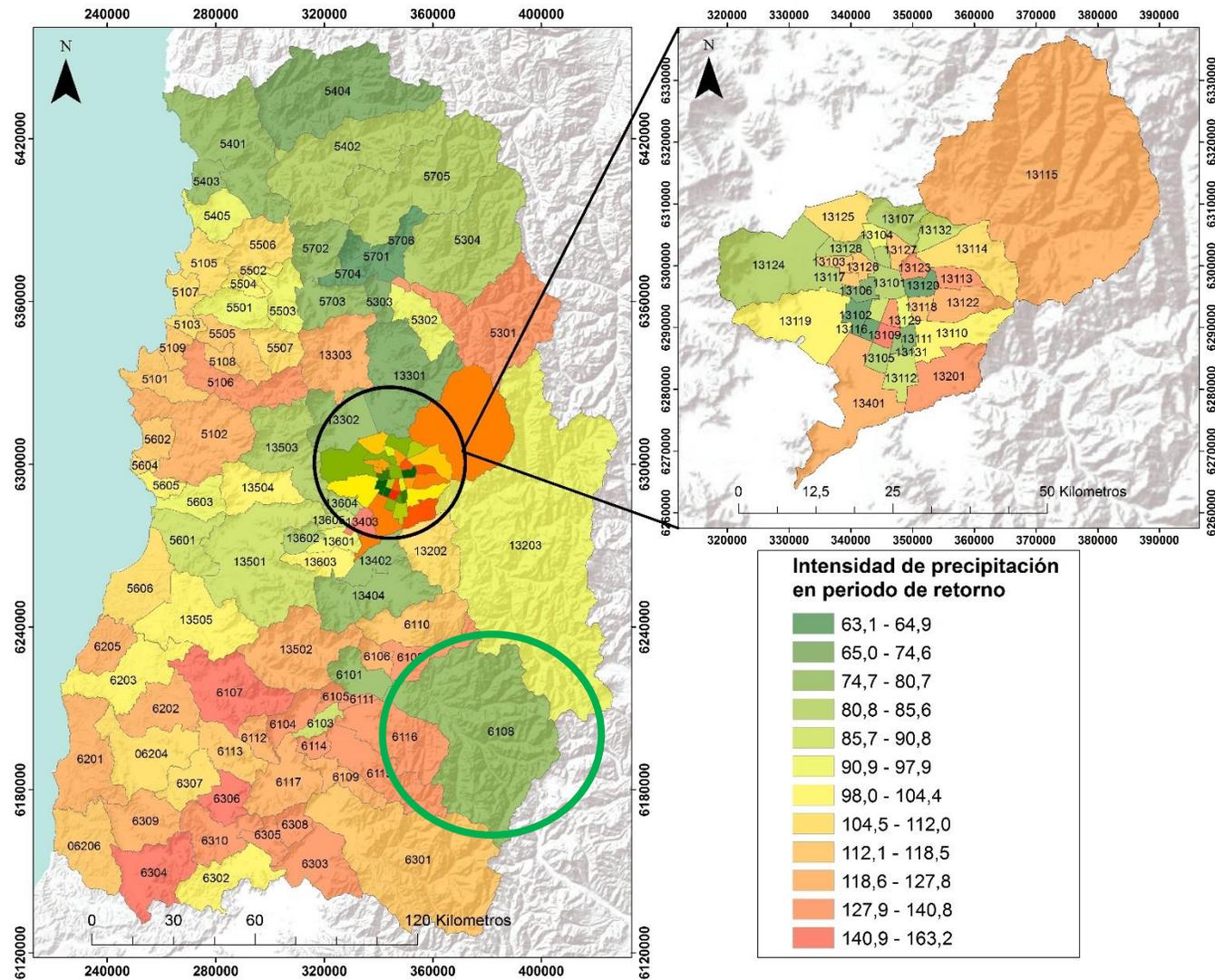


Figura N° 57: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 24 horas, en periodo de retorno de 10 años  
Fuente: Elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

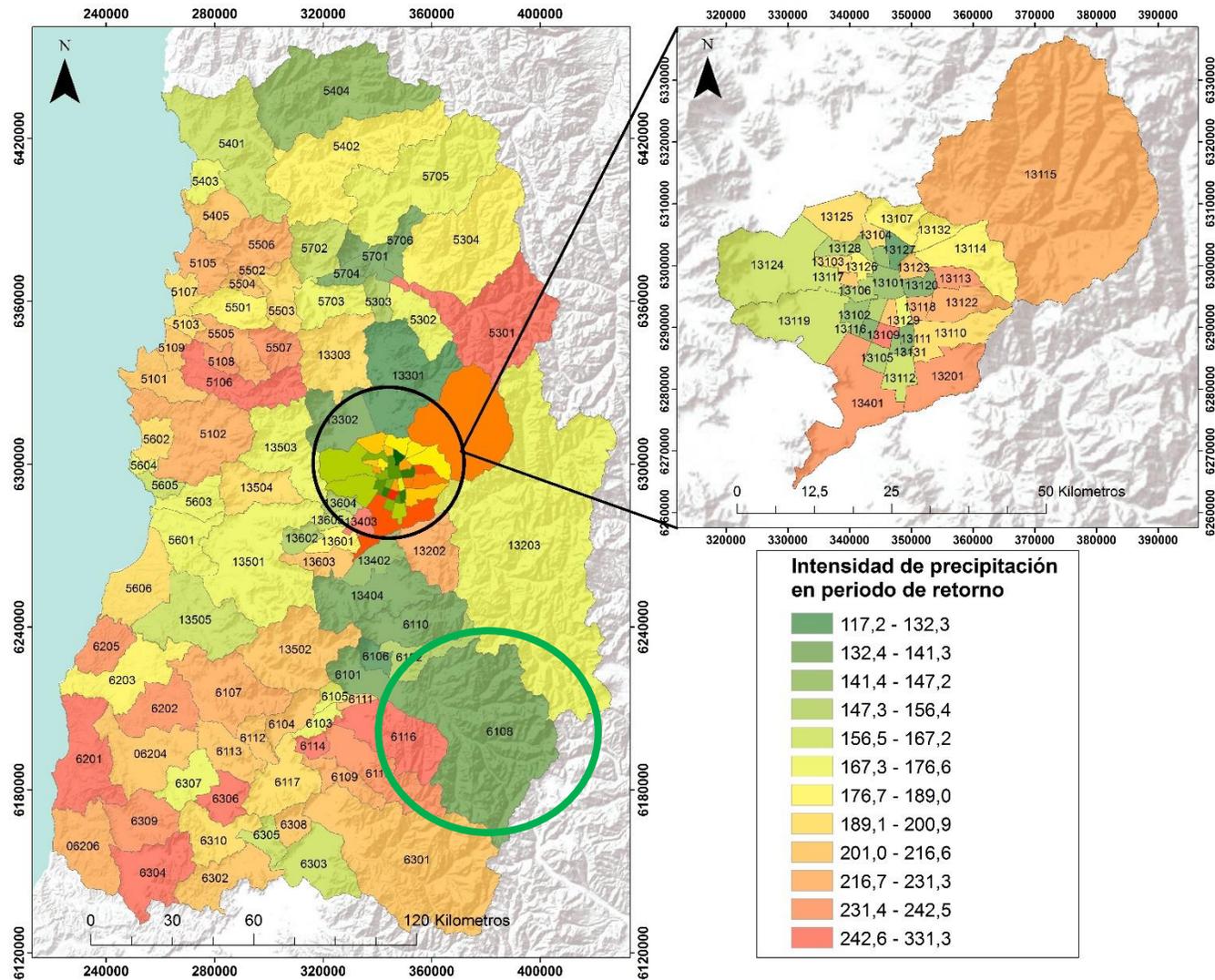


Figura N° 58: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 24 horas, en periodo de retorno de 50 años  
Fuente: Elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

