



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PRECIPITACIONES  
DESENCADENANTES DE FLUJOS DE DETRITOS EN LA  
REGIÓN DE COQUIMBO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

PAULA ALEJANDRA MARDONES MORALES

PROFESORA GUÍA:  
MARISOL LARA CASTILLO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALEJANDRO ALFARO SOTO  
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE: Geóloga  
POR: Paula Alejandra Mardones Morales  
FECHA: 12/03/2019  
PROFESORA GUÍA: Marisol Lara Castillo

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PRECIPITACIONES DESENCADENANTES DE FLUJOS DE DETRITOS EN LA REGIÓN DE COQUIMBO

Los eventos de remoción en masa constituyen una constante amenaza para un país formado por cadenas montañosas como es el caso de Chile. En particular los flujos de detritos corresponden a los tipos de remoción que mayor potencial destructivo tienen, y en general, se encuentran relacionados a eventos de precipitación intensas. A lo largo de todo el territorio chileno se reconocen eventos de esta naturaleza y la Región de Coquimbo no es una excepción, ya que se han reconocido numerosos flujos, por ejemplo en la Cuenca del Río Elqui. Entre los eventos ocurridos en las últimas décadas se mencionan los de los años 1992, 1997, 2004, 2006, 2015 y 2017, de los cuales se tiene registro.

El objetivo general de este trabajo es establecer una relación entre los flujos de detritos y las precipitaciones, mediante un análisis estadístico. Para esto se construye un catastro de remociones en masa, a partir de la modificación datos de SERNAGEOMIN y un catastro de precipitaciones, los cuales se sintetizarán en una base de datos. La relación entre ambos factores se establece mediante una regresión logística.

De acuerdo a la información analizada, se reconoce la predominancia de los flujos (detritos, barro, arena) sobre los demás tipos de remociones en la Región de Coquimbo. En la mayoría de los casos estos se encuentran en las zonas cordilleranas, con particular concentración en la Cuenca del Río Elqui en las distintas fechas con eventos. Las precipitaciones asociadas a dichos flujos, corresponden a precipitaciones intensas y en periodos de tiempo acotados en torno a las fechas de los eventos.

A partir del análisis estadístico se establece la relación entre la ocurrencia de los flujos de detritos y las variables independientes. Entre estas últimas se reconocen la precipitación diaria, la precipitación antecedente a 1 día y la altura de la isoterma 0°C, la cual se encuentra estrechamente relacionada a los fenómenos de precipitación. De los 224 casos analizados, el modelo es capaz de predecir correctamente un 95,1% de estos. Los índices estadísticos y los fundamentos geológicos, indican la validez del modelo escogido.

## Agradecimientos

Llegada esta etapa final de mi carrera me gustaría agradecer a las personas que hicieron este periodo y estadía en la universidad más fácil, o mejor dicho, menos difícil.

En primer lugar, agradecer a mis papás que siempre han estado ahí para apoyarme en cada una de las etapas de mi vida. A mi mamá, por tener ese sexto sentido para saber cómo ayudarme, especialmente, en este último año. Y por siempre tener un ratito para nosotras dos. A mi papá, por su voluntad de oro para llevarme a la u, ir a buscarme después de los controles de plan común, o llevarme donde a algún compañero a estudiar. Además de siempre darme ánimo en periodos difíciles.

A mis hermanos, René, Gabriel y Andrés, por acompañarme cada uno a su manera. Ya sea ayudándome a estudiar, revisando mi borrador el día previo a la entrega a las 3 de la mañana, darme alojamiento en Iquique o simplemente haciendo mi tiempo libre más ameno. Además a mis cuñadas Vicky y Fran, por acompañarme en este proceso.

A mis sobrinitos Emilia y Renato, que aunque sus visitas impliquen dormir menos los fines de semana y no tener el silencio necesario para estudiar, el cariño y alegría que entregan hace que todo lo demás no importe.

A la Suelo y Vanessín, por estar conmigo desde el día 0. Si bien, no todos los semestres compartido mucho, siempre estuvieron presentes.

A los tontuelos por acompañarme y estar siempre ahí para los almuerzos y los respectivos cumpleaños. Al José, por apoyarme en mis momentos de desmotivación y siempre tener un tiempo para mí. Al Benja, a quien a pesar de conocer en mis últimos años de u, se convirtió en un amigo muy cercano, dispuesto siempre a ayudar.

A mis compañeros de Geo, a quienes conocí ya más avanzada la carrera, pero que su presencia en las clases y los terrenos, hacía más entretenido todo. Agradecimiento especial a mis compañeras más secas, con las cuales tuve la suerte de poder estudiar en más de una ocasión. A la Vale, por ser mi pareja de trabajos en los últimos ramos de la carrera. Y a mis compañeritos de práctica, Navia, Seba y Rodri, por hacer del verano sin vacaciones un tiempo más divertido y agradable.

A la Rama de natación, especialmente a las niñas, por la buena onda y el cariño. Y por mostrarme otro lado de la vida universitaria. Además de sorprenderme con su motivación y compromiso.

Al Diego por acompañarme en el proceso de la memoria ya que sin él hubiese sido mucho más tedioso. Gracias por hacer de la sala un lugar acogedor. Al Huaiqui por aportar con sus conocimientos de estadística y estar siempre dispuesto a responder cada una de mis dudas respecto al tema.

A mis profesores Marisol, Alejandro y Sergio por la buena disposición y el buen trato. Mención especial a la profesora Marisol por siempre estar dispuesta a responder mis dudas, revisar mis avances y siempre hacerme sentir apoyada en este proceso. Además, agradecer al profesor Miguel Lagos, del Departamento de Civil, por su buena disposición y aporte de conocimientos técnicos para la memoria.

Finalmente, agradecer a Felipe Abarca, por ser un pilar fundamental en mi vida. Por ser mi compañero, prácticamente en toda mi etapa universitaria, apoyándome, dándome ánimo, enseñándome y confiando en mí especialmente en este periodo de la memoria. Gracias por nunca dudar de mis capacidades y darme el empujoncito que a veces me hace falta.

## Tabla de contenido

Capítulo 1 : Introducción .....	1
Objetivos .....	2
Metodología .....	3
Trabajos anteriores .....	3
Capítulo 2 : Marco teórico.....	5
Remociones en masa.....	5
Factores condicionantes de remociones en masa .....	6
Factores desencadenantes de remociones en masa .....	7
Aspectos climáticos .....	7
Fenómeno del Niño .....	7
Altura de la isoterma 0°C .....	8
Estadística .....	9
Regresión logística .....	9
<i>Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)</i> .....	10
Correlación de variables.....	10
Indicadores .....	11
Capítulo 3: Área de estudio .....	13
Ubicación .....	13
Accesos .....	14
Clima y vegetación .....	14
Geomorfología .....	16
Hidrografía.....	18
Marco geológico .....	22
Secuencias sedimentarias .....	22
Secuencias volcano-sedimentarias .....	23
Secuencias volcánicas .....	24
Rocas intrusivas.....	25
Rocas metamórficas .....	27
Geología estructural .....	31
Flujos ocurridos en la Región de Coquimbo.....	33
24 de marzo 1992 (Hauser, 2000) .....	33
18 de junio 1997 (SERNAGEOMIN, 2015) .....	33

23 de abril 2004 (Hauser, 2004).....	33
15 de febrero 2006 ((Naranjo y Landon, 2006) .....	33
24-25 de marzo 2015 (Alfaro et al, 2017; Opazo y Velásquez, 2015a, 2015b y 2015c) .....	34
11-13 de mayo 2017 (Alfaro et al, 2017 y Sepúlveda et al, 2017).....	34
26 de junio 2017 .....	35
Capítulo 4: Metodología para análisis estadístico .....	36
Catastro de remociones en masa .....	36
Catastro de precipitaciones .....	36
Isoterma 0°C .....	38
Fenómeno de El Niño .....	38
<i>Statistical Package for the Social Sciences</i> (SPSS).....	38
Base de datos .....	38
Procesamiento .....	39
Determinación de umbrales .....	40
Capítulo 5: Resultados.....	41
Catastro de remociones en masa.....	41
Precipitaciones .....	44
Isoterma 0°C .....	65
Fenómeno del Niño.....	66
Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) .....	67
Base de datos .....	67
Procesamiento .....	67
Caso 1: Óptimo estadístico.....	71
Caso 2: Modelo descartado .....	72
Caso 3: Modelo escogido .....	73
Determinación de umbrales .....	76
Capítulo 6: Discusión .....	79
Complejidad del catastro .....	79
Representatividad de la ubicación del flujo .....	79
Descripción de eventos .....	80
Distancia de estaciones meteorológicas.....	80
Variables climáticas .....	81
Precipitación antecedente.....	81
Isoterma 0°C.....	81

Precipitación diaria.....	82
Base de datos .....	82
Revisión de modelos .....	82
Caso 1: Óptimo estadístico.....	83
Caso 2: Modelo descartado .....	83
Caso 3: Modelo escogido .....	84
Constante del modelo .....	85
Fallas del modelo .....	85
Comparación con otros estudios .....	86
Determinación de umbrales .....	87
Capítulo 7: Conclusiones.....	89
Bibliografía.....	91
Anexos .....	96

## Capítulo 1 : Introducción

Los eventos de remoción en masa constituyen una constante amenaza para un país formado por cadenas montañosas como Chile. A lo largo de toda la extensión del territorio, se tienen registros de catástrofes asociadas a este tipo de fenómenos, en particular a flujos de detrito y barro, comúnmente llamados aluviones. Los eventos de remociones en masa afectan al país de manera transversal generando pérdidas de todo tipo. De acuerdo a los datos de la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (ONEMI), los desastres naturales que generan mayor cantidad de afecciones a la vida humana son: inundaciones, terremotos y deslizamientos. Los datos específicos se pueden ver en la Tabla 1.1. De igual forma, respecto a los daños generados, los deslizamientos<sup>1</sup> corresponden a la tercera amenaza que más daños económicos genera (Tabla 1.2).

Tabla 1.1: Desglose del n° de desastres y afección humana desagregados por amenaza (1900-2015) en Chile.

<b>Desglose del n° de desastres y afección humana desagregados por amenaza (1900-2015)-ONEMI</b>						
<b>Amenaza</b>	<b>N° Eventos</b>	<b>Muertos</b>	<b>Heridos</b>	<b>Afectados</b>	<b>Damnificados</b>	<b>Total Afectados</b>
Terremoto	40	57.345	3.915	2.671.556	6.061.990	8.794.806
Actividad Volcánica	26				4.357	9.545
Deslizamiento	41	314	121	135.538	343.411	479.384
Inundación	62	1.438	177	16.216.290	2.032.554	18.250.466
Sequía	5					
Incendio Forestal	26	7	38	255.487	129	280.576
<b>TOTAL</b>	<b>200</b>	<b>59.104</b>	<b>4.251</b>	<b>19.278.871</b>	<b>8.442.441</b>	<b>27.814.777</b>

Fuente: Elaborado por la Subsecretaría de Economía y Empresas de menor tamaño, según datos del repositorio digital de ONEMI (2017).

Tabla 1.2: Desglose de pérdidas registradas en Chile por desastres naturales (1900-2015).

<b>Desglose de pérdidas registradas en Chile por desastres naturales (1900-2015) - ONEMI</b>	
<b>Amenaza</b>	<b>Total daños (USD MM 2015)</b>
Terremoto	48.206,2
Actividad Volcánica	43,8
Deslizamiento	1.662,2
Inundación	251,8
Sequía	14.444,6
Incendio Forestal	1.412,0
<b>Total</b>	<b>66.020,6</b>

Fuente: Elaborado por la Subsecretaría de Economía y Empresas de menor tamaño, según datos del repositorio digital de ONEMI (2017).

<sup>1</sup> Dado que en el documento no se especifica mayormente, se asume como deslizamiento a cualquier tipo de remoción en masa.

A modo de ejemplo, en el norte de Chile, se tiene el caso del aluvión de Copiapó ocurrido en el año 2015, el cual generó daños en las viviendas y construcciones<sup>2</sup>, y dejó decenas de víctimas<sup>3</sup>. De igual forma, en el año 1993, en la capital del país, ocurrió un aluvión asociado a la quebrada de Macul, el cual dejó alrededor de 30.000 personas damnificadas<sup>4</sup>. En el sur de Chile, en el año 2017, ocurrió un evento similar en el pueblo de Santa Lucía, ubicado en la comuna de Chaitén, el cual generó daños a la infraestructura, tanto en las viviendas de las personas como en construcciones públicas, además de alrededor de 20 personas fallecidas o desaparecidas<sup>5</sup>. En estos tres casos el factor gatillante<sup>6</sup> de dichas remociones corresponde a eventos de precipitación intensa. Dado que en Chile generalmente los flujos de detritos ocurren producto de precipitaciones de alta intensidad<sup>7</sup>, este trabajo busca establecer una relación estadística entre ambos factores.

En la Región de Coquimbo los flujos también constituyen una amenaza para la población. Por ejemplo, en el año 1997 se produjo un flujo en la comuna de Vicuña, sector el Almendral, el cual generó dos personas fallecidas y alrededor de 140 damnificados<sup>8</sup>. En la misma comuna, en el año 2004 ocurrió un evento en la localidad de Diaguitas<sup>9</sup>. Además, la Región de Coquimbo fue una de las afectadas por los flujos de detritos ocurridos en varias regiones de la zona norte del país en el año 2015<sup>10</sup>.

## Objetivos

### Objetivo Principal

Determinar una relación entre las precipitaciones y flujos de detritos en la región de Coquimbo, mediante un análisis estadístico.

### Objetivos específicos

- Modificar el catastro de remociones en masa de SERNAGEOMIN para la región de Coquimbo.
- Elaborar un catastro de precipitaciones asociadas a los flujos de detritos identificados en el catastro de remociones en masa.
- Establecer una relación estadística entre las precipitaciones y los flujos de detritos, orientado a la determinación de umbrales.

---

<sup>2</sup> <http://www.emol.com/noticias/nacional/2015/04/22/713764/minvu-presenta-plan-de-reconstruccion-para-la-region-de-atacama-tras-aluviones.html> Última fecha de visita al sitio: 4 de marzo 2019.

<sup>3</sup> <http://www.soychile.cl/Santiago/Sociedad/2015/04/08/315033/Esta-es-la-lista-de-los-26-muertos-que-dejaron-los-aluviones-en-el-norte.aspx> Última fecha de visita al sitio: 4 de marzo 2019.

<sup>4</sup> [https://www.bcn.cl/siit/actualidad-territorial/zona-de-riesgo-en-la-quebrada-de-macul/document\\_view2](https://www.bcn.cl/siit/actualidad-territorial/zona-de-riesgo-en-la-quebrada-de-macul/document_view2) Última fecha de visita al sitio: 4 de marzo 2019.

<sup>5</sup> <http://www.sernageomin.cl/aluvion-villa-santa-lucia/> Última fecha de visita al sitio: 4 de marzo 2019.

<sup>6</sup> Gatillante: estímulo externo que causa una respuesta casi inmediata en forma de remoción en masa.

<sup>7</sup> <http://www.onemi.cl/aluviones/> Última fecha de visita al sitio: 4 de marzo 2019.

<sup>8</sup> <http://repositoriodigitalonemi.cl/web/bitstream/handle/2012/89/ONE0013.pdf?sequence=1>

<sup>9</sup> <http://repositoriodigitalonemi.cl/web/handle/2012/1055>; <http://www.emol.com/noticias/nacional/2004/04/22/145616/aluvion-de-lodo-deja-diversos-danos-en-comuna-de-diaguitas.html> Última fecha de visita al sitio: 4 de marzo 2019.

<sup>10</sup> [http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/mapa-gco/Caracterizaci%C3%B3n%20de%20cuencas%20afectadas%20por%20evento%20meteorol%C3%B3gico%20del%2025%20y%2026%20de%20marzo%20en%20regiones%20de%20Antofagasta,%20Atacama%20y%20Coquimbo%20\(1\).pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/mapa-gco/Caracterizaci%C3%B3n%20de%20cuencas%20afectadas%20por%20evento%20meteorol%C3%B3gico%20del%2025%20y%2026%20de%20marzo%20en%20regiones%20de%20Antofagasta,%20Atacama%20y%20Coquimbo%20(1).pdf) Última fecha de visita al sitio: 4 de marzo 2019.

## Metodología

Para la elaboración del catastro de remociones en masa ocurridas en la Región de Coquimbo, se utiliza como base los antecedentes disponibles del SERNAGEOMIN (Alfaro *et al*, 2018). Esta información fue trabajada en formato *shapefile* donde cada evento fue representado por un punto que corresponde a una única remoción en masa. Para cada una de ellas se especifica el tipo de remoción y el factor desencadenante, además de la fecha de ocurrencia y, en la mayoría de los casos, la referencia asociada al evento. Se clasifican según la naturaleza de la remoción y su factor desencadenante, descartando las remociones que no fuesen generadas por precipitaciones y dando énfasis especial a los flujos de detritos.

Para el caso del catastro de precipitaciones, se recopila información de las estaciones meteorológicas de la Dirección general de aguas (DGA) y el Centro de estudios avanzados en zonas áridas (CEAZA).

Adicionalmente, se recopila información de la altura de la isoterma 0°C para cada evento estudiado, esta información es proporcionada por la Dirección meteorológica de Chile (DMC) y, por otro lado, se determina la condición respecto al fenómeno del Niño, para las distintas fechas con flujos. Esta última información fue obtenida en el sitio web de CEAZA.

El análisis estadístico se realiza mediante una regresión logística. Previo a esto, se analizaron las variables involucradas en el modelo, mediante la determinación de sus parámetros estadísticos y la correlación entre variables. El modelo se itera en numerosas ocasiones, modificando las variables involucradas y los valores de corte de la probabilidad de ocurrencia del flujo.

Los *software* utilizados para las actividades anteriores corresponden a *ArcGis*, para trabajar con la ubicación de las remociones en masa y la elaboración de mapas, *Microsoft Excel* para ordenar y procesar la información, y finalmente *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) para el análisis estadístico.

## Trabajos anteriores

Previamente, ya se han realizado estudios para relacionar las precipitaciones con los eventos de remociones en masa, tanto en Chile, como en otros lugares del mundo. En primera instancia se revisarán los trabajos realizados a nivel global para luego continuar con los trabajos realizados en Chile.

Con el objetivo de predecir la ocurrencia de deslizamientos a escala regional en Emilia-Romaña (Italia), Martelloni *et al* (2011) desarrolló un sistema llamado SIGMA, el cual mediante la comparación de registros de lluvia y umbrales definidos estadísticamente, emite alarmas de acuerdo a los lineamientos regionales de protección civil. El sistema se calibró con una base de datos compuesta por remociones en masa y precipitaciones asociadas logrando predecir un 84% de los deslizamientos. La base de este modelo considera únicamente datos de lluvia acumulada con un registro de datos horarios. El software considera los registros de lluvia y los pronósticos existentes, y, en caso de superar un umbral determinado, se emite una alarma.

Segoni *et al* (2014a) presentó una metodología para automatizar y estandarizar la identificación de umbrales de intensidad-duración de precipitaciones asociados a la ocurrencia de remociones en masa

en Serchio y Valdera (Italia). Para esto se utilizó el software *MaCumBA* (*MAssive CUMulative Brisk Analyzer*), el cual, a partir de registros asociados a pluviómetros, puede determinar la intensidad y la duración de la tormenta más próxima al inicio de la remoción. El software define dos umbrales de intensidad-duración, por medio de dos métodos estadísticos distintos (intervalo de confianza e intervalo de predicción). Se escoge como óptimo el umbral que entregue menos falsas alarmas para un mismo nivel de confianza. Los resultados fueron satisfactorios y la metodología se reconoce como aplicable a otras zonas con condiciones ambientales distintas.

De igual forma, Segoni *et al* (2014b) realizó un análisis en la región de Toscana, Italia, donde se utilizó el software *MaCumBA* presentado anteriormente. La zona se dividió en 25 sectores de alerta, las cuales fueron escogidas según sus condiciones geomorfológicas y meteorológicas. El objetivo del estudio era determinar un umbral para cada una de estas áreas. Mediante un proceso de comparación y validación se demostró que al reducir el área de análisis, los umbrales entregados eran más precisos que al considerar solo una región más extensa, siempre y cuando se tuviese suficientes datos para el análisis estadístico.

En Chile, se realizó un estudio similar (Padilla, 2006 y Sepúlveda y Padilla, 2008) a este en el sector Cordillerano de la Región Metropolitana, donde se buscó relacionar la precipitación con la ocurrencia de flujos de detritos y barro. Para el análisis se utilizó el método de regresión logística, mediante el cual se esperaba determinar umbrales de precipitación que al ser superados generaran remociones en masa. En este estudio se definen tres factores relevantes en la generación de remociones: la precipitación durante el día del evento, la precipitación antecedente y la línea de nieve. De igual forma, para una probabilidad definida, establece umbrales de precipitación diaria, para ciertas condiciones de precipitación antecedente y línea de nieve.

Soto *et al* (2017) estudio dos cuencas tributarias del Río Elqui en los sectores costeros de la Región de Coquimbo, para establecer los potenciales riesgos asociados a eventos de precipitación extrema y sus efectos en el área urbana de la ciudad de La Serena. Estudios de las características geomorfológicas de las cuencas muestran que las condiciones son favorables para la escorrentía superficial. Los sedimentos disponibles en las laderas de los afluentes conducen a altas descargas de sedimentos en forma de flujos hiperconcentrados en las cuencas superiores. Además, el suministro de sedimentos se ve reforzado por la generación frecuente de terremotos de gran magnitud ( $M > 6$ ) en la región que causan deslizamientos de tierra. Así, estimaron que los eventos de precipitación de más de 60 mm / 24 h (período de retorno decenal) desencadenan efectos hidrometeorológicos, tales como inundaciones y flujos hiperconcentrados.

## Capítulo 2 : Marco teórico

### Remociones en masa

Para la caracterización de las remociones en masa, sus factores condicionantes y desencadenantes, se utilizan dos referencias principalmente, además de los autores que se encuentran citados en el texto. En primer lugar el trabajo titulado: Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana (Lara, 2007). Y el apunte del curso Remociones en masa, de la Universidad de Chile (Lara y Sepúlveda, 2008).

Una remoción en masa corresponde a un proceso de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores (Hauser, 2000). Cruden (1991) precisa que el movimiento sería de tipo descendente debido a que está influenciado por la gravedad.

Las remociones en masa pueden ser clasificadas de acuerdo a distintos criterios, como por ejemplo según el tipo de movimiento o material involucrado. Cruden y Varnes (1996) reconocieron las siguientes categorías: desprendimientos o caídas, deslizamientos (rotacionales y traslacionales), flujos, *toppling* o volcamientos y extensiones laterales. A continuación se define cada uno, dando mayor énfasis a los flujos.

- **Caída o desprendimiento de roca:** corresponde a movimientos abruptos de bloques independientes de roca, siendo sus causas principales la presencia de discontinuidades en el macizo rocoso. El material desprendido podrá alcanzar el pie del talud mediante caída libre, rodando y rebotando, lo cual dependerá principalmente de la forma del bloque y del ángulo de la pendiente del talud.
- **Deslizamientos:** movimiento ladera abajo de masas de suelo o roca a través de superficies de cizalle definidas. Pueden ser de tipo rotacional o traslacional lo cual va a depender, a grandes rasgos, de la forma de la superficie de falla, si es curva o plana respectivamente.
- **Toppling o volcamiento:** corresponde al desprendimiento de uno o varios fragmentos de rocas o suelo mediante el volcamiento de éstos en torno a un punto o un eje bajo el centro de gravedad de la masa desplazada.
- **Extensiones laterales:** corresponde a la propagación lateral de una masa de suelo o roca combinada con una subsidencia general de la masa de material fracturado. En suelos, las extensiones laterales están generalmente relacionados con procesos de licuefacción.
- **Flujos:** proceso de remoción en masa, que afecta a una masa de suelo (detritos y/o barro) saturado en agua, y con una concentración de sólidos tal que se comporta mecánicamente como un fluido no newtoniano. Esta definición incluye a los llamados flujos hiperconcentrados, en que las concentraciones de sólidos son menores a un 50% en volumen (Sepúlveda, 1998). Pueden clasificarse según el tipo de material, grado de saturación, entre otros.

Los flujos se originan donde existe una cantidad de material detrítico suficiente que pueda ser movilizado mediante la adición de agua. La movilización de esta masa de suelo requiere inicialmente de la pérdida de la resistencia del material y aumento de los esfuerzos de corte

actuantes sobre ésta, mientras que la condición de flujo está dada por la reducción de la viscosidad.

Los flujos pueden llegar a transportar bloques de 10 metros de diámetro o más, sin embargo aquellos que transportan material sólido de menores tamaños presentan las mismas cualidades que los primeros (Iverson, 1997b), avanzando a grandes velocidades.

### Factores condicionantes de remociones en masa

Los factores condicionantes corresponden a aquéllos que generan una situación potencialmente inestable. Hauser (1993) afirma que dichos factores corresponden a la geología y geotecnia, geomorfología, hidrología e hidrogeología, vegetación, clima, y la actividad antrópica. A continuación se revisa brevemente cada uno de ellos.

La **geología y la geotecnia**, son factores que pueden influir en mayor o menor medida en la ocurrencia de remociones en masa. Algunas de las propiedades consideradas en esta categoría corresponden a la litología de las rocas, su estructura, alteración y meteorización, además del tipo de material que compone los depósitos, la densidad, plasticidad, humedad y permeabilidad.

El tipo de depósito condiciona ciertas características en su comportamiento; por ejemplo, los depósitos volcanoclásticos, glaciales, escombros de falda, aluviales, coluviales, y de antiguos flujos de detritos son susceptibles a ser movilizados y/o removilizados, ya que son materiales permeables, donde el agua se infiltra fácilmente, superando su capacidad de infiltración y produciendo la saturación rápida y facilitando el escurrimiento rápido del agua en este material saturado (Hauser, 1997).

La **geomorfología** es un factor que agrupa aspectos como la topografía, pendientes de las laderas, cambios abruptos en las pendientes de las laderas, la extensión y altura de estas, son rasgos que condicionan la ocurrencia de remociones en masa. Estas características inciden en la velocidad, energía y volumen de las remociones que puedan originarse. Así también, cualquier modificación de ellos puede transformar una ladera estable en inestable y generar remociones (Popescu, 2002). Además de lo anterior, influye la forma y superficie de las hoyas hidrográficas, orientación de laderas y su consecuente exposición al sol.

La **hidrología e hidrogeología** también condicionan la ocurrencia de remociones en masa, a través de elementos como la ubicación de la red de drenaje, las posiciones y variaciones del nivel freático, caudales, coeficientes de escorrentía y coeficientes de infiltración. Todos estos factores son relevantes, debido a que determinan el nivel de agua en las rocas y suelos, modificando la resistencia de los materiales y por ende su estabilidad.

Respecto a la **vegetación**, esta puede considerarse como un agente que estabiliza o desestabiliza las superficies. Por ejemplo, Según Selby (1993), la vegetación contribuiría a disminuir el efecto erosivo sobre las laderas. La existencia de árboles en las laderas permitiría la absorción de agua por parte de estos disminuyendo el grado de saturación del suelo. Además, sus raíces en general ayudarían a la estabilización de las laderas actuando como anclajes de reforzamiento, sin dejar de considerar que en algunos casos esta estabilización es sólo superficial. Por el contrario, Prieto (1985) establece que la estabilidad dada por la vegetación está fuertemente condicionada por el efecto del clima y topografía, pues, por ejemplo en zonas que sufren de fuertes vientos, si la pendiente es fuerte, los árboles remueven el terreno provocando su desestabilización.

El **clima** también es relevante debido a que factores asociados a este, tales como la temperatura, el viento, la radiación y la precipitación son los principales responsables de la erosión, con particular importancia este último.

Ciertas **actividades antrópicas** son capaces de modificar la estabilidad de ciertos materiales, por ejemplo, generando cambios en sus propiedades a través del uso de explosivos o excavaciones, provocando cambios en los niveles de agua y capacidad de infiltración, o realizando acciones erosivas como la deforestación, entre otros.

### Factores desencadenantes de remociones en masa

Un agente gatillante o desencadenante es un factor externo que genera una respuesta traducida en una remoción en masa mediante el rápido incremento de esfuerzos o la reducción de la resistencia del material de una ladera (Wieczorek, 1996). Un agente desencadenante se caracteriza principalmente por la existencia de un corto lapso entre causa y efecto. Los factores más comunes corresponden a sismos y precipitaciones.

Los **sismos** actúan a nivel de diversos escenarios geológicos y topográficos. Las aceleraciones sísmicas generan un cambio temporal en el régimen de esfuerzos al que está sometido la ladera, tanto normales como de corte, pudiendo producir su inestabilidad. Keefer (1984) establece que los tipos de remociones más abundantes generados por terremotos corresponderían a caídas de rocas, deslizamientos desagregados (*disrupted landslides*) de suelos con pendientes de laderas  $>15^\circ$  y deslizamientos de roca con pendientes de laderas  $\geq 40^\circ$ , y secundariamente derrumbes en suelo, deslizamientos en bloques de suelo y avalanchas de tierra.

Por otro lado, las **precipitaciones** también constituyen un agente desencadenante, debido a que actúan aumentando el grado de saturación de los materiales, tanto en suelo como en fracturas de rocas, aumentando temporalmente la presión de fluidos, lo cual provoca la disminución de la resistencia de los materiales durante un periodo de tiempo, con ello una baja en la estabilidad y un eventual fenómeno de remoción en masa. Además, las precipitaciones intensas aumentan la escorrentía superficial, aumentando con esto la erosión del material en laderas con suelo suelto, y asociado se genera socavación y/o disolución de la ladera.

### Aspectos climáticos

#### Fenómeno del Niño

Para la descripción de este fenómeno climático se utiliza una publicación homónima, hecha en el sitio web de la Enciclopedia Cubana: Ecured (2019).

El Niño es un fenómeno meteorológico que consiste en el calentamiento de las aguas del Océano Pacífico. Dicho fenómeno se produce cada 2 a 7 años y genera un gran impacto en el comportamiento climático mundial.

Generalmente, en el océano Pacífico soplan los vientos alisios, los cuales van desde la costa americana a la costa indo australiana. La existencia de estos vientos, genera el afloramiento de una corriente fría en las costas de América del sur. Cuando se está en presencia del fenómeno del Niño, los vientos se encuentran debilitados, por lo cual la temperatura del agua comienza a aumentar, generando un nivel de evaporación mayor y por ende, mayor humedad en las costas del Pacífico.

El Niño causa importantes alteraciones en la dinámica de la atmósfera y el océano en las costas de Sudamérica. En zonas habitualmente desérticas o semidesérticas, provoca que se desarrollen precipitaciones excesivas, generando inundaciones y otras catástrofes. Caso contrario ocurre en la zona indo australiana, donde se producen periodos de sequía en lugares del sudeste asiático donde generalmente se tienen lluvias torrenciales, lo cual genera impacto en los cultivos de la zona. Si bien los sectores más afectados son los nombrados anteriormente, el impacto generado tiene un nivel global.

Algunos de los impactos que genera esta condición climática son el cambio de la circulación atmosférica, calentamiento global del planeta y aumento en la temperatura de las aguas costeras, pérdidas económicas asociadas a especies marinas que no sobreviven a estas nuevas condiciones, etc.

Para la ciudad de Antofagasta, Vargas et al (2000) estableció una relación entre la ocurrencia de inundaciones y flujos de detrito y barro, y el fenómeno del Niño. Dentro del siglo XX se reconocen siete eventos de aluviones (1925, 1930, dos eventos en 1940, 1982, 1987 y 1991), en los cuales, las precipitaciones ocurrieron durante el invierno, en la fase de desarrollo de eventos El Niño. Además, se reconoce que estas lluvias forman parte de sistemas frontales provenientes desde el sur que afectaron a gran parte del norte de Chile.

De igual forma, Hauser (1997) señala que la actividad del fenómeno de El Niño, frente a las costas de Chile, genera una modificación severa en el comportamiento climático del país; las alteraciones se expresan en la súbita activación de precipitaciones de inusual intensidad, por tanto, en situación de sobrepasar los máximos umbrales históricos. Además indica que a nivel territorial, este nuevo ambiente climático ha provocado profundos cambios en el comportamiento hidrológico de numerosas hoyas hidrográficas, condicionando extensas inundaciones y el desarrollo de destructivos procesos de remoción en masa.

### Altura de la isoterma 0°C

Es de particular interés determinar la altura de la línea de nieves, dado que esta define el límite entre los sectores con aportes de precipitación líquida y sólida. Por ende, es determinante al momento de definir el área aportante de agua en una cuenca producto de un evento de precipitación. No es lo mismo que precipite 1 mm/h en un área de 30 km<sup>2</sup>, que en un área de 50 km<sup>2</sup>. Diferencias de este tipo son las que se pueden generar al existir un alzamiento de la línea de nieves.

En particular, en las cuencas con régimen pluvio-nival, es decir, que su aporte de agua tiene una componente en forma de lluvia (pluvial), y en menor medida en forma de nieve (nival), al generarse una elevación de la línea de nieves, esto puede provocar que zonas donde usualmente nieve, ahora llueva, aumentando el área aportante de agua líquida, aumentando el caudal habitual de los ríos de la cuenca, derritiendo la nieve acumulada previamente, etc.

Una forma de obtener la ubicación de esta altura es mediante la determinación de la isoterma 0°C, dado que, teóricamente, a esta temperatura se produce el congelamiento del agua a presiones atmosféricas. Existen diversos autores, entre ellos Garreaud (1992), que han definido relaciones entre la altura de la isoterma 0°C y la línea de nieves, sin embargo, se trabajarán como similares en este trabajo, ya que no se busca determinar el punto exacto donde se encuentra, sino variaciones de esta para distintas fechas.

## Estadística

A continuación se definen una serie de conceptos que son fundamentales para comprender la metodología y el desarrollo estadístico del presente trabajo. Se explica qué es una regresión logística y cómo se construye su expresión matemática. Además, se revisa brevemente el software utilizado: SPSS y adicionalmente se detalla qué es una correlación en términos estadísticos y cuáles son algunos de los indicadores que permiten discernir que combinación de variables es mejor al momento de explicar determinado fenómeno.

### Regresión logística

Para definir el concepto de regresión logística se utiliza como fuente el documento: *Applied logistic regression* (Hosmer y Lemeshow, 2000).

Una regresión es un método que busca describir la relación entre una variable dependiente y una o varias variables independientes. En particular, para el caso de la regresión logística binaria, tal como su nombre lo indica, la variable dependiente posee un comportamiento binario o dicotómico, es decir, puede tomar dos valores. Por este motivo, es útil al momento de trabajar con la ocurrencia de sucesos. Por ejemplo, para este caso se podría asignar con el valor 1 a la situación en que el suceso ocurre, y con el valor 0 cuando no.

El problema que se quiere resolver corresponde a una probabilidad condicional, donde se busca encontrar los casos en que  $Y = 1$  dado determinado  $x$ . Dicha función se denomina como:

$$\pi(x) = P(Y = 1|x) \quad 2.1$$

Para resolver el problema se utiliza la función logística, la cual para el caso univariable posee la siguiente forma:

$$\pi(x) = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 x)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 x)}} \quad 2.2$$

Luego, usando el operador *logit*, se linealiza la función quedando de la siguiente forma:

$$g(x) = \ln \left[ \frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)} \right] = \beta_0 + \beta_1 x \quad 2.3$$

El desarrollo para el caso multivariado es similar, siendo  $X$  un vector con  $n$  valores distintos de  $x_i$ , por lo cual la expresión anterior queda de la siguiente forma:

$$g(x) = \ln \left[ \frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)} \right] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad 2.4$$

La regresión logística entrega una probabilidad, la cual determinará la ocurrencia o no de un determinado suceso. La forma de dicha probabilidad se muestra a continuación:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n)}} \quad 2.5$$

Donde  $P$  es la probabilidad entregada, los  $x_i$  corresponden a las distintas variables independientes y los  $\beta_i$  a los coeficientes asociados a cada una de las variables.  $\beta_0$  corresponde a una constante.

En base a datos conocidos, se puede determinar qué variables son las que influyen en determinar la ocurrencia del suceso y en qué medida afectan, o sea determinar los coeficientes ( $\beta$ ). Para esto se utiliza el método de máxima verosimilitud, para lo cual se desarrolla la función verosimilitud, la cual indica la probabilidad de los datos observados en función de los coeficientes. Los valores escogidos serán aquellos que maximizan la función.

La función verosimilitud tiene la siguiente forma:

$$L(\beta) = \prod_i f(x_i, \beta) \quad 2.6$$

Donde  $f(x_i, \beta)$  corresponde a la función densidad de probabilidad, la cual corresponde al modelo de regresión logística, así la función puede expresarse de la siguiente manera:

$$\mathcal{L}(\beta) = \prod_i p(x_i)^{y_i} [1 - p(x_i)]^{1-y_i} \quad 2.7$$

La cual es más fácil de trabajar matemáticamente si se aplica logaritmo.

$$\text{Ln}[\mathcal{L}(\beta)] = \sum_i \{y_i \text{Ln}[p(x_i)] + (1 - y_i) \text{Ln}[1 - p(x_i)]\} \quad 2.8$$

Los valores de  $\beta$  que maximizan la ecuación se pueden obtener al derivar e igualar a 0. Las ecuaciones obtenidas son las siguientes:

$$\sum [y_i - p(x_i)] = 0 \quad 2.9$$

$$\sum x_i [y_i - p(x_i)] = 0 \quad 2.10$$

La clasificación de si ocurre o no el suceso, se realiza mediante una probabilidad límite, si esta es igualada o sobrepasada se interpreta como que el evento ocurre y si es menor, el suceso no ocurre.

### *Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)*

Para resumir, a grandes rasgos, qué es y cómo funciona el software SPSS, se utiliza la publicación “qué es SPSS y cómo utilizarlo” del sitio web Questionpro (2019).

SPSS es un software utilizado para realizar la captura y análisis de datos para crear tablas y gráficas con data compleja. Es conocido por su capacidad de gestionar grandes volúmenes de datos. Además, es posible realizar recopilación de datos, crear estadísticas, análisis de decisiones de gestión y mucho más.

En este caso en particular, se utilizan las funciones para obtener los estadísticos descriptivos, las correlaciones bivariadas y el análisis estadístico, por medio de la regresión logística binaria.

### **Correlación de variables**

Para explicar el concepto de correlación de variables se utiliza la publicación “La correlación estadística” hecha en el sitio web Explorable.com (2009).

Usualmente en los análisis estadísticos, previo a trabajar con el modelo mismo se realiza un análisis exploratorio de las variables, donde se caracterizan de forma individual, definiendo sus estadísticos, y de forma conjunta, correlacionando variables.

Una correlación, en términos estadísticos, corresponde a la relación que existe entre dos variables, la cual se mide mediante el coeficiente de correlación definido de manera continua en el rango

entre -1 y 1. Mientras más cerca de los extremos se encuentre dicho coeficiente, mayor será la correlación entre ambas variables. El signo indica si la correlación es directa, signo positivo, o si es inversa, signo negativo. Por el contrario, si se encuentra cercana a 0, entonces no habrá relación o esta será débil.

## Indicadores

Para caracterizar cada uno de los distintos indicadores se recurre a tres documentos distintos: Capítulo ejemplo: IV. Análisis de regresión (App4stats.com, fecha de acceso: Diciembre 2018), Cómo hacer una Regresión Logística con SPSS© “paso a paso” (Aguayo, C., 2007) y Significancia estadística y práctica (Soporte de Minitab, 2018).

El proceso de determinar el modelo que mejor se ajuste al fenómeno de estudio corresponde a un proceso iterativo, en el cual se van modificando las variables involucradas hasta obtener el resultado óptimo que sea consistente con la realidad. Para comparar los distintos modelos existen indicadores que precisan la calidad de la combinación de variables escogidas. Existen varios, pero para este caso se trabajan con los presentados a continuación:

### **Logaritmo de la verosimilitud**

En particular, el programa que se utiliza en este caso trabaja con una modificación de este parámetro. En el caso normal se busca maximizar su valor, mientras que en este caso, debido al signo, se busca minimizarlo. La configuración utilizada corresponde a  $-2\text{Log}$  verosimilitud.

Este nuevo valor indica hasta qué punto un modelo se ajusta bien a los datos. También se suele nombrar como la desviación de estos, por lo tanto, mientras más pequeño sea el número, mejor será el ajuste.

### **R cuadrados de Cox y Snell, y Nagelkerke**

El  $R^2$  de Cox y Snell es un coeficiente que estima la proporción de varianza de las variables dependiente que es explicada por las variables predictoras, es decir, las variables independientes. Se basa en la comparación del log de la verosimilitud para el modelo y el log de la verosimilitud de un modelo de línea base. Los valores que puede adoptar van entre 0 y 1, los cuales pueden expresarse en forma de porcentaje. Por ejemplo, si este indicador tiene un valor de 0,65 esto significa que un 65% de la variable dependiente es explicada por las variables independientes.

El  $R^2$  de Nagelkerke corresponde a una versión corregida del  $R^2$  de Cox y Snell, esta última tiene un valor máximo inferior a 1, incluso para un modelo “perfecto”. El  $R^2$  de Nagelkerke corrige la escala para cubrir el rango completo de 0 a 1.

### **Chi-cuadrado**

Este indicador mide la diferencia entre  $-2\text{Log}$  verosimilitud del caso del modelo conformado solo por la constante y el mismo parámetro considerando el modelo analizado. El programa entrega tres resultados: paso, bloque y modelo, en la tabla de la prueba ómnibus.

El ítem paso corresponde al cambio de verosimilitud entre pasos sucesivos en la construcción del modelo. El ítem bloque corresponde a los cambios entre bloques de entrada durante la construcción del modelo, si se introducen las variables en un solo bloque, el Chi-cuadrado de bloque y modelo será el mismo. Finalmente, el ítem modelo corresponde al cambio de verosimilitud entre el modelo solo con la constante y el modelo escogido.

Puede ser que los tres valores coincidan si fueron introducidos en un solo paso. El valor de la significancia debe ser menor a 0,05 para tener sustento estadístico.

### Tabla de clasificación

Otra forma de analizar la calidad del modelo, es comparar los datos observados y los esperados mediante una tabla de clasificación. Esta corresponde a una tabla de 2x2 donde se clasifican los datos según la concordancia entre los valores observados y los predichos. Tal como se muestra a continuación:

Tabla 2.1: Ejemplo de tabla de clasificación

Observado		Pronosticado		Porcentaje correcto
		Fenómeno Positivo	Fenómeno Negativo	
Fenómeno Positivo		105	5	95,5
Fenómeno Negativo		8	107	93,0
Porcentaje global				94,2

Fuente: Elaboración propia.

Un buen modelo debería tener una alta coincidencia entre lo observado y lo pronosticado. Una ecuación sin poder de clasificación alguno, tendría un 50% bien clasificado por simple azar. Un modelo puede considerarse aceptable si tanto la especificidad como la sensibilidad tienen un nivel alto, al menos de un 75%. La especificidad corresponde a los casos positivos identificados como tales, mientras que la sensibilidad se refiere a la correcta identificación de los casos negativos.

### Significancia estadística

Para que una variable independiente incida en los resultados de la variable dependiente, debe tener un coeficiente  $\beta$  lo suficientemente distinto de 0 para que la probabilidad de obtener por azar el valor observado sea menor que el nivel de significación fijado *a priori*. En general se utiliza un valor de un 5%, es decir, niveles de significancia menores a 0,05 pueden asegurar que el coeficiente de la variable independiente será distinto de 0.

Es importante destacar, que la significancia estadística por sí sola no es suficiente para que los resultados tengan una consecuencia práctica. Se debe usar conocimiento especializado para determinar la coherencia de los datos.

## Capítulo 3: Área de estudio

### Ubicación

La zona de estudio corresponde a la Región de Coquimbo, la cual se ubica aproximadamente entre los 29° 20' y los 32° 15' de latitud sur. Limita hacia el norte con la región de Atacama y hacia el sur con la región de Valparaíso, tal como se puede ver en la figura 3.1.

Para caracterizar la región de Coquimbo se utiliza información proveniente del sitio web de la Biblioteca nacional del congreso de Chile (BNC), en particular la sección titulada Región de Coquimbo.

La región posee una superficie de 40.579,9 km<sup>2</sup> los cuales equivalen aproximadamente al 5% del total de Chile. Según el Censo del año 2017, la población alcanzaba los 757.586 habitantes, con una densidad de 46,23 habitantes por km<sup>2</sup>. Administrativamente se compone de tres provincias, Limarí, Elqui y Choapa, las cuales a su vez se dividen en 15 comunas.



Figura 3.1: Ubicación zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

## Accesos

La definición de los accesos a la región se hace mediante la plataforma de Google Maps.

Existen distintas formas de acceder a la región. Por el sur el ingreso puede ser a través de la Ruta 5 en el sector cercano a la costa o utilizando la ruta E-37-D hacia el interior.

Por el norte, de poniente a oriente, se puede ingresar a través de la ruta C-536, la Ruta 5 y la Ruta D-115. Existen otros accesos, pero estos son los principales.

Hacia el este limita con Argentina y se puede acceder a través de la ruta 41, y hacia el oeste limita con el mar.

## Clima y vegetación

Para caracterizar el clima y vegetación de la región de Coquimbo se utiliza información proveniente del sitio web de la Biblioteca nacional del congreso de Chile (BNC), en particular la sección homónima.

La región de Coquimbo corresponde a una zona de transición entre las zonas desérticas de más al norte y las templadas mediterráneas de más al sur, razón por la cual presenta diversos climas.

En el borde costero, hasta aproximadamente 40 km hacia el interior, se presenta el clima estepárico costero o nuboso, el cual se caracteriza por su abundante nubosidad, humedad, temperaturas moderadas, con precipitaciones anuales promedio de 130 mm, con un periodo seco de ocho a nueve meses.

En la parte interior de la región, sobre los 800 m, se presenta el clima de estepa cálido, el cual presenta ausencia de nubosidad y sequedad del aire, con temperaturas mayores que en el sector costero y precipitaciones menos abundantes, donde los periodos de sequía son habituales.

En el sector cordillerano, sobre los 3.000 m, se presenta el clima templado de altura, donde sus características principales corresponden a las altas precipitaciones, temperaturas bajas y nieves permanentes, las cuales constituyen una buena fuente de agua para el periodo de verano.

La vegetación presente en la región se conoce como estepa arbustiva abierta, predominando la especie espino. Dependiendo del clima y la topografía existen distintas especies. En las planicies litorales se observa un matorral arbustivo costero poco denso con especies como cactáceas, espinos y un tapiz herbáceo.

Debido al alto nivel de humedad presente al sur de la bahía Tongoy y al norte del río Limarí es que se preservan los bosques Fray Jorge y Altos de Talinay de categoría residual del tipo selva valdiviana, con especies como olivillo, arrayán, boldos, etc.

Al norte de La Serena, al interior de la región, se presenta una estepa abierta de acacia caven asociada a cactáceas y hierbas. Hacia el sur se presentan especies mesófilas como boldo, peumo, chañar, etc.

En los cordones montañosos se presenta un matorral abierto andino de características bajas, cubierta de hierbas, además de arbustos muy dispersos. A mayores alturas, se encuentran especies xerófitas adaptadas a climas de altura como festucas, stipas y arbustos pequeños.

A nivel regional, de acuerdo al balance hídrico que abarca el periodo 1985-2015 (DGA, 2017a), los valores de precipitación media anual no superan los 250 mm (Figura 3.2). De igual forma, de acuerdo al Atlas del Agua (DGA, 2017b), la macrozona norte, conformada por las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo, presenta un promedio de lluvia caída de 87 mm/año.

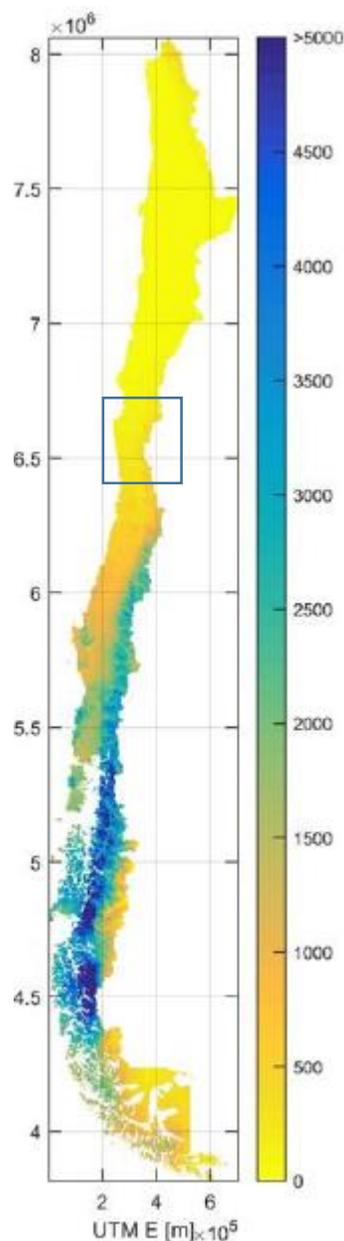


Figura 3.2 Precipitación media anual mm para el período 1985-2015.  
Fuente: Actualización del Balance Hídrico Nacional. DGA (2017a).

## Geomorfología

Para caracterizar la geomorfología de la región se utiliza la información proveniente del sitio web de la Biblioteca nacional del congreso de Chile (BNC), en particular la sección Relieve Región de Coquimbo, además del Mapa de Chile: versión digital (SERNAGEOMIN, 2003) y las referencias especificadas más adelante.

En el área de estudio se reconocen únicamente dos unidades morfo estructurales a nivel regional. Hacia el sector poniente se reconoce la Cordillera de la Costa, mientras que hacia el oriente la Cordillera de los Andes. Estas se distribuyen con orientación norte-sur, y se dividen de manera equitativa la superficie de la región. Hacia (Figura 3.3).

A una escala de más detalle, además de las cordilleras se reconoce la presencia de valles fluviales de orientación este-oeste que hacen desaparecer la típica depresión intermedia presente en el resto del país (Novoa, 1989). De esta forma, se reconocen principalmente cuatro unidades geomorfológicas: la alta Cordillera de los Andes, la montaña media, los valles fluviales transversales y la franja costera o litoral (Paskoff, 1993). Estas unidades se pueden ver en la figura 3.4.

**Alta montaña:** Corresponde a la Cordillera de Los Andes la cual ocupa la posición extrema oriental de la región y se distingue por sus alturas, y su capacidad de retención nival. La cordillera de la Región de Coquimbo se caracteriza por la ausencia de vulcanismo cuaternario. Sus cumbres superan los 3500 m, alcanzando sobre la frontera chileno-argentina los 6000 m de altitud (Novoa, 1989).

**La montaña media:** Este ambiente montañoso que agrupa todos aquellos relieves cuya altura no supera los 3000 msnm, está separado de la Cordillera de Los Andes por la falla de Vicuña. Aparece como un relieve desmembrado y discontinuo, debido a la intensa disección fluvial a la que ha estado sometido. El límite occidental de la unidad queda demarcado por la franja litoral y los relieves asociados a ella.

**Valles fluviales:** sus formas son producto de la actividad de las aguas corrientes y con alturas que no sobrepasan los 300 m en su curso inferior. Se trata pues, de formas amplias y de baja pendiente, sobre las cuales en conjunto con sus proyecciones naturales en la costa, se localiza la mayor proporción de la población regional y la principal actividad agrícola. De norte a sur se advierten tres unidades, los valles de los ríos Elqui, Limarí y Choapa respectivamente (Paskoff, 1993).

**Franja costera o litoral:** Las planicies litorales se presentan con un amplio desarrollo y penetran hacia el interior, formando franjas de hasta 40 km de ancho, variando entre 0 y 200 msnm. En la desembocadura del río Elqui, Guanaqueros y la bahía de Tongoy se manifiestan, pero al sur desaparecen para dar paso a los relieves altos de Talinay, cuya principal característica es la costa elevada y abrupta que va descendiendo hacia el sur, donde nuevamente aparecen las planicies costeras. Una de las mayores características de la costa sur de la región es la presencia de extensos campos de dunas litorales al norte de Los Vilos (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BNC), 2018).

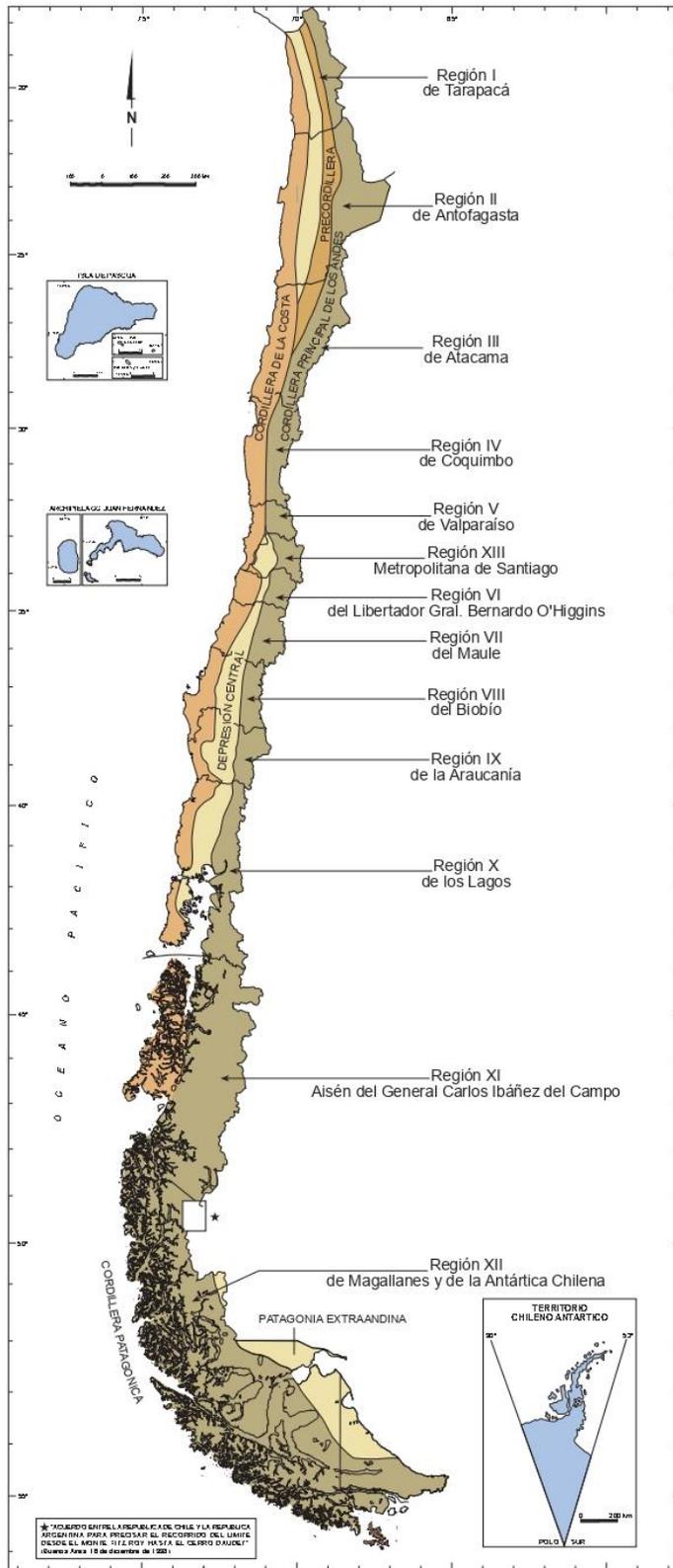


Figura 3.3. Dominios morfoestructurales y división político-administrativa. Fuente: Mapa Geológico de Chile: versión digital. SERNAGEOMIN (2003).

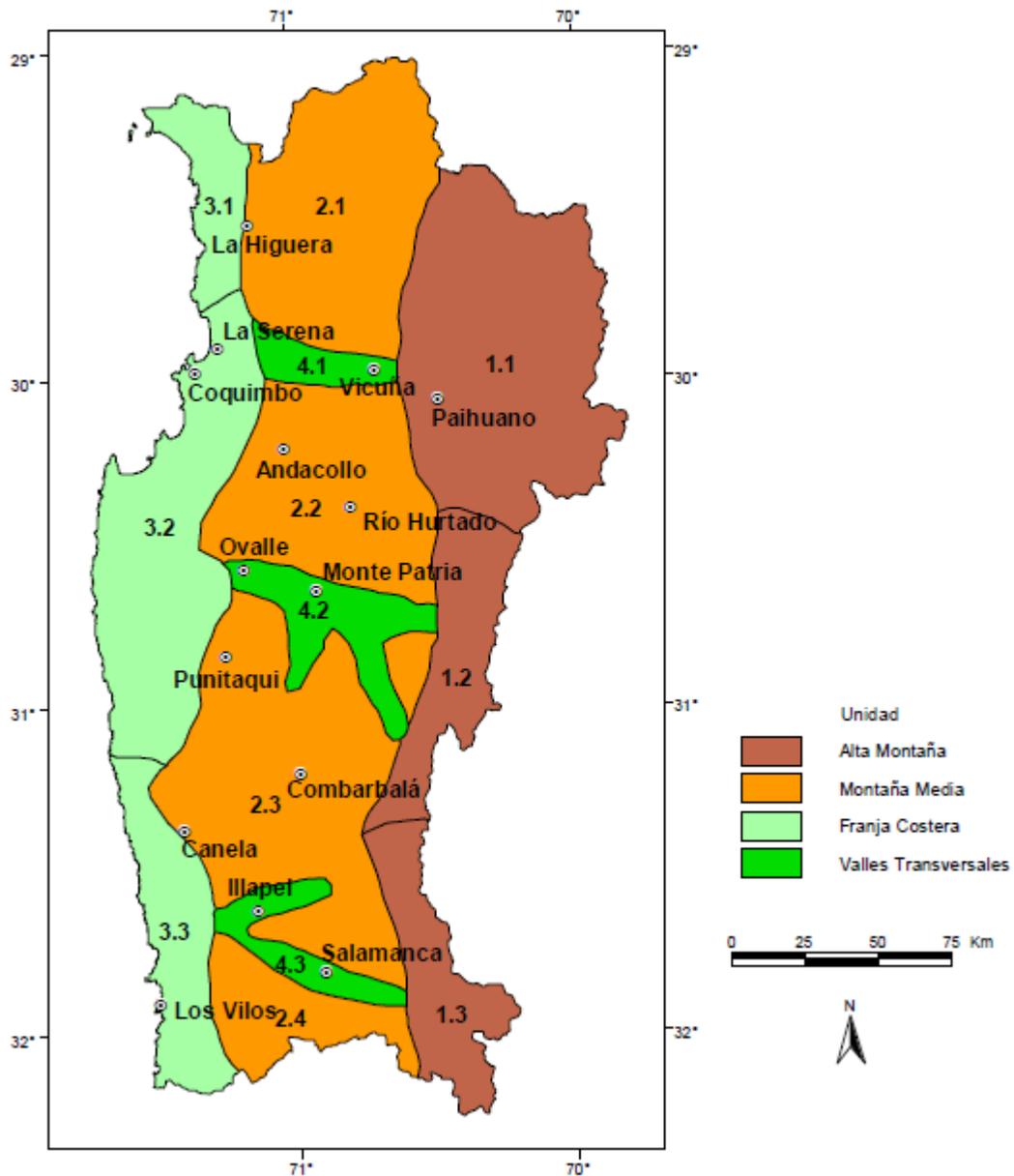


Figura 3.4. Unidades geomorfológicas de la Región de Coquimbo. Fuente: Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo. Novoa y López (2001).

## Hidrografía

De acuerdo al Inventario de cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile (DGA, 2014) se reconocen tres ríos importantes en la región: Elqui, Limarí y Choapa. Todos ellos nacen en la Cordillera de los Andes y desembocan en el mar. El río Elqui es de régimen de alimentación mixta. En época de deshielo sus principales tributarios, son el río Turbio y Claro. El río Limarí posee tributarios como los ríos Hurtado, Grande y Guatulame. Destacan en su estructura la regulación de

sus aguas por los embalses de Recoleta, La Paloma y Cogotí. Por su parte, los principales tributarios del río Choapa corresponden a los ríos Tocornal e Illapel.

En la región se reconocen 11 cuencas distintas, divididas a su vez en subcuencas (DGA, 2014), las cuales se muestran a continuación en la tabla 3.1 y se observan en la Figura 3.5:

Tabla 3.1: Cuencas y subcuencas de la región de Coquimbo

Nombre cuencas	Área km <sup>2</sup>	Tipo	Región	% por región
<b>Nombre subcuencas</b>	<b>Área km<sup>2</sup></b>			
<b>Río Huasco</b>	<b>9.813,7</b>	<b>Exorreica</b>	<b>Atacama-Coquimbo</b>	<b>88 -12</b>
Río Transito	4111,8			
Río del Carmen	3041,9			
Río Huasco	2660,1			
<b>Costeras e Islas entre Tercera Región y Q. Los Choros</b>	<b>229,9</b>	<b>Exorreica</b>	<b>Coquimbo</b>	<b>100</b>
Qs. entre Q. Carrizalillo y R. Los Choros	223,8			
Isla Gaviota	1,8			
Isla Los Choros	3,5			
Isla Damas	0,8			
<b>Río los Choros</b>	<b>3.838,0</b>	<b>Exorreica</b>	<b>Atacama-Coquimbo</b>	<b>9 – 91</b>
Q. Los Choros hasta junta Q. del Pelicano	1448,9			
Q. del Pelicano	1188,8			
Q. Los Choros entre Q. del Pelicano y desembocadura	1200,3			
<b>Costeras entre R. Los Choros y R. Elqui</b>	<b>440,8</b>	<b>Exorreica</b>	<b>Coquimbo</b>	<b>100</b>
Costeras entre Río Los Choros y Río Elqui	440,8			
<b>Río Elqui</b>	<b>9.826,0</b>	<b>Exorreica</b>	<b>Coquimbo</b>	<b>100</b>
Río Turbio	4155,8			
Río Claro	1523,4			
R. Elqui Medio	1737,6			
R. Elqui Bajo	2409,1			
<b>Costeras entre Elqui y Limarí</b>	<b>2.299,6</b>	<b>Exorreica</b>	<b>Coquimbo</b>	<b>100</b>
E. El Culebron - Q. El Romeral (Incl.)	1082,8			
Q. Camarones (Incl. - R. Limarí	1216,7			
<b>Río Limarí</b>	<b>11.696,5</b>	<b>Exorreica</b>	<b>Coquimbo</b>	<b>100</b>
Río Hurtado	2665,8			
Río Grande Alto (hasta arriba junta Río Rapel)	2190,0			
R. Grande Medio (arriba Junta R. Rapel y R. Guatulame o Muro Emb. Paloma)	1497,1			
R. Guatulame (Muro Embalse Paloma)	2619,8			
Río Grande Bajo (entre Embalse Paloma y Río Hurtado)	374,6			
Río Limarí	2349,0			

<b>Nombre cuencas</b>	<b>Área km<sup>2</sup></b>	<b>Tipo</b>	<b>Región</b>	<b>% por región</b>
<b>Nombre subcuencas</b>	<b>Área km<sup>2</sup></b>			
<b>Costeras entre R. Limarí y R. Choapa</b>	<b>1.666,9</b>	<b>Exorreica</b>	<b>Coquimbo</b>	<b>100</b>
Costeras entre Río Limarí y Estero El Teniente	243,9			
E. El Teniente y E. El Almendro (Incl.)	775,0			
Costeras entre E. El Almendro y Q. Totoral (Incl.)	485,6			
Costeras entre Quebrada Totoral y Río Choapa	162,3			
<b>Río Choapa</b>	<b>7.653,7</b>	<b>Exorreica</b>	<b>Coquimbo</b>	<b>100</b>
Río Choapa Alto (hasta abajo junta Río Cuncumen)	1582,6			
Río Choapa Medio (entre Ríos Cuncumen e Illapel)	2248,0			
Río Illapel	2054,7			
Río Choapa Bajo (entre Río Illapel y Desembocadura)	1768,5			
<b>Costeras entre R.Choapa y R.Quilimarí</b>	<b>1.293,4</b>	<b>Exorreica</b>	<b>Coquimbo</b>	<b>100</b>
Costeras entre Estero Millahue y Estero Pupio	401,0			
Estero Pupio	693,0			
Costeras entre Estero Pupio y Río QuiLimarí	199,3			
<b>Río Quilimarí</b>	<b>783,5</b>	<b>Exorreica</b>	<b>Coquimbo</b>	<b>100</b>
Río Quilimarí hasta Muro Embalse Culimo	783,5			

Fuente: Modificada de Inventario de cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile (DGA, 2014)

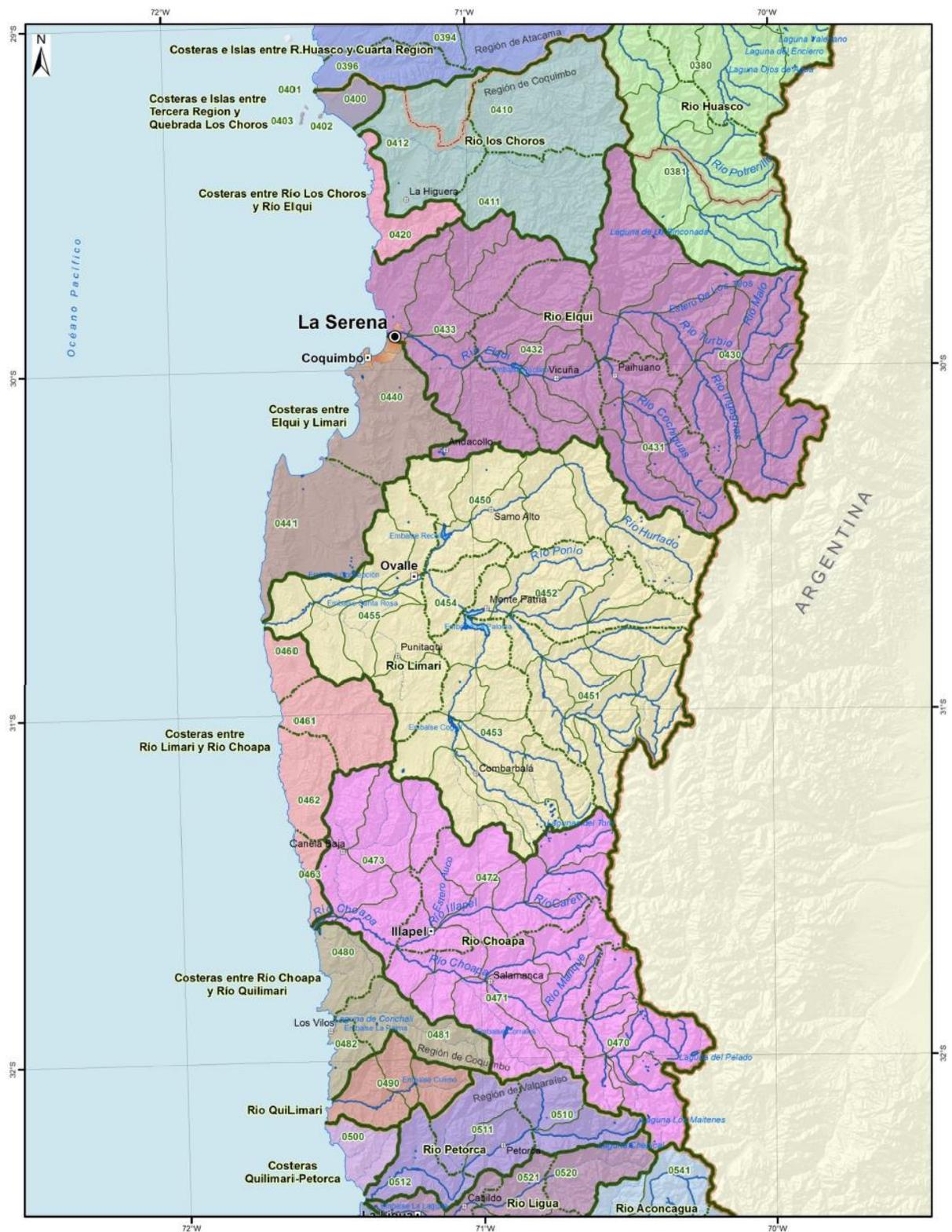


Figura 3.5a: Cuencas y subcuencas de la Región de Coquimbo. Fuente: Inventario de cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile. DGA (2014).



Figura 3.5b: Simbología y leyenda cuencas y subcuencas de la Región de Coquimbo. Fuente: Inventario de cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile. DGA, (2014).

## Marco geológico

La geología a nivel regional puede ser descrita mediante el Mapa Geológico de Chile a escala 1:1.000.000. Debido a la extensión del área de estudio, se observan afloramientos de diversa naturaleza, destacando secuencias sedimentarias, volcano-sedimentarias y volcánicas, además de rocas intrusivas y metamórficas. Las edades abarcan desde el Paleozoico hasta el Cenozoico, específicamente el Cuaternario. A continuación se describen brevemente las secuencias y rocas presentes en la región, las que se observan en la Figura 3.6.

### Secuencias sedimentarias

**Tr1m (Triásico Superior):** Secuencias sedimentarias marinas y transicionales: areniscas, conglomerados, limolitas y calizas. En la Precordillera y zona costera, regiones II a IV: formaciones Cerro Minado, San Félix y El Quereo.

**TrJ1m (Triásico-Jurásico Inferior):** Secuencias sedimentarias marinas litorales y transicionales: areniscas cuarcíferas, ortoconglomerados, calizas fosilíferas, lutitas y limolitas calcáreas con intercalaciones volcánicas subordinadas. En la Precordillera y localmente en la costa, regiones II a III: Estratos de Rencoret y formaciones Quebrada del Salitre, El Profeta (inferior) y Canto del Agua.

**Ki1m (Cretácico Inferior (Neocomiano)):** Secuencias sedimentarias marinas litorales: calizas, calcarenitas, areniscas, margas y coquinas. En las regiones I a IV: formaciones Blanco, El Way, Grupo Chañarillo y Río Tascadero.

**Kia1c (Cretácico Inferior alto (Aptiano-Cenomaniano)):** Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres: areniscas, conglomerados, limolitas, calcilutitas y brechas sedimentarias con intercalación de tobas. En la región IV: formaciones Pucalume y Viñita (inferior); en la Cordillera Principal, regiones V y Metropolitana: formaciones Colimapu y Cristo Redentor.

**MP1c (Mioceno Superior-Plioceno):** Secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales o fluviales: conglomerados, areniscas y limolitas. En las regiones I a IV: formaciones Huaylas, Lauca y Pastos Chicos, Gravas del Copiapó; en la región XI: Formación Galeras.

**MP1m Mioceno Superior-Plioceno:** Secuencias sedimentarias marinas transgresivas: areniscas, limolitas, coquinas, conglomerados, calizas y fangolitas. En la costa, regiones II a VIII: formaciones La Portada, Bahía Inglesa, Coquimbo, Navidad y Tubul.

**PPI1r (Plioceno-Pleistoceno):** Depósitos de remoción en masa: brechas polimícticas con matriz de arena/limo en proporción variable, de flujo o deslizamiento gravitacional. En la Cordillera Principal: flujos de detritos de las quebradas Lluta y Camarones (región I); avalancha de detritos de Colón-Coya (región VI).

**Qe (Pleistoceno-Holoceno):** Depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas en dunas y barjanes tanto activos como inactivos. En las regiones I a VII: dunas de Santo Domingo y Quivolgo.

**Q1g (Pleistoceno-Holoceno):** Depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glacialacustres: diamictos de bloques y matriz de limo/arcilla, gravas, arenas y limos. En la Cordillera Principal, regiones I a IV. En la Depresión Central, regiones IX y X; en regiones XI y XII: lóbulos morrénicos en el frente de los lagos proglaciales, abanicos fluvio-glaciales frontales o varves en la ribera de lagos o cursos fluviales, asociados a las principales glaciaciones del Pleistoceno donde son indiferenciados o relativos a las glaciaciones Llanquihue (**1**; 35-14,2 ka); Santa María (**2**; 262-132 ka); Río Llico (**3**; 480-338 ka) o Caracol (**4**; 687-512 ka).

**Qa (Pleistoceno-Holoceno):** Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. En la Depresión Central, regiones I a III: abanicos aluviales.

**Qf (Pleistoceno-Holoceno):** Depósitos fluviales: gravas, arenas y limos del curso actual de los ríos mayores o de sus terrazas subactuales y llanuras de inundación

**Q1 (Pleistoceno-Holoceno):** Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvio-glaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvio-glaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos

#### Secuencias volcano-sedimentarias

**Js2c (Jurásico Medio-Superior):** Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales: rocas epiclásticas, piroclásticas, y lavas andesíticas a riolíticas. En la Cordillera Principal, regiones III a IV: formaciones Lagunillas, Algarrobal, Mostazal. En la Cordillera de la Costa, regiones V y Metropolitana: Formación Horqueta.

**Ki2m (Cretácico Inferior (Neocomiano)):** Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas: lavas andesíticas y basálticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias, areniscas y calizas fosilíferas. En la Precordillera, región III: Estratos Cerro El Aguila; en la Cordillera Principal, región IV: Formación Los Pelambres; en la Cordillera de la Costa, regiones V y Metropolitana: Formación Lo Prado.

**Ki2c (Cretácico Inferior-Cretácico Superior):** Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales, con escasas intercalaciones marinas: brechas sedimentarias y volcánicas, lavas andesíticas, ocoítas, conglomerados, areniscas, limolitas calcáreas lacustres con flora fósil;

localmente calizas fosilíferas marinas en la base. En Cordillera de la Costa, regiones IV, V y Metropolitana: formaciones Quebrada Marquesa y Veta Negra.

**Kia2 (Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo):** Secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas. En la Precordillera y Cordillera de la Costa, regiones III a Metropolitana: formaciones Cerrillos, Viñita (occidental) y Las Chilcas.

**Ks2c (Cretácico Superior):** Secuencias volcanosedimentarias continentales: rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas. En la Precordillera, región I a III: formaciones Quebrada Mala, Llanta, Hornitos; en las regiones IV a Metropolitana: formaciones Quebrada Seca, Viñita (oriental), Los Elquinos y Lo Valle.

**OM2c (Oligoceno-Mioceno):** Secuencias volcanosedimentarias: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas. En la Cordillera Principal, regiones I a IX: formaciones Lupica, Escabroso, Abanico, Coya-Machalí, Cura- Mallín (inferior).

### Secuencias volcánicas

**CP3 (Carbonífero-Pérmico):** Secuencias volcánicas continentales: lavas, domos, tobas y brechas andesíticas a riolíticas con intercalaciones de areniscas, conglomerados y calizas. Incluye cuerpos hipabisales riolíticos. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a IV: formaciones Quipisca, Collahuasi, Cas y La Tabla.

**PTr3 (Pérmico-Triásico):** Secuencias volcánicas continentales y complejos subvolcánicos: tobas, brechas, lavas y domos riolíticos y dacíticos con intercalaciones de areniscas y conglomerados. Incluye pórfidos riolíticos. En la Cordillera Principal, regiones III y IV: Formación Pantanoso y Estratos de Guanaco Sonso.

**TrJ3 (Triásico-Jurásico Inferior):** Secuencias volcánicas continentales y transicionales: lavas, domos, brechas, basálticos a riolíticos con intercalaciones de areniscas y conglomerados. En la Precordillera, regiones II y III: Estratos Las Lomas y Formación La Ternera; en la Cordillera Principal, región IV: Estratos de los Tilos; en la Cordillera de la Costa, región IV: Formación Pichidangui.

**J3i (Jurásico):** Secuencias volcánicas continentales y marinas: lavas y aglomerados basálticos a andesíticos, tobas riolíticas, con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales. En la Cordillera de la Costa, regiones I a III: formaciones Camaraca y La Negra; en la Cordillera Principal, región VIII: Formación Nacientes del Biobío (Miembro Icalma).

**JK3 (Jurásico Superior-Cretácico Inferior):** Secuencias volcánicas: lavas basálticas a riolíticas, domos, brechas y aglomerados andesíticos a dacíticos con intercalaciones clásticas continentales y marinas. En la Precordillera, regiones I, III y IV: formaciones Punta del Cobre y Arqueros; en la Cordillera Patagónica, región XII: Formación Hardy.

**Ks3i (Cretácico Superior):** Secuencias volcánicas continentales: lavas, domos y brechas basálticos a dacíticos con intercalaciones piroclásticas y epiclásticas. En la Precordillera, regiones I a IV: Formación Cerro Empexa (superior), Estratos del Estanque, Cerro Los Carneros; en la Cordillera Patagónica, región XI: Grupo Ñireguao.

**PE3a (Paleoceno-Eoceno Inferior):** Secuencias y complejos volcánicos continentales ácidos: domos y rocas piroclásticas dacíticas a riolíticas asociados a calderas de colapso. En la Precordillera, región III: calderas El Salvador, San Pedro de Cachiyuyo y Lomas Bayas.

**OM3 (Oligoceno-Mioceno):** Secuencias y centros volcánicos intermedios a ácidos: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesíticos a riolíticos. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones III y IV: complejos volcánicos de la ‘Franja de Maricunga’, Complejo Volcánico Cerros Bravos y Formación Tilito.

**M3i (Mioceno Inferior-Medio):** Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas. En la Cordillera Principal, regiones I a VIII: complejos volcánicos Doña Inés y Ojos de Maricunga; formaciones Cerro Las Tórtolas y Farellones.

**Ms3i (Mioceno Superior):** Centros y secuencias volcánicas: lavas, domos y depósitos piroclásticos, andesíticos a dacíticos, con intercalaciones aluviales, asociados a depósitos epitermales de Au-Ag. En la Cordillera Principal, regiones I a IV: volcanes Choquelimpie, Copiapó, Wheelwright y Formación Vacas Heladas.

**Ms3t (Mioceno Superior):** Ignimbritas dacíticas a riolíticas y depósitos piroclásticos asociados a estratovolcanes. En la Cordillera Principal, regiones I a IV: ignimbritas Ujina, Sifón, San Andrés, Grande y Formación Vallecito.

**PPI3 (Plioceno-Pleistoceno):** Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados. En la Cordillera Principal, regiones VII a X: formaciones Cola de Zorro y Malleco; en la Cordillera Patagónica, región XII: basaltos de Pali Aike; en las islas oceánicas: volcán Poike (Isla de Pascua), archipiélago Juan Fernández, isla Salas y Gómez; islas San Félix y San Ambrosio.

### Rocas intrusivas

**CPg (Carbonífero-Pérmico (328-235 Ma)):** Granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, de hornblenda y biotita, localmente de muscovita. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a IV: Batolitos compuestos, ‘stocks’ y cuerpos hipabisales (Sierra Moreno, Cordillera de Domeyko, Batolito Elqui-Limarí); en la Cordillera Principal, regiones X y XI: Batolito Panguipulli-Riñihue y ‘Stock’ Leones.

**PTrg (Pérmico-Triásico (270-205 Ma)):** Granitos hololeucocráticos, pórfidos graníticos y granodioritas de biotita. En la Cordillera Principal, regiones III y IV: Batolito Elqui-Limarí (Unidad Inaguás); en Antártica.

**TrJg (Triásico-Jurásico (212-180 Ma)):** Granodioritas, monzogranitos, monzodioritas, dioritas y gabros de piroxeno y hornblenda; sienogranitos. En Cordillera de la Costa, regiones III a V.

**Jsg (Jurásico Medio-Superior (180-142 Ma)):** Monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda. En la Cordillera de la Costa, regiones I a VI; en la Cordillera Principal, regiones X y XI: Plutón Panguipulli y borde oriental del Batolito Norpatagónico; en la península Antártica.