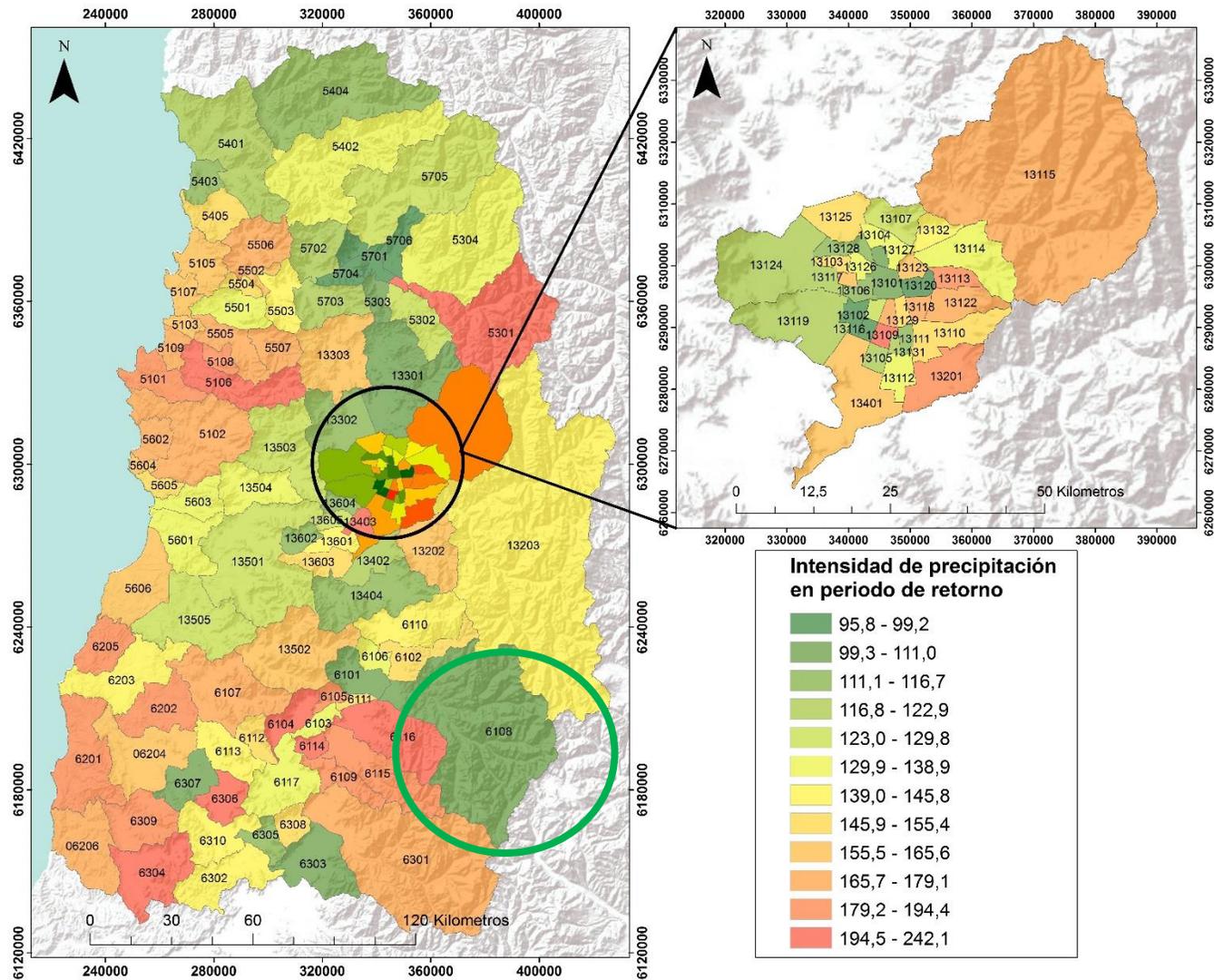


Figura N° 59: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 24 horas, en periodo de retorno de 100 años  
Fuente: Elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

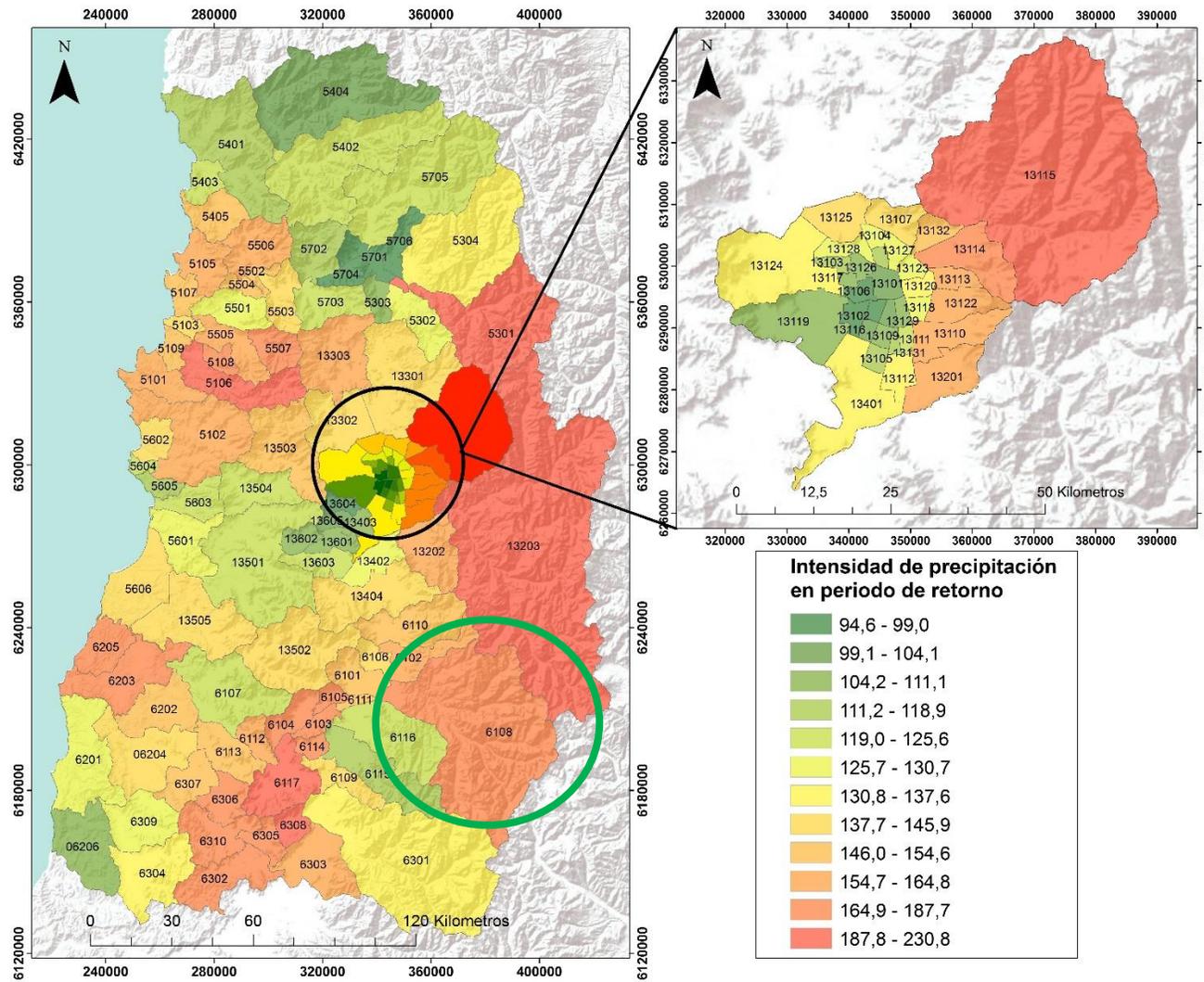


Figura N° 60: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 48 horas, en periodo de retorno de 10 años  
Fuente: Elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

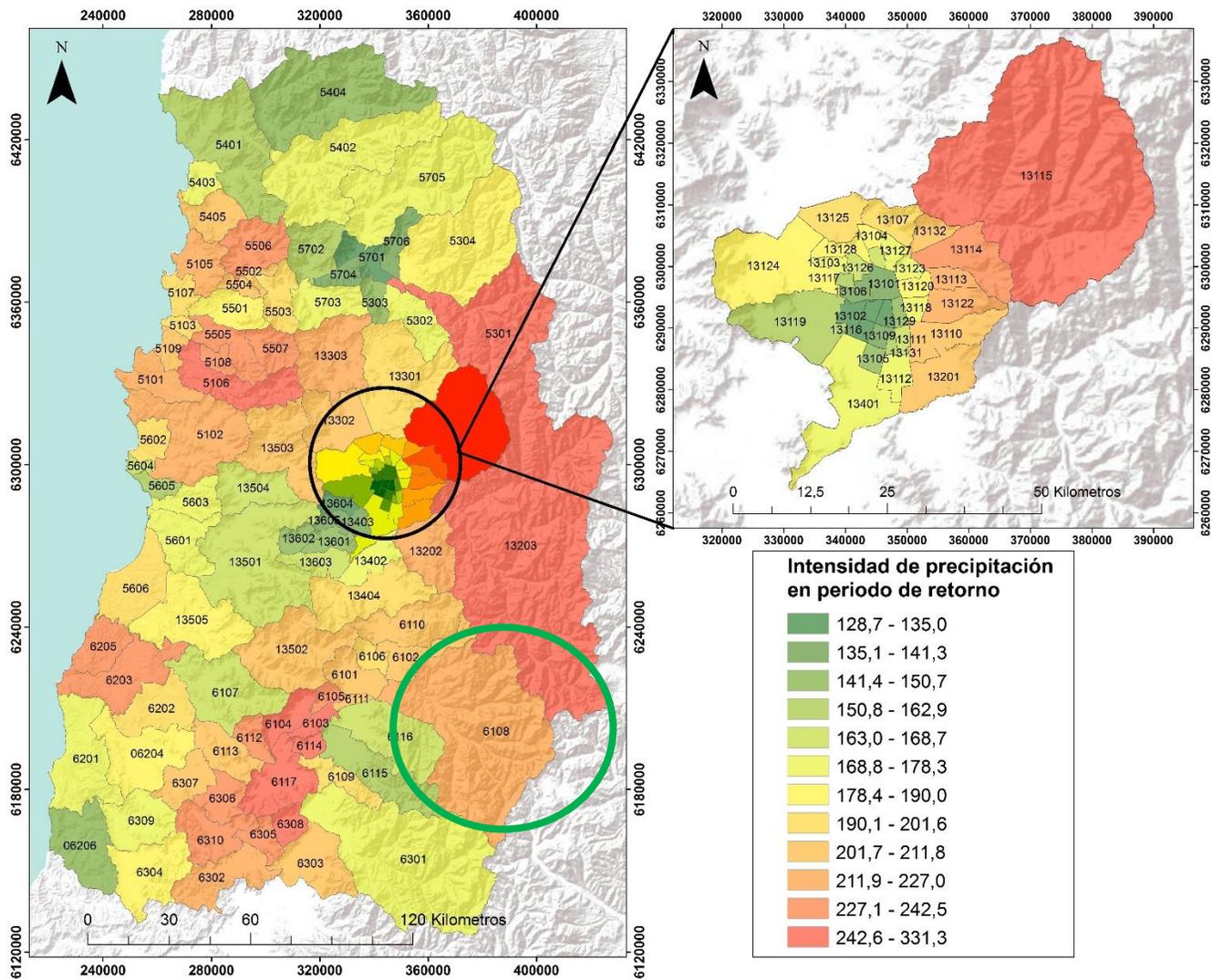


Figura N° 61: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 48 horas, en periodo de retorno de 50 años  
Fuente: Elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