**Kibg (Cretácico Inferior bajo (144-124 Ma)):** Monzodioritas y dioritas de piroxeno, hornblenda y biotita, granodioritas y tonalitas. En la Cordillera de la Costa, regiones II a IV, asociados al Sistema de Fallas Atacama-El Romeral y mineralización de Fe (Cerro Imán, Algarrobo).

**Kiag (Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo (123-85 Ma)):** Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita. En la Cordillera de la Costa, regiones II a IV, al este del Sistema de Fallas Atacama-El Romeral y asociados a mineralización de Fe-Cu-Au (Candelaria) y Cu-Au (Andacollo); en la Cordillera de la Costa, regiones V a X.

**Ksh (Cretácico Superior (84-66 Ma)):** Pórfidos andesíticos-dioríticos, dacíticos y riolíticos. Entre las cordilleras de la Costa y Principal, regiones III y IV, asociados a secuencias volcánicas de edad similar.

**KTg (Cretácico Superior-Terciario Inferior):** Granodioritas, dioritas y pórfidos graníticos. Entre las cordilleras de la Costa y Principal, regiones I a IV; en la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: granitoides y pórfidos de Puerto Ibañez e islas Evans. (a) Facies marginales de granodioritas y gabros del Batolito Surpatagónico: isla Riesco y estrecho de Magallanes.

**PEg (Paleoceno-Eoceno (63-38 Ma)):** Monzodioritas de piroxeno y biotita, granodioritas y monzogranitos de hornblenda y biotita, dioritas, gabros y pórfidos riolíticos y dacíticos, asociados a mineralización de Cu-Au. En la Precordillera, regiones II y III: San Cristóbal, Inca de Oro; en la Cordillera Principal, región IV; en la Cordillera Patagónica, región XII: islas Hoste y Londonderry.

**Eg (Eoceno (52-33 Ma)):** Granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita, dioritas y monzodioritas de piroxeno y biotita; pórfidos dacíticos y riolíticos. En la Precordillera y Cordillera Principal, regiones I a V; en la Cordillera Patagónica, región XI: archipiélago de los Chonos.

**Og (Oligoceno (33-24 Ma)):** Granodioritas, monzogranitos, tonalitas, dioritas de hornblenda y biotita; gabros. En la Precordillera, región I: Batolito Yabricoya; en la Cordillera Principal, región IV: Plutón Río Las Cuevas; en la región XI: Gabro Bandurrias.

**Mimg (Mioceno Inferior-Medio (22-16 Ma)):** Granodioritas, monzogranitos, monzodioritas, monzonitas y dioritas de biotita y hornblenda. En Cordillera Principal, regiones V y Metropolitana: Plutón La Obra.

**Mh (Mioceno (20-12 Ma)):** Pórfidos dacíticos, andesíticos, monzodioritas y dioritas de hornblenda, piroxeno y biotita. En la Cordillera Principal, regiones I a III: pórfidos de Poquis, Chapiquiña y 'Pórfidos auríferos' de la 'Franja de Maricunga'. En la Depresión Central y Cordillera Principal, región Metropolitana: cerro Manquehue.

**Msh (Mioceno Superior (8-5 Ma)):** Pórfidos andesíticos, dacíticos y granodioríticos de hornblenda, portadores de mineralización de tipo 'Pórfido cuprífero gigante' y chimeneas de brechas. En la Cordillera Principal, región VI: El Teniente.

## Rocas metamórficas

**DC4 (Devónico-Carbonífero):** Metaareniscas, filitas y, en menor proporción, mármoles, cherts, metabasaltos y metaconglomerados; metaturbiditas con facies de ‘mélange’. En la Cordillera de la Costa, regiones I a III: Formación El Toco, Complejo Epimetamórfico Chañaral; en la Cordillera Patagónica, regiones XI y XII: Complejo Metamórfico Oriental de Aisén y Magallanes.

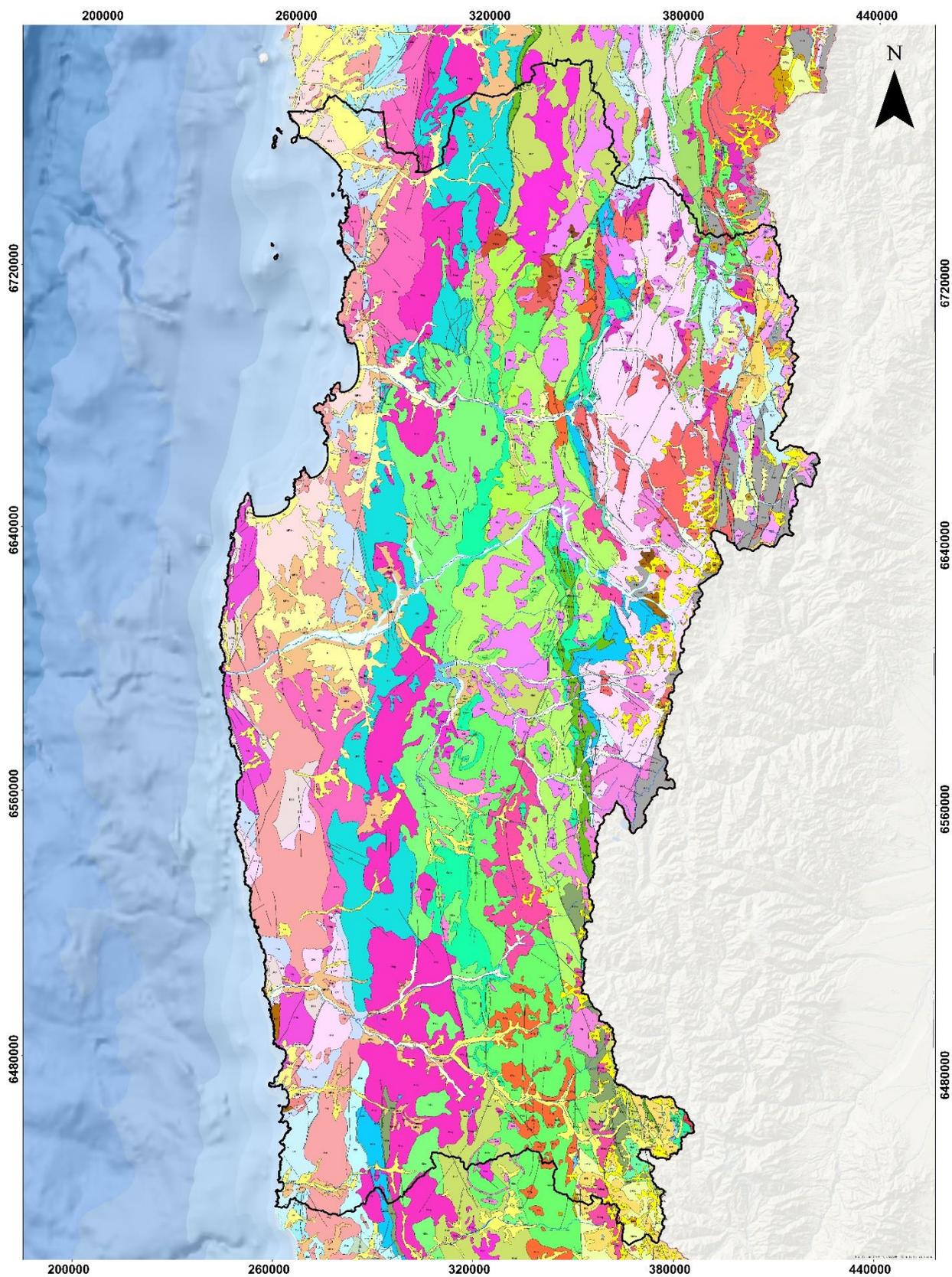


Figura 3.6a: Mapa geológico de la Región de Coquimbo escala 1:1.000.000.  
Fuente: Elaboración propia con mapa vectorial del SERNAGEOMIN.

# LEYENDA

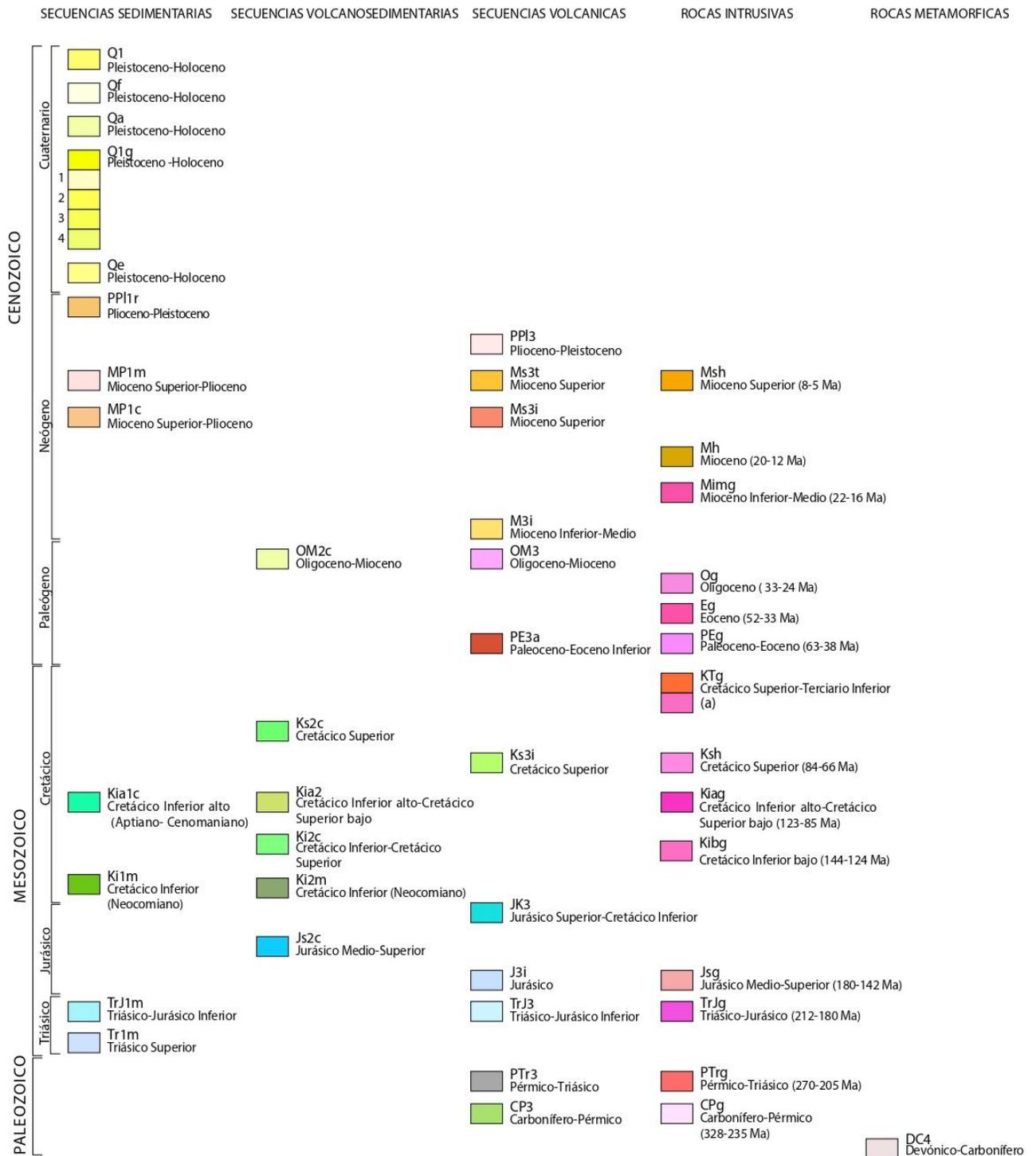


Figura 3.6b: Leyenda Mapa geológico de la Región de Coquimbo escala 1:1.000.000.  
Fuente: Modificado de SERNAGEOMIN (2003).

## SIMBOLOGIA

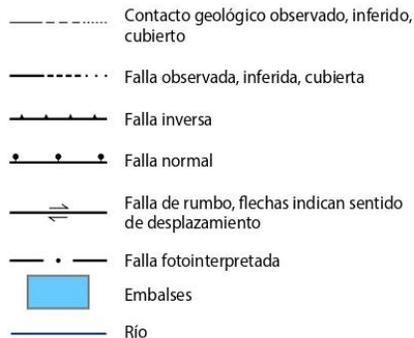


Figura 3.6c: Simbología Mapa geológico de la Región de Coquimbo escala 1:1.000.0000.  
Fuente: Modificado de SERNAGEOMIN (2003).

A un mayor nivel de detalle, la geología de la región se puede describir mediante seis cartas geológicas a escala 1:250.000, las cuales componen y exceden el área de estudio. Dichas cartas se detallan en la tabla 3.2 y se muestran en la figura 3.7.

Tabla 3.2: Cartas geológicas a escala 1:250.000 disponibles para la Región de Coquimbo

Carta	Autor	Año
Hoja Vallenar y parte norte de La Serena	Moscoso R., Nasi C., Salinas P.	1982
Hoja Guanta	Nasi C., Moscoso R., Maksaev V.	1990
Hoja Pisco Elqui	Mpodozis C., Cornejo P.	1988
Hoja Ovalle	Bohn Horst, T. H.	1967
Hoja Illapel	Rivano S., Sepúlveda P.	1991
Hoja Quillota Portillo	Rivano S.	1996

Fuente: Elaboración propia.

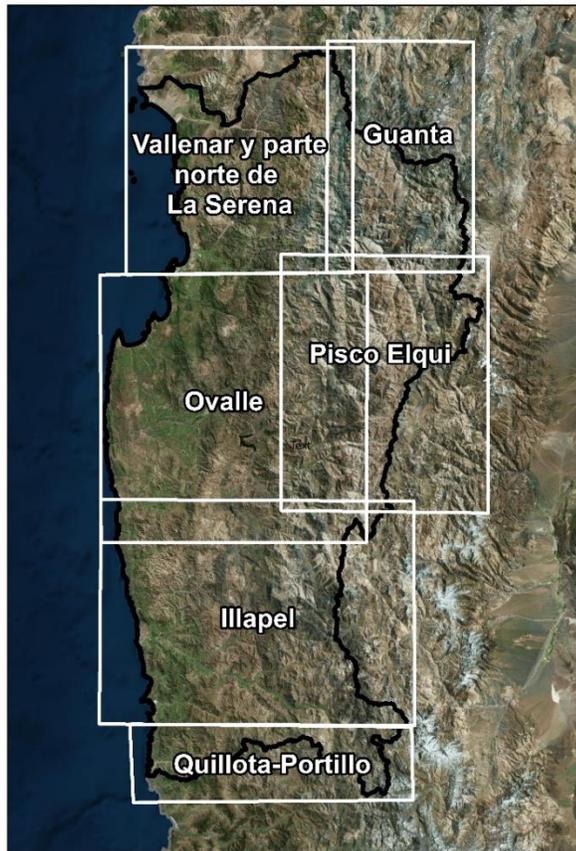


Figura 3.7: Cartas geológicas a escala 1:250.000 disponibles para la Región de Coquimbo.  
Fuente: Elaboración propia.

### Geología estructural

Para definir la geología estructural de la región, se utilizaron las cartas geológicas presentes en la tabla 3.1, además de las descripciones del Área Condoriaco-Rivadavia (Emparan y Pineda, 1999), Geología del área Vicuña-Pichasca (Pineda y Emparán, 2006) y el documento Estilos estructurales en el norte chico de Chile (Moscoso y Mpodozis, 1998).

En el norte de Chile, entre los 28° y 31°S, la cadena andina está formada por dos provincias tectónicas con estilos estructurales distintos (Figura 3.8), pero complementarios. La Cordillera frontal está dominada por la deformación de basamento (piel gruesa), caracterizada por fallas inversas y domos de basamento, a los cuales se amolda una cobertura de comportamiento pasivo. En cambio, la región costera, muestra una deformación pelicular (piel fina), con su cobertura volcánica cretácica, relleno de la cuenca marginal “abortada” del Norte Chico, deformada en pliegues abiertos de gran longitud de onda y escamas dirigidas hacia el oeste en las calizas neocomianas.

Entre los sistemas de falla más importante en la región se reconoce parte del sistema de falla Atacama, el cual se presenta en la cordillera de la Costa. Posee una orientación NS-NNE y se presenta desde el sur de Iquique hasta el Romeral, al norte de La Serena. En la Cordillera de los Andes se presentan las fallas Rivadavia y Vicuña. Esta última posee una orientación NS y un largo aproximado de 150 km.

En la figura 3.8 se puede notar la distribución de los afloramientos de basamento que predominan ampliamente en la zona oriental (Cordillera frontal), en contraste con la cobertura, principalmente mesozoica de la Provincia costera.

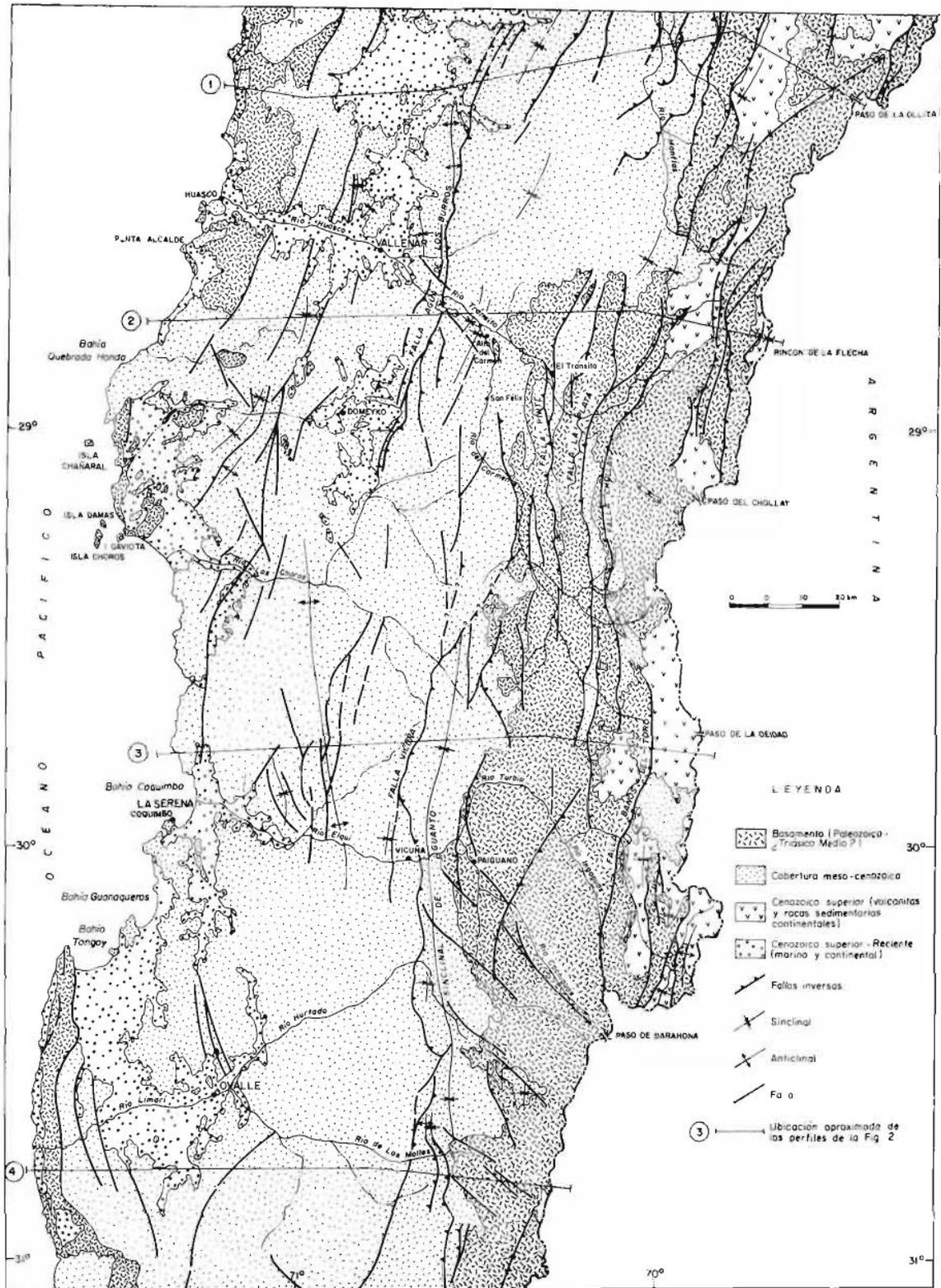


Figura 3.8: Mapa de dominios estructurales del territorio chileno entre los 28° y 31°S. Fuente: Moscoso y Mpodozis (1998).

## Flujos ocurridos en la Región de Coquimbo

Durante los últimos años la región se ha visto afectada por diversos eventos de remoción en masa, en particular flujos de detritos, barro, etc. los cuales han generado daño a la población. A continuación, se presenta una breve descripción de los eventos ocurridos en la región de Coquimbo en el periodo 1991-2017.

### 24 de marzo 1992 (Hauser, 2000)

El día 24 de marzo de 1992 se generaron flujos de barro y detritos de gran volumen y poder destructivo, los cuales fueron generados por precipitaciones del orden de 23 mm/24 hrs (Hauser, 2000). Producto de esto se dañaron algunas viviendas pertenecientes al poblado de Los Maitenes, ubicado en un afluente del río Hurtado (Cuenca del Limarí)

### 18 de junio 1997 (SERNAGEOMIN, 2015)

En esta fecha se registró un aluvión (nombre común para los flujos de detritos), el cual afectó al sector El Almendral, en la comuna de Vicuña (Cuenca del Elqui) Los daños generados corresponden a la muerte de 2 personas, 2 lesionadas y 140 albergadas.

En el invierno del mismo año, también ocurrieron otros flujos de barro y detritos hiperconcentrados, de los cuales no se tiene la fecha específica. Estos generaron daños en la carretera Panamericana Norte, entre La Serena y Vallenar, obstruyendo el tráfico entre ambas ciudades.

### 23 de abril 2004 (Hauser, 2004)

En esta fecha, en la comuna de Vicuña (Cuenca del Elqui), se desarrollaron varios flujos de detritos que fueron generados por precipitaciones de intensidades inusuales, las cuales alcanzaron los 80 mm en un lapso de 3 horas, esto de acuerdo a registros del fundo Primavera (Hauser, 2004). El evento descrito correspondería a un ciclo pluvial con un determinante control orográfico, es decir, altamente relacionado con la variación de la topografía, y sería una lluvia de tipo “celda”, lo cual se traduce en importantes variaciones en el agua caída, entre dos puntos separados por distancias menores (Hauser, 2004).

Los daños ocasionados corresponden a la destrucción de al menos 10 viviendas, colmataciones de importantes segmentos de una serie de canales de regadío, daños a calles, caminos, terrenos agrícolas y frutícolas, entre otros. La localidad afectada corresponde a la localidad de Diaguitas, ubicada en la ribera norte del valle del río Elqui.

### 15 de febrero 2006 ((Naranjo y Landon, 2006)

El 15 de febrero del 2006 entre las 17.30 y las 18.00 horas, se produjeron tres flujos de detritos (aluviones de escombros y barro), provenientes del cordón Pajaritos ubicado al sureste de Paihuano (Cuenca del Río Elqui). Las precipitaciones que dieron origen a estos flujos, habrían sido de tipo convectivas.

Las características de los flujos en cuanto a su litología, composición y morfología, son semejantes. Estos escurrieron con un elevado grado de viscosidad, lo que permitió la formación de bancos laterales bien definidos y su encauzamiento a lo largo del canal central. Se midieron bancos laterales de hasta 3,5 m de alto y anchos de hasta 20 m, rasgos dependientes de la morfología del

cauce que albergó el flujo. Asimismo, se midieron marcas de descargas que llegaron a los 8 m de alto, medidos sobre el eje del cauce.

Los flujos estaban constituidos por hasta un 40% de bloques, bolones y guijarros de 7 a 60 cm de diámetro (excepcionalmente hasta 2,5 m), dispuestos aleatoriamente en una matriz fina o fracción fina (60%). Esta correspondía, principalmente, a limo y arena de cristales (maicillo). La matriz daba a los flujos un color pardo oscuro cuando estaba húmeda y un color bayo grisáceo una vez endurecida y seca. Se incorporaron en el depósito abundantes ramas y troncos de arbustos, los cuales se destacan por la emisión de resinas de color negro, que contrasta con el color claro del depósito seco.

Los flujos producidos en las cabeceras de las quebradas tuvieron longitudes entre 4,5 a 6 km, con volúmenes de 50.000 a 75.000 m<sup>3</sup>, y demorando entre 25-30 minutos en arribar a los sectores poblados de los valles.

Afortunadamente, no hubo víctimas fatales, personas heridas ni daños importantes a las viviendas, sin embargo, sí hubo problemas en las conexiones viales del sector, debido a la interrupción del tránsito en el camino D-487.

[24-25 de marzo 2015 \(Alfaro et al, 2017; Opazo y Velásquez, 2015a, 2015b y 2015c\)](#)

El día 25 de marzo del 2015 se generaron diversos flujos de detritos, los cuales afectaron a varias localidades del sector norte de la región (Cuenca del Elqui principalmente, y Cuenca del Limarí). Es importante destacar que este evento no solo se concentró en la región de Coquimbo, sino que es parte de un fenómeno climático que afectó a una parte importante de la zona norte del país.

Debido a la extensión de este fenómeno climático los flujos generados en la región son abundantes y por ende tienen diversas características. Entre las remociones en masa generadas se reconocen flujos de detritos, flujos de barro y flujos de detrito y barro. Además de lo anterior, dentro del material arrastrado se reconoce la presencia de basura, material acumulado por los vecinos y restos de troncos.

Los flujos detríticos se desarrollaron a través de quebradas laterales, que desembocaron, en algunos casos y, en otros, represaron al río principal. Los flujos de barro también fueron generados desde quebradas laterales, colmatando cauces artificiales o naturales. Las inundaciones afectaron a sectores de los ríos Elqui y Turbio y en gran medida la quebrada Marquesa.

Este evento afectó numerosas redes viales, en algunos casos generando aislamiento, como para las localidades de Viñitas y Las Lajas, las cuales tenían una vía única de acceso. Además hubo daño a las viviendas, y de manera puntual, la destrucción total de una casa y muerte de animales.

[11-13 de mayo 2017 \(Alfaro et al, 2017 y Sepúlveda et al, 2017\)](#)

Entre los días 11 y 13 de mayo del 2017 se desarrollaron diversos flujos de detritos en varias zonas de la región (Cuenca del Elqui, Limarí, Choapa, Costeras entre Elqui y Limarí)

En la cuenca del río Limarí, se visitaron las comunas de Montepatria, Combarbalá y Punitaqui. En ellas se reconocieron crecidas con y sin desbordes, flujos de detritos, deslizamiento de roca y suelo y caída de roca. Los efectos del evento meteorológico se concentran en los flujos de detritos y crecidas que afectaron rutas principales de la región.

Los flujos reconocidos en la cuenca del Limarí corresponden a flujos de detritos, los cuales presentan bloques de roca y restos vegetales en muchos casos. Los tamaños y las granulometrías son propias de cada uno, sin embargo, los bloques transportados alcanzan tamaños de hasta 3 m.

Los depósitos, en promedio, no superan los 1,5 m, y se reconoce el transporte de troncos de hasta 4 m de largo.

En la cuenca del río Elqui, varias de las quebradas donde transitaron los flujos para el evento de marzo del 2015 fueron reactivadas en esta oportunidad, sin embargo, de acuerdo a los expertos, la magnitud habría sido mayor para el caso del año 2015. En esta cuenca se observaron crecidas de detritos en los cauces y quebradas principales, flujos de detritos en quebradas laterales y algunos deslizamientos y caídas de rocas asociados a laderas y taludes de caminos y rutas. Dentro de los flujos se reconocen flujos de detritos y barro, y flujos de arena y detritos. Nuevamente, las características son específicas para cada uno, sin embargo, en general los depósitos generados van desde los 30 cm hasta 1,5 m.

Cortes de caminos, obstrucción del alcantarillado, ruptura de barreras de contención, daños a viviendas y la muerte de dos personas son algunos de los efectos ocasionados por los flujos asociados a esta fecha.

#### 26 de junio 2017

Para este evento, no existen informes oficiales, solo información asociada a redes sociales. Se reconoce la crecida del río Quebrada Leiva en la comuna de Vicuña, a eso de las 17.51 h del 26 de junio del 2017.

De acuerdo a la información proporcionada por SERNAGEOMIN, se reconocen dos puntos con flujos, no se especifica el tipo, en la Quebrada Arenal y Diaguitas, en la comuna de Vicuña (Cuenca del Elqui).

## Capítulo 4: Metodología para análisis estadístico

### Catastro de remociones en masa

Para la modificación del catastro de remociones en masa ocurridas en la Región de Coquimbo, se utiliza como base los antecedentes disponibles del SERNAGEOMIN (Alfaro *et al*, 2018). Esta información fue trabajada en formato *shapefile* donde cada evento fue representado por un punto donde cada uno corresponde a una única remoción en masa. Para cada una de ellas se especifica el tipo de remoción y el factor desencadenante, además de la fecha de ocurrencia y, en la mayoría de los casos, la referencia asociada al evento.

Cada punto corresponde a un evento registrado por el SERNAGEOMIN en informes o estudios del Servicio, no obstante esto no significa, necesariamente, que estos sean los únicos ocurridos en el periodo analizado. La ubicación del punto se asocia a la cuenca de generación del flujo, en algunos casos puede que se encuentre más cercana al depósito y en otras a la zona de generación o parte alta de la cuenca.

El periodo analizado se extiende entre los años 1991 y 2017 de acuerdo con los antecedentes disponibles del SERNAGEOMIN. No obstante, se reconoce que pueden haber existido otros eventos que no están incluidos ya sea porque no se tiene registro de su ocurrencia, la ubicación o la fecha exacta.

Se clasifican según la naturaleza de la remoción y su factor desencadenante, descartando las remociones que no fuesen generadas por precipitaciones. En este estudio los flujos corresponden al tipo de remoción de interés, por lo que de aquí en adelante se trabaja únicamente con estos.

De manera específica, se reconocen tanto flujos de detritos, como de arena y barro, y casos mixtos entre estos. Si bien se reconoce la ocurrencia de flujos hiperconcentrados, no se tiene la ubicación ni la fecha exacta de ocurrencia por lo cual no son incorporados en el catastro.

### Catastro de precipitaciones

Una vez identificados los flujos y las fechas en que ocurrieron, se realiza una recopilación de datos de precipitación con el objetivo de elaborar un catastro de precipitaciones asociadas a dichos eventos. Los datos fueron descargados del sitio web de la dirección general de aguas (DGA)<sup>11</sup> y del Centro de estudios avanzados en zonas áridas (CEAZA)<sup>12</sup>. La información obtenida corresponde a datos de precipitación mensual, diaria, máxima anual en 24 horas, y horaria. Una

---

<sup>11</sup> Los datos de precipitación asociados a fechas con flujos fueron descargados del sitio web de la DGA, en su mayoría, entre el 12 y 13 de septiembre del 2018. Mientras que para los casos sin flujo fueron principalmente entre el 8 y 9 de noviembre del mismo año.

<sup>12</sup> Los datos de precipitación asociados a fechas con flujos fueron descargados del sitio web de CEAZA, en su mayoría, el 10 de octubre del 2018. Mientras que para los casos sin flujo fueron principalmente entre el 12 y 13 de noviembre del mismo año.

vez que se realiza la recopilación se construye una base de datos en *Excel*, para cada tipo de información, además se incorpora la precipitación antecedente en base a los datos anteriores.

Dado que se tiene una gran cantidad de estaciones meteorológicas disponibles, se opta por definir un criterio de selección aplicable a todos los eventos. De esta forma, se escogen únicamente las estaciones que se encuentran dentro de un radio menor o igual a 30 km desde el punto donde fue ubicado el flujo. Algunos eventos como el del 11-13 de mayo del 2017 generaron diversos flujos, por lo cual se dispone de varios puntos en torno a los cuales se calculan los 30 km, y por lo tanto, mayor disponibilidad de estaciones.

El radio de 30 km no se escoge arbitrariamente, sino que fue mediante un proceso de revisión de los antecedentes disponibles. Una vez identificadas las estaciones con datos, se mide la distancia de cada una de estas a los distintos puntos caracterizados como flujos. Tomando en consideración todas las fechas involucradas, se van probando distintos radios (por ejemplo 15 o 20 km), hasta encontrar la medida para que, por lo menos, se tengan dos estaciones con información para cada punto. Cada una de las estaciones posee información de precipitación diaria y mensual asociada a la DGA.

Dado que algunas series de datos de precipitaciones no se encontraban completas, se procede a completarlas, para el caso de las precipitaciones mensuales se suman precipitaciones diarias. Cuando no es posible realizar el procedimiento anterior, o corresponden a datos de precipitación diaria, se grafican los datos de la estación de interés versus una estación cercana. Si se logra un buen ajuste, mediante una regresión lineal, es posible estimar la precipitación en una estación en función de la otra. Solo se utilizan relaciones con ajustes con un  $R^2$  igual o superior a 0,9.

De igual forma, una vez reunidos todos los datos, se elabora una tabla resumen de la información que se tiene para cada uno de los eventos y un mapa donde se muestran los flujos y las distintas estaciones con datos disponibles.

Como se menciona en la sección de marco teórico, la regresión logística corresponde a una probabilidad condicional. La cual se define como “Sean A y B dos sucesos asociados a un experimento  $\epsilon$ . Indiquemos con  $P(B|A)$  la probabilidad condicional del suceso, B dado que A ha ocurrido” (Meyer, 1973). En este caso el suceso B corresponde a la ocurrencia del flujo y A corresponde a los factores meteorológicos, entre esos la precipitación. Por este motivo se trabaja únicamente con fechas en que se hayan registrado precipitaciones (ocurrencia del suceso A).

Para la realización del análisis estadístico se requieren datos tanto de casos positivos como negativos, es decir, datos asociados a fechas donde hubo generación de flujos y otras donde no hubo. Can *et al* (2005) señala que la regresión logística es un método que puede presentar problemas si la cantidad de datos positivos (variable dependiente igual a 1), es muy distinta a la cantidad de datos negativos (variables dependiente igual a 0). Por este motivo se busca un número similar de días con precipitación para los casos sin flujo y con flujo.

Los casos sin flujo se escogen de manera aleatoria dentro del periodo considerado (1991-2017) en base a la definición de casos sin flujo. Para comprender dicha definición se debe tener en cuenta que se consideran como periodos con precipitaciones similares los meses de Enero-Febrero-Marzo (periodo 1) y Abril-Mayo-Junio (periodo 2).

Definición de casos sin flujo: mes de mayor precipitación en un periodo de similar precipitación (periodo 1 o 2). Una vez definido el mes, se escoge el día con mayor precipitación como el día del evento (que en este caso no habría ocurrido).

Los meses de Julio a Diciembre no fueron incluidos en el análisis, debido a que en ellos no se registran flujos para el periodo considerado en el catastro. Debido al periodo considerado en el análisis, la aplicación del modelo será válida solo para los meses contemplados entre Enero y Junio.

Las fuentes de información consultadas corresponden a las mismas utilizadas para los casos con flujos.

### Isoterma 0°C

La altura de la isoterma 0°C constituye un dato que fue proporcionado por la Dirección meteorológica de Chile, a través del SERNAGEOMIN. La información proviene de la Radiosondas Quinteros y Santo Domingo, la primera dejó de funcionar el 7 de agosto de 1999, mientras que la última sigue en vigencia hasta el día de hoy.

### Fenómeno de El Niño

Para determinar en qué condiciones se encontraba la región de Coquimbo respecto al fenómeno de El Niño durante la ocurrencia de los flujos incluidos en el catastro, se consultan los boletines climáticos mensuales del Centro de estudios avanzados en zonas áridas (CEAZA). En los boletines se presentan los resultados de varios índices, (el índice oceánico de El Niño (ONI), índice de la oscilación del sur (SOI) e índice de radiación de onda larga satélite (OLR)), los cuales combinados entregan el estado climático respecto a dicho fenómeno.

### *Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)*

#### Base de datos

Para la construcción de la base de datos a analizar con el programa SPSS, se utiliza el catastro de precipitaciones realizado previamente, en específico, la información proveniente de la DGA. En primer lugar, es importante señalar, que cada punto identificado como un flujo en el *shapefile*, corresponde a un dato distinto, a pesar de haber ocurrido en la misma fecha. Por ejemplo, para el caso del flujo del 26 de junio del 2017, se tienen dos puntos distintos donde se identificaron depósitos asociados al flujo y, por lo tanto, estos constituyen dos datos distintos.

Tal como se mencionó anteriormente, el análisis debe contemplar casos positivos y negativos de flujos. Para los casos negativos, se utiliza la misma ubicación geográfica que para los casos positivos, es decir, para un mismo punto, se tiene un dato con flujo y otro sin flujo, sin embargo, dado que las fechas difieren entre ambos casos, los datos de precipitación asociados a cada uno son distintos.

Para cada punto se incluye: la fecha considerada, es decir, la fecha de ocurrencia o no ocurrencia del flujo, la altura de la isoterma 0°C, datos de precipitación mensual, diaria, antecedente a 1, 2, 8 y 11 días previos a la fecha de análisis. La elección de estos rangos de tiempo, se debe a la distribución de las precipitaciones en torno a los casos asociados a eventos positivos. En general, entre los 3 y 7 días previos a las fechas de análisis la precipitación registrada era cero, por ende, si se considera la precipitación antecedente a los 2 y 7 días, en la mayoría de los casos, no habría variación.

La base de datos se construye únicamente con información proveniente de la DGA, ya que posee un registro más extenso y completo, especialmente para los casos más antiguos donde, en muchos casos, CEAZA no presenta datos. De igual forma, al comparar los datos entre estaciones cercanas (1-3 km) de la DGA y CEAZA se observaron diferencias entre ambos registros (ejemplos en la sección de Anexos). Las discrepancias se deben a que las precipitaciones son muy variables espacialmente y ambas estaciones (DGA y CEAZA) no están midiendo exactamente en el mismo lugar. Sin embargo, no debiesen existir diferencias mayores a un 30% para la precipitación diaria (2019, comunicación escrita CEAZA). Es importante mencionar que la información asociada a las estaciones de CEAZA no se descarta, sino que se utiliza para la elaboración de gráficos. No puede ser utilizada para la base de datos, ya que el registro es muy acotado y no tendría una cantidad de información suficiente para cada uno de los eventos considerados.

Dentro del radio de 30 km alrededor de cada uno de los puntos se tienen distintas estaciones, donde cada una de ellas constituye un dato diferente. Para construir la base, se ordenó la información de acuerdo a la distancia de la estación al punto, siendo la primera la estación más cercana a la ubicación del flujo y la última la más distante. Por ejemplo, si el punto A1, tiene 5 estaciones dentro del radio de 30 km, entonces, tiene 5 datos distintos para la precipitación mensual, diaria, etc. Y estos están ordenados en la base desde la más próxima a la más distante. La cantidad de estaciones para cada uno de los puntos, depende únicamente de la ubicación de estas y de los flujos, por lo tanto la cantidad de información varía de un punto a otro, siendo el máximo 8 estaciones por punto.

Se decide utilizar más de una estación asociada al flujo, de modo de tener mayor información respecto a las precipitaciones. En caso de que la estación más próxima no tenga información, se tiene el dato de la que le sigue en distancia. De igual forma, al tener más estaciones con registros de precipitaciones es posible comprender como estas varían desde un punto de medición a otro.

Además, para cada conjunto de información (precipitación mensual, diaria, antecedente a 1, 2, 8 y 11 días previos a la fecha del evento), se calcula el valor promedio, esto con el objetivo de tener un dato adicional al momento de explicar la ocurrencia de los flujos.

## Procesamiento

Una vez completa la base, esta se procesa con el programa SPSS. Previamente a la ejecución del modelo mismo, se realiza un análisis exploratorio y descriptivo de las variables involucradas en el estudio. En primer lugar, se definen los estadísticos descriptivos de cada variable, entre los cuales se obtuvo el valor máximo, mínimo, promedio y desviación estándar, además de un histograma con los distintos valores que adquiere la variable. Todo lo anterior con el objetivo de comprender cómo esta se comporta, entre qué rangos se mueve, y cómo es la distribución de sus valores. Por ejemplo, si la mayoría de los valores se encuentra bajo cierto punto o están distribuidos homogéneamente.

Por otro lado, es interesante comprender cómo se relacionan las distintas variables entre sí, para lo cual se analiza la correlación entre estas. Este dato se define tanto de forma numérica como gráfica. Para esta última se construyen gráficos donde se muestra una variable versus otra, por ejemplo, precipitación mensual promedio versus precipitación diaria promedio. De esta forma era posible observar si tienen un comportamiento similar, opuesto o no hay relación. Dentro de los gráficos es posible diferenciar los puntos que corresponden a casos con flujo o sin flujo de detritos.

Una vez comprendido el comportamiento de las variables y cómo se relacionan entre sí se procede a ejecutar la regresión logística misma. Para esto se determina la variable dependiente, en este caso la ocurrencia o no ocurrencia del flujo de detritos, y las variables independientes, que serán los

distintos datos recopilados, como la isoterma 0°C y los distintos tipos de precipitación. Esta parte corresponde a un proceso iterativo, en el cual se van agregando y quitando variables de modo de comprender cuales son las que generan un mejor modelo. Por ejemplo, es probable que dos variables que en el paso anterior demostraron tener una correlación alta (cercana a 1 ó -1), no vayan juntas, dado que *a priori* se esperaría que ambas variables estarían explicando un mismo comportamiento.

Para definir qué modelo o combinación de variables entrega el mejor resultado se deben comparar los indicadores de los distintos casos. Tal como se explica en la sección de marco teórico, el logaritmo de la verosimilitud, los  $R^2$  de Cox y Snell, y Nagelkerke, el test Chi-cuadrado y las tablas de clasificación indican qué tan bien explican la ocurrencia de flujos las variables independientes, qué capacidad de predicción tiene el modelo y en qué porcentaje los resultados son consistentes con lo que ocurre en la realidad.

Además de lo anterior, las variables independientes involucradas en el modelo deben ser capaces de explicar lo que ocurre con la variable dependiente. Si los indicadores son apropiados, pero las variables presentes en el modelo no tienen sustento estadístico, no es un buen modelo, por lo cual, es importante reconocer qué parámetros tienen mayor relevancia y predicen el comportamiento de la variable independiente. Lo anterior se verifica por medio de la significancia de variables. De igual forma, estas deben tener un sustento teórico que respalde su permanencia en el modelo.

Una vez reconocidas las variables que predicen mejor el fenómeno en estudio, se prueban distintas probabilidades de corte, de modo de definir cuál es la que genera mejores resultados.

### Determinación de umbrales

Para determinar umbrales de precipitación asociados a la ocurrencia de flujos, se trabaja con la relación utilizada por Padilla (2006). Como se menciona en el capítulo de introducción, Padilla (2006) trabajó con la regresión logística en un estudio similar para la Región Metropolitana. Una vez que establecen los coeficientes ( $\beta$ ) para cada una de las variables, escoge una probabilidad para dejar fija en la ecuación, en particular él trabaja con 0,2 y 0,5. En este caso la probabilidad fijada se elige según los resultados del modelo.

Al dejar la probabilidad fija, se puede establecer una relación lineal entre las distintas variables independientes. Por medio del operador *Logit* se puede linealizar la ecuación, tal como se muestra en la sección de marco teórico en la ecuación 2.4 quedando de la siguiente manera:

$$\text{Ln} \left[ \frac{P_{\text{escogida}}}{1-P_{\text{escogida}}} \right] = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad 4.1$$

En la ecuación anterior  $P_{\text{escogida}}$  y los  $\beta$  corresponden a valores conocidos, mientras que los  $x$  corresponden a variables independientes, donde algunas funcionarán como dato a ingresar y otra será la variable que se busca definir. Nuevamente, las variables escogidas corresponden a un resultado del modelo elaborado, por lo tanto no se puede definir *a priori*, cuantas variables serán, ni que rol tendrá cada una.

Finalmente, para cierta probabilidad, la relación entre las variables escogidas será la determinada a partir de la ecuación 4.1. Así, el concepto de umbral aplica para la variable que está definida en función de las otras, que en este caso corresponde a la precipitación diaria.

## Capítulo 5: Resultados

### Catastro de remociones en masa

Para la elaboración del catastro de remociones en masa ocurridas en la Región de Coquimbo, se utiliza como base los antecedentes disponibles del SERNAGEOMIN (Alfaro *et al*, 2018).

Al escoger únicamente eventos desencadenados por precipitaciones se tiene un total de 189 remociones en masa y 117 corresponden a flujos. El resultado se muestra en la figura 5.1 a continuación y la tabla se encuentra en la sección de anexos.

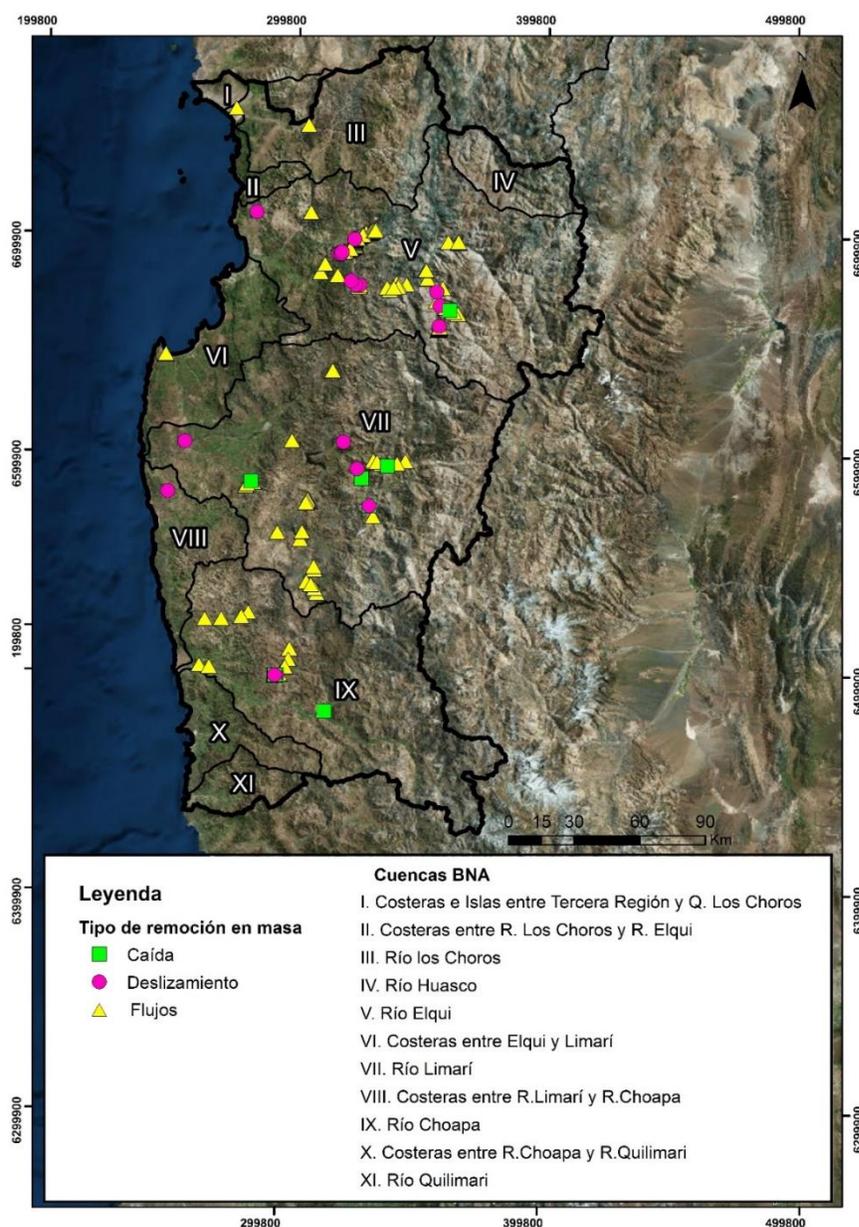


Figura 5.1: Catastro de remociones en masa en la Región de Coquimbo. Fuente: Elaboración propia con datos del SERNAGEOMIN y la Mapoteca digital de la DGA.

En la figura 5.1 se delimita la región de Coquimbo con una línea negra gruesa. Las distintas cuencas presentes en la región, ya sea de manera parcial o completa, se presentan con una línea negra más delgada. Además, cada una presenta un número el cual se detalla en la leyenda. En este caso, las remociones en masa se simbolizan de distinta forma dependiendo su naturaleza, para el caso de la caída de roca se utilizan cuadrados verdes, para los deslizamientos círculos rosados y para los flujos triángulos de color amarillo.

La ocurrencia de remociones en masa no es exclusiva de un sector acotado sino más bien se distribuye en distintos puntos de la región. En particular, la mayoría se concentra principalmente en tres cuencas, de norte a sur, Río Elqui, Río Limarí y Río Choapa. Además se puede ver que un gran porcentaje de las remociones se concentra en los sectores más montañosos de la región, por sobre los costeros.

Del mapa se puede observar que las remociones en masa más abundantes corresponden a flujos con distintas composiciones (detritos, arena y barro, detritos y barro). Debido a su naturaleza y su forma de ocurrencia, es probable que los flujos de detritos correspondan a las remociones en masa que más daño generan a la región, por lo cual es comprensible que haya un mayor foco de atención hacia ellos en comparación con los otros tipos de remociones.

Dado el interés de este trabajo, se utilizan únicamente los flujos gatillados por precipitaciones. A continuación en la figura 5.2 y en la tabla 5.1 se muestran las fechas de los eventos con los cuales se trabaja.

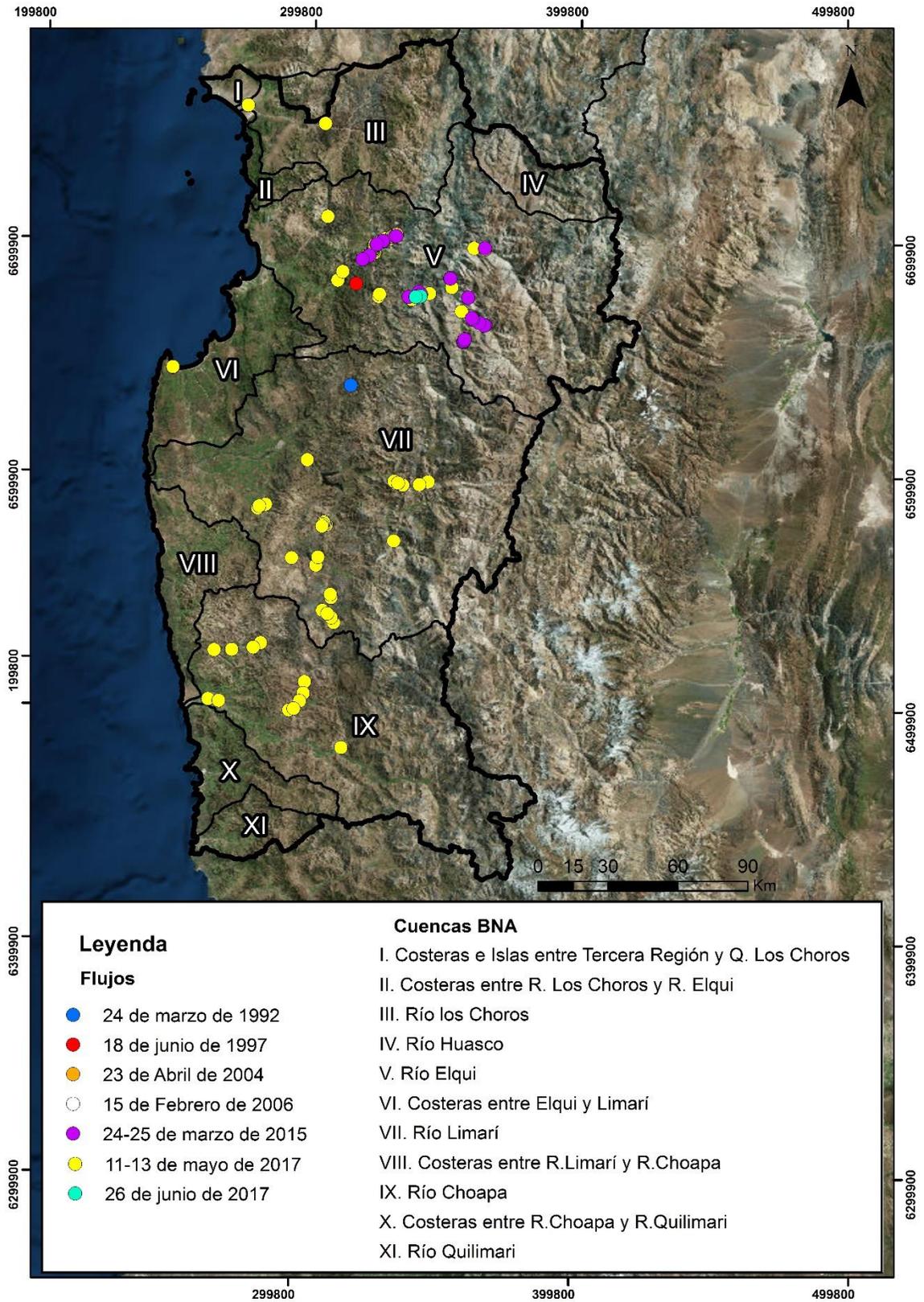


Figura 5.2: Catastro de flujos de detritos en la Región de Coquimbo. Fuente: Elaboración propia con datos del SERNAGEOMIN y la Mapoteca digital de la DGA.

En la figura 5.2, se separan los distintos flujos según su fecha de ocurrencia, cada color corresponde a una fecha distinta. De esto se puede ver que el evento ocurrido entre el 11 y el 13 de mayo del 2017 (en amarillo), tuvo una distribución mucho mayor dentro de la región que los eventos previos. En segundo lugar, en cuanto a distribución, se encuentran los flujos ocurridos entre el 24 y 25 de marzo del 2015 (en morado), los cuales se localizan principalmente en la zona norte de la región, específicamente en la cuenca del Río Elqui.

El resto de las fechas, presenta flujos con distribuciones acotadas. En algunos casos, donde no es posible ubicar el punto en el mapa, por ejemplo, para el 15 de febrero del 2006, se debe a que este coincide o se encuentra muy cercano con la posición de un flujo ocurrido en otra fecha. Este tipo de situaciones ocurre en la cuenca del Río Elqui, donde prácticamente todos los eventos, exceptuando el 24 de marzo de 1992, presentan por lo menos un flujo en ese sector.

En cuanto a la distribución general de los flujos, se puede observar que las cuencas costeras prácticamente no presentan flujos, mientras que la mayoría de estos se concentran en zonas montañosas de la región. Esto probablemente porque existen condiciones geomorfológicas favorables para esto. Por ejemplo existe una mayor cantidad de quebradas laterales, con pendientes pronunciadas, capaces de acumular sedimentos que pueden ser removidos ante un evento de precipitación.

A modo de resumen en la tabla 5.1 se muestran las distintas fechas con eventos que serán incluidas en el análisis y las respectivas cuencas donde se desarrollaron.

Tabla 5.1: Catastro de flujos en la Región de Coquimbo

Fecha	Cuenca
24 de marzo de 1992	Río Limarí
18 de junio 1997	Río Elqui
23 de Abril de 2004	Río Elqui
15 de Febrero de 2006	Río Elqui
24-25 de marzo 2015	Río Limarí y Río Elqui
11-13 de mayo 2017	Río Los Choros, Río Elqui, Río Limarí, Río Choapa, Costeras entre Elqui y Limarí
26 de junio 2017	Río Elqui

Fuente: Elaboración propia con información de SERNAGEOMIN.

## Precipitaciones

Debido a que se tiene bastante información asociada a las precipitaciones de la región, los resultados asociados al catastro también lo son. Entre estos se tienen principalmente mapas y gráficos, los cuales se desarrollan a continuación, y de manera adicional, en la sección de anexos, se incorpora una tabla resumen con los flujos estudiados y la información disponible para cada uno.

En las figuras 5.3 y 5.4 se muestra la distribución de los flujos y las estaciones meteorológicas con información disponible. Si una estación se encuentra en el mapa significa que presenta datos para al menos uno de los eventos estudiados.

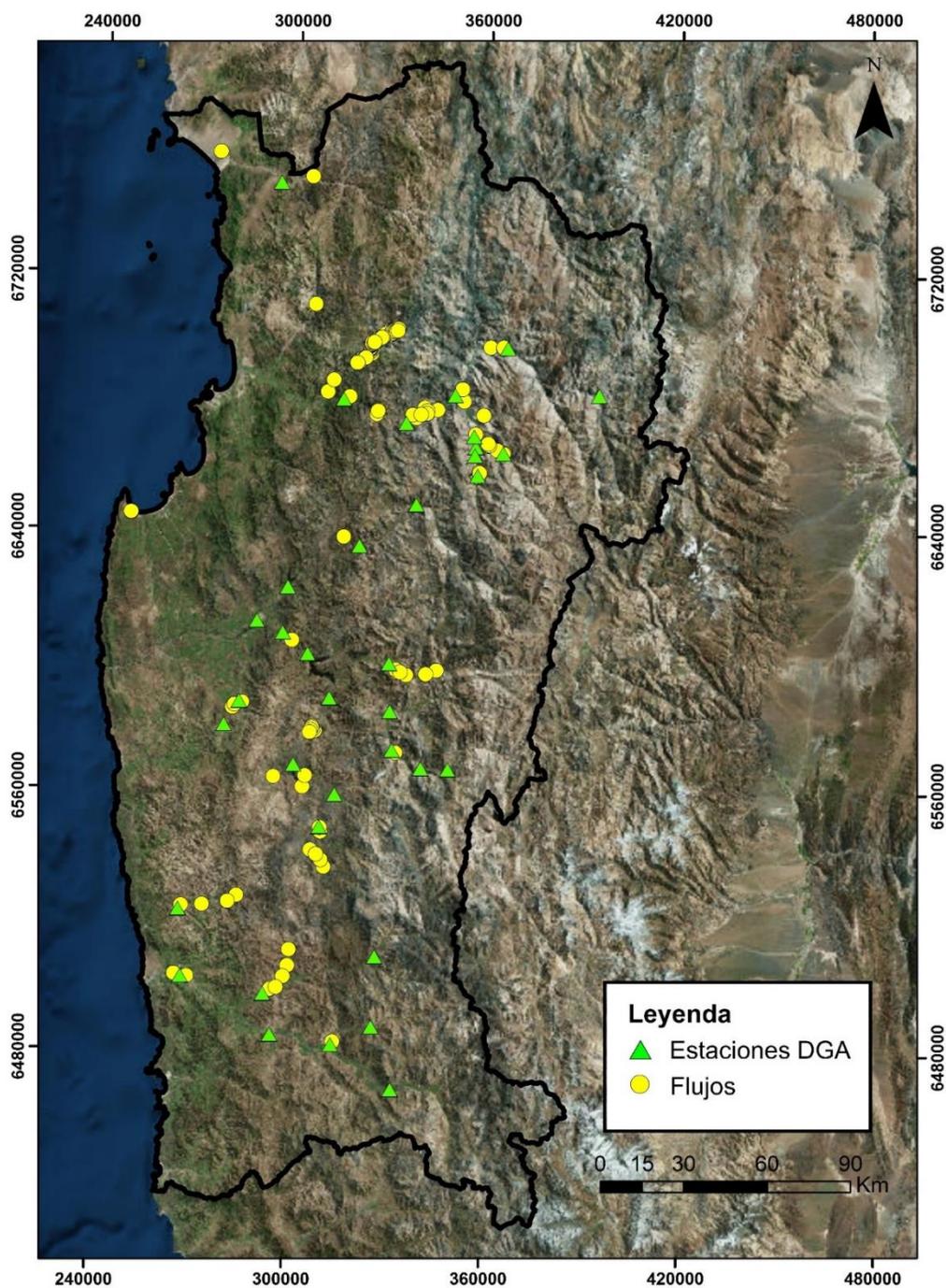


Figura 5.3: Estaciones DGA con datos y flujos de detritos. Fuente: Elaboración propia con información de la DGA y SERNAGEOMIN.

La figura 5.3 muestra los flujos con círculos amarillos y las estaciones de la DGA con triángulos verdes. Se observa que para la mayoría de los puntos, al menos existe una estación cercana.

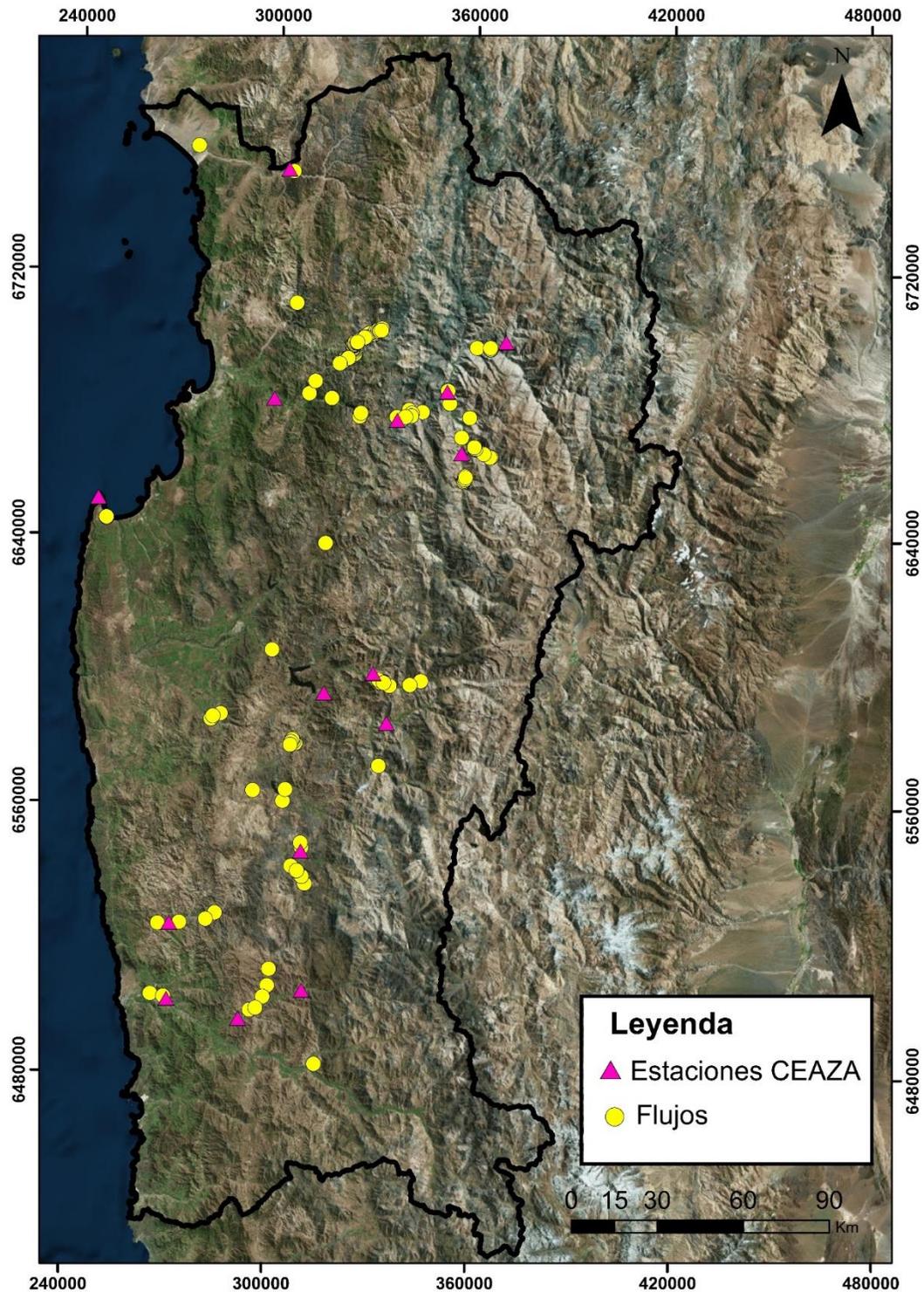


Figura 5.4: Estaciones CEAZA con datos y flujos de detritos. Fuente: Elaboración propia con información de CEAZA y SERNAGEOMIN.

En la figura 5.4 los flujos se muestran con círculos amarillos y las estaciones de CEAZA con triángulos rosados. En este caso las estaciones con información son notablemente menores respecto a la DGA. Sin embargo, se logra cubrir una parte importante de la zona.

Para una mejor comprensión de los distintos datos de precipitación se elaboran gráficos de tiempo versus precipitación para cada una de las fechas con flujos. Los rangos de tiempo considerados varían de acuerdo a la naturaleza de la información. Por ejemplo, para la precipitación mensual, se consideró aproximadamente un año donde se mostraron los distintos meses y sus precipitaciones mensuales en mm.

Los gráficos elaborados para cada uno de los eventos van desde los datos más generales a más particulares en cuanto a términos de tiempo: se parte con la precipitación mensual hasta llegar a la precipitación horaria en el o los días del evento. Se tratarán por separado las distintas fuentes de información, es decir, DGA y CEAZA. En cada uno de los gráficos las estaciones van acompañadas de la altitud a la que se encuentran.

Debido a que la información disponible es bastante extensa se escoge solo un evento que será utilizado como caso de estudio, mientras que los demás se presentan en la sección de Anexos. Se elige el evento del 11 al 13 de mayo del 2017 debido que corresponde a una fecha donde se desarrollaron una gran cantidad de flujos. La distribución se puede observar en la figura 5.2 en color amarillo. Dado que son varios puntos, hay múltiples estaciones en torno a estos y por ende los datos de precipitación son abundantes.

Los gráficos serán presentados en función de las cuencas en las cuales se generan. Previo a los gráficos, se incluyen cuatro figuras (5.5 a 5.8), una para cada cuenca con flujos, donde se detallan las estaciones meteorológicas con información y la ubicación de los flujos.

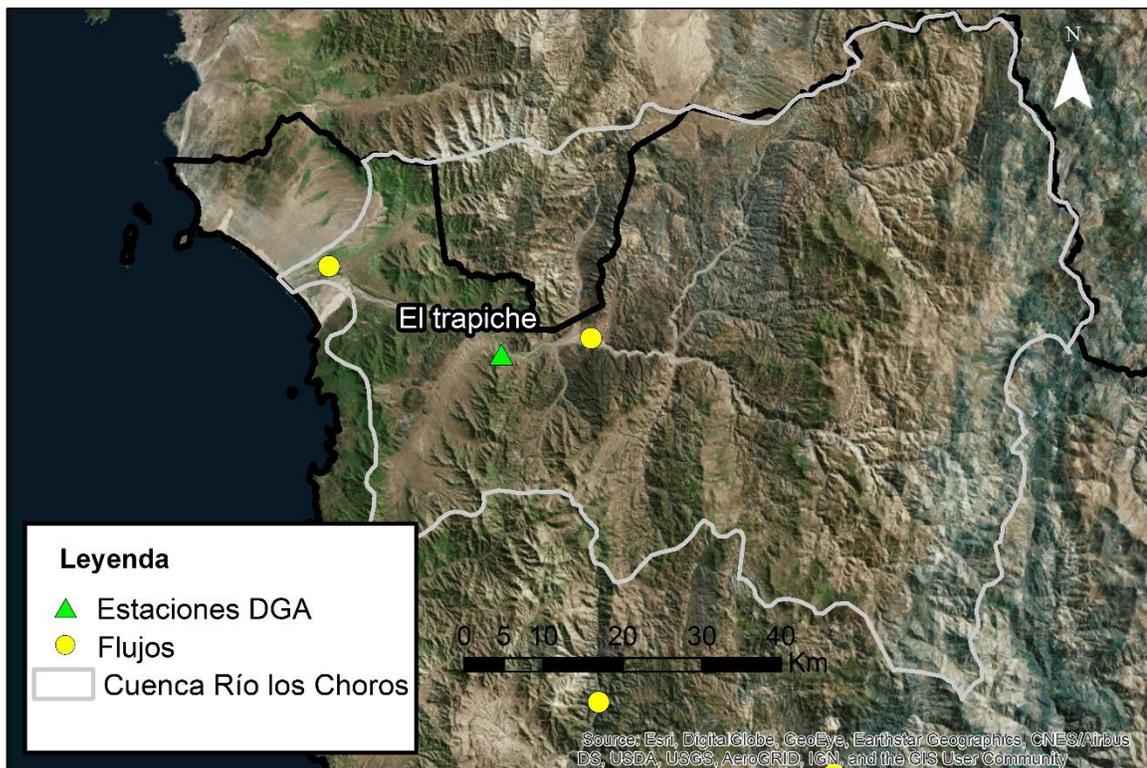


Figura 5.5: Ubicación de los flujos y estaciones de la DGA para la Cuenca Río los Choros. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA y SERNAGEOMIN.

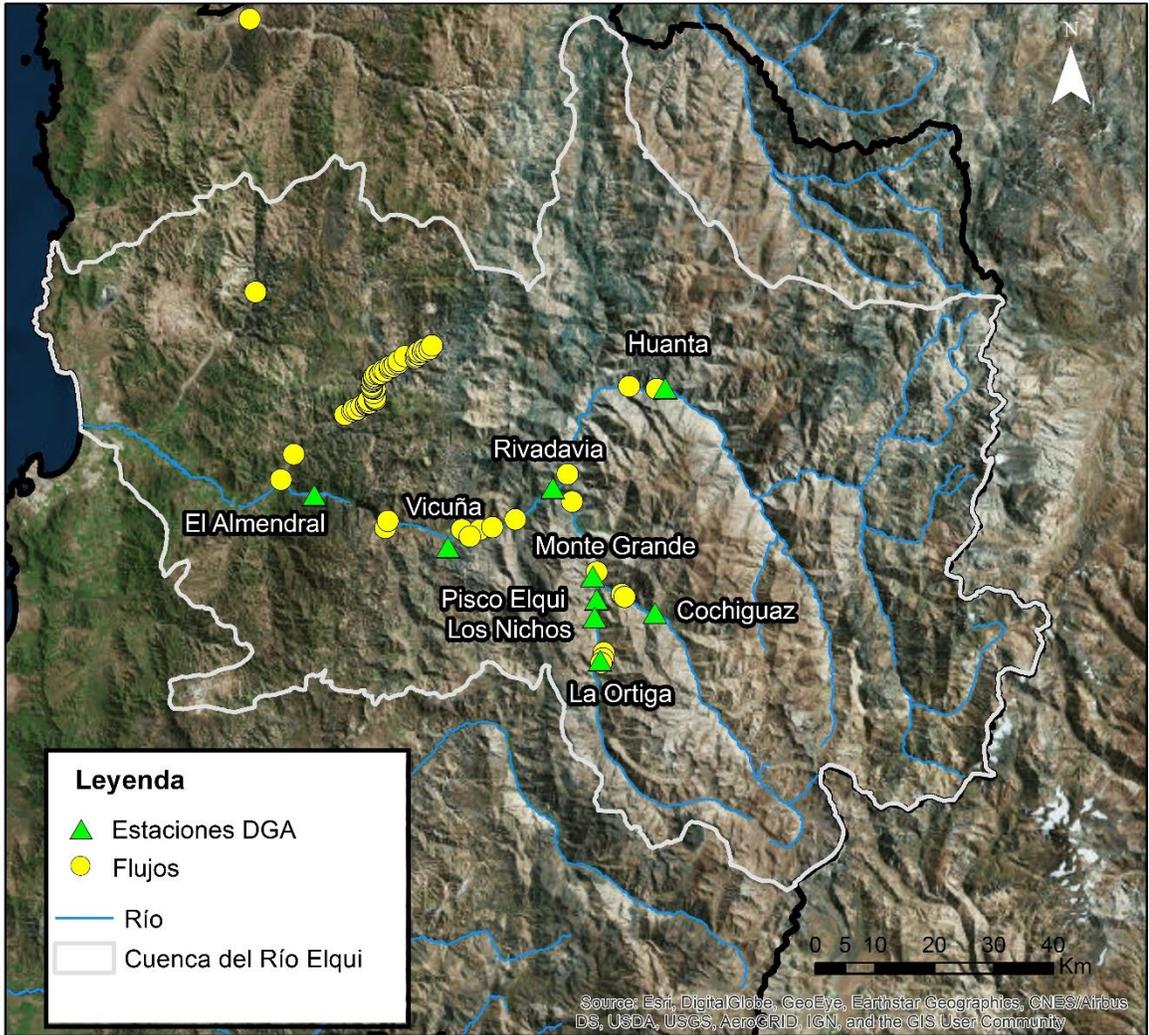


Figura 5.6: Ubicación de los flujos y estaciones de la DGA para la Cuenca del Río Elqui. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA y SERNAGEOMIN.

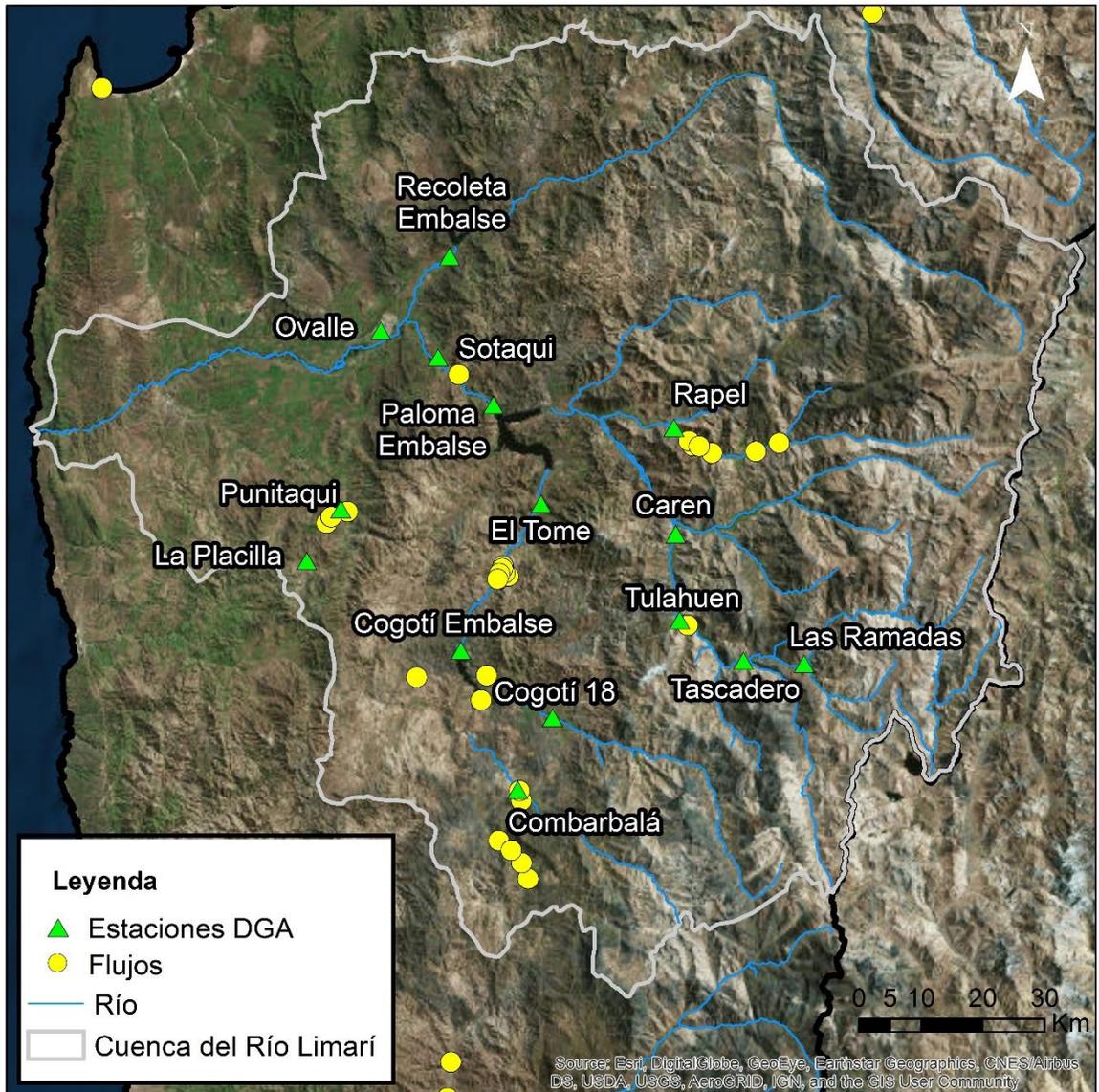


Figura 5.7: Ubicación de los flujos y estaciones de la DGA para la cuenca del Río Limarí. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA y SERNAGEOMIN.

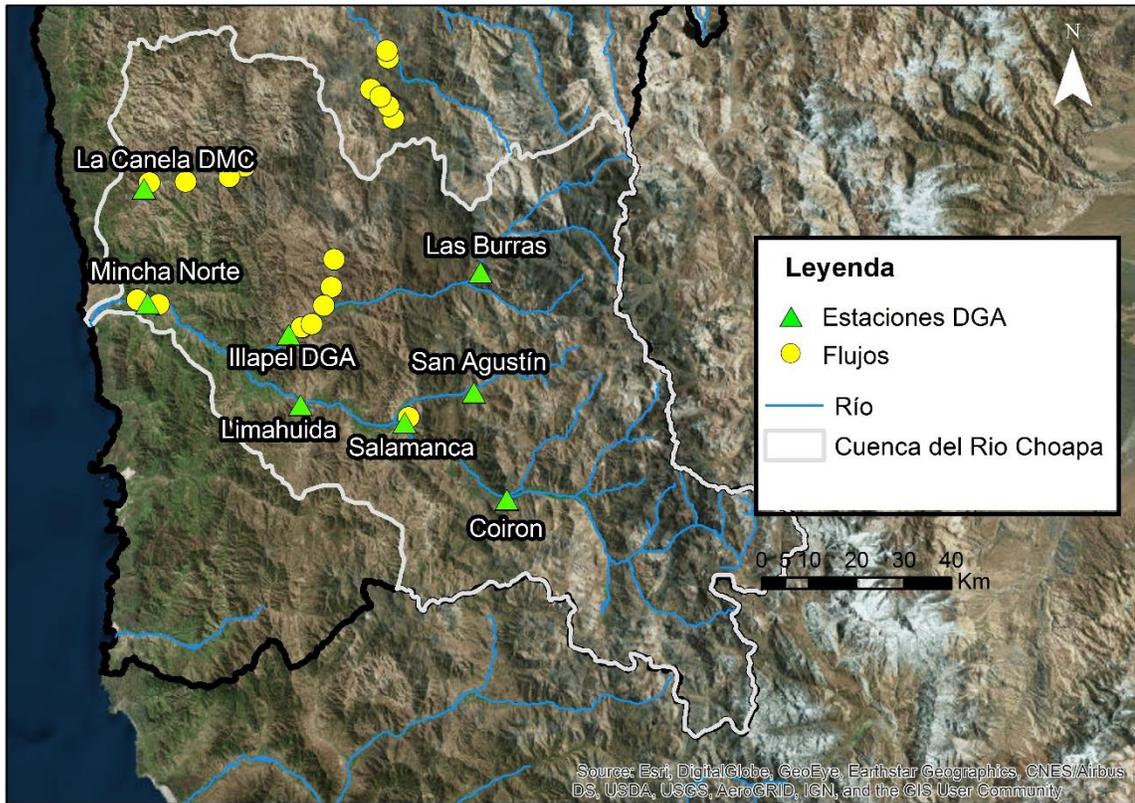


Figura 5.8: Ubicación de los flujos y estaciones para la cuenca del Río Choapa. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA y SERNAGEOMIN.