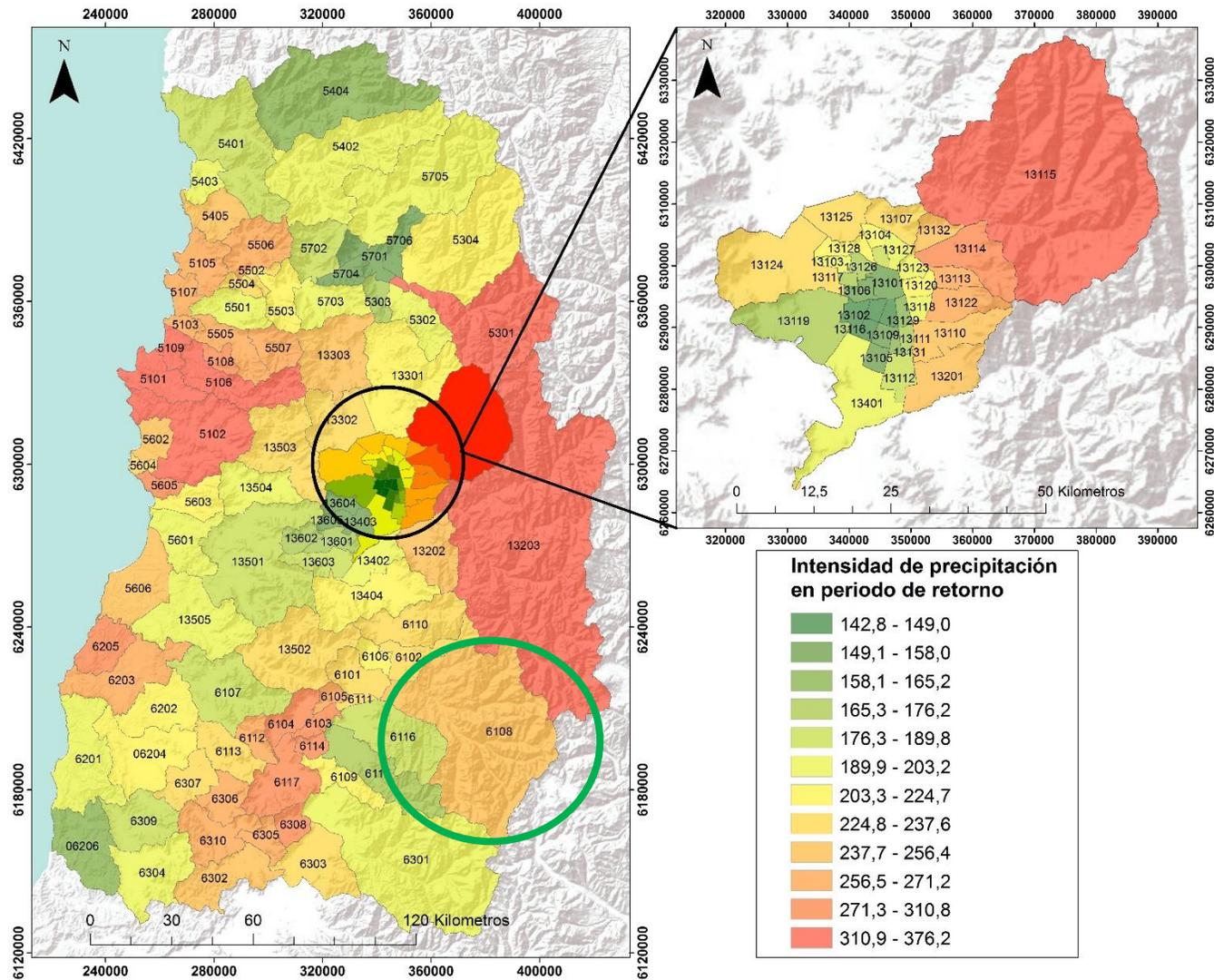


Figura N° 62: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 48 horas, en periodo de retorno de 100 años  
Fuente: Elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

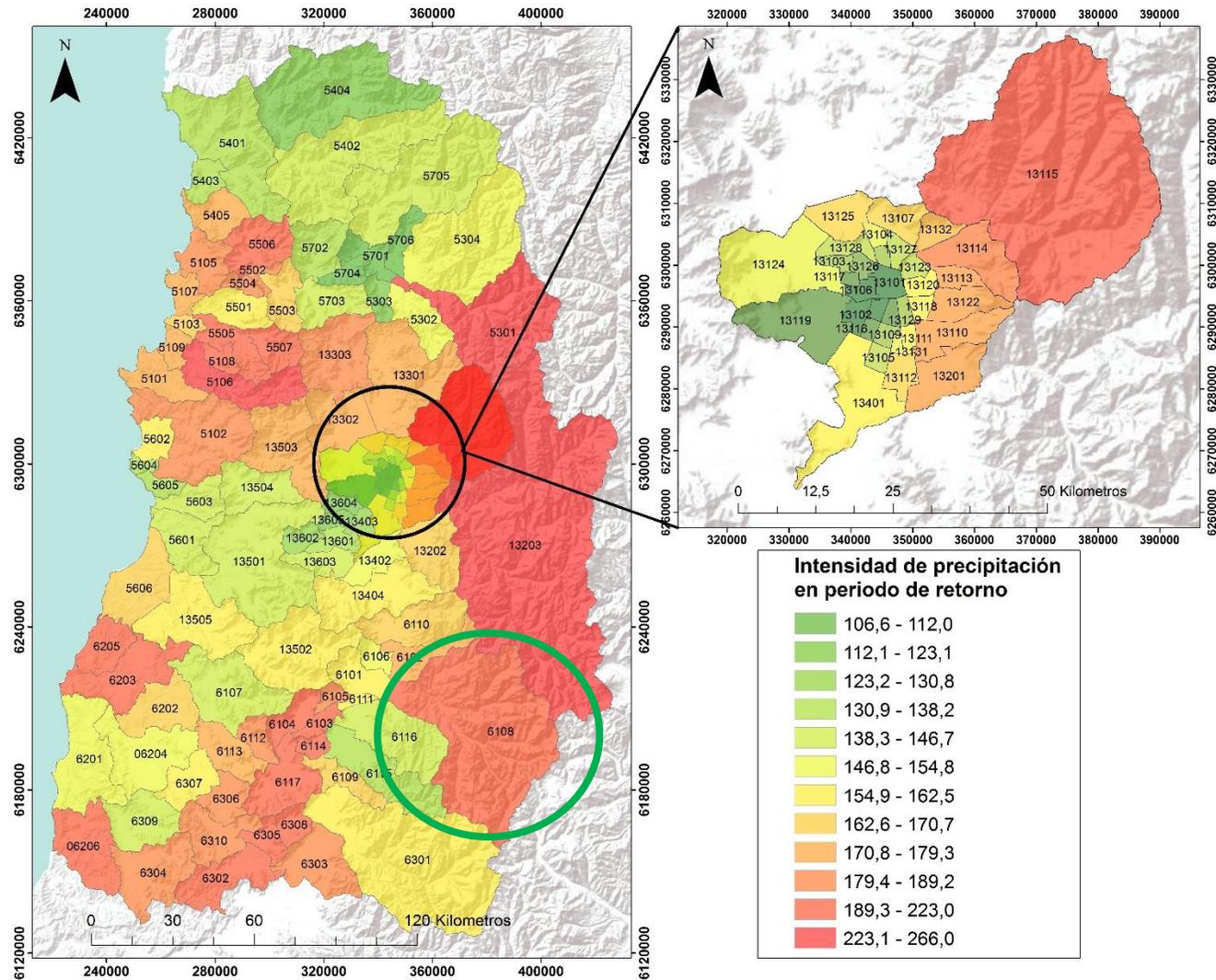


Figura N° 63: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 72 horas, en periodo de retorno de 10 años  
Fuente: Elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