En primer lugar, se comienza con la información asociada a las estaciones de la DGA. A continuación, se muestra la precipitación mensual para el periodo comprendido entre mayo del 2016 y junio del 2017, esto para visualizar cómo es la precipitación total del mes de mayo del 2017 respecto a los otros meses considerados. Los gráficos 5.1 a 5.4 están ordenados de norte a sur, en sus respectivas cuencas.

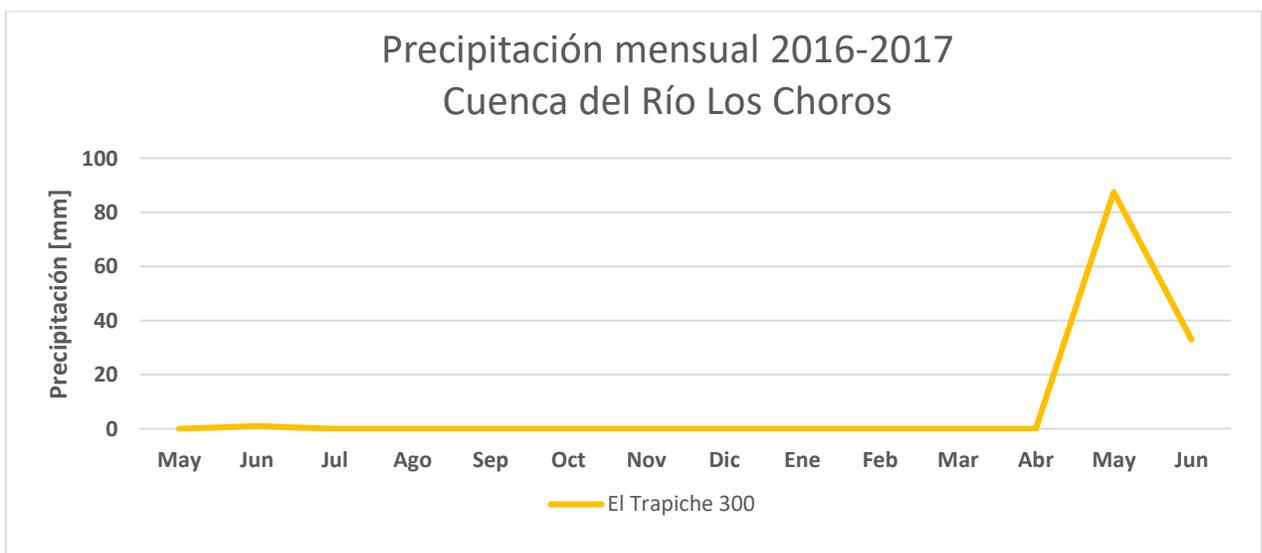


Gráfico 5.1: Precipitación mensual 2016-2017, Cuenca del Río Los Choros, DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

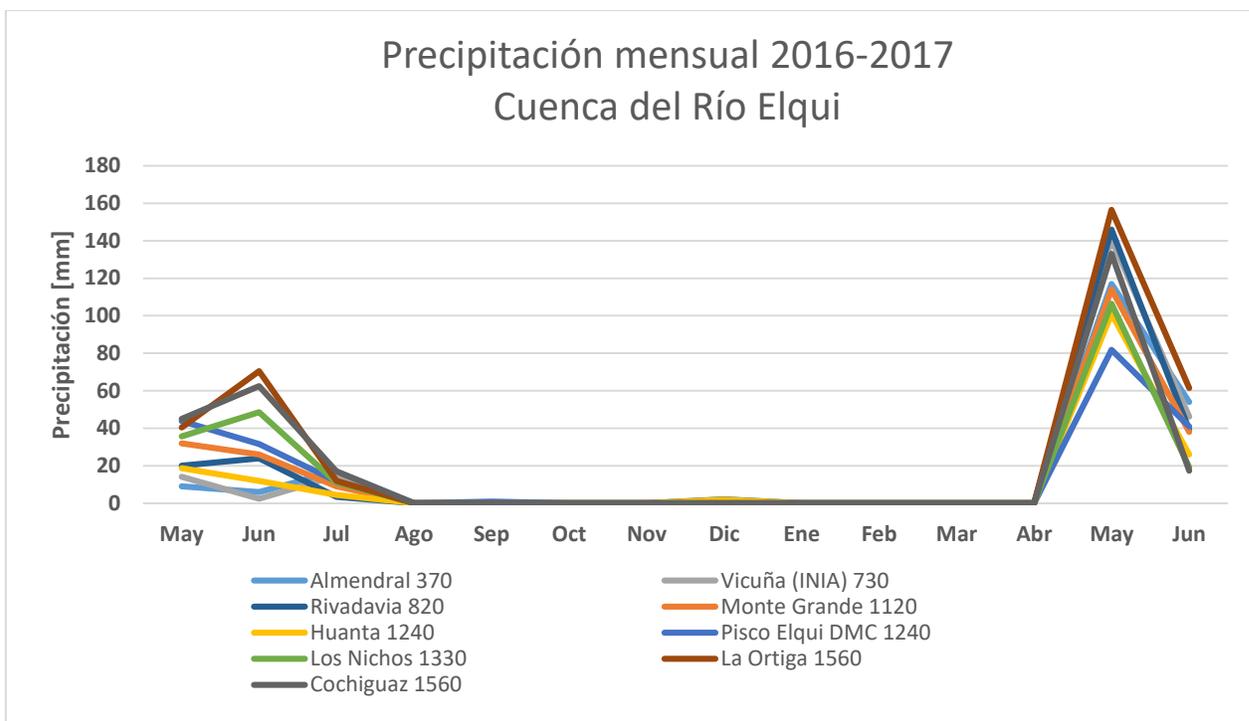


Gráfico 5.2: Precipitación mensual 2016-2017, Cuenca del Río Elqui, DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

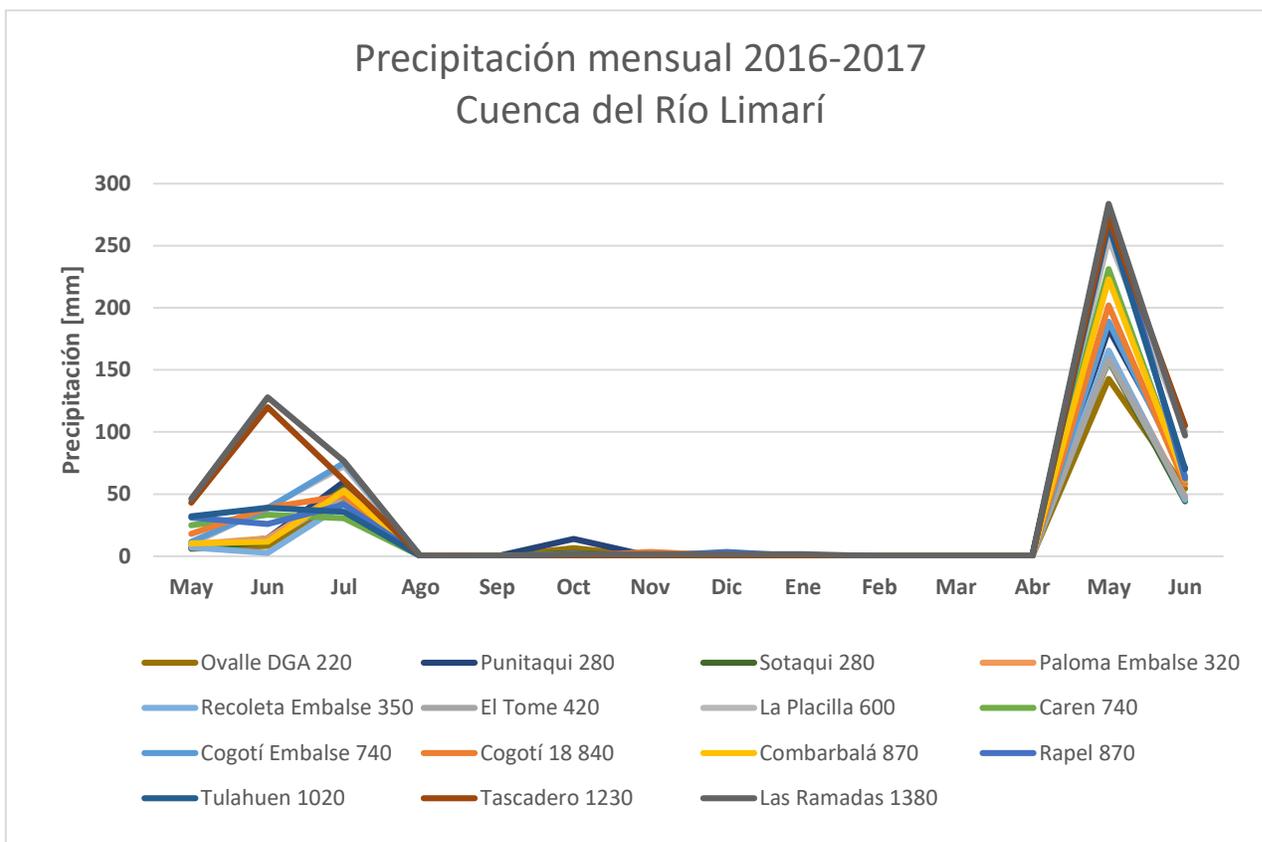


Gráfico 5.3: Precipitación mensual 2016-2017, Cuenca del Río Limarí, DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

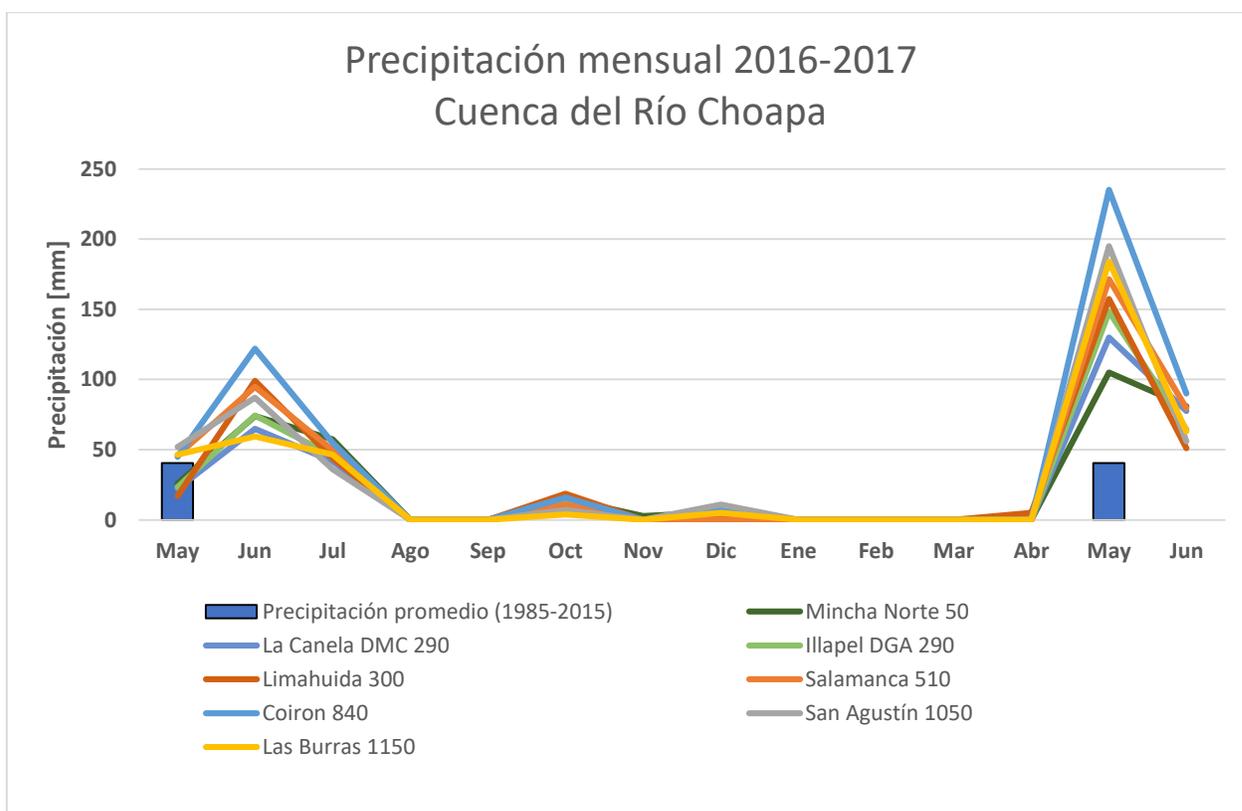


Gráfico 5.4: Precipitación mensual 2016-2017, Cuenca del Río Choapa, DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

De los gráficos anteriores se pueden observar dos *peak* principales, uno entre los meses de junio y julio 2016, y el otro en mayo 2017, exceptuando en la cuenca del Río Los Choros que solo presenta un *peak* en este último. La precipitación mensual de mayo 2017 es considerablemente mayor al mismo mes del año previo. Además los valores registrados no se igualan a ningún otro mes del periodo considerado. Los rangos entre los que se mueven los datos varían según la cuenca, sin embargo, se puede observar una tendencia creciente al avanzar desde la cuenca del río Los Choros hasta la cuenca del Limarí, que corresponde a la que presenta mayores valores. Por su parte, la precipitación de la cuenca del Choapa se ubicaría entre la cuenca del Río Elqui y Limarí. De igual forma en las zonas con más de una estación, se puede observar una gradación entre los valores de precipitación, en algunos casos, directamente relacionado con la altura, es decir, a mayor altura, mayor precipitación.

En las distintas cuencas de la región, para Mayo 2017 se registran precipitaciones que van entre los 80 y 280 mm aproximadamente, lo cual constituye un porcentaje importante de la precipitación anual, la cual no supera los 250 mm (DGA, 2017). En cuanto a los valores mensuales, en particular para la cuenca del Choapa, estos corresponden a 40,6 mm para el mes de mayo (DGA, 2017). Los registros de mayo 2017 muestran datos entre 100 y 235 mm en dicha cuenca, lo cual sería, aproximadamente, entre dos y seis veces el valor histórico (1985-2015).

Por otro lado, entre los meses de agosto 2016 y abril 2017, las precipitaciones son débiles o inexistentes en la mayoría de los casos. La zona sur se escapa un poco de la tendencia, presentando precipitaciones mayores al resto, para los meses de octubre y diciembre 2016.

A continuación, entre los gráficos 5.5 y 5.8 se presentan las precipitaciones diarias asociadas al mes de mayo del 2017.



Gráfico 5.5: Precipitación mayo 2017, Cuenca del Río Los Choros, DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

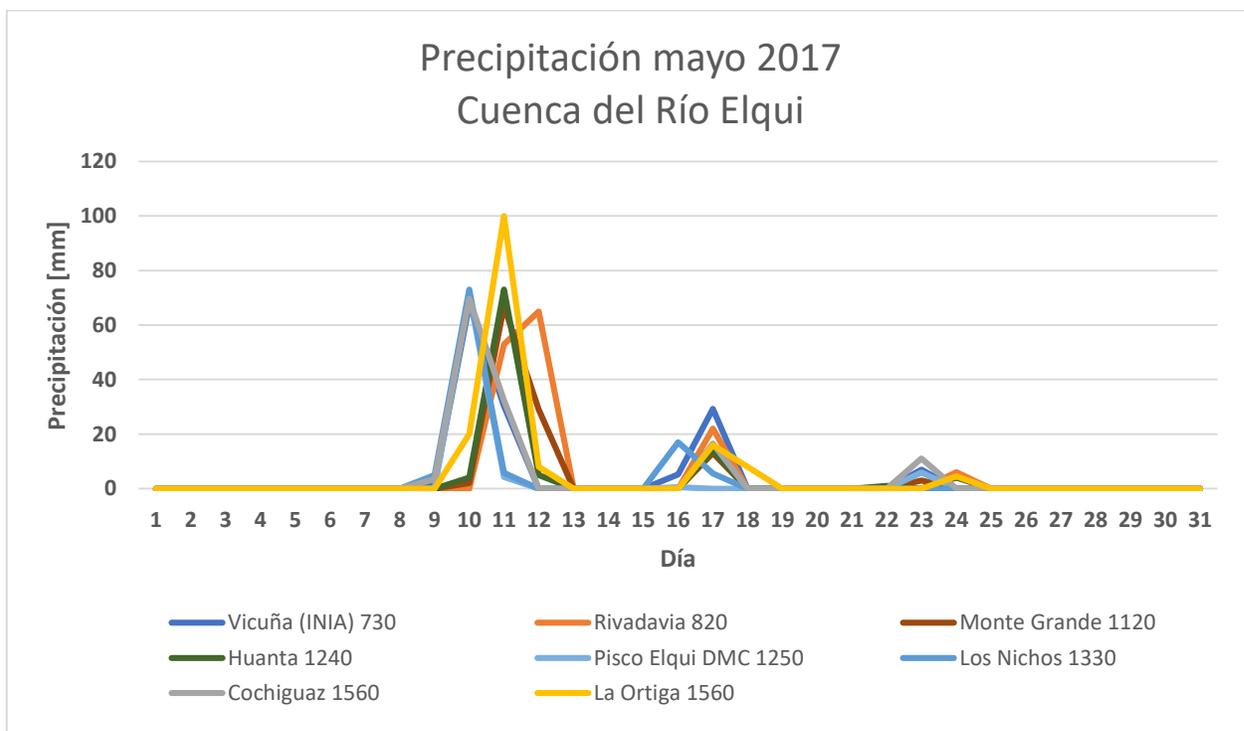


Gráfico 5.6: Precipitación mayo 2017, Cuenca del Río Elqui, DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

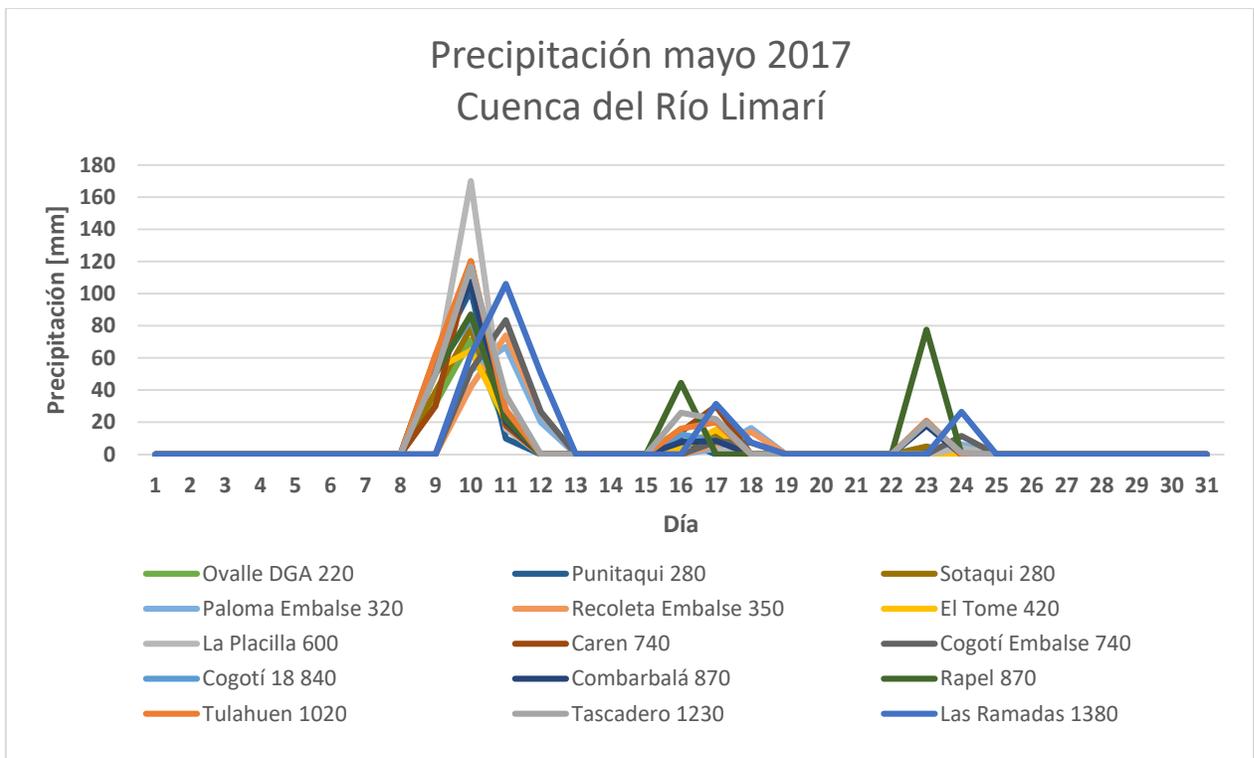


Gráfico 5.7: Precipitación mayo 2017, Cuenca del Río Limarí, DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

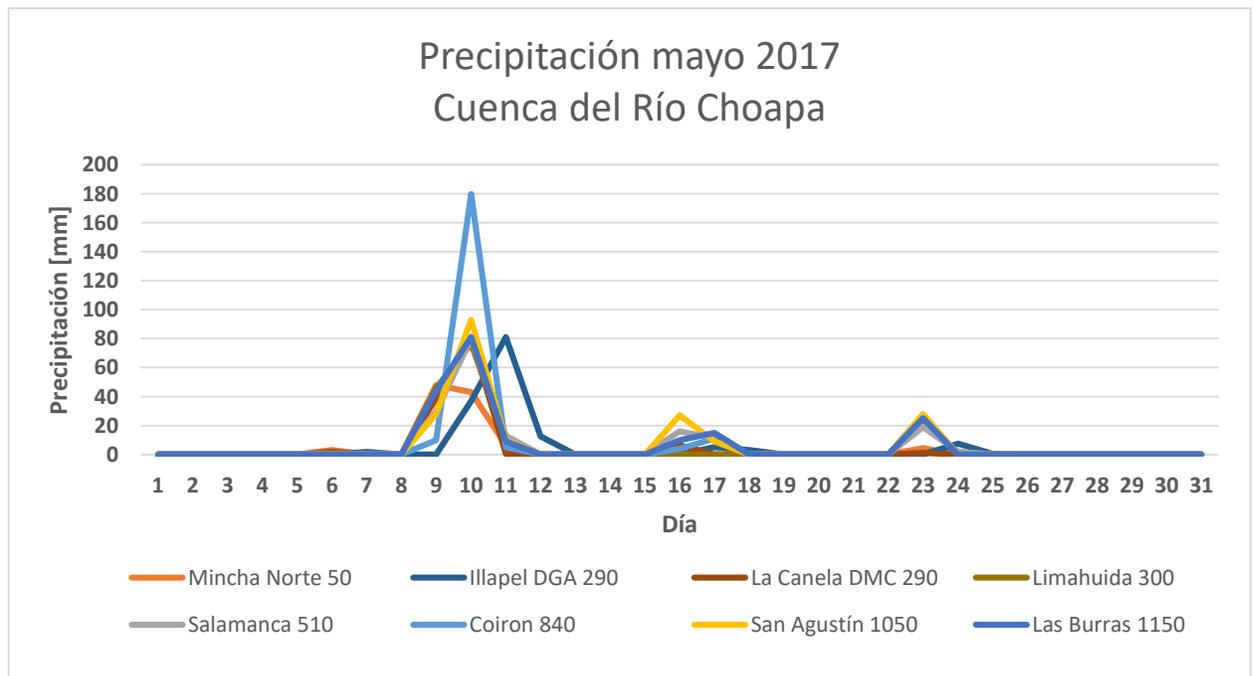


Gráfico 5.8: Precipitación mayo 2017, Cuenca del Río Choapa, DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

Se puede observar que hay tres *peak* en cada uno de los gráficos, los cuales ocurren aproximadamente en los mismos días para las distintas zonas. El *peak* de mayor magnitud ocurre en torno a la fecha del flujo, en particular entre el 10 y el 11, alcanzando, en la mayoría de los casos, valores entre 70-110 mm, exceptuando algunas estaciones que se escapan de este rango.

El orden de los valores según las cuencas se mantiene igual que para el caso de las precipitaciones mensuales. Nuevamente la cuenca del Limarí es la que presenta los *peak* con valores promedio más altos que van alrededor de los 100 mm. Y por su parte, para la cuenca del Choapa, las precipitaciones tienen valores de 80 mm en la mayoría de los casos. Este valor corresponde prácticamente a dos veces el valor histórico mensual (1985-2015), el cual estaría siendo alcanzado en solo un día (10 u 11 de mayo).

Finalmente, se presentan una serie de gráficos del 5.9 al 5.12 los cuales muestran la precipitación acumulada desde aproximadamente 60 días previos al 11-13 de mayo, culminando en este último.

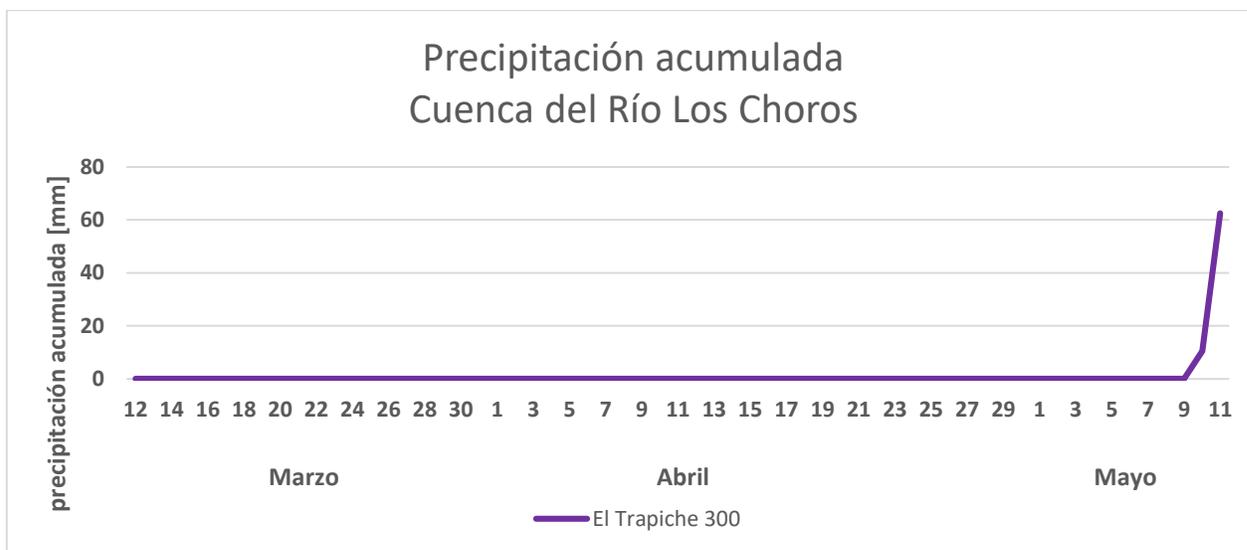


Gráfico 5.9: Precipitación acumulada, Cuenca del Río Los Choros, DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

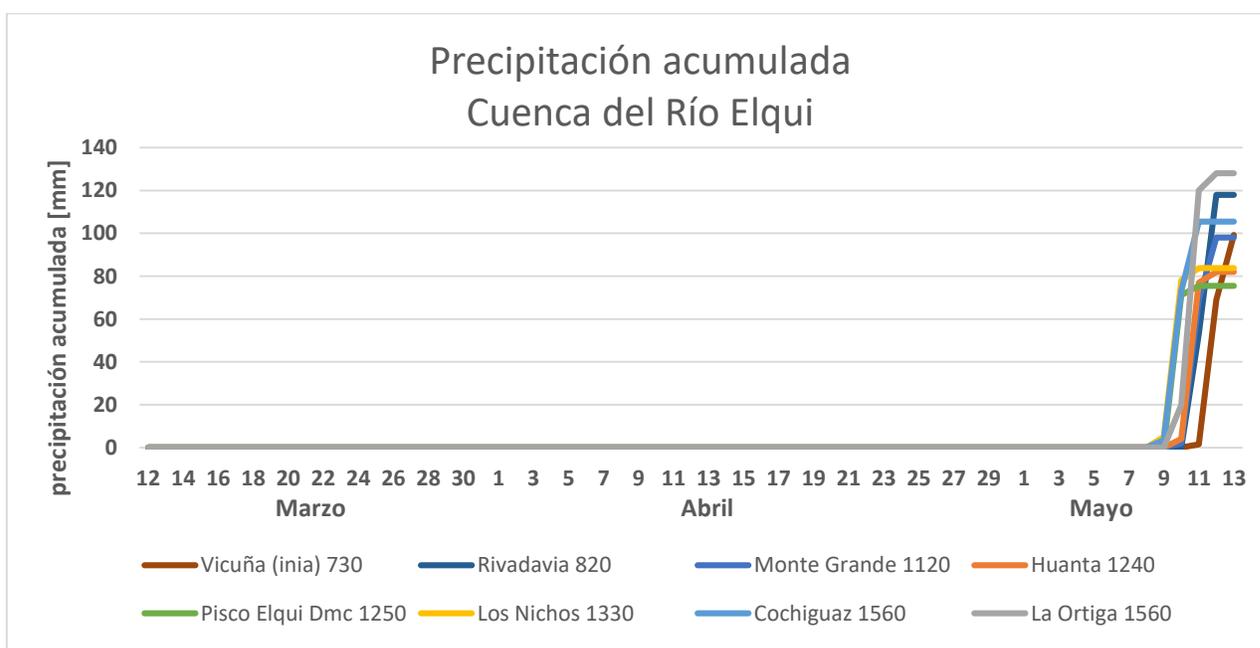


Gráfico 5.10: Precipitación acumulada, Cuenca del Río Elqui, DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

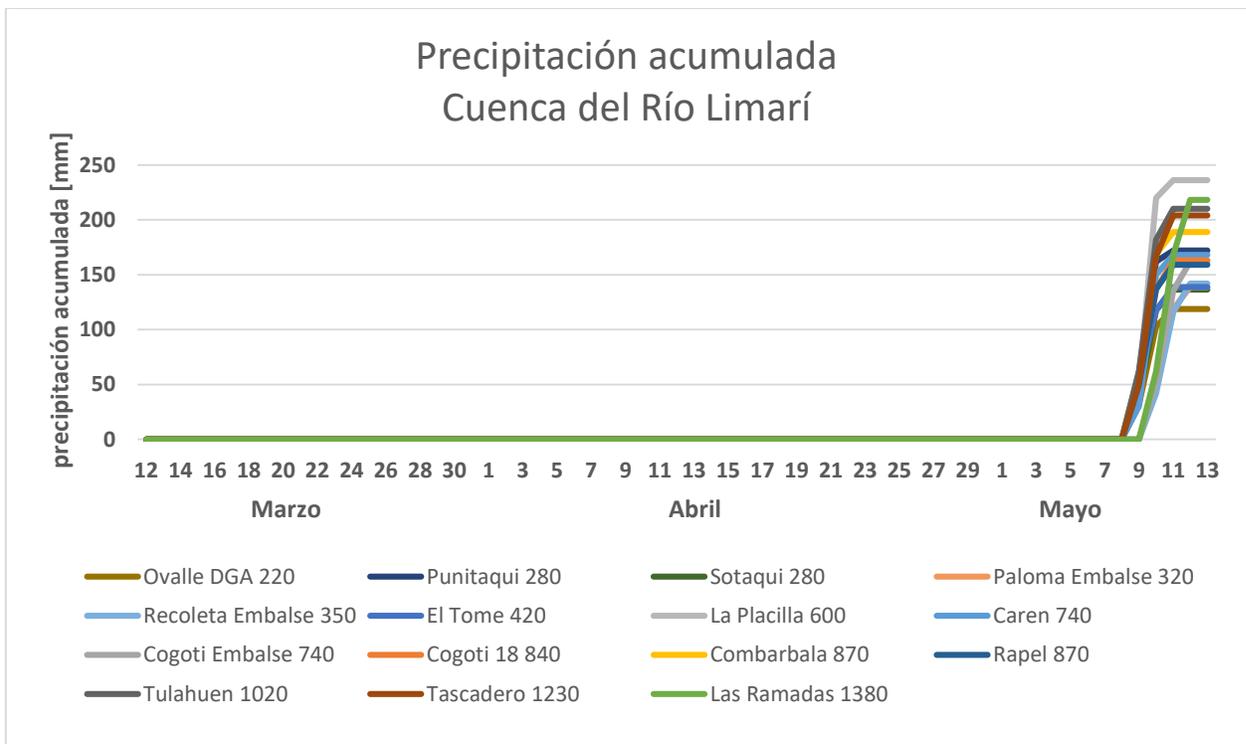


Gráfico 5.11: Precipitación mayo 2017, Cuenca del Río Limarí, DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

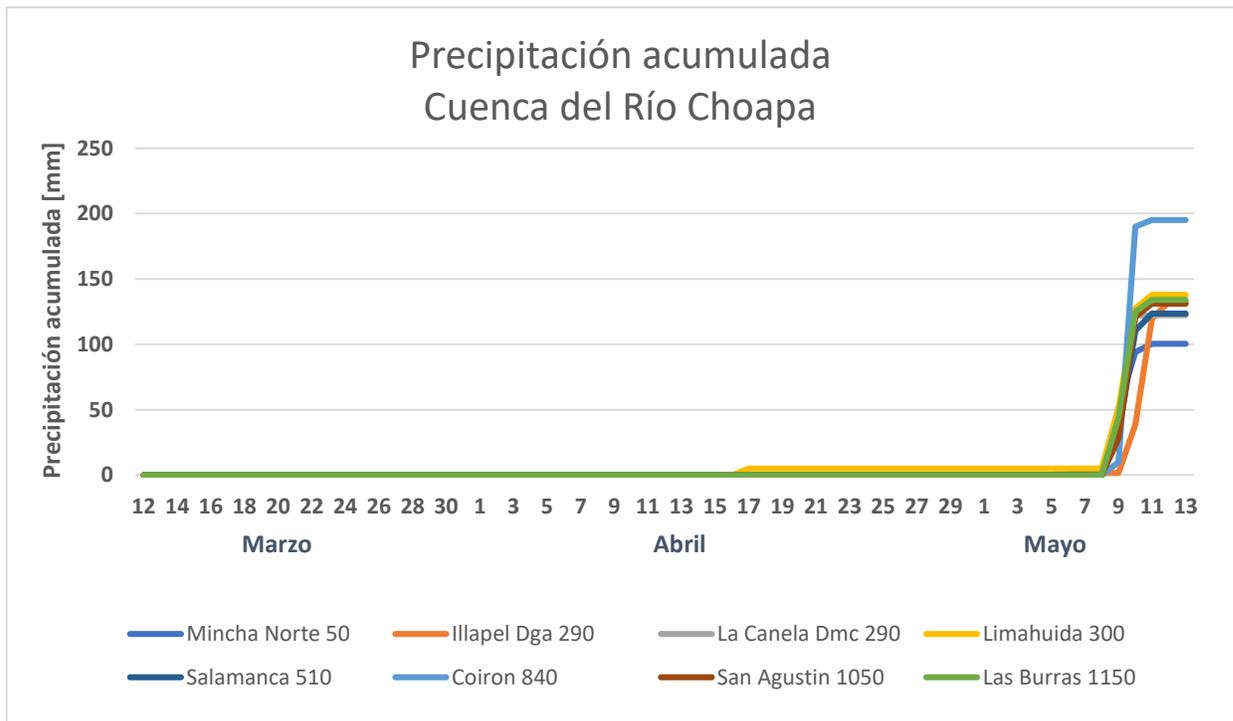


Gráfico 5.12: Precipitación mayo 2017, Cuenca del Río Choapa, DGA. Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA.

De lo anterior, es posible distinguir, que la precipitación acumulada se mantiene constante en 0 mm, hasta los días próximos al evento, entre el 7 y 10 de mayo, exceptuando el caso de la zona sur, en la cuenca del Choapa, donde se registraron precipitaciones previas el día 17 de abril. Se deduce

que, en la mayoría de los casos, la precipitación ocurre en un periodo de tiempo acotado, el cual se distribuye entre los días previos y los de la ocurrencia del flujo.

Por otro lado, se construyen gráficos asociados a las estaciones de CEAZA, esto debido a que presentan datos de precipitación horaria, es decir, datos más detallados. Como se menciona anteriormente, dado que no existe una coincidencia completa entre los datos de la DGA y CEAZA (en la sección de anexos se incluyen algunos gráficos con estaciones de la DGA y CEAZA juntos), se opta por presentar los datos de precipitación del mes de mayo 2017 asociada a las estaciones de este último. En este caso se incorpora una nueva cuenca (Costeras entre Elqui y Limarí) debido a que hay un flujo que presenta información en las estaciones de CEAZA, pero no en las de la DGA.

A continuación entre las figuras 5.9 y 5.12 se muestran los flujos y la ubicación de las estaciones para el caso de CEAZA.

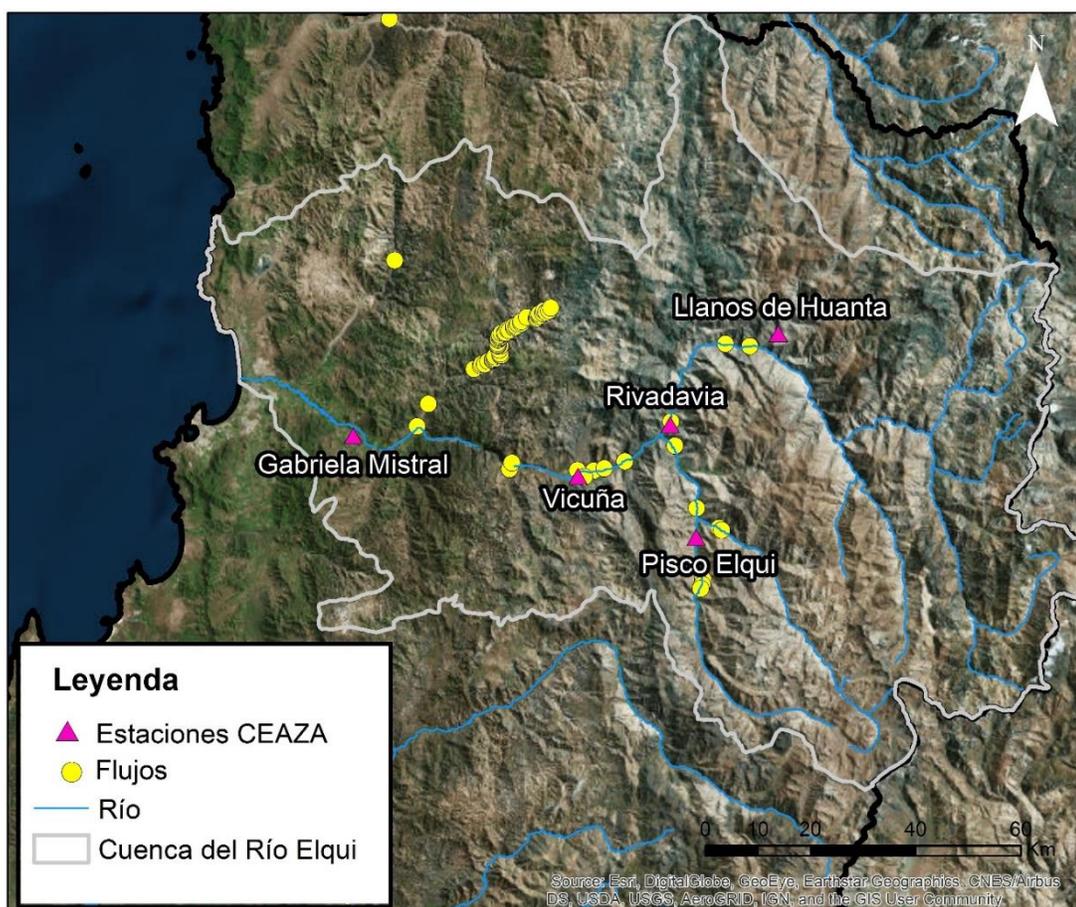


Figura 5.9: Ubicación de los flujos y estaciones de CEAZA para la Cuenca del Río Elqui. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA y SERNAGEOMIN.



Figura 5.10: Ubicación de los flujos y estaciones de CEAZA para la Cuenca Río Los Choros. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA y SERNAGEOMIN.