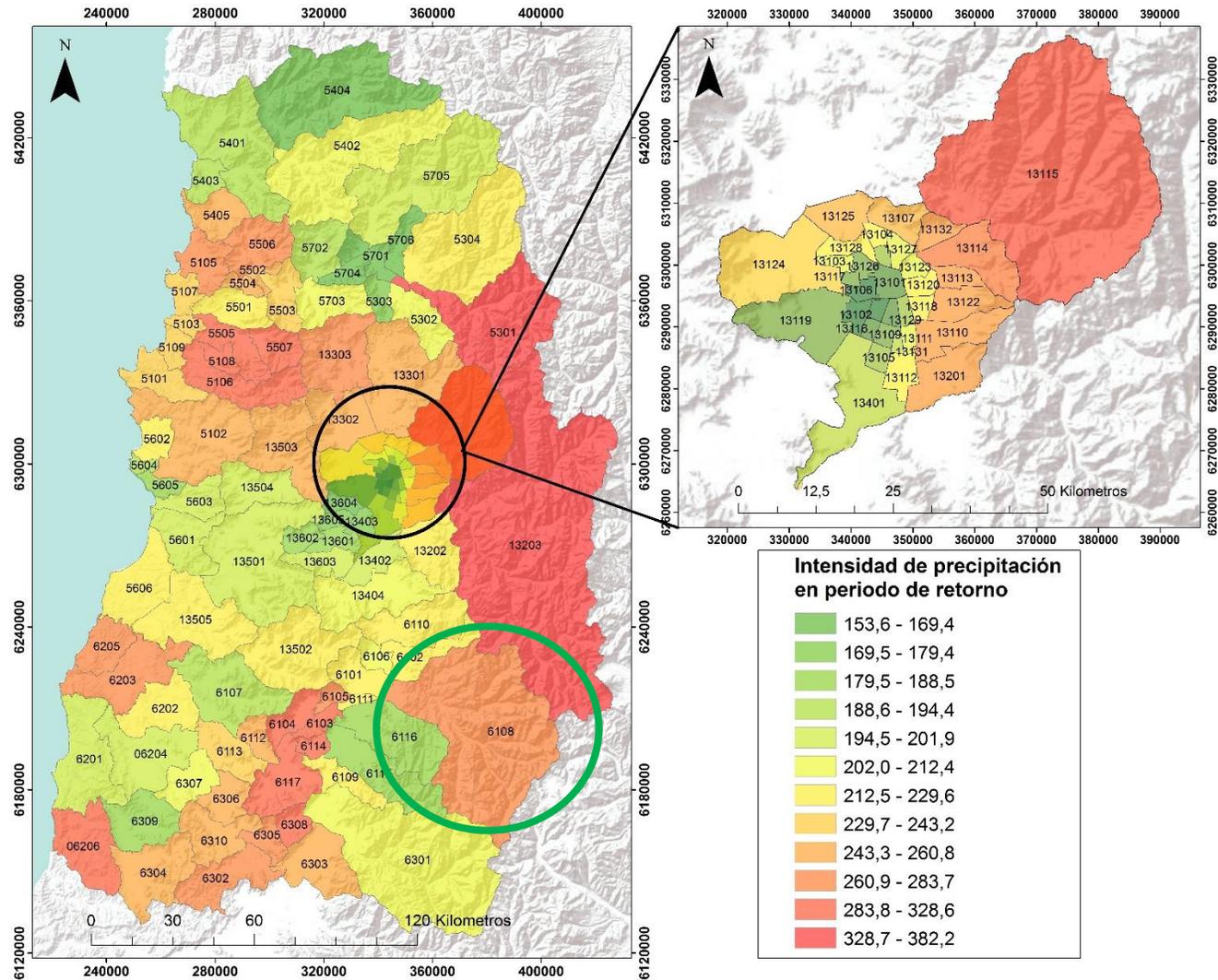


Figura N° 64: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 72 horas, en periodo de retorno de 50 años  
Fuente: Elaboración propia

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

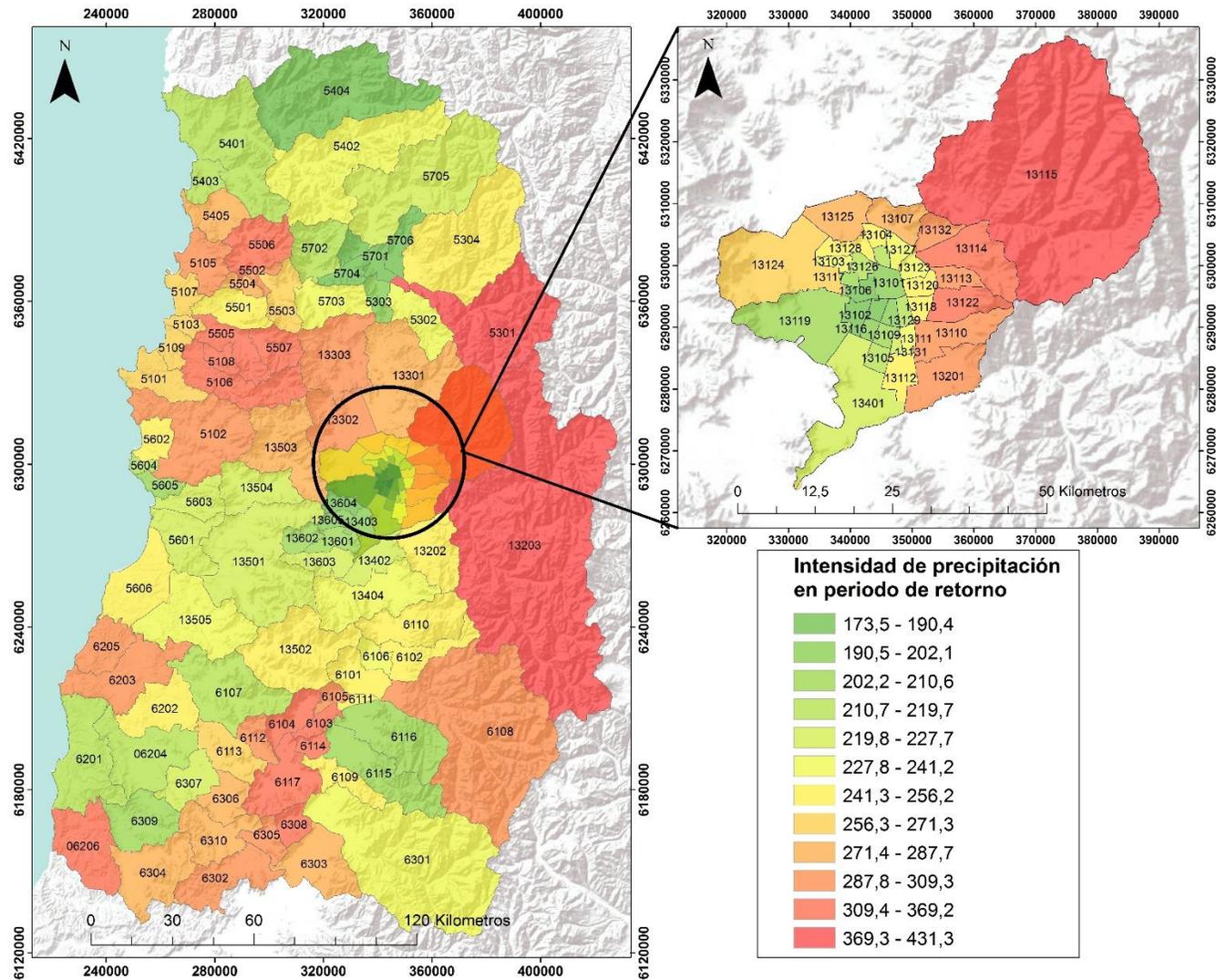


Figura N° 65: Intensidad de precipitaciones por comuna, en eventos de 72 horas, en periodo de retorno de 100 años  
Fuente. Elaboración propia

## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 5.1 Discusión

Es preciso, a partir nuestros resultados comparar con otros estudios previos. Pizarro *et al.* (2007), indica que los eventos son concentrados en esta región central de Chile; su condición de clima de transición tiende a aportar la mayor cantidad de precipitaciones en las primeras horas del evento, asunto no probado por esta investigación dado el análisis a escala diaria. Sin embargo, coincide a resolución de 24 horas. Se debe agregar que a diferencia del estudio de Pizarro *et al.* (2007) se logra analizar casos de 48 y 72 horas, revelando que los eventos extremos tienden a acumular una cantidad importante de precipitaciones hasta 48 horas, tal como se pudo ver en el resultado N°1.