Figura 5.11: Ubicación de los flujos y estaciones de CEAZA para las Cuencas costeras entre Elqui y Limarí. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA y SERNAGEOMIN.



Figura 5.12: Ubicación de los flujos y estaciones de CEAZA para las Cuenca del Río Limarí. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA y SERNAGEOMIN.

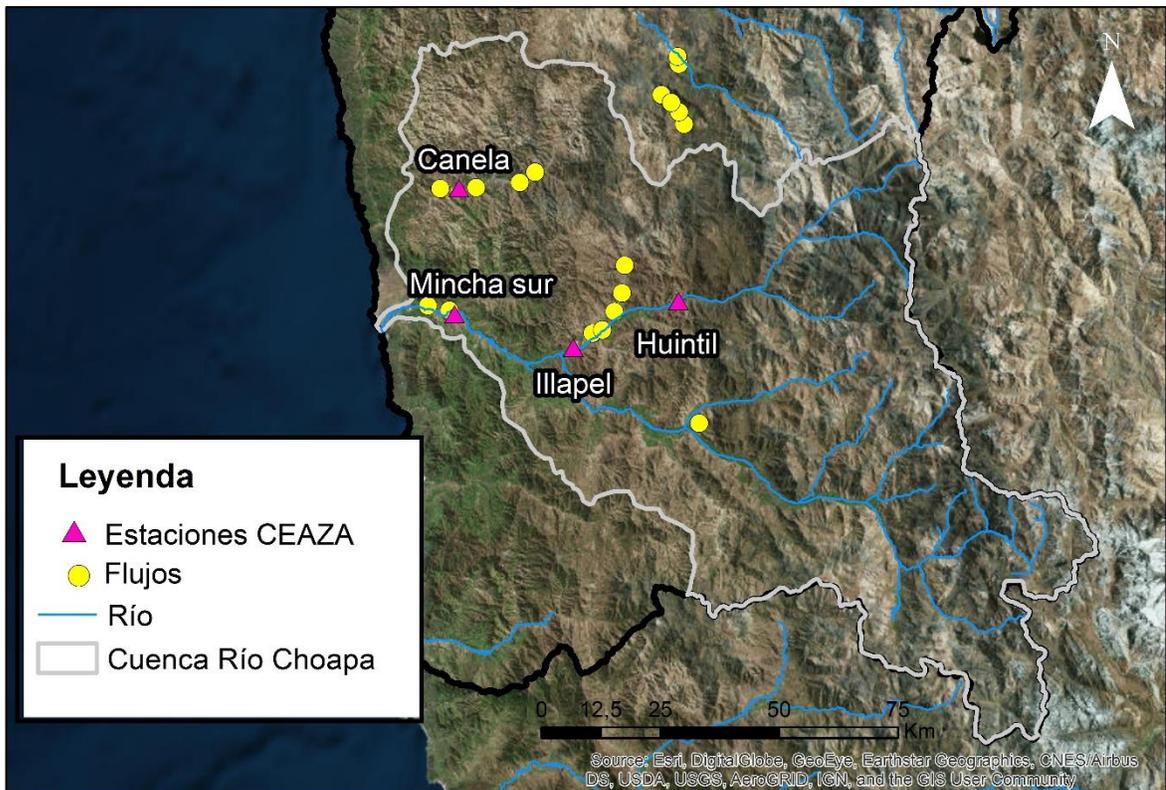


Figura 5.13: Ubicación de los flujos y estaciones de CEAZA para las Cuenca del Río Choapa. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA y SERNAGEOMIN.

De los gráficos 5.13 al 5.17 se presenta la precipitación diaria del mes mayo asociada a las estaciones de CEAZA.

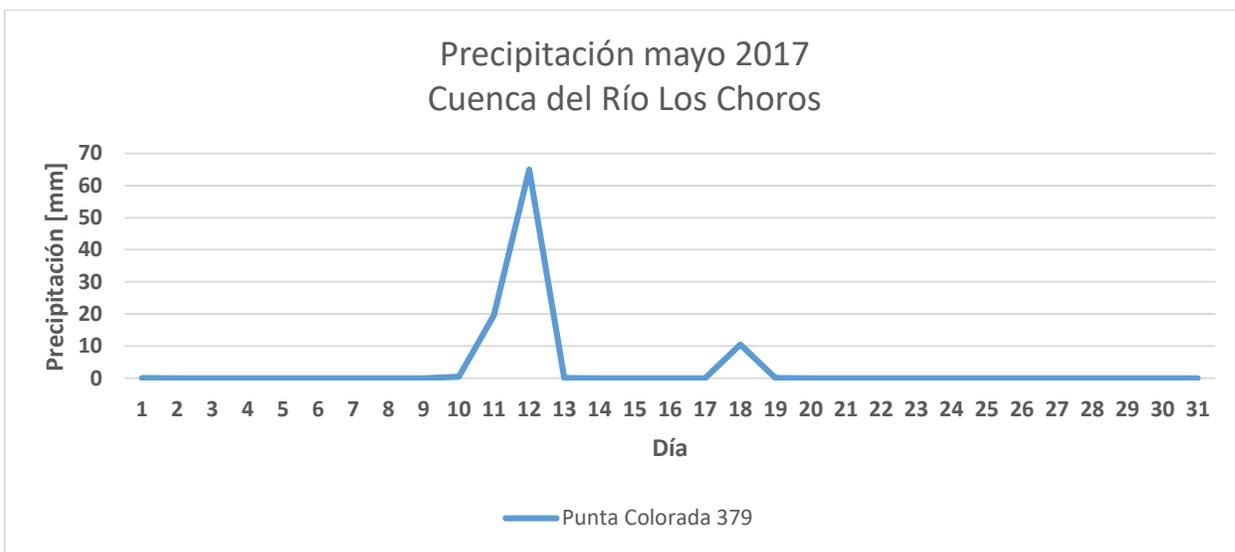


Gráfico 5.13: Precipitación mayo 2017, Cuenca del Río Los Choros, CEAZA. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA.

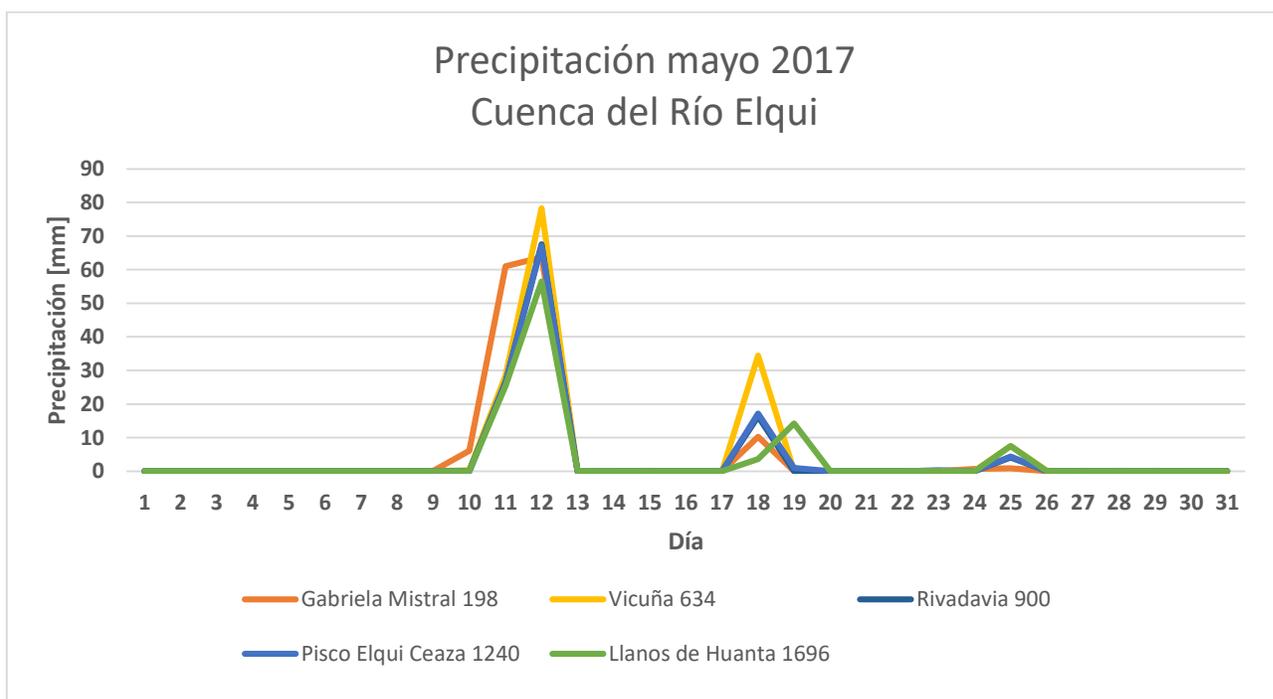


Gráfico 5.14: Precipitación mayo 2017, Cuenca del Río Elqui, CEAZA. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA.

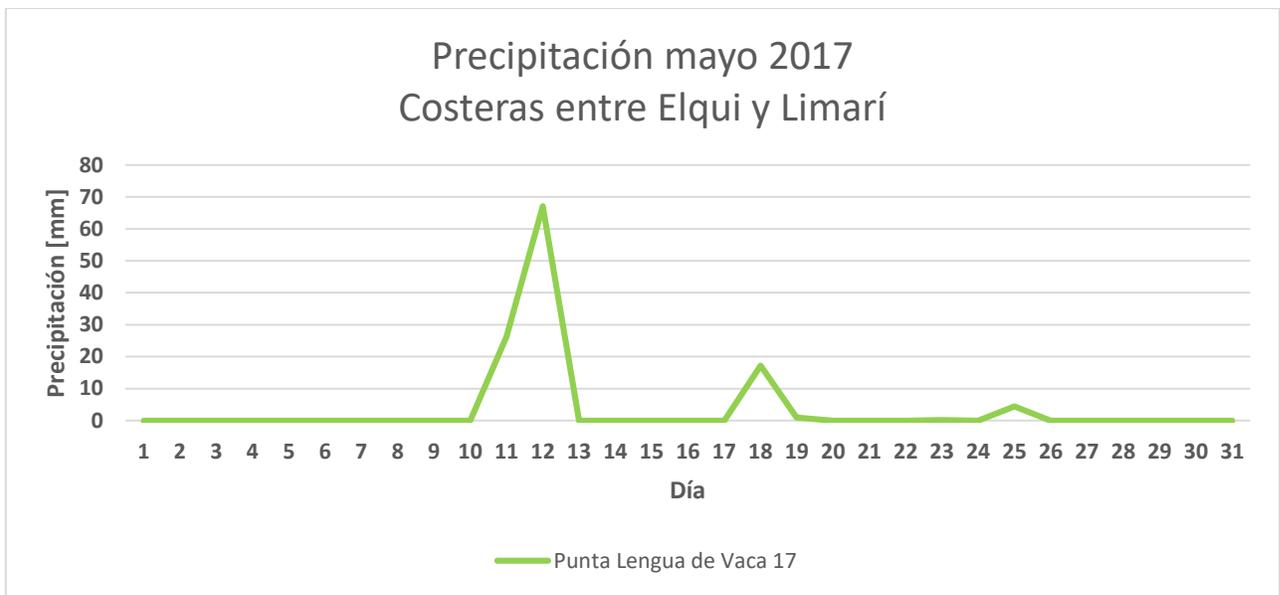


Gráfico 5.15: Precipitación mayo 2017, Cuencas costeras entre Elqui y Limarí. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA.

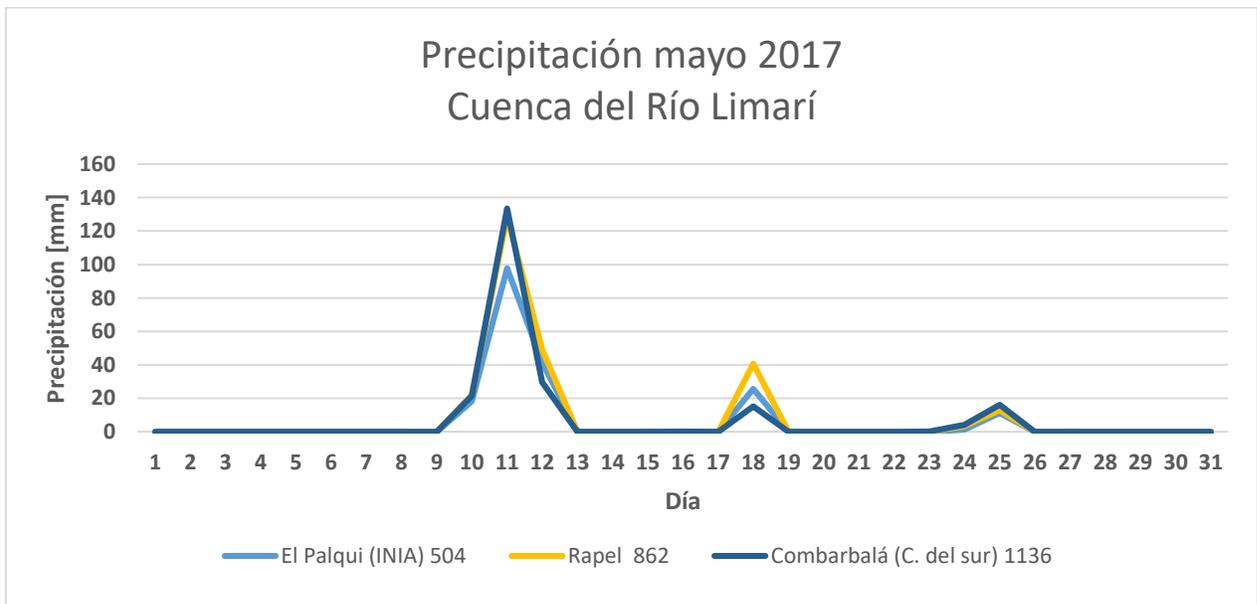


Gráfico 5.16: Precipitación mayo 2017, Cuenca del Río Limarí, CEAZA. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA.

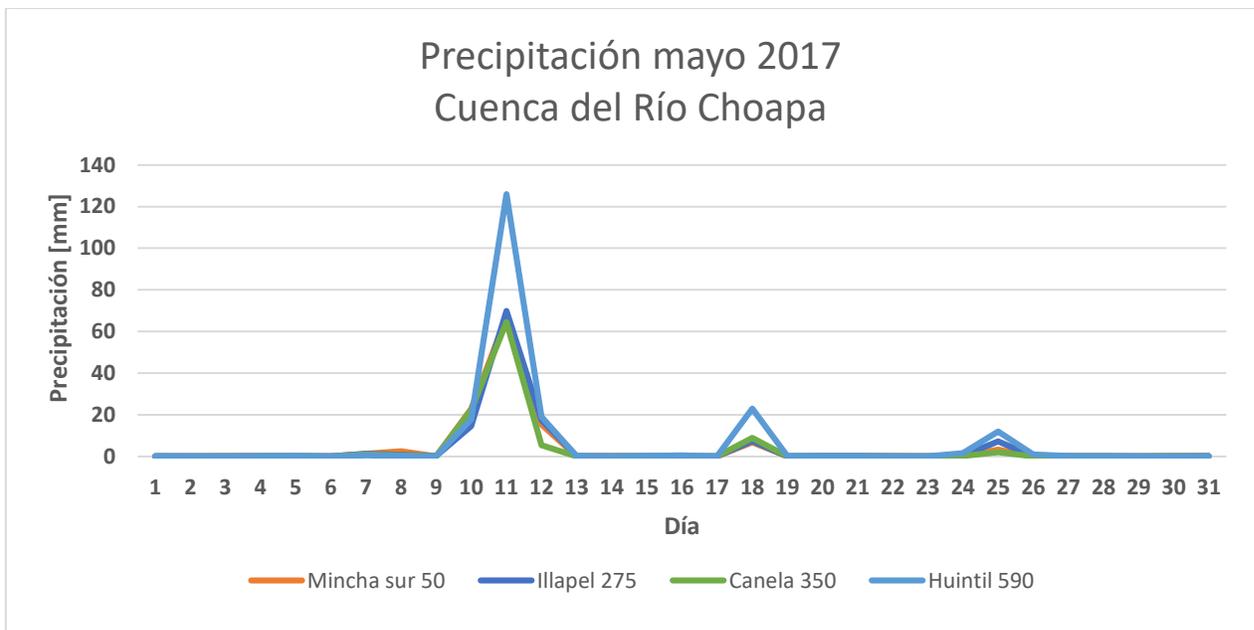


Gráfico 5.17: Precipitación mayo 2017, Cuenca del Río Choapa. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA.

En los distintos sectores, se aprecia que existen tres *peak*, donde el mayor corresponde a la fecha de análisis y es considerablemente más prominente que los otros. Para el caso de la información de la DGA (gráficos 5.5 a 5.8) se observa una situación similar, sin embargo, al mirar cada *peak* en detalle, la distribución de las precipitaciones es más dispersa en cuanto a los días, que en el caso de CEAZA.

Los valores máximos de precipitación para el período 11-13 de mayo, consideran valores que van entre 60-120 mm aproximadamente, exceptuando un par de casos que se escapa de estos rangos. Además, para las cuencas del río Los Choros, del río Elqui y Costeras entre Elqui y Limarí, se observa que el *peak* mayor se produce el día 12 de mayo, mientras que para las cuencas del Limarí y Choapa se produce el día 11 de mayo.

Finalmente, entre los gráficos 5.18 y 5.22, se muestra la precipitación horaria para los días entre el 10 y 13 de mayo, separadas por cuencas y ordenadas de norte a sur.

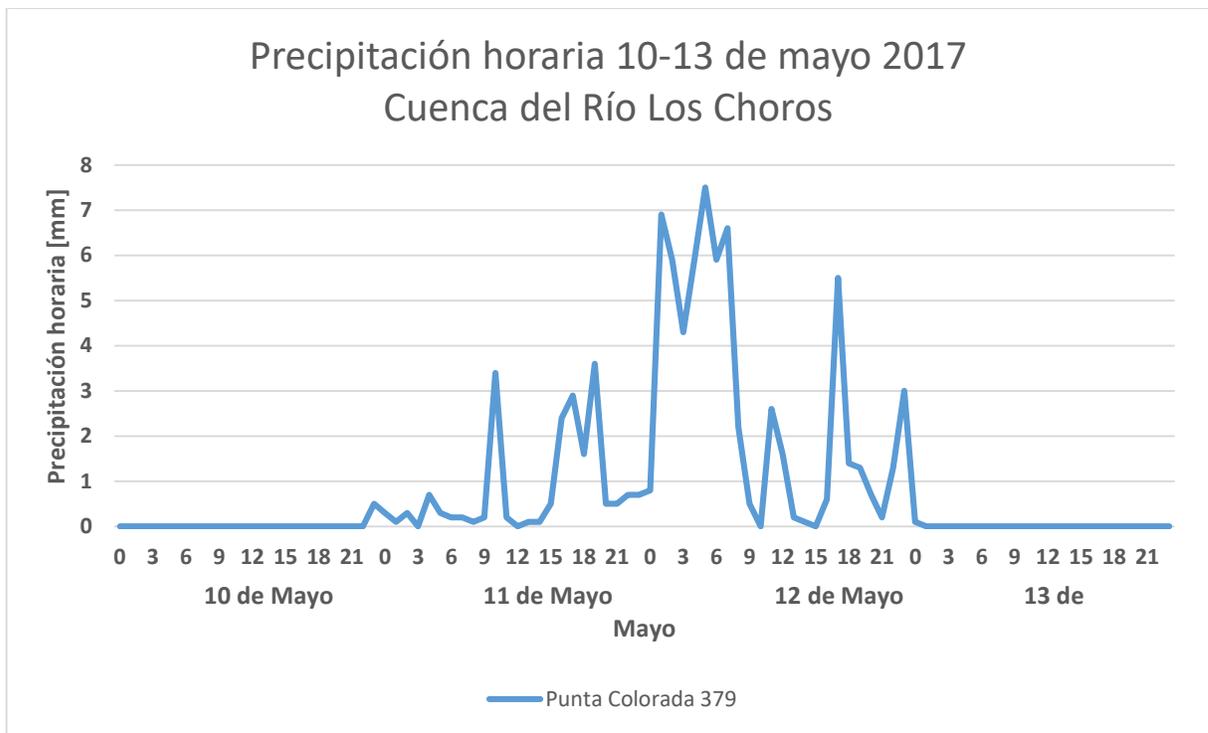


Gráfico 5.18: Precipitación 10-13 de mayo 2017, Cuenca del Río Los Choros, CEAZA. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA.

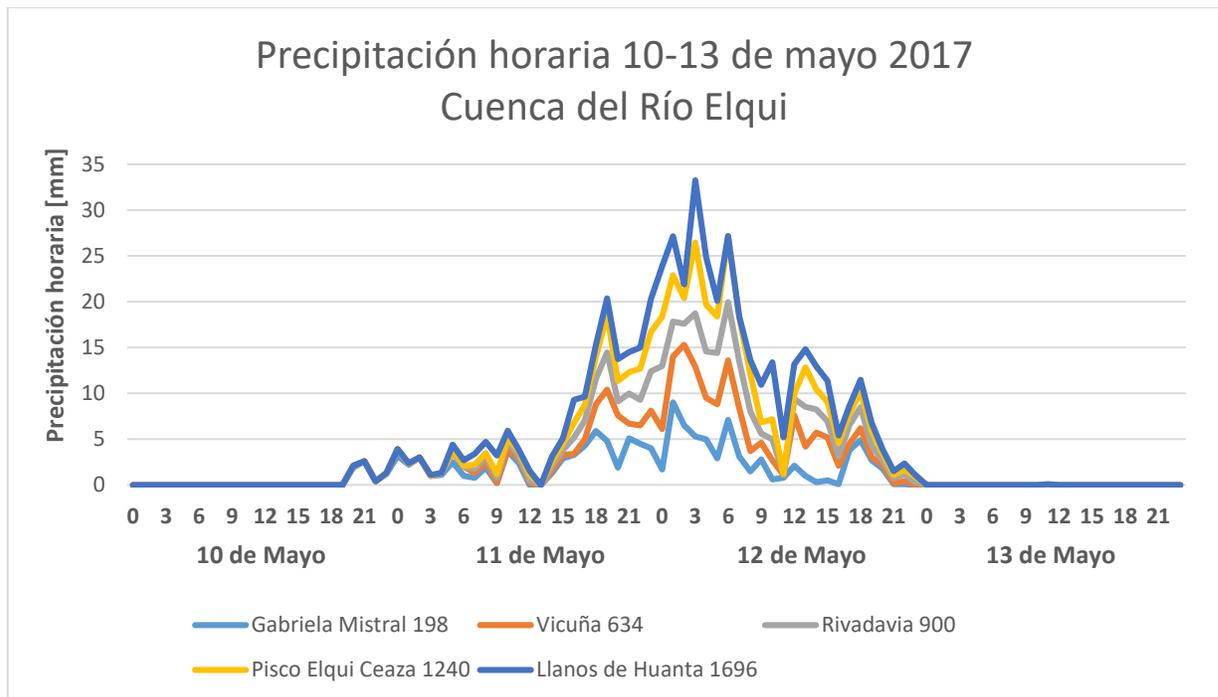


Gráfico 5.19: Precipitación 10-13 de mayo 2017, Cuenca del Río Elqui, CEAZA. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA.

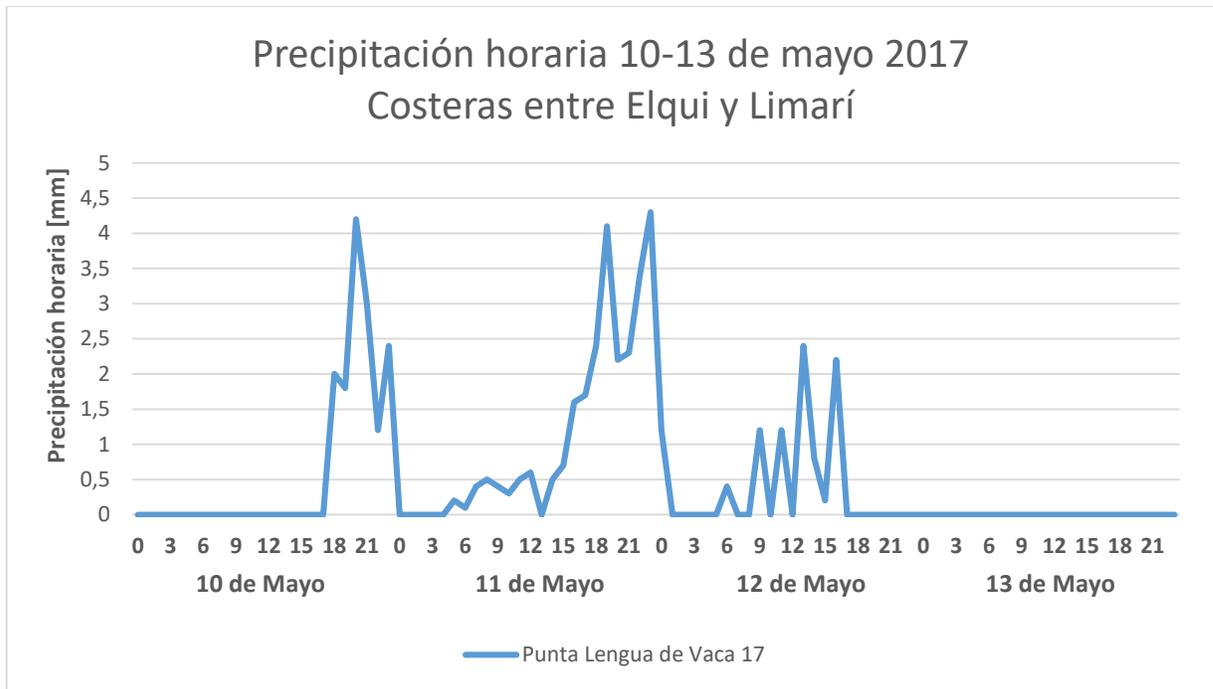


Gráfico 5.20: Precipitación 10-13 de mayo 2017, Cuencas Costeras entre Elqui y Limarí, CEAZA. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA.

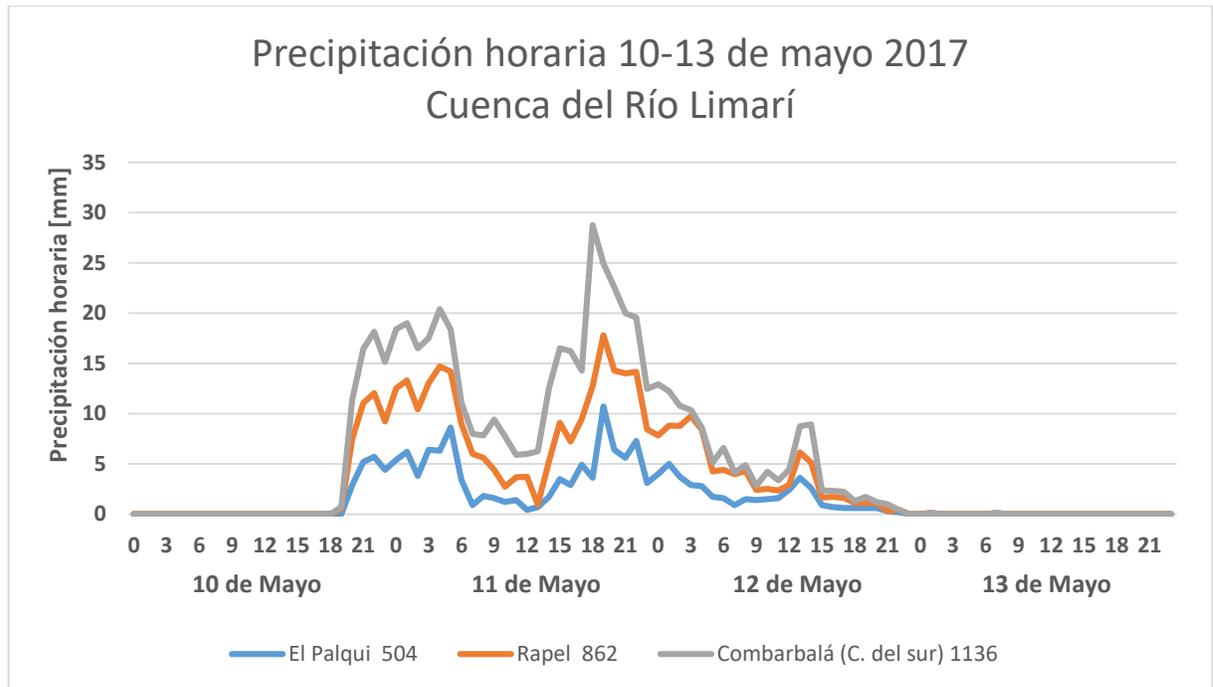


Gráfico 5.21: Precipitación 10-13 de mayo 2017, Cuenca del Río Limarí, CEAZA. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA.

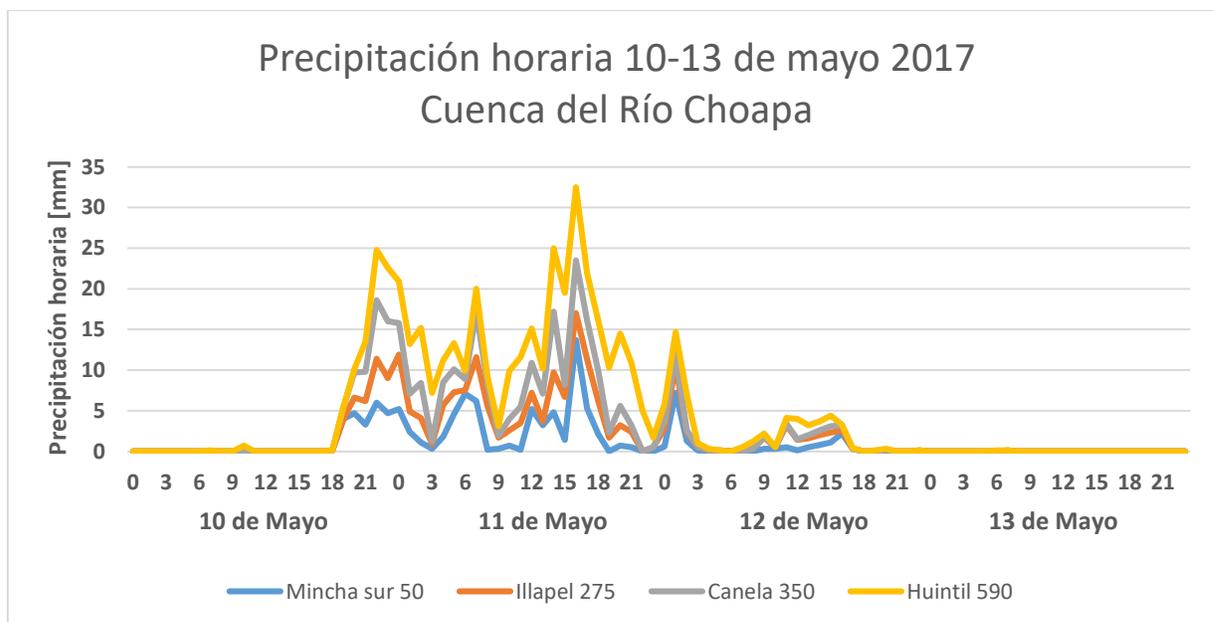


Gráfico 5.22: Precipitación 10-13 de mayo 2017, Cuenca del Río Choapa, CEAZA. Fuente: Elaboración propia con datos de CEAZA.

Para el caso de las cuencas grandes, Elqui, Limarí y Choapa, se puede distinguir que las precipitaciones siguen cierto patrón. Al observar los *peak*, estos aparecen antes en el sector sur de la región y a medida que se avanza hacia el norte, se desplazan hacia la derecha, es decir, se desarrollan horas más tarde. Por ejemplo, para la cuenca del Choapa el primer *peak* se desarrolla durante la noche del 10 y madrugada del 11 de mayo entre las 20.00 y 2.00 h respectivamente. En la cuenca del Limarí, entre las 20.00 y 6.00 h de los mismos días. Mientras que para el Elqui, el primer *peak* ocurre entre las 15.00 y 20.00 h del 11 de mayo. Para el caso del segundo *peak* se observa la misma distribución. De esta forma se deduce que el evento meteorológico podría haber tenido un avance de sur a norte en las cuencas de mayor tamaño.

### Isoterma 0°C

Tal como se menciona en la sección de metodología, la isoterma 0°C es un dato proporcionado por la Dirección meteorológica de Chile (DMC.2018; comunicación escrita. Si bien el año en que se obtuvo la información es el 2018, los datos fueron tomados en cada uno de los respectivos años).

El valor de la isoterma 0°C se obtiene mediante el uso de una radiosonda. La cual corresponde a un instrumento que se adosa a un globo de 600 gr inflado con Hidrógeno, el que asciende desde la superficie hasta los 26 km de altura aproximadamente. Este equipo es capaz de registrar en su ascenso, los parámetros de temperatura, humedad, viento y punto de rocío, datos que transmite a un equipo terrestre, el que procesa dichos parámetros para luego entregar mensajes donde se registran los niveles mandatorios, y significativos de presión, temperatura y viento. El alcance del Radiosonda es de 250 kilómetros y el dato tiene un carácter regional (DMC. 2019; comunicación escrita).

En particular los datos fueron captados por la radiosonda Quintero (cerrada el 7 de agosto de 1999) y la radiosonda Santo Domingo (vigente desde 1999 hasta hoy). En la tabla 5.2 se muestra la información recibida.

Tabla 5.2: Altura isoterma 0°C para fechas analizadas

Fecha	Altura [msnm]
30 de abril 1987	3100
17 de junio 1991	1750
24 de marzo 1992	-
18 de junio 1997	-
13 de abril 2000	3500
9 de abril 2002	3100
23 de abril 2004	2263
15 de febrero 2006	-
5 de junio 2011	3000
26 de abril 2012	3100
27 de abril 2012	2750
24 de marzo 2015	3657
2 de junio 2016	3000
3 de junio 2016	2800
11 de mayo 2017	2548
26 de junio 2017	2267

Fuente: Elaboración propia con datos de la Dirección Meteorológica de Chile.

La altura de la isoterma 0°C para las fechas consideradas como casos con y sin flujos, varía entre los 1.750 y 3.657 msnm. Aproximadamente la mitad de los datos se encuentran bajo los 3000 msnm y el valor promedio de la isoterma es de 2.833 msnm para las fechas que presentan este dato.

### Fenómeno del Niño

La información recopilada asociada a este factor se presenta en la tabla 5.3 a continuación:

Tabla 5.3: Condición fenómeno del Niño para fechas de análisis

Flujo	Fecha	Condición	Fuente
No	17 de junio 1991	-	-
Sí	24 de marzo 1992	-	-
Sí	18 de junio 1997	-	-
No	13 de abril 2000	-	-
No	9 de abril 2002	-	-
Sí	23 de abril 2004	-	-
Sí	15 de febrero 2006	-	-
No	26-27 de abril 2012	-	-
No	27 de abril 2012	-	-

Flujo	Fecha	Condición	Fuente
Sí	24 de marzo 2015	Fenómeno del Niño	Boletín climático CEAZA abril 2015
No	27 de mayo 2013	Neutro	Boletín climático CEAZA junio 2013
No	17 de mayo 2013	Neutro	Boletín climático CEAZA junio 2013
No	2 de junio 2016	Fenómeno del Niño en decaimiento o retirada	Boletín climático CEAZA julio 2016
No	3 de junio 2016	Fenómeno del Niño en decaimiento o retirada	Boletín climático CEAZA julio 2016
Sí	11 de mayo 2017	Neutro	Boletín climático CEAZA Junio 2017
Sí	26 de junio 2017	Neutro	Boletín climático CEAZA Julio 2017

Fuente: Elaboración propia con información de CEAZA.

No se aprecia un patrón o tendencia general debido a la gran cantidad de datos faltantes (fechas previas al 2015), sin embargo se observa que la condición de fenómeno del Niño como tal se encuentra solo para un caso con flujo, mientras que la condición de fenómeno del Niño en decaimiento o retirada solo se asocia para casos sin flujos. Por otro lado, la condición neutra es independiente de la ocurrencia de flujos.

## Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)

### Base de datos

Mediante la unión de los datos recopilados en los ítems anteriores se construye una base de datos para realizar el análisis estadístico en el programa SPSS. Tal como se menciona en la sección de metodología, las precipitaciones utilizadas corresponden únicamente a las obtenidas de la DGA. Además de la precipitación se incorporan los datos asociados a la isoterma 0°C.

En la base los datos se ordenan según los distintos puntos, y la información que contiene cada uno corresponde a: la fecha, la ocurrencia positiva o negativa de un flujo, precipitación mensual, diaria, antecedente a 1, 2, 8 y 11 días previos al evento, y los promedios asociados a cada uno, además de la altura de la isoterma 0°C. En la sección de anexos se puede encontrar de manera detallada el contenido de la tabla.

### Procesamiento

En esta sección se incorporan las correlaciones entre las variables incluidas en el análisis y se ejemplifican gráficamente un par de casos extremos.

En la tabla 5.4 se presentan dichas correlaciones, donde las variables incluidas corresponden a la altura de la isoterma 0°C, precipitación mensual, diaria, antecedente a 1, 2, 8 y 11 días. Cada una de las variables de precipitación fue considerada, solamente para la estación 1, la cual corresponde a la estación con datos más cercana al punto y la que tiene más información para los distintos puntos, por lo que esta sería la que mejor representa el fenómeno estudiado.

Tabla 5.4: Correlación de variables

	Isoterma 0°C	Pp <sup>13</sup> mensual	Pp diaria	Pp antecedente a 1 día	Pp antecedente a 2 días	Pp antecedente a 8 días	Pp antecedente a 11 días
Isoterma 0°C	1	-0,520	-0,191	-0,564	-0,532	-0,559	-0,561
Pp mensual	-0,52	1	0,473	0,833	0,837	0,818	0,826
Pp diaria	-0,191	0,473	1	0,107	0,028	0,007	0,013
Pp antecedente a 1 día	-0,564	0,833	0,107	1	0,973	0,954	0,941
Pp antecedente a 2 días	-0,532	0,837	0,028	0,973	1	0,985	0,973
Pp antecedente a 8 días	-0,559	0,818	0,007	0,954	0,985	1	0,985
Pp antecedente a 11 días	-0,561	0,826	0,013	0,941	0,973	0,985	1

Fuente: Elaboración propia.

Las correlaciones altas se dan principalmente entre las precipitaciones antecedentes, en general para todas las combinaciones de estas, con valores superiores a 0,9 en todos los casos. Por otro lado, se puede apreciar que entre la isoterma 0°C y las distintas precipitaciones existe un comportamiento opuesto, lo cual se deduce del signo negativo de la correlación. De esto se deduce que a medida que la isoterma 0°C aumenta, las variables de precipitación decrecen.

A continuación, se presentan un par de gráficos (5.28 y 5.29) para mostrar visualmente las correlaciones entre las variables.

<sup>13</sup> Pp= precipitación.