Si bien al sur del área de estudio la precipitación es más regular (Sarricolea y Martín-Vide 2014), y por ende amerita expandir el periodo cronológico de análisis de un evento extremo, en Chile central no es necesario.

Considerando que la intensidad se mantiene o aumenta hasta 48 e incluso 72 horas, tal y como se expuso en el objetivo N°2, se estima que para catalogar un evento de precipitación extrema, no existe solo una definición. En este sentido, autores como Pizarro *et al.* (2007) o Hauser (1985), han entregado antecedentes sobre estos fenómenos en relación con las condiciones locales. Hauser (en Elmes, 2015), para el piedmont la región Metropolitana, señala que un evento extremo es aquel que alcanza los 60 milímetros en un periodo menor o igual a 24 horas. Sin embargo, más allá de un único umbral es necesario precisar mejor los umbrales pluviométricos que gatillen remoción en masa en conjunción con factores geológicos y geomorfológicos.

En zonas de la cordillera de los Andes de la región metropolitana, se presentan eventos por sobre los 60 milímetros, sumado a esto, los periodos de retorno incluso para 10 años sobrepasan por mucho este umbral. En esta zona de la cordillera principal es necesario conocer la fracción líquida y sólida de los eventos, pues las interpolaciones pueden resultar poco satisfactorias y aumentar significativamente las cifras acumuladas (Viale *et al.* 2013).

Otro elemento necesario mencionar, es que la definición de un umbral se complejiza aún más para la estimación de umbrales. La metodología de cálculo varia, por ejemplo, considerando el promedio de días húmedos. Para el área de estudio, se encuentra el problema de la irregularidad de las precipitaciones, y como se pudo comprobar en los resultados de esta investigación existe una gran variabilidad en el territorio, incluso como se observa en el resultado N°2, los mayores eventos registrados tienen un comportamiento variado y a esto se debe agregar que también la oscilación del sur (El Niño) el cual exacerba la distribución de precipitación. Por ejemplo, en la etapa cálida, los periodos de retorno pueden ser más altos en intensidad y/o tener una mayor frecuencia, vale decir, mayores montos diarios y con periodos de retorno más cortos.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Sobre la relación entre la distribución de eventos de precipitación máxima en la zona se puede decir que el relieve modula la intensidad. Si se considera que, además, la zona correspondiente al área de estudio, según Aravena (2006) se ubica en la denominada “zona de transición”, es preciso identificar aquellos lugares donde los efectos de disparo pluviométrico son potencialmente mayores. Es así como se plantea que, cumpliendo con la distribución general de las precipitaciones, las áreas ubicadas en cimas y laderas a barlovento, son afectadas por precipitaciones más intensas, con mayor duración horaria y de periodicidad de eventos más alta, tal como indica el resultado N°1.

En el análisis de los mayores eventos que afectaron en la última década, se ve como la intensidad se distribuye de manera desigual, marcando valores mayores principalmente en cordillera de la Costa y de los Andes con una consecuente atenuación de los efectos en valles. Lo anterior asociado al efecto del disparo pluviométrico para el primer caso y sombra pluviométrica en el segundo, tal como explicita Romero, Vázquez, Smith (2010). Sin embargo, esta aseveración tiene una escala diferente ya que se utiliza para análisis climáticos, no a escala meteorológica. Además, tal como explica Viale y Garreaud (2013), un frente frío (los más habituales y con mayor intensidad que afectan a la zona), se distribuye aleatoriamente y no ha sido posible comprobar si existe una relación entre el relieve y sus variaciones locales.

Respecto al punto anterior, Viale y Garreaud (2013), proponen que asociado a la gradiente altitudinal hay un efecto aparente en la activación o debilitamiento de los frentes a su paso por zonas montañosas, específicamente para la zona de estudio se presenta una condición posiblemente comparable con el concepto “disparo pluviométrico”, ya que, el efecto de la gradiente altitudinal reactiva el frente, el que aporta humedad precipitable en la masa nubosa.

Un resultado interesante se expresa en los perfiles pluviométricos y topográficos, los que aumentaban la intensidad de la lluvia en las laderas, y se presentaban más “estables” en la cima, como así también en valles. El gradiente altitudinal tenía un efecto inverso desde el paso de la cima al valle, debilitando la intensidad de este, explicando los valores de precipitación menores que reciben aquellas zonas ubicadas tras la cordillera o relieve acusado. Sin embargo, la atenuación de estos eventos nuevamente se ve reactivada al encontrarse con la cordillera de los Andes, pero, a pesar de la diferencia altitudinal importante entre ambas cordilleras, los mayores valores para la media de eventos de precipitación máxima se localizan en estaciones de cordillera de la Costa, ya que, si bien los valores interpolados entregan mayores valores para las cumbres de la cordillera Principal. No obstante, es complejo corroborar ese dato por la poca o nula inexistencia de estaciones meteorológicas en el área, conclusión similar a la llegada por Viale y Garreaud (2013) quien determina que es preciso contar con mayor número de estaciones para validar lo propuesto.

## Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

Respecto a los datos obtenidos estos se dificultan al verificar entre los valores de estaciones y el TRMM, debido a la poca cantidad de estaciones meteorológicas presentes en el área, incluso muchas de ellas presentaban datos discontinuos e interrumpidos. Más aun, en zonas de la región de O'Higgins la cordillera de Los Andes esta desprovista de estaciones meteorológicas. Es deseable a futuro aplicar la metodología por Pizarro et al (2007) a escala horaria, siendo preciso contar con datos provenientes de pluviogramas, los cuales son escasos en la región de Valparaíso y O'Higgins, dejando una labor compleja de realizar. Por este motivo, el análisis final es realizado a escala diaria. Sin embargo, para utilizar estos datos fue necesario completar series con lagunas mediante la metodología aportada por Serrano (2017), quien menciona la necesidad de reconstrucción de datos en base a algoritmos que optimizan la información y mejoran la cobertura espacial. Esta propuesta fue recogida por la investigación y permitió ampliar el arco de análisis dando mayor densidad de datos y derivó en una mejor interpolación. Además, al comparar con los datos recolectados por CR2, con las estimaciones no hay valores fuera de rangos ni sobre ni subestimaciones. Ello dista bastante con los datos obtenidos del satélite TRMM que en la mayor parte de los casos observados en el resultado N°2, subestima la cantidad de precipitación. Junto con esto y considerando lo que aporta Barret et al. (2011), quienes menciona la posibilidad de tendencia a error en la estimación de precipitación en zonas montañosas y laderas, debido al método utilizado por el satélite (ya mencionados), por este motivo, la utilización de hidroestimaciones de TRMM, entregan una aproximación al comportamiento del evento, pero debe ser corroborada con datos locales que entregan las estaciones meteorológicas.