### Correlación entre precipitación mensual y diaria

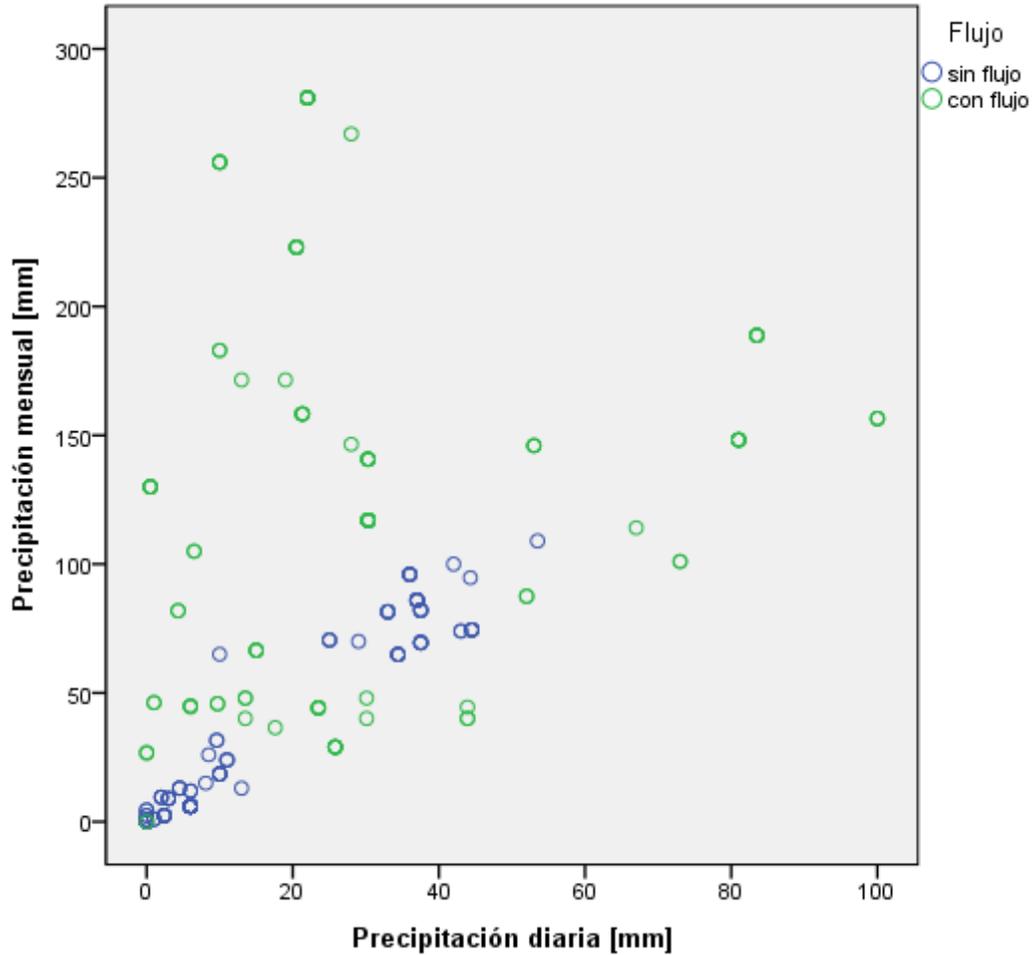


Gráfico 5.23: Correlación entre precipitación mensual y diaria. Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 5.23 se muestra la correlación entre la precipitación mensual y la precipitación diaria, por lo cual se encuentra una variable en cada eje. Además, se muestran en color verde los círculos que corresponden a casos con flujos, mientras que los azules corresponden a casos sin flujos. Se puede observar que los puntos azules tienen una distribución más o menos localizada en la diagonal entre ambas variables, por otro lado, los círculos verdes tienen una distribución más dispersa.

### Correlación entre precipitación acumulada a 8 y 11 días

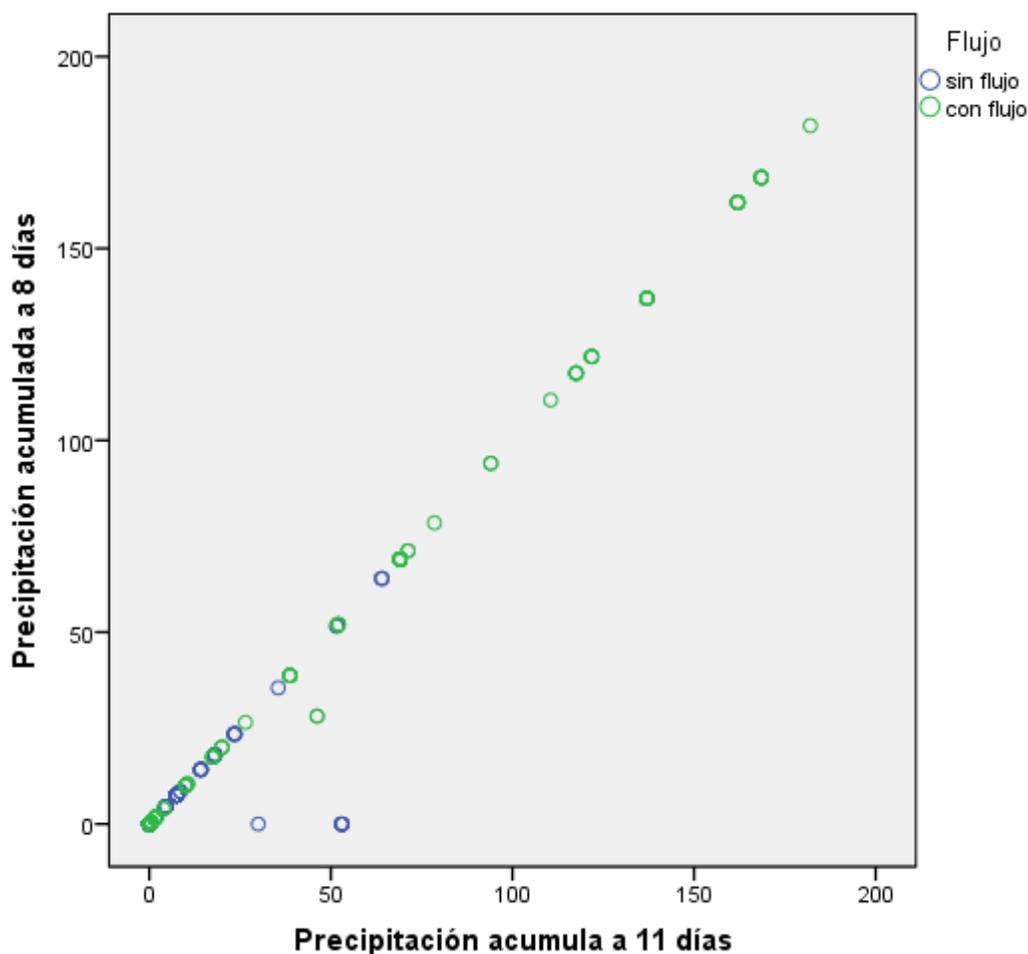


Gráfico 5.24: Correlación entre precipitación mensual y diaria. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso anterior, en el gráfico 5.24 se muestra la correlación entre la precipitación antecedente a 8 y 11 días, y también se diferencian los casos con y sin flujos. Se puede ver que existe una línea recta casi perfecta, exceptuando algunos puntos que se escapan de la tendencia general.

En el gráfico 5.23 la correlación entre ambas variables es media, con un valor de 0,473 mientras que en el 5.24 la correlación es bastante alta con un valor de 0,985. Si la correlación entre dos variables es alta, *a priori* se esperaría que ambas estén explicando un mismo comportamiento, por lo cual no sería óptimo tener a ambas variables dentro de la regresión logística. Sin embargo, esta suposición debe ser verificada al ejecutar el modelo.

Una vez revisado el comportamiento de las variables, de manera individual y en conjunto, se procede a correr el modelo, de manera iterativa, probando con distintas combinaciones de variables. De las distintas iteraciones se destacan tres resultados que son presentados a continuación:

### Caso 1: Óptimo estadístico

En este caso se considera la isoterma 0°C, la precipitación diaria, la precipitación antecedente a 2 días y a 11 días. Los indicadores de este modelo se muestran en las tablas a continuación (5.5 a 5.9) siendo los resultados obtenidos los óptimos de todas las combinaciones probadas.

Tabla 5.5: Resumen de procesamiento de casos

Casos sin ponderar <sup>a</sup>		N	Porcentaje
Casos seleccionados	Incluido en el análisis	222	72,1
	Casos perdidos	86	27,9
	Total	308	100,0
Casos no seleccionados		0	0
Total		308	100,0

Fuente: Elaboración propia.

El número de puntos incluidos en el análisis es de 222 de 308, esto se debe a que los clasificados como perdidos no tienen alguna de las variables utilizadas para el análisis por ende no pueden ser considerados.

Tabla 5.6: Pruebas ómnibus de coeficientes del modelo

		Chi-cuadrado	gl	Sig.
Paso 1	Paso	268,188	4	,000
	Bloque	268,188	4	,000
	Modelo	268,188	4	,000

Fuente: Elaboración propia.

La significancia debe tener valores inferiores a 0,05 para que el modelo explique el fenómeno estudiado, en este caso que los distintos datos de precipitación más la isoterma 0°C sean capaces de explicar la ocurrencia de los flujos. Por lo tanto, en este caso, si se tiene que las variables independientes son capaces de explicar la variable dependiente.

Tabla 5.7: Resumen del modelo

Paso	Logaritmo de la verosimilitud -2	R cuadrado de Cox y Snell	R cuadrado de Nagelkerke
1	39,119 <sup>a</sup>	,701	,936

a. La estimación ha terminado en el número de iteración 11 porque las estimaciones de parámetro han cambiado en menos de ,001.

Fuente: Elaboración propia.

Mientras menor sea el valor del logaritmo de la verosimilitud, mejor será el modelo. En este caso el valor es menor que para otras combinaciones, por lo cual entregaría un mejor resultado. Por otro lado, los valores de los R cuadrado, son bastante altos, 70,1% y 93,6%.

Tabla 5.8: Tabla de clasificación

		Flujo		Porcentaje correcto	
		sin flujo	con flujo		
Paso 1	Flujo	sin flujo	105	1	99,1
		con flujo	0	116	100,0
Porcentaje global					99,5

a. El valor de corte es ,500

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla se puede deducir que el modelo pronostica correctamente casi el 100% de las situaciones, exceptuando un caso en que predice un flujo, y los datos indican que no hubo.

La probabilidad de corte escogida corresponde a 0,5 la cual viene por defecto en el programa. Lo cual quiere decir que si la probabilidad es mayor o igual a 0,5 se clasifica la situación como con flujo, y si es menor a 0,5 sin flujo. Debido al alto nivel de acierto que tiene el modelo, esta corresponde a la probabilidad de corte óptima.

Tabla 5.9: Variables en la ecuación

		$\beta$	Error estándar	Wald	gl	Sig.	Exp( $\beta$ )
Paso 1 <sup>a</sup>	Isoterma 0°C	,005	,001	14,266	1	,000	1,005
	Pp diaria	,117	,030	14,897	1	,000	1,124
	Pp ant 2d	1,052	,256	16,924	1	,000	2,865
	Pp ant 4d	-,462	,130	12,597	1	,000	,630
	Constante	-19,541	4,839	16,308	1	,000	,000

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se tienen las variables involucradas en el modelo, sus coeficientes ( $\beta$ ), y sus valores de significancia (Sig), en todos los casos menores a 0,05 por ende, son todas significativas, y son relevantes para explicar el fenómeno estudiado.

El problema de este modelo radica aquí, en los coeficientes, o sea en los  $\beta$  de las distintas variables. Para el caso de la isoterma 0°C, la precipitación diaria y la antecedente a 2 días los coeficientes son positivos, mientras que el de la precipitación antecedente a 11 días es negativo, por lo tanto tendría un efecto opuesto a las otras variables. La importancia de esto es revisada de manera detallada en el capítulo de discusión.

### Caso 2: Modelo descartado

En este caso se utilizan la isoterma 0°C, la precipitación mensual y antecedente a 1 día. Los indicadores muestran que es peor que el caso 1 y mejor que el caso 3.

Tabla 5.10: Resumen de procesamiento de casos

Casos sin ponderar <sup>a</sup>		N	Porcentaje
Casos seleccionados	Incluido en el análisis	225	73,1
	Casos perdidos	83	26,9
	Total	308	100,0
Casos no seleccionados		0	,0
Total		308	100,0

Fuente: Elaboración propia.

Los datos procesados corresponden a 225 de los 308 considerados en la base de datos.

Tabla 5.11: Pruebas ómnibus de coeficientes del modelo

		Chi-cuadrado	gl	Sig.
Paso 1	Paso	233,994	3	,000
	Bloque	233,994	3	,000
	Modelo	233,994	3	,000

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los índices de Chi-cuadrado las variables independientes son capaces de explicar el fenómeno.

Tabla 5.12: Resumen del modelo

Paso	Logaritmo de la verosimilitud -2	R cuadrado de Cox y Snell	R cuadrado de Nagelkerke
1	77,811 <sup>a</sup>	,647	,862

a. La estimación ha terminado en el número de iteración 9 porque las estimaciones de parámetro han cambiado en menos de ,001.

Fuente: Elaboración propia.

El logaritmo de la verosimilitud es mayor que para el caso 1 y menor que para el caso 3, por lo cual, de acuerdo a este parámetro este modelo sería mejor que el modelo escogido (caso 3) y peor que el caso óptimo (1). Los R cuadrado de este modelo son de 64,7% y 86,2%, lo cual coincide con el comportamiento de acuerdo al logaritmo de la verosimilitud.

Tabla 5.13: Tabla de clasificación

Paso 1	Observado		Pronosticado		Porcentaje correcto
	Flujo	sin flujo	sin flujo	con flujo	
	sin flujo		105	5	95,5
	con flujo		8	107	93,0
	Porcentaje global				94,2

a. El valor de corte es ,500

Fuente: Elaboración propia.

La probabilidad de corte es de 0,5 y el 94,2% de los casos son predichos correctamente, siendo 5 casos sin flujo y 8 con flujo mal pronosticados.

Tabla 5.14: Variables en la ecuación

		$\beta$	Error estándar	Wald	Gl	Sig.	Exp( $\beta$ )
Paso 1 <sup>a</sup>	Isoterma 0°C	,005	,001	29,786	1	,000	1,005
	Pp mensual	,049	,010	23,707	1	,000	1,050
	Pp Ant 1d	,175	,050	12,039	1	,001	1,191
	Constante	-19,195	3,314	33,547	1	,000	,000

Fuente: Elaboración propia.

Todas las variables son significativas y tienen coeficientes con igual signo. La razón por la cual se descarta este modelo es un motivo geológico, ya que la precipitación mensual es menos influyente que la precipitación diaria, en cuanto a generación de flujos. De todas formas este punto es abarcado más ampliamente en la sección de discusión.

### Caso 3: Modelo escogido

Las variables utilizadas en este caso corresponden a la isoterma 0°C, la precipitación diaria y la precipitación antecedente al día 1 previo al evento. Este modelo entrega buenos indicadores, pero en algunos casos peores que para los casos anteriores.

Tabla 5.15: Resumen de procesamiento de casos

Casos sin ponderar <sup>a</sup>		N	Porcentaje
Casos seleccionados	Incluido en el análisis	224	72,7
	Casos perdidos	84	27,3
	Total	308	100,0
Casos no seleccionados		0	,0
Total		308	100,0

a. Si la ponderación está en vigor, consulte la tabla de clasificación para el número total de casos.

Fuente: Elaboración propia.

El número de puntos analizados en este caso corresponde a 224, mientras que los perdidos son 84.

Tabla 5.16: Pruebas ómnibus de coeficientes del modelo

		Chi-cuadrado	gl	Sig.
Paso 1	Paso	224,913	3	,000
	Bloque	224,913	3	,000
	Modelo	224,913	3	,000

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el modelo anterior, las significancias son menores a 0,05 por lo cual la isoterma 0°C, la precipitación diaria y a la antecedente el día previo al evento, son capaces de predecir la ocurrencia de los flujos.

Tabla 5.17: Resumen del modelo

Paso	Logaritmo de la verosimilitud -2	R cuadrado de Cox y Snell	R cuadrado de Nagelkerke
1	85,456 <sup>a</sup>	,634	,845

a. La estimación ha terminado en el número de iteración 9 porque las estimaciones de parámetro han cambiado en menos de ,001.

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, el logaritmo de la verosimilitud es mayor que en el caso óptimo (1) y el modelo descartado (2). Mientras que los valores de R cuadrado corresponden a 63,4% y 84,5% inferiores a los casos anteriores, pero de igual forma bastante buenos.

Tabla 5.18: Tabla de clasificación

Observado		Pronosticado		Porcentaje correcto
		Flujo sin flujo	Flujo flujo	
Paso 1	Flujo sin flujo	105	4	96,3
	flujo	7	108	93,9
Porcentaje global				95,1

a. El valor de corte es ,500

Fuente: Elaboración propia.

El modelo tiene una buena capacidad de predicción, ya que pronostica correctamente un 95,1% de los casos, donde los errores se distribuyen entre las dos situaciones, con y sin flujos, y los errores son de 4 y 7 respectivamente. En este ámbito los errores son menores que para el caso 2.

Tabla 5.19: Variables en la ecuación

		$\beta$	Error estándar	Wald	gl	Sig.	Exp( $\beta$ )
Paso 1 <sup>a</sup>	Isoterma	,005	,001	30,318	1	,000	1,005
	Pp diaria	,072	,015	22,309	1	,000	1,075
	Pp Ant 1d	,209	,047	19,520	1	,000	1,233
	Constante	-17,094	2,833	36,398	1	,000	,000

Fuente: Elaboración propia.

Todas las variables incluidas en este modelo son significativas y poseen coeficientes  $\beta$  de igual signo para todas las variables, a diferencia del caso anterior. El caso de la constante es un punto aparte, que será revisado en la sección de discusión.

De esta forma, la relación entre la probabilidad de ocurrencia y las variables independientes queda de la siguiente manera:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(-17,094 + 0,005 * I_{0^{\circ}C} + 0,072 * P_d + 0,209 * P_{ac1})}} \quad 5.1$$

Donde P corresponde a la probabilidad de ocurrencia,  $I_{0^{\circ}C}$  corresponde a la altura de la isoterma  $0^{\circ}C$  [msnm],  $P_d$  a la precipitación diaria en [mm] y  $P_{ac1}$  la precipitación antecedente al día previo de la fecha de análisis [mm]. El valor -17,094 corresponde a la constante.

A modo de ejemplo, se revisan 3 combinaciones de datos reales asociadas a casos con flujos y se muestra la probabilidad pronosticada por el modelo. Los primeros dos casos corresponden a flujos ocurridos en el evento del 24 y 25 de marzo del 2015, y el último al evento del 11 al 13 de mayo del 2017.

Para una isoterma de 3.657 m, precipitación diaria de 6 m-m y precipitación antecedente de 0,5 mm, la probabilidad entregada por el modelo es de 0,525.

Para una isoterma de 3.657 m precipitación diaria de 30,10 mm y una precipitación antecedente de 0, la probabilidad pronosticada es de 0,850.

De igual forma, para una isoterma de 2.548 m, precipitación diaria 81 mm y precipitación antecedente de 37 mm, la probabilidad pronosticada es de 0,999.

A modo de resumen, en la tabla 5.20 se muestran los tres casos y sus principales indicadores.

Tabla 5.20: Resumen de los tres casos

Caso	Chi-cuadrados significativos	-2Log Verosimilitud	R cuadrados	Casos clasificados correctamente	Variables significativas
<b>Óptimo estadístico</b>	Sí	39,119	0,701-0,936	99,5%	Todas
<b>Descartado</b>	Sí	77,811	0,647-0,862	94,2 %	Todas
<b>Escogido</b>	Sí	85,456	0,634-0,845	95,1	Todas

Fuente: Elaboración propia.

## Determinación de umbrales

Tal como se menciona en la sección de metodología, para este punto se utiliza la relación de Padilla (2006). Si se fija una probabilidad P tal como se utiliza para la elaboración del modelo, y se aplica el operador *logit* en la relación definida entre las variables independientes y la probabilidad, se tiene lo siguiente:

$$\ln \left[ \frac{P}{1-P} \right] = -17,094 + 0,005 * I_{0^{\circ}C} + 0,072 * P_d + 0,209 * P_{ac1} \quad 5.2$$

Donde P corresponde a la probabilidad de ocurrencia,  $I_{0^{\circ}C}$  corresponde a la altura de la isoterma  $0^{\circ}C$  [m],  $P_d$  a la precipitación diaria en [mm] y  $P_{ac1}$  la precipitación antecedente a 1 día [mm]. El valor -17,094 corresponde a la constante.

Si se fija la probabilidad en 0,5, queda lo siguiente:

$$\ln \left[ \frac{0,5}{1-0,5} \right] = -17,094 + 0,005 * I_{0^{\circ}C} + 0,072 * P_d + 0,209 * P_{ac1} \quad 5.3$$

Desarrollando:

$$\ln[1] = -17,094 + 0,005 * I_{0^{\circ}C} + 0,072 * P_d + 0,209 * P_{ac1}$$

$$0 = -17,094 + 0,005 * I_{0^{\circ}C} + 0,072 * P_d + 0,209 * P_{ac1}$$

$$0,072 * P_d = 17,094 - 0,005 * I_{0^{\circ}C} - 0,209 * P_{ac1}$$

$$P_d = \frac{17,094 - 0,005 * I_{0^{\circ}C} - 0,209 * P_{ac1}}{0,072}$$

$$P_{d(0,5)} = 237,416 - 0,0694 * I_{0^{\circ}C} - 2,9027 * P_{ac1} \quad 5.4$$

La última expresión relaciona la precipitación diaria con la isoterma  $0^{\circ}C$  y la precipitación antecedente a 1 día, para una probabilidad de ocurrencia igual a 0,5. De esta forma, conociendo la isoterma  $0^{\circ}C$  y la precipitación antecedente a 1 día, se puede determinar la precipitación diaria mínima, o sea el umbral de precipitación diaria, necesaria para la ocurrencia de flujos en la Región de Coquimbo.

De igual forma, se desarrolla la relación para una probabilidad de 0,9 obteniendo lo siguiente:

$$P_{d(0,9)} = 267,93 - 0,0694 * I_{0^{\circ}C} - 2,9027 * P_{ac1} \quad 5.5$$

A continuación en los gráficos 5.31 y 5.32 se muestran las relaciones 5.4 y 5.5 respectivamente. En cada una el plano definido corresponde a la probabilidad de 0,5 y 0,9 según sea el caso.

### Precipitación diaria para P=0,5

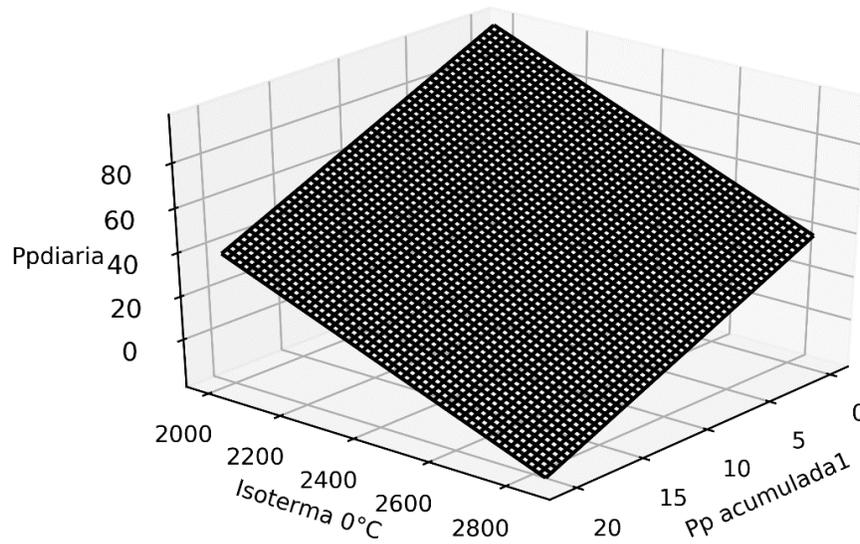


Gráfico 5.31: Umbral de precipitación diaria para una probabilidad de 0,5. Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se evalúa en los casos extremos para tener una idea del comportamiento de la precipitación diaria. Los resultados para una probabilidad de 0,5 se muestran a continuación en la tabla 5.21:

Tabla 5.21: Precipitación para P=0,5

Pp antecedente a 1 día [mm]	Isoterma 0°C [m]	Pp diaria [mm]
0	2000	98,61
19	2600	1,82

Fuente: Elaboración propia.

### Precipitación diaria para P=0,9

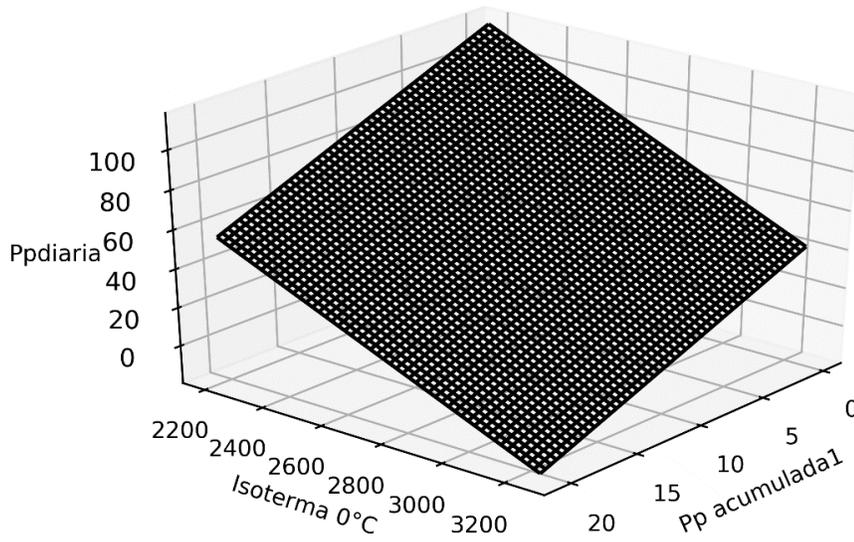


Gráfico 5.32: Umbral de precipitación diaria para una probabilidad de 0,5. Fuente: Elaboración propia.

De igual forma, se evalúa en los casos extremos para una probabilidad de 0,9. Los resultados se muestran en la tabla 5.22:

Tabla 5.22: Precipitación para P=0,9

Pp antecedente a 1 día [mm]	Isoterma 0°C [m]	Pp diaria [mm]
0	2000	129,13
18	3100	0,54

Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo 6: Discusión

### Compleitud del catastro

Los antecedentes del SERNAGEOMIN corresponde a la fuente de información principal para la identificación de las remociones en masa, sin embargo, existen casos, particularmente de flujos, en que no se tiene la información completa. Por ejemplo, de acuerdo al Primer catastro nacional de desastres naturales (SERNAGEOMIN, 2005), en el invierno de 1997, se desarrollaron flujos de barro y detritos hiperconcentrados que afectaron la Carretera Panamericana Norte, CH-5, entre La Serena y Vallenar. Este caso no fue incluido en el catastro, debido a que no se tiene la fecha de ocurrencia exacta, ni la ubicación de los flujos, lo cual tiene dos implicancias, en primer lugar no sería posible determinar las estaciones meteorológicas cercanas y segundo, no sería posible determinar el día en que ocurrió y por ende buscar datos de la precipitación diaria. De igual forma, es probable que existan otros eventos similares a este, en que no se tiene la ubicación exacta o la fecha al nivel de detalle que se requiere.

Dado que es más directo visualizar los desastres naturales cuando tienen un impacto en la población, no se descarta que existan zonas aisladas de los sectores poblados donde se hayan generado remociones en masa que no fueron registradas.

Tal como se puede observar en los resultados, el registro para los flujos recientes (2015, 2017) es bastante completo, no así para los más antiguos. Por este motivo, algunos eventos pueden ser subestimados debido a la falta de información. Por lo tanto, se debe tener en consideración que las conclusiones obtenidas son a partir de los datos disponibles.

### Representatividad de la ubicación del flujo

Tal como se menciona anteriormente, la ubicación del punto se asocia a la cuenca de generación del flujo, en algunos puede que se encuentre más cercana al depósito y en otras a la zona de generación o parte alta de la cuenca. Lo ideal sería registrar la zona donde se genera el flujo y no donde se deposita, para así poder reconocer las precipitaciones que dieron origen a este. Lamentablemente esto no siempre es posible y por este motivo los puntos presentes en el *shapefile* no siempre serían representativos de la zona de generación de la remoción. Sin embargo, debido al carácter regional del trabajo dichos efectos se ven disminuidos. Esto debido a que en la mayoría de los casos los flujos fueron generados en quebradas menores, por lo tanto el punto representa prácticamente la quebrada completa.

## Descripción de eventos

En algunos casos se pudo observar que existen diferencias entre la información presentada en las referencias y el registro asociado a las estaciones meteorológicas de la DGA. En particular se reconocen tres casos, 24 de marzo de 1992, 23 de abril 2004 y 15 de febrero 2006.

En las tres situaciones las referencias señalan que los montos precipitados son bastante superiores a los registrados por las distintas estaciones disponibles para cada uno de los flujos. En particular para las dos primeras fechas, las estaciones más cercanas se ubican a 6 y 8 km respectivamente, lo cual podría ser el motivo de estas discrepancias, si las precipitaciones hubiesen tenido un carácter localizado. Caso contrario ocurre para el 15 de febrero del 2006 donde la estación más cercana se encuentra a 400 m y la precipitación registrada para ese día es de 0 mm. En este caso, la explicación anterior parece poco probable.

Tal como se señala en la discusión anterior, es posible que existan puntos que no representen la generación del flujo, si esta fuese la situación en estos casos, las estaciones meteorológicas consideradas no reflejarían la precipitación que dio origen al flujo, sino simplemente la lluvia de la zona donde se depositó o algún punto intermedio del trayecto entre su origen y el depósito. De igual forma, esta situación tendría un mayor impacto si la cuenca considerada fuese de gran tamaño ya que la zona de lluvia podría concentrarse en la parte alta de esta, y la situación en el sector del depósito sería totalmente diferente.

En base a esto se consideraron como fechas con flujos las presentadas en la bibliografía y como datos de precipitación la información asociada a la DGA. Estas discrepancias observadas no tienen mayor impacto en el estudio dado que corresponden a eventos menores (un punto cada uno).

## Distancia de estaciones meteorológicas

Al momento de determinar las variables más significativas para explicar la ocurrencia o no ocurrencia de los flujos de detritos, se utilizan datos de distinta naturaleza, tales como precipitación diaria o mensual, asociados a la estación 1, la cual corresponde a la estación con información más cercana al flujo que se está considerando. Si bien el criterio utilizado es uniforme para los distintos puntos, este no es equivalente para todos los flujos, debido a que la distancia de “la estación más cercana” es variable según el caso. La distancia mínima corresponde aproximadamente a 10 m, mientras que la máxima se ubica a 29,8 km, prácticamente en el límite superior del radio aceptable. En promedio las estaciones se encuentran a 17 km de sus respectivos puntos aproximadamente, y un 82% de las estaciones se encuentran a menos de 15 km del punto considerado. Existen estaciones que se encuentran fuera del radio aceptable, muy próximas (a 31 km por ejemplo), sin embargo, estos casos son bastante acotados, y dado que, para la elaboración del modelo se trabaja con las estaciones 1, esto no tiene mayor impacto en el estudio.

Es de esperarse que las estaciones más cercanas al punto de generación del flujo representen el fenómeno de mejor manera que las estaciones más distantes. Lamentablemente, este es una condición que no puede ser resuelta en el presente estudio, y por ende corresponde a una de las limitaciones del trabajo.

## Variables climáticas

### Precipitación antecedente

Tal como se menciona en la sección de marco teórico, existen elementos que van a favorecer o disminuir la probabilidad de ocurrencia de un flujo de detritos. En esta situación en particular, se reconoce como factor condicionante a la precipitación antecedente a la ocurrencia del evento.

Reid *et al* (2008) a partir de tres casos de estudio en Oregon, California y Washington, determinó que el tiempo y la magnitud de respuesta de la humedad del suelo y la presión de poros ante los eventos pluviales, dependen de las condiciones iniciales de la humedad del suelo. Por lo tanto, no responderá de la misma manera un suelo seco a un suelo sobre el cual ya llovió. Además, determinó que la ocurrencia de deslizamientos está fuertemente correlacionada con las condiciones de humedad del suelo, previas a las precipitaciones desencadenantes. Si bien el estudio está enfocado en deslizamientos y no en flujos de detritos, una vez ocurridos, y ante las condiciones propicias, los primeros pueden evolucionar a estos últimos.

Hauser (2000) señala que la lluvia antecedente juega un rol decisivo en la generación de flujos aluviales, ya que la saturación del suelo acelera el escurrimiento superficial en detrimento de la infiltración. En terrenos con determinado nivel de humedad previa, la infiltración directa asociada a posteriores lluvias de gran intensidad y corta duración, son suficientes para provocar su total saturación. En el momento en que las aguas lluvia se infiltran en el suelo a una velocidad que supera su capacidad de drenaje, el suelo desarrolla un nivel estático superficial suficiente para generar una presión de poro crítica e inducir su falla.

De igual forma, Lambe y Whitman (1972) señalan que la incorporación de agua en la estructura del suelo, que en ciertos casos puede llegar a la saturación, genera una disminución en la resistencia del material, disminuyendo su tensión efectiva producto de la generación de presiones de poros.

Para este caso la precipitación antecedente considerada es de sólo un día debido a las condiciones semiáridas de la región. Su rol sería desestabilizar el suelo o los depósitos, por medio de la incorporación agua, previa a la saturación final dada por la precipitación diaria (factor desencadenante). El periodo acotado de tiempo aseguraría la permanencia del agua en el sistema.

### Isoterma 0°C

La altura de la isoterma 0°C constituye un factor importante al momento de determinar la ocurrencia de flujos, debido a que una variación de esta, se traduce en un cambio en el área aportante de agua en una cuenca. Suponiendo que existe una elevación de la isoterma 0°C, donde antes se almacenaba agua en forma de nieve (cuencas pluvio-nivales como por ejemplo la del Río Elqui), ahora se tendría precipitación líquida, en forma de lluvia. Al aumentar el área aportante, las quebradas y cauces de río, tendrían que ser capaces de transportar caudales superiores a los usuales, lo cual podría generar desastres naturales.

Naranjo (comunicación oral en Lara 2007) señala que los eventos de remoción en masa de mayor envergadura no necesariamente se generan en invierno, y están asociadas a generación de precipitaciones ante condiciones de temperatura elevada y ubicación alta de la isoterma 0°C.

Por otro lado, existen eventos de precipitación que se producen en condiciones de isoterma 0°C altas, las cuales pueden tener un carácter localizado, que no puede ser registrado por estaciones meteorológicas que se encuentren distantes al punto. Por este motivo, si se tienen fenómenos de

este tipo, es posible que los datos asociados a las estaciones meteorológicas no sean capaces de reproducir la situación ocurrida.

En este caso, la isoterma 0°C correspondería a un factor condicionante del factor desencadenante de la remoción, es decir, de la precipitación diaria.

### Precipitación diaria

Las precipitaciones además de un factor condicionante, actúan como un factor desencadenante de remociones en masa, dadas las condiciones propicias. Hauser (2000) señala que el agua constituye uno de los principales agentes desencadenantes al originar drásticas disminuciones de la resistencia al corte y presiones intersticiales a lo largo de potenciales planos o superficies de ruptura.

González *et al* (2002) afirma que precipitaciones de poca intensidad en periodos prolongados de tiempo y precipitaciones de gran intensidad en periodos cortos de tiempo podrían desencadenar eventos de remociones en masa en zonas donde el escenario sea favorable para ello. Para este caso, la precipitación diaria desencadenante de los flujos, tendría un carácter acotado y de alta intensidad respecto a los valores promedios.

Se han determinado umbrales de precipitación diaria para distintos sectores de Chile. Por ejemplo, para la ciudad de Antofagasta, se reconoce que precipitaciones del orden de 32 mm/24 h para un periodo de retorno de 50 años, serían capaces de activar flujos aluviales con riesgo para distintos sectores de la ciudad (Hauser, 1997). De igual forma, para la zona preandina de la Región Metropolitana, lluvias de gran intensidad, es decir, precipitaciones superiores al orden de 60 mm/24 h serían suficientes para activar enérgicos procesos de remoción en masa, ya sean flujos de barro o detritos, deslizamientos o desprendimientos (Hauser, 1985a). Así también, en sectores litorales de la región de Valparaíso, específicamente Reñaca y Concón, García Yague (1978) reconoce que lluvias mayores que 5 mm/24 h suelen provocar flujos de arena.

### Base de datos

La metodología utilizada para definir los casos sin eventos es distinta a la presentada por Padilla (2006). En ese estudio se utiliza todo el registro de precipitaciones asociado a dos estaciones meteorológicas para un periodo de 25 años. En cambio, en esta oportunidad se escoge una muestra aleatoria de los casos sin flujo en el periodo considerado 1991-2017, con una cantidad de datos similar a los casos con flujo (la definición de caso sin flujo se encuentra en la Metodología, catastro de precipitaciones). Se optó por hacerlo de esta manera, ya que una muestra aleatoria es válida estadísticamente y se evita que la regresión logística falle producto del desbalance de casos positivos y negativos.

### Revisión de modelos

Tal como se menciona en la sección de resultados, existen distintas combinaciones de variables que se pueden utilizar al momento de explicar el comportamiento de la variable dependiente. En

esta sección se revisa el motivo de eliminación de determinadas variables o el descarte de ciertos modelos.

### Caso 1: Óptimo estadístico

En primer lugar es importante recordar que cuando dos variables tienen una correlación alta, podría esperarse que expliquen el mismo factor dentro del comportamiento de la variable dependiente. De cumplirse lo anterior, no tendría sentido incluir dos variables con similar comportamiento en el modelo. En particular para este caso, las precipitaciones antecedentes presentan entre ellas correlaciones altas y directas, por ejemplo, si se consideran dos casos, ambas van a aumentar o disminuir en la misma tasa. Y por ende, teniendo en consideración el punto anterior, se incluyeron las variables de precipitación antecedente a 2 y 11 días en el caso 1: óptimo estadístico para comprobar de manera práctica que ambas variables no deberían ir juntas en un mismo modelo.

A simple vista, todos los indicadores entregan buenos resultados y las variables incluidas en el análisis son todas significativas, por lo cual se tendería a pensar que el argumento planteado anteriormente no aplica para este caso y que es correcto incluir ambas variables en el análisis. Sin embargo, al mirar más en detalle los resultados del modelo, en particular la tabla de variables en la ecuación, se puede notar una particularidad, que las variables isoterma  $0^{\circ}\text{C}$ , precipitación diaria y precipitación antecedente a 2 días poseen  $\beta$  positivos, mientras que la precipitación antecedente presenta un  $\beta$  negativo.

Al conocer la forma de la relación entre la probabilidad de ocurrencia y las distintas variables se puede verificar el efecto que tienen los coeficientes en la probabilidad. Teniendo en consideración que los valores de las precipitaciones y la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  son iguales a 0 o positivos en todos los casos, al multiplicarlos por un coeficiente  $\beta$  positivo, esto contribuirá a aumentar la probabilidad de ocurrencia de los flujos. Lo cual tiene sentido con la realidad, ya que a mayores precipitaciones, diaria y antecedente, se tiene una condición favorable para la generación de flujos, al igual que al aumentar la altura de la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$ .

Por el contrario, un coeficiente  $\beta$  negativo, para una variable que toma valores iguales a 0 o positivos, tiende a disminuir la probabilidad de ocurrencia. Lo cual, para el caso de la precipitación antecedente a 11 días, no se explica con lo visto en la realidad. Las precipitaciones previas a un evento de este tipo, tienden a generar una condición inestable, por lo cual deberían aumentar o, suponiendo que el agua previa ya se infiltró o secó, no influir en la probabilidad de ocurrencia, pero en ningún caso disminuirla. Si se aceptara esta configuración como aceptable, se tendría que justificar que la precipitación antecedente, estabiliza los suelos, disminuyendo la probabilidad de que ocurra un flujo de detritos.

Debido a los planteamientos presentados anteriormente se descarta esta configuración como aceptable para el fenómeno estudiado. Ya que si bien constituye, tal como su nombre lo indica, el modelo óptimo estadístico, no existe total concordancia con la observación de la realidad.

### Caso 2: Modelo descartado

Este caso considera las variables isoterma  $0^{\circ}\text{C}$ , precipitación mensual y precipitación antecedente a 1 día. Sus indicadores muestran que es un buen modelo, incluso con mejores índices que para el caso escogido (caso 3). El motivo de descarte es netamente teórico, ya que, si bien de manera estadística es posible justificar la elección de las variables, teóricamente se cree que existen otras variables más importantes al momento de determinar la ocurrencia de flujos.