## 5.2 Conclusión

Los fenómenos de precipitación máxima deben ser comprendidos desde una óptica más amplia y que no solo considere los factores atmosféricos, sino que también de superficie, ya que, la orografía influye variando tanto la intensidad como la frecuencia y posiblemente duración de los eventos.

El relieve junto con sus distintos atributos (la altitud, orientación de laderas y tipo de sustrato) es fundamental para la distribución de precipitación, pues gatillan y generan de modo diferenciado amenazas tales como remoción en masa.

Entregar a mayor detalle los umbrales para clasificar fenómenos de precipitación extrema, permite prever y ajustar planes de acción más allá de las 24 horas previas de un evento. A ello, se le debe añadir un análisis de condiciones locales que determinen cuales zonas son más propensas a recibir mayores montos de precipitación en cada periodo de retorno estimado.

En el centro de Chile central son habituales los fenómenos de “disparo pluviométrico”, término que permite ejemplificar la mayor intensidad de eventos extremos observados; y “sombra pluviométrica”, que trata sobre el debilitamiento de la intensidad de los eventos.

La falta de estaciones meteorológica deja desprovisto parte del territorio, principalmente en alta cordillera y en zonas costeras, solo centrándose en valles ubicados entre ambas cordilleras, más específicamente en el valle del río Maipo. De lo anterior, la búsqueda de otras fuentes de datos pluviométricos, como por ejemplo imágenes satelitales, se ve mermada por la escasa precisión de ellos en relieves accidentados, reduciendo su utilidad a escalas locales. TRMM posee un tamaño del pixel grande (25x25 km), el cual mediante mejoras de resolución estadísticas no aporta más información que la original.

Por ello, se recomienda mantener y aumentar la red de estaciones meteorológicas (principalmente en la cordillera principal, poniendo el foco en Quinta y Sexta región) y a su vez diversificar los instrumentos relacionados (por ejemplo, con radar meteorológico y pluviógrafos).

Por último, con todo lo anterior, la hipótesis propuesta se cumple dado que como se planteó, la orografía modula los eventos de precipitación, los cuales se asocian principalmente a frentes de origen frío (en esta zona) y si bien no es exclusivo como factor que determina la intensidad o frecuencia de un evento, este sí presenta injerencia comprobando que en escala de eventos temporales hay una relación entre la superficie y la atmósfera.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENCIA NACIONAL DE METEOROLOGIA (AEMET). 2015. Manual de uso de términos Meteorológicos. Edición 2015 [en línea] <[http://www.aemet.es/es/conocerlas/recursos\\_en\\_linea/publicaciones\\_y\\_estudios/publicaciones/detalles/Manual\\_de\\_uso\\_de\\_terminos\\_met\\_2015](http://www.aemet.es/es/conocerlas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/Manual_de_uso_de_terminos_met_2015)> [consulta: 17 noviembre 2016]
- ALBORNOZ, F. 2017. Geodinámica de laderas en el fiordo Comau, Región de los Lagos, Chile. (Tesis para optar al grado de Magister en Geografía, mención Recursos territoriales). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. 95p
- ARAVENA, D. 2006. Análisis comparativo de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de 31 estaciones pluviográficas ubicadas en la zona árida y semiárida de Chile. Tesis para optar al título de Ingeniero Forestal. Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales, 122p
- 
- ÁVILA, K. 2012. Análisis del comportamiento de eventos extremos de precipitación en la zona centro y sur de Chile Continental. Tesis. Máster Oficial. Agua. Análisis interdisciplinarios y Gestión Sostenible. Universidad de Barcelona. España. 32p
- ÁVILA, K. y VIDE, M. 2013. Análisis estadístico de los eventos extremos de precipitación en la zona centro y sur de Chile continental. Cuadernos Geográficos 52(1):69-83,
- BARRET, B., BASTINE, D. y BARLOW, C. 2011. Multiday Circulation and precipitation Climatology During Winter Rain Events of Differing Intensities in Central Chile. Journal of Hydrometeorology 12: 1071-1084.
- BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. 2017. Sistema integrado de información territorial Valparaíso, Chile, Región de Valparaíso [en línea] <<https://www.bcn.cl/siit>> [consulta: 20 diciembre 2017]
- BIDEGAIN, M. Taller de introducción a la meteorología, Masas de aire y frentes [Diapositivas] Uruguay, Universidad de la Republica [2010] 11d
- CARUSO, S y BUSINGER, S. 2006. Subtropical Cyclogenesis over the Central North Pacific. Subtropical Cyclogenesis over the Central North Pacific. American Meteorological Society, 21: 193-205.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

- CERECEDA, R.2008. Propuesta de un método para la construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en estaciones pluviométricas de Chile Central Tesis para optar al título de Ingeniero Forestal. Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales, 145p
- CHANDRASEKAR, A. 2010. Basics of atmospheric science, Nueva Delhi. Editorial PHI learning private limited.464p
- CHARDON, A. 2011. Un enfoque geográfico de la vulnerabilidad global de un hábitat urbano de ladera expuesto a amenazas naturales. El caso andino de Manizales (Andes de Colombia). [en línea]. < [http://idea.manizales.unal.edu.co/gestion\\_riesgos/descargas/gestion/Desarrollourbano.pdf](http://idea.manizales.unal.edu.co/gestion_riesgos/descargas/gestion/Desarrollourbano.pdf)>. [consulta: fecha].
- DIRECCIÓN METEOROLOGICA DE CHILE (DMC).2017, Anuarios climatológicos de Chile 1920-2012 [en línea] < <http://164.77.222.61/climatologia/>> [consulta: 20 noviembre 2016].
- DIRECCION DE OBRAS HIDRAULICAS (Ministerio de Obras Públicas).2016 Glosario [en línea]< <http://www.doh.gov.cl/publicacionesyestudios/Paginas/default.aspx>> [consulta: 11 noviembre 2016]
- DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA Y LOS OCEANOS. 2004. “El sistema Climático”. Facultad de ciencias naturales y exactas, Universidad de Buenos aires. Unidad N°1, El sistema Climático, 2004
- DESINVENTAR.2017. Sistema de inventario de efectos de desastres [en línea] < <https://online.desinventar.org/desinventar/#CHL-1257983285> [chile inventario historico de desastres](http://chile.inventariohistorico.de.sastres) > [consulta: 7 octubre 2017]
- EDBON, D. 1982. Estadística para Geógrafos. Barcelona: Oikos-tau S.A., 352p
- ELMES, M. 2016-. Amenaza debido a eventos de precipitación máxima entre los 21° y 34° latitud sur de Chile Continental: Análisis de umbrales hidrometeorológicos, gatillantes de remoción en masa por flujos en la cuenca del Río Copiapó. (Tesis para optar al grado de Magister en Geografía, mención en Recursos Territoriales), Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 188p

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

- ESCOBEDO, C. 2014. Análisis geográfico y tendencia de la irregularidad temporal y especial de las precipitaciones diarias en Chile central, entre los 30° y 35° S de latitud. (Periodo 1965-2010). Memoria para optar al título de Geógrafo. Carrera de Geografía). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. 81p
- FIGUEROA, P. 2014. Variabilidad de las precipitaciones (1965 – 2012) en Chile centro – sur mediante índices estadísticos y temporales de las irregularidades. Memoria para optar al título de Geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 96p
- FUENZALIDA, H., SÁNCHEZ, R. & GARREAUD, R. 2005. A climatology of cutoff lows in the Southern Hemisphere. *Revista Geophysical research*, 110: 2-10,
- GARREAUD, R. 1994. Configuraciones atmosféricas regionales durante grandes tormentas pluviales en Chile central. *Revista Meteorológica*, 19:73-81.
- GARREAUD, R. 2005. Circulación general de la atmósfera [Diapositivas], Santiago, Departamento de Geofísica; Texto en español.
- HILL, D., HAYWOOD, A., VALDES, P., FRANCIS, J., LUNT, D. y WADE, B. y BOWMAN, C. 2013. Paleogeographic control on the onset of the antarctic circumpolar current. *Revista Geophysical Research Letters*, 40:5199-5204
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. 2017. Resultados preliminares CENSO 2017 [en línea] < <http://www.censo2017.cl/> > [consulta: 17 octubre 2017]
- LUEBERT, F & PLISCOFF, P. 2006, Sinopsis bioclimática y vegetación de Chile, Santiago de Chile: Editorial Universitaria, S.A. 323 p
- MAURO, A. 2002, El sistema climático, fundamentos físicos del clima. Valparaíso: Editorial Universidad de Valparaíso. 383p
- MUÑOZ, C.2009. Variabilidad interanual de la precipitación invernal en Chile central no asociada al ciclo El Niño-Oscilación del sur. (Tesis para optar al título profesional de Geofísico.), Concepción, Chile. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2009.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA).2017, Goddard Space Flight Center [en línea] < <https://www.nasa.gov/goddard> > [consulta: 2 mayo 2017]

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

- NATIONAL SNOW & ICE DATA CENTER (NSIDC).2016. Cryosphere Glossary, [en línea] < <https://nsidc.org/cryosphere/glossary/term/cyclogenesis> > [consulta: 17 noviembre 2016]
- NEIRA, F. 2010. Elaboración de la cartografía climática de temperaturas y precipitaciones mediante redes neuronales artificiales: caso de estudio en la región del Libertador Bernardo O'Higgins. (Tesis para optar al título de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias agronómicas,
- OFICINA NACIONAL DE EMERGENCIA (ONEMI). 2002 Sistema frontal, norte, centro y sur 2-5 junio 2002. Santiago: Edición Unidad de riesgos de origen natural. 35p.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE METEOROLOGIA. 2016 (OMM), Official terminology database [en línea] < <http://wmo.multitransms.com/MultiTransWeb/Web.mvc>> [consulta: 11 noviembre 2016]
- PÉREZ, L. 2010. Paleoclimatic records:clues to explain climate variability, [Diapositivas] México, Geofísica UNAM; Texto en Inglés y Español [2010] 84d
- PIZARRO, R. ABARZA, A. ARAVENA, D. CORNEJO, M. LABRA, M. MACAYA, K. PAVEZ, M. ROMAN, L. 2007. Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia, para la zona centro sur de Chile. Editorial Universidad de Talca. Documentos Técnicos, UNESCO, phi-lac, 7:17- 85
- PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNUD). 2003. La gestión local del riesgo nociones y precisiones entorno al concepto y la práctica. Ciudad de Panamá, Panamá, 101p El autor es LAVELL, A. 2003. La gestión local del riesgo nociones y precisiones entorno al concepto y la práctica. [en línea], < <http://www.cridlac.org/digitalizacion/pdf/spa/doc15783/doc15783-contenido.pdf>>. [consulta: 17 diciembre 2017].
- RAULD, R. 2011. Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla de San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S) (Doctorado en ciencias, mención Geología) Santiago, Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2011.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

- ROMERO, H., VAZQUEZ, A. & SMITH, P.2010. Análisis crítico de las potencialidades y limitaciones para el desarrollo regional de Aysén. [en línea]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117780>. [consulta: fecha].
- SARRICOLEA, P. 2011. La génesis de una <<DANA>> y sus consecuencias entre el 17 al 20 de junio de 2011. [en línea] <<http://www.fau.uchile.cl/noticias/noticias-por-unidad/facultad-dearquitectura-y-urbanismo/74905/la-genesis-de-una-dana-y-sus-consecuencias>> [consulta: 20 de mayo 2017]
- SARRICOLEA, P., MESEGUER-RUIZ, M., & MARTÍN-VIDE, J. (2014). Variabilidad y tendencias climáticas en Chile central en el período 1950-2010 mediante la determinación de los tipos sinópticos de Jenkinson y Collison. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, (64), 227-247.
- SARRICOLEA, P., HERRERA-OSSANDON, M., & MESEGUER-RUIZ, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66-73.
- SERRANO, R. 2017. Reconstrucción climática instrumental de la precipitación diaria en España: Ensayo metodológico y aplicaciones. (Doctorado en Geografía), Zaragoza, España. Universidad de Zaragoza, Facultad de Filosofía y Letras. 234p
- SIMPOSIO Latinoamericano de Riesgo Geológico Urbano (2° Pereira, Colombia, 1992) Gestión ambiental para la prevención de desastres. Pereira, Colombia. Cardona, O D.
- SUBSECRETARIA DE DESARROLLO REGIONAL Y ADMINISTRATIVO (SUBDERE) 2011. Guía análisis de riesgos naturales para el ordenamiento territorial. Santiago: Edición SUBDERE, 174p
- THOMSON, D. & WALLACE, J, 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. climate*,13:1000-1016
- VARGAS, X. & CARTES, M. 2010. Apunte para hidrología Elementos de meteorología [Diapositivas] Chile, Departamento de ingeniería civil, División recursos hídricos y medio ambiente. Texto en español [2010] 20d
- VIALE, M. & GARREAUD, R. 2013. Summer Precipitation Events over the Western Slope of the Subtropical Andes. *Revista Monthly weather* 142: 1074-1092.

Influencia de la orografía en eventos de precipitación máxima en Chile central: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.

- VINAGRE, J. & ROMERO, H. 1985. Topoclimatología de la cuenca del río Mapocho. Revista investigaciones Geográficas 32: 3-30.
- WALLACE, J. & HOBBS, P. 2005. Atmospheric science an introductory survey, Washington, Editorial Elsevier. 504p