Como ya se mencionó, la precipitación mensual, estadísticamente constituye una variable significativa y el hecho de incorporarla en el análisis genera buenos resultados. Pero, para justificar su elección se debería poder explicar cómo influye teóricamente esta variable en la ocurrencia de los flujos y por qué tiene mayor relevancia, por ejemplo, que la precipitación diaria. Lo anterior no es posible ya que la precipitación mensual constituye un dato muy amplio, que no muestra cómo se distribuye dicha precipitación, resume lo que ocurre en aproximadamente 30 días, en un solo dato.

Además, si se elige la precipitación mensual en vez de la diaria, se está dejando fuera del análisis el factor desencadenante del flujo, el cual es de suma importancia. Pero ¿por qué se debe escoger entre una y otra en vez de mantener ambas?, simplemente porque al incorporar ambas variables al modelo estas pierden significancia, no así como cuando se analizan por separado.

Por lo tanto, al momento de escoger racionalmente qué variable tiene mayor influencia en la ocurrencia de un flujo, si la precipitación mensual o la precipitación diaria, se escoge esta última, debido a que entrega información más detallada respecto a la distribución de la precipitación.

### Caso 3: Modelo escogido

Este modelo considera la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$ , la precipitación diaria y la precipitación antecedente a 1 día. Los indicadores señalan que los otros ajustes son mejores, sin embargo, este es perfectamente aceptable en términos estadísticos, además de cumplir con los requisitos teóricos del fenómeno.

Se escoge un periodo de precipitación antecedente acotado, dadas las condiciones climáticas de la región, es decir, un clima semiárido, donde las precipitaciones tienen un comportamiento esporádico y no se desarrollan lluvias durante periodos extensos, sino que presentan un carácter más acotado. Si se eligiera un rango de tiempo mayor (8 u 11 días), de acuerdo a lo observado en los datos, habrían vacíos de precipitación importantes en ese periodo de tiempo. Esto provoca que exista tiempo suficiente para las precipitaciones previas puedan ser evaporadas, escurridas o infiltradas y ya no se encontrarían presentes al momento de generarse la precipitación diaria, desencadenante del evento.

Al igual que para los casos anteriores, se trabaja con la probabilidad de corte igual a 0,5 dado que es el valor que mejores resultados entrega, cualquier variación de esta se traduciría en perder más casos pronosticados correctamente, que los casos que se corregirían.

Respecto a los coeficientes, es importante mencionar que a simple vista no se puede determinar cuál de los tres, dejando fuera la constante, tiene mayor influencia en la probabilidad, esto dado que no se puede comparar un coeficiente que pondera una variable con valores del orden de 2.000 o 3.000, con uno que pondera valores entre 0 y 100, que es el caso de la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  y las precipitaciones respectivamente.

Se probó normalizar los datos, dividiendo cada valor por el número mayor que presenta la variable. Desafortunadamente, con esta nueva configuración los resultados no son favorables. Existe una disminución de los casos bien clasificados (75,5% clasificado correctamente), las variables incluidas dejan de ser significativas (tanto la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  como la precipitación diaria) y los R cuadrado disminuyen considerablemente con respecto a la situación sin normalizar (0,34 y 0,46 para Cox y Snell y Nagelkerke respectivamente).

Por otro lado, al normalizar restando la media y dividiendo por la desviación estándar de cada variable, se obtienen resultados similares a los obtenidos para el caso sin normalizar (el detalle se puede revisar en la sección de Anexos). De esta forma se obtiene que la variable con mayor influencia en la ocurrencia de flujos es la precipitación antecedente con un coeficiente de 7,276.

Para la precipitación diaria y la isoterma 0°C los valores son de 1,167 y 1,628 respectivamente. Si bien esto es lo que entrega el modelo estadístico, este se basa en los datos incluidos en el análisis que corresponden a la evidencia de las situaciones ocurridas en la realidad. Dada el área de trabajo, tiene sentido que la precipitación antecedente juegue un rol primordial, dado que actúa como desestabilizador de los suelos por medio de una saturación previa a la propia del evento.

### Constante del modelo

En los tres casos analizados se puede apreciar que, de manera independiente a las variables escogidas, el valor de la constante es negativo y alto comparado con el resto de los coeficientes. El valor negativo, nos indica que este coeficiente contribuye a disminuir la probabilidad de ocurrencia de los flujos.

La explicación que se le da a esta situación, es que, dado que todas las variables escogidas contribuyen a aumentar la probabilidad de ocurrencia, debe existir una variable, en este caso la constante, que contrarreste el peso de las anteriores, disminuyendo dicha probabilidad.

Los factores que podría englobar este coeficiente, corresponden a los agentes estabilizadores del entorno o que tienden a prevenir la generación de flujos. Por ejemplo, si los depósitos acumulados en las quebradas son escasos o inexistentes, no se tendrá este input de material para ser arrastrado, la presencia de vegetación estabilizadora del suelo que disminuye el efecto erosivo sobre este, la existencia de depósitos capaces de incorporar de manera rápida el agua que es introducida al sistema en forma de precipitación no generarán una saturación y desestabilización de este, etc.

### Fallas del modelo

En la tabla 6.1 a continuación se muestra la totalidad de los casos mal pronosticados por el modelo. Corresponden a 4 falsos positivos, y 7 falsos negativos.

Tabla 6.1: Casos en que falla el modelo

Fecha	Punto	Flujo	Pronóstico	Probabilidad calculada	Isoterma 0°C	Precipitación diaria	Precipitación antecedente 1 día
23 de abril 2004	RCOQ-15	Sí	No	0,00207	2263,00	0,00	3,20
11 de mayo 2017	RCOQ-38	Sí	No	0,15372	2548,00	53,00	0,00
11 de mayo 2017	RCOQ-44	Sí	No	0,15372	2548,00	53,00	0,00
11 de mayo 2017	RCOQ-51	Sí	No	0,15372	2548,00	53,00	0,00
26 de junio 2017	232	Sí	No	0,30011	2267,00	1,00	28,10
26 de junio 2017	235	Sí	No	0,30011	2267,00	1,00	28,10
11 de mayo 2017	RCOQ-50	Sí	No	0,43225	2548,00	67,00	2,00
3 de junio 2016	RCOQ-41	No	Sí	0,80632	2800,00	25,00	19,00
3 de junio 2016	RCOQ-42	No	Sí	0,80632	2800,00	25,00	19,00
3 de junio 2016	RCOQ-43	No	Sí	0,80632	2800,00	25,00	19,00
17 de junio 1991	113	No	Sí	0,97844	3100,00	53,50	14,00

Fuente: Elaboración propia.

Para los casos donde se tienen flujo y las probabilidades calculadas pronostican lo contrario, se pueden observar distintas situaciones. Para el caso del 23 de abril del 2004, RCOQ-15, las condiciones son desfavorables para la ocurrencia de un flujo en comparación a los datos de los otros eventos, ya que la precipitación diaria es 0, la antecedente es baja al igual que la altura de la isoterma 0°C, lo cual tiene sentido con la bajísima probabilidad entregada por el modelo. Además, para este caso en particular existen discrepancias entre los datos observados en las estaciones y lo

registrado en los reportes. En este modelo se trabaja con los datos asociados a las estaciones, debido que es la fuente de información disponible, sin embargo, no se descarta que estas sean incapaces de registrar los fenómenos ocurridos en determinadas situaciones, por ejemplo en esta donde la estación más cercana se encuentra a 8 km de la ocurrencia del flujo.

Para los tres puntos siguientes, RCOQ-38, RCOQ-44 y RCOQ-41, asociados al 11 de mayo 2017, se tiene que las precipitaciones diarias son altas, mientras que la precipitación antecedente es nula y la altura de la isoterma es baja. Comparando con otros flujos ocurridos en esta fecha, similar altura de la isoterma 0°C y la precipitación diaria, la precipitación antecedente debiese aumentar aproximadamente en 10 mm como mínimo para que el modelo pudiese predecirlo correctamente. En este caso, uno de los factores condicionantes no posee un valor suficientemente alto para ser bien clasificado por el modelo.

Para los puntos asociados al 26 de junio 2017 (232 y 235) se tiene una isoterma 0°C baja y precipitaciones diarias muy acotadas, las precipitaciones antecedentes contrarrestan el efecto de las anteriores, ya que la probabilidad entregada no se encuentra extremadamente lejos de la probabilidad de corte, sin embargo no es suficiente para igualar o superar esta probabilidad límite. La estación más cercana a estos puntos se encuentra a 6 u 8 km aproximadamente, por lo cual no se descarta la posibilidad de que la precipitación en el sector haya sido más intensa que lo registrado.

Para RCOQ-50, tanto la precipitación diaria como lo antecedente a 1 día son más altas que en los casos anteriores, por lo cual la probabilidad es más cercana a 0,5. Sin embargo, a pesar de ser más altos, no son suficientes para ser clasificados de manera correcta por el programa.

Para el caso de los falsos positivos, las probabilidades entregadas son bastante altas. Lo cual se explica porque en general los datos tienen valores altos, que serían propicios para la generación de flujos.

Los modelos de este tipo constituyen buenas aproximaciones de ciertos fenómenos, pero es muy difícil lograr un ajuste completo de los datos, en este caso el porcentaje que falla es bastante acotado respecto a la totalidad de los datos.

## Comparación con otros estudios

En el estudio de Padilla (2006) en el sector cordillerano de la Región Metropolitana. El modelo utilizado también es una regresión logística, pero ha sido abordado de manera distinta. El registro pluviométrico se asocia a 2 estaciones de las cuales ocupa información de diversos años para trabajar. Las variables incorporadas al modelo son básicamente las mismas, ya que se trabaja con la precipitación diaria, la antecedente y la línea de nieves.

En el caso de Padilla (2006) se calcula la altura de la línea de nieves en base a mediciones de temperatura de las mismas estaciones, mientras que en este trabajo constituye un dato proporcionado por la DMC medido a través de radiosondas. De igual forma, la cantidad de días escogidos para la precipitación antecedente varía entre un estudio y otro, en el caso de Padilla se utiliza la precipitación antecedente a 25 días mientras que en este caso solo a 1 día. Esto tiene que ver con las condiciones climáticas de cada área de estudio, en particular la Región de Coquimbo presente un clima semi-árido, mientras que el sector cordillerano de la Región Metropolitana es mucho más húmedo.

Por otro lado, los indicadores utilizados para determinar qué modelo es mejor, también son distintos en ambos casos, lo cual dificulta la comparación. Padilla se enfoca principalmente en el estadístico de *Wald* y el estadístico de bondad de ajuste ( $Z^2$ ), mientras que los criterios utilizados en este caso corresponden a la tabla de clasificación, la verosimilitud y los R cuadrados.

En el caso de las probabilidades de corte escogidas, Padilla (2006) trabaja con 0,2 y 0,5, este último coincide con el utilizado en este caso. Por otro lado, en el trabajo mencionado se señala únicamente las probabilidades obtenidas para los casos positivos y no se indica qué ocurre con los casos en que no se tienen remociones, de esta forma es difícil tener un panorama global del comportamiento del modelo si solo se toman los resultados de manera parcial. Ya que si no, se podría argumentar que una probabilidad baja explica bien la ocurrencia de remociones en masa, sin embargo no se tiene el dato de cuantos falsos positivos se están generando con esta probabilidad de corte.

Un problema que puede presentar el trabajo señalado es la diferencia entre casos positivos y negativos. Si se tienen registros de 25 años y solo se utilizan 6 días con casos de remociones en masa, se tiene un número de casos negativos mucho mayor a los positivos. Para evitar ese problema, en este caso se tomó una muestra aleatoria de los casos definidos como no eventos para el periodo considerado (1991-2017).

En base a los resultados estadísticos, Padilla señala que la precipitación diaria corresponde al factor de mayor influencia en el pronóstico de remociones en masa. Mientras que en este estudio la precipitación antecedente ocuparía ese rol.

Finalmente, para la determinación de umbrales se comparan las dos expresiones para una probabilidad de 0,5.

Padilla:

$$P_{E(50\%)} = 216,665 - 0,131 * PA_{25-d} - 0,047 * HLN \quad 6.1$$

Presente estudio:

$$P_{d(0,5)} = 237,416 - 0,0694 * I_{0^\circ C} - 2,9027 * P_{ant-1} \quad 6.2$$

Donde  $P_E$  y  $P_d$  corresponden a la precipitación diaria del día del evento,  $PA_{25-d}$  y  $P_{ant-1}$  la precipitación antecedente a 25 y 1 día respectivamente, finalmente  $HLN$  e  $I_{0^\circ C}$ , altura línea de nieves e isoterma  $0^\circ C$ . Se puede observar que la constante y el coeficiente de la isoterma  $0^\circ C$ / línea de nieves presentan un orden similar, mientras que para la precipitación antecedente la diferencia es considerable lo cual genera el cambio de roles entre las variables para cada modelo.

## Determinación de umbrales

La definición de umbral se hace para la precipitación diaria, es decir, el factor gatillante de los flujos estudiados. El umbral representa la cantidad de precipitación diaria mínima para que el flujo se genere con una probabilidad X, dadas ciertas condiciones de precipitación antecedente e isoterma  $0^\circ C$ . Como se mostró en la sección de resultados, las probabilidades utilizadas en este caso corresponden a 0,5 y 0,9. La primera se escoge de acuerdo al valor de corte utilizado en el análisis estadístico y la segunda como un caso extremo, intentando disminuir el margen de casos

negativos. Por razones obvias, a medida que la probabilidad aumenta las condiciones son más exigentes.

La combinación de variables para una probabilidad dada corresponde a un plano como los que se muestran en los gráficos 5.31 y 5.32 de la sección de resultados. De esta forma, al escoger un valor de precipitación antecedente e isoterma 0°C se puede obtener el valor de precipitación diaria de manera gráfica. Dado lo anterior existen combinaciones de datos en las cuales la precipitación diaria toma valores negativos o es cero. En primera instancia esto no tiene sentido lógico, sin embargo, puede entenderse como que el factor “precipitación diaria” no es relevante si se tienen ciertos valores de precipitación antecedente e isoterma 0°C. De esta forma, existiría un cambio de roles donde la precipitación antecedente pasaría a ser la precipitación diaria y por ende el factor desencadenante del flujo.

Es importante tener en consideración que el umbral definido es representativo de los datos que fueron utilizados para el análisis, los cuales corresponden a datos de precipitación y flujos, comprendidos entre los meses de Enero y Junio (los eventos considerados se pueden revisar en la sección de resultados en la tabla 5.1). Por ende el umbral posee una restricción temporal, ya que es aplicable únicamente a este periodo. Entre Julio y Diciembre no ocurrieron flujos en la región entre los años 1991-2017 (o SERNAGEOMIN no posee registros de ellos), por lo que no se analizaron las precipitaciones comprendidas en esos meses.

En este caso no se profundizó en cuanto al tipo de tormenta de los distintos eventos, sin embargo, es un factor interesante para estudios posteriores.

Debido a que la mayoría de los flujos se concentra en los sectores montañosos de la región, parece adecuado limitar la aplicación de este umbral únicamente a estos sectores y excluir la zona costera de la región. Dado que los datos considerados para el análisis son recientes, estos resultados estarían reflejando las condiciones climáticas de las últimas décadas y las actuales.

## Capítulo 7: Conclusiones

A partir de este trabajo, se puede concluir lo siguiente:

Se modificó el catastro elaborado previamente por SERNAGEOMIN, obteniéndose un registro de 189 puntos, donde 117 corresponden a flujos. Se realizaron dos mapas y una tabla. El catastro muestra los distintos puntos donde se han reconocido remociones en masa, entre ellos caídas, deslizamientos o flujos. Los flujos en particular se presentan según sus fechas de ocurrencia, asociados a eventos de precipitaciones. Se consideran 7 eventos de precipitación que tienen como resultado la generación de flujos, que corresponden a los eventos de los días 24 de marzo 1992, 18 de junio 1997, 23 de abril 2004, 15 de febrero 2006, 24 y 25 de marzo 2015, 11 al 13 de mayo 2017 y 26 de junio 2017.

De acuerdo al catastro, en la región, los flujos se distribuyen a lo largo de toda ésta, concentrándose principalmente en las zonas montañosas, mientras que en la franja costera solo se identifican un par de casos puntuales. En base a la información analizada se puede concluir que la cuenca del Río Elqui es la que mayor desarrollo de flujos presenta. De los 7 eventos, solo hay uno que no presenta registros en dicha cuenca, y que corresponde al evento del día 24 de marzo de 1992.

Se elaboró un catastro de precipitaciones asociadas a los flujos ocurridos en la región que se sintetiza en mapas, gráficos y tablas. Entre los resultados más importantes destaca: un mapa donde se muestran las estaciones de la DGA y la ubicación de los flujos, un mapa donde se muestran las estaciones de CEAZA y la ubicación de los flujos, gráficos de precipitación mensual, diaria y horaria en torno a los distintos eventos, además de diversos gráficos asociados a cada uno. De estos últimos se puede observar que, en general, los flujos se asocian a precipitaciones intensas que se acotan a un par de días entorno a la fecha de los eventos. Mediante los gráficos de precipitación horarios, se reconoce un avance de sur a norte, del fenómeno climático considerado como caso de estudio, 11 al 13 de mayo 2017.

Se sintetiza la información recopilada en una base de datos donde se asigna a cada punto identificado como un flujo, la fecha, la altura de la isoterma 0°C y datos de precipitación (mensual, diaria y antecedente). Estos últimos asociados a las estaciones de la DGA dentro de un radio de 30 km en torno al punto. Se incorpora además, la información correspondiente para casos sin flujos en el mismo lugar.

Se establece una relación estadística entre la ocurrencia de flujos de detritos, las precipitaciones y la altura de la isoterma 0°C. La relación obtenida es la siguiente:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(-17,094 + 0,005 * I_{0^{\circ}\text{C}} + 0,072 * P_d + 0,209 * P_{ac1})}} \quad 7.1$$

Donde P corresponde a la probabilidad de ocurrencia, la cual al ser mayor o igual a 0,5 indica la ocurrencia del flujo. Donde  $I_{0^{\circ}\text{C}}$  corresponde a la altura de la isoterma 0°C [msnm],  $P_d$  a la precipitación diaria en [mm] y  $P_{ac1}$  la precipitación antecedente al día previo de la fecha de análisis. El valor -17,094 corresponde a la constante.

De esta forma, se define la combinación de condiciones que hacen probable la ocurrencia de un flujo. Las variables que definen dicha ocurrencia corresponden a las incluidas en el modelo: isoterma 0°C, precipitación diaria y precipitación antecedente al día previo del evento. Se destaca además su relevancia en comparación con el resto de variables incluidas en la base de datos (precipitación mensual, antecedente a 2, 8 y 11 días) y descartadas del modelo.

De los 224 casos analizados, el modelo es capaz de predecir correctamente un 95,1% de estos. Los índices estadísticos y los fundamentos geológicos, indican la validez del modelo escogido.

La aplicación del modelo estadístico es válido para el periodo comprendido entre los meses de Enero y Junio, y espacialmente, para las zonas cordilleranas de la Región de Coquimbo.

Dados los objetivos, este trabajo solo contempla factores asociados a factores meteorológicos, principalmente la precipitación, sin embargo, sería interesante incorporar otras variables asociadas a las condiciones geológicas y geomorfológicas de la zona o complementar esta información, por ejemplo, con estudios de susceptibilidad.

A modo de recomendación sería interesante comprender qué ocurre en el periodo Julio-Diciembre en cuanto a la generación de flujos. De igual forma, se podría analizar el comportamiento del sector costero de la región. Por otro lado, se sugiere realizar estudios a una menor escala, por ejemplo, en la Cuenca del Río Elqui.

También se recomienda aplicar esta metodología en otras regiones, ya que las relaciones entregadas son específicas de la región de Coquimbo.

## Bibliografía

- Aguayo, M. 2007. Fundación Andaluza Beturia para la Investigación en Salud. Cómo hacer una Regresión Logística con SPSS© “paso a paso”. [Http://www.fabis.org/html/archivos/docuweb/Regres\\_log\\_1r.pdf](http://www.fabis.org/html/archivos/docuweb/Regres_log_1r.pdf)
- Alfaro, A., Garrido, N., Ramírez, P. 2017. Efectos geológicos del evento meteorológico del 11 al 13 de Mayo de 2017, región de Coquimbo, Valle del Elqui, comunas de Vicuña y Paihuano (INF Coquimbo-02.2017) [informe inédito].SERNAGEOMIN.
- Alfaro, A., Pantoja, G., Brantt, C. 2018. Peligro de remociones en masa en la región de Coquimbo-Sector norte. Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe registrado IR-18-68, 40 p., 3 Anexos.
- App4stats: Bioestadística para estudios científicos.2018.Manual-ejemplo. Capítulo ejemplo: IV. Análisis de regresión. [Http://app4stats.com/manual-ejemplo/](http://app4stats.com/manual-ejemplo/)
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BNC).2018. Clima y vegetación Región de Coquimbo. [Https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region4/clima.htm](https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region4/clima.htm)
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BNC).2018. Región de Coquimbo. [Https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/nuestropais/region4/](https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/nuestropais/region4/)
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BNC).2018. Relieve Región de Coquimbo. [Https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region4/relieve.htm](https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region4/relieve.htm)
- Bohn Horst, T. H. 1967. Geología de la hoja Ovalle. Prov. Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas-Chile, Boletín, 23, 50-54.
- Can, T. Nefeslioglu, H. Gokceoglu, C. Sonmez, H. Duman, T. 2005. Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. *Geomorphology* 72, 250 – 271.
- Cruden, D., 1991. A simple definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No. 43, p. 27-29.
- Cruden, D., Varnes, D., 1996. Landslide types and processes. In Turner A.K. & Schuster R.L., 1996. *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C. 675 p.
- DGA. 2017a. Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DGA. 2017b. Atlas del agua. Chile 2016. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.
- Ecured.cu. 2019. El Niño (fenómeno meteorológico) - EcuRed. [https://www.ecured.cu/El\\_Ni%C3%B1o\\_\(fen%C3%B3meno\\_meteorol%C3%B3gico\)](https://www.ecured.cu/El_Ni%C3%B1o_(fen%C3%B3meno_meteorol%C3%B3gico)).
- Emparán, C. y Pineda, G. (1999). Área Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo (1: 100,000).SERNAGEOMIN. Mapas Geológicos, 12. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.

- Explorable.com. 2009. La Correlación Estadística. Feb 21, 2019 Obtenido de Explorable.com: <https://explorable.com/es/la-correlacion-estadistica>.
- Garreaud, R. 1992. Estimación de la línea de nieves en cuencas andinas de Chile central. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, Vol 7:21-32.
- González De Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. Editorial Prentice Hall. 715 p.
- Hauser, A. 1985a. Flujos de barro en la zona preandina de la Región Metropolitana: características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas. *Revista geológica de Chile: An international journal on andean geology*, N° 24, p. 75-92.
- Hauser, A., 1993. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45, p. 7-29.
- Hauser, A. 1997. El fenómeno de “El Niño” y los flujos aluviales en Chile: causas, efectos, mitigación. SERNAGEOMIN.
- Hauser, A., 1997. Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: Un análisis crítico a cinco años del desastre. Boletín N° 49. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Hauser, A., 2000. Remociones en masa en Chile (versión actualizada). Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 59.
- Hauser, A. 2004. Flujo aluvional que afecto a la localidad de Diaguitas, Comuna de Vicuña, IV Región, el 23 de Abril de 2004, SERNAGEOMIN.
- Hosmer, D. Y Lemeshow, S. 2000. *Applied Logistic Regression*, John Wiley and Sons, New York.
- Iverson, R., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35, 3 / August 1997, p.245–296.
- Iverson, R., Reid, M., lahusen, R., 1997b. Debris-flow mobilization from landslides. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 1997. 25, p. 85–138.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 95, p. 406-421.
- Lambe, W., Whitman, R., 1972. *Mecánica de suelos*. Instituto Tecnológico de Massachusetts, Editorial Limusa-Wiley S.A., 583 p
- Lara, M. 2007. Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geología. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile.
- Lara, M., y Sepúlveda, S.2008. Remociones en masa, apunte del curso. Universidad de Chile.
- Martelloni, G., Segoni, S., Fanti, R., & Catani, F. 2012. Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale. *Landslides*, 9(4), 485-495.
- Meyer, P. L., Campos, C. P., & Cuéllar, G. A. (1973). *Probabilidad y aplicaciones estadísticas* (No. QA273. 25. M49 1973.). Bogotá: Fondo Educativo Interamericano.

- Minitab. 2018. Significancia estadística y práctica. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/basics/statistical-and-practical-significance/>
- Moscoso, R., and Mpodozis, C. 1988, Estilos estructurales en el norte chico de Chile (28-31°S), regiones de Atacama y Coquimbo: Revista Geológica de Chile v. 15, no. 2, p. 151-166
- Moscoso, R., Nasi, C., & Salinas, P. 1982. Geología de la Hoja Vallenar y parte Norte de la Hoja La Serena. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Carta Geológica de Chile, 55.
- Mpodozis, C., & Cornejo, P. 1988. Hoja Pisco Elqui, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile). Carta Geológica de Chile (68), 1.
- Naranjo, J., Landon, N. 2006. Informe sobre flujos de detritos que afectaron el Valle del Río Cochiguás el 15 de Febrero de 2006, comuna de Paihuano, región de Coquimbo [informe inédito]. SERNAGEOMIN, 2006.
- Nasi, C., Moscoso, R., Maksaev, V. 1990. Hoja Guanta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica N° 67, 141 p., 1 mapa escala 1:250.000, Santiago.
- Novoa, J.E. 1989. Geografía y Medio Ambiente. En: Colosos del Norte Verde. Ediciones Universidad de La Serena y Universidad Católica del Norte, La Serena: 15-20.
- Novoa, J., López, D. 2001. Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo (F.A. Squeo, G. Arancio y J.R. Gutiérrez, Eds.) Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile. Capítulo 2: “VI Región: El escenario geográfico” p. 13 – 28.
- ONEMI: Ministerio del Interior y Seguridad Pública. 2018. Aluviones. <http://www.onemi.cl/aluviones/>
- Opazo, E., Velásquez, R. 2015a. Efectos Geológicos del evento meteorológico del 24 y 25 de Marzo de 2015: Observaciones de remociones en masa en la Comuna de Vicuña, Región de Coquimbo, INF-COQUIMBO-01, SERNAGEOMIN.
- Opazo, E., Velásquez, R. 2015.b Efectos Geológicos del evento meteorológico del 24 y 25 de Marzo de 2015: Observaciones de remociones en masa en las comunas de Monte Patria, Río Hurtado y sector de Viñita, INF-COQUIMBO-03, SERNAGEOMIN.
- Opazo, E., Velásquez, R. 2015c. Efectos Geológicos del evento meteorológico del 24 y 25 de Marzo de 2015, Fotointerpretación de los efectos de remociones en masa del 24 al 26 de marzo de 2015 en las comunas de Vicuña y Paihuano: áreas afectadas y zonas propuestas para evaluación y acopio. INF-COQUIMBO-04, SERNAGEOMIN.
- Padilla, C. 2006. Análisis de factores meteorológicos desencadenantes de remociones en masa en el sector oriente de Santiago. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile.
- Paskoff, R. 1993. Geomorfología de Chile Semiárido. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, 321 pp.
- Pineda, G., & Emparán, C. (2006). Geología del área Vicuña-Pichasca, Región de Coquimbo. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.

- Popescu, M.E., 2002. Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. Keynote Lecture, Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety Of Infra-Structures, Singapore, p. 61-81.
- Prieto, C., 1985. Inestabilidades y erosión de laderas asociadas a riadas. Geología y prevención de riesgos por inundaciones, Instituto Geológico y Minero de España, p. 117-192.
- Questionpro.com. 2019. Qué es SPSS y cómo utilizarlo. <https://www.questionpro.com/es/que-es-spss.html>
- Reid, M. E., Baum, R. L., lahusen, R. G., & Ellis, W. L. 2008. Capturing landslide dynamics and hydrologic triggers using near-real-time monitoring. *Landslides and engineered slopes*, 1, 179-191.
- Rivano, S., & Sepúlveda, P. 1991. Hoja Illapel. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Carta Geológica de Chile, Escala 1:250.000.
- Rivano, S. 1996. Geología de las Hojas Quillota y Portillo. Servicio Nacional de Geología y Minería (Informe Inédito).
- Schachter, P. 2008. Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en el sector nororiente de la Cuenca de Santiago mediante métodos estadísticos multivariados (memoria para optar al título de Geóloga). Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Segoni, S., Rossi, G., Rosi, A., & Catani, F. 2014a. Landslides triggered by rainfall: a semi-automated procedure to define consistent intensity–duration thresholds. *Computers & Geosciences*, 63, 123-131.
- Segoni, S., Rosi, A., Rossi, G., Catani, F., & Casagli, N. 2014b. Analysing the relationship between rainfalls and landslides to define a mosaic of triggering thresholds for regional-scale warning systems. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(9), 2637-2648.
- Selby, M.J., 1993. Hillslope materials and processes. Second Edition, Oxford University Press, 451 p.
- Sepúlveda, S.A., 1998. Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana.
- Sepúlveda, S. A., & Padilla, C. 2008. Rain-induced debris and mudflow triggering factors assessment in the Santiago cordilleran foothills, Central Chile. *Natural hazards*, 47(2), 201-215.
- Sepúlveda, N., Álvarez, J., Ramírez, P. 2017. Efectos geológicos del sistema frontal del 11 al 13 de Mayo de 2017, cuenca del Río Limarí, región de Coquimbo (INF-Coquimbo-05.2017)
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago
- SERNAGEOMIN, 2015. Primer catastro nacional desastres de naturales. <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Primer-Catastro-Nacional-Desastres-Naturales.pdf>
- SERNAGEOMIN, 2018. Catastro de remociones en masa a nivel nacional. <http://www.sernageomin.cl/peligrosgeologicos/> (última visita: 4 de marzo 2019).

Soto, M. V., Sarricolea, P., Sepúlveda, S. A., Rodolfi, G., Cabello, M., & Maerker, M. 2017. Assessment of hydro-geomorphological hazard potentials in the Chilean semiarid coastal range and its impacts on La Serena city, Coquimbo Region. *Natural Hazards*, 88(1), 431-452.

Subsecretaría de Economía y empresas de menor tamaño. 2017. Consultoría sobre dimensionamiento del mercado de desastres naturales: Impacto y tamaño en Chile y el mundo.

Vargas, G., Ortlieb, L. and Rutllant, J. 2000. Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista geológica de Chile* v.27 N°2.

Velásquez, R., Opazo, E. 2015. Efectos Geológicos del evento meteorológico del 24 y 25 de Marzo de 2015: Observaciones de remociones en masa en las comunas de Paihuano y Vicuña, Región de Coquimbo, Inf-Coquimbo-02, SERNAGEOMIN.

Wieczorek, G. F., 1996. Landslide Triggering Mechanisms in Landslides – Investigations and Mitigation. Special Report 247. A. K. Turner y R. L. Schuster, Editores. Transportation Research Board. National Research Council, National Academic Press, Washington, DC, USA, p.76-90.

Yagüe, A. G. 1978. Modern methods used in study of mass movements. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 17(1), 65-71.

## Anexos

### Anexo A: Catastro de remociones en masa en la Región de Coquimbo.

Punto	Tipo de remoción	Fecha evento	Comuna
RCOQ-1	Flujo	24 de marzo de 1992	Río Hurtado
RCOQ-3	Flujo	15 de Febrero de 2006	Paihuano
RCOQ-4	Flujo	24 y 25 de Marzo de 2015	Vicuña
RCOQ-5	Flujo	24 y 25 de Marzo de 2015	Vicuña
RCOQ-6	Flujo	24 y 25 de Marzo de 2015	Vicuña
RCOQ-7	Flujo	24 y 25 de Marzo de 2015	Vicuña
RCOQ-8	Flujo	24 y 25 de Marzo de 2015	Paihuano
RCOQ-9	Flujo	24 y 25 de Marzo de 2015	Paihuano
RCOQ-10	Flujo	24 y 25 de Marzo de 2015	Paihuano
RCOQ-11	Flujo	24 y 25 de Marzo de 2015	Vicuña
RCOQ-12	Flujo	24 y 25 de Marzo de 2015	Vicuña
RCOQ-13	Flujo	24 y 25 de Marzo de 2015	Monte Patria
RCOQ-14	Flujo	24 y 25 de Marzo de 2015	Vicuña
RCOQ-15	Flujo	23 de Abril de 2004	Vicuña
RCOQ-31	Flujo	11-13 de mayo 2017	Coquimbo
RCOQ-32	Flujo	11-13 de mayo 2017	Coquimbo
RCOQ-34	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Ovalle
RCOQ-35	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-36	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-37	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-38	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-39	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Paihuano
RCOQ-40	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Paihuano
RCOQ-41	Flujo	11-13 de mayo 2017	Paihuano
RCOQ-42	Flujo	11-13 de mayo 2017	Paihuano
RCOQ-43	Flujo	11-13 de mayo 2017	Paihuano
RCOQ-44	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-45	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-46	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Paihuano
RCOQ-47	Flujo	11-13 de mayo 2017	Paihuano
RCOQ-48	Flujo	11-13 de mayo 2017	Paihuano
RCOQ-49	Caída	11-13 de mayo 2017	Paihuano
RCOQ-50	Flujo	11-13 de mayo 2017	Paihuano
RCOQ-51	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-52	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-53	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-54	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña

RCOQ-55	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-56	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-57	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-58	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-59	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-60	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-61	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-62	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-63	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-64	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-65	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-66	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-67	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-68	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-69	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-70	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-71	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-72	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-73	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-74	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-75	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-76	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-77	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-78	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-79	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-80	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-81	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-82	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-83	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-84	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-85	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-86	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-87	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-88	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-89	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-90	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-91	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-92	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-93	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-94	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-95	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-96	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
RCOQ-97	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña

<b>RCOQ-98</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-99</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-100</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-101</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-102</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-103</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-104</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-105</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-106</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-107</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-108</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-109</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-110</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-111</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-112</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-113</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Vicuña
<b>RCOQ-117</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Higuera
<b>RCOQ-118</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Higuera
<b>RCOQ-120</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Higuera
<b>RCOQ-121</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	La Serena
<b>RCOQ-123</b>	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Ovalle
<b>RCOQ-124</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Paihuano
<b>RCOQ-125</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña
<b>RCOQ-126</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña
<b>RCOQ-127</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña
<b>RCOQ-128</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña
<b>RCOQ-129</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Paihuano
<b>RCOQ-130</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Paihuano
<b>RCOQ-131</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Paihuano
<b>RCOQ-132</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña
<b>RCOQ-133</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña
<b>RCOQ-134</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña
<b>RCOQ-135</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Paihuano
<b>RCOQ-136</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña
<b>RCOQ-137</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña
<b>RCOQ-138</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña
<b>RCOQ-139</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Paihuano
<b>RCOQ-140</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Paihuano
<b>RCOQ-141</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Paihuano
<b>RCOQ-142</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Paihuano
<b>RCOQ-143</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Paihuano
<b>RCOQ-144</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña
<b>RCOQ-145</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña

<b>RCOQ-146</b>	Flujo	24-25 de marzo 2015	Vicuña
<b>RCOQ-148</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-149</b>	Caída	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-150</b>	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-151</b>	Caída	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-152</b>	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-153</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-154</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-155</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-156</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-157</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-158</b>	Caída	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-159</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-160</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-161</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-162</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-163</b>	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-164</b>	Caída	11-13 de mayo 2017	Punitaqui
<b>RCOQ-165</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Punitaqui
<b>RCOQ-166</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Punitaqui
<b>RCOQ-167</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Punitaqui
<b>RCOQ-168</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Punitaqui
<b>RCOQ-169</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Punitaqui
<b>RCOQ-170</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Punitaqui
<b>RCOQ-171</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-172</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Combarbalá
<b>RCOQ-173</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-174</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-175</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-176</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-177</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-178</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-179</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Monte Patria
<b>RCOQ-180</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Combarbalá
<b>RCOQ-181</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Combarbalá
<b>RCOQ-182</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Combarbalá
<b>RCOQ-183</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Combarbalá
<b>RCOQ-184</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Combarbalá
<b>RCOQ-185</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Combarbalá
<b>RCOQ-186</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Combarbalá
<b>RCOQ-187</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Canela
<b>RCOQ-188</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Canela
<b>RCOQ-189</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Canela

<b>RCOQ-190</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Canela
<b>RCOQ-191</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Canela
<b>RCOQ-192</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Canela
<b>RCOQ-193</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Canela
<b>RCOQ-194</b>	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Illapel
<b>RCOQ-195</b>	Caída	11-13 de mayo 2017	Illapel
<b>RCOQ-196</b>	Caída	11-13 de mayo 2017	Illapel
<b>RCOQ-197</b>	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Illapel
<b>RCOQ-198</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Illapel
<b>RCOQ-199</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Illapel
<b>RCOQ-200</b>	Caída	11-13 de mayo 2017	Illapel
<b>RCOQ-201</b>	Deslizamiento	11-13 de mayo 2017	Illapel
<b>RCOQ-202</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Illapel
<b>RCOQ-203</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Illapel
<b>RCOQ-204</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Illapel
<b>RCOQ-205</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Illapel
<b>RCOQ-206</b>	Flujo	11-13 de mayo 2017	Salamanca
<b>RCOQ-207</b>	Caída	11-13 de mayo 2017	Salamanca
<b>113</b>	Flujo	18 de junio 1997	Vicuña
<b>115</b>	Caída de roca	15 de enero 2000	Vicuña
<b>118</b>	Deslizamiento	6 de junio 2011	La Serena
<b>232</b>	Flujo	26 de junio 2017	Vicuña
<b>235</b>	Flujo	26 de junio 2017	Vicuña

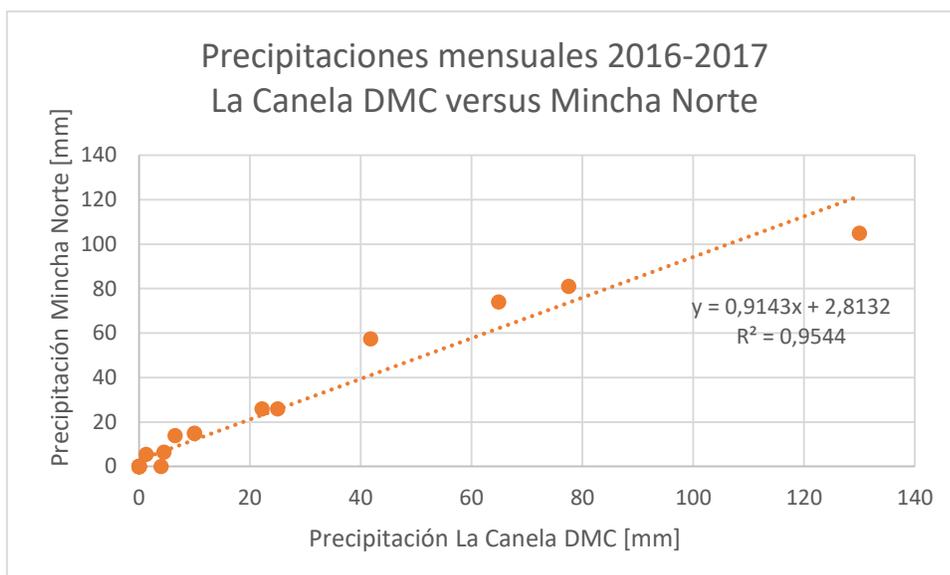
**Anexo B:** Datos disponibles para cada evento.

Evento	Fuente	Datos disponibles dentro del radio de 30 km	Estaciones con datos
24 de marzo 1992	DGA	Pp mensuales	3
		Pp diaria mes del evento	2
		PP antecedente	2
	CEAZA	Pp diaria mes del evento	-
		Pp por hora día del evento	-

18 de junio 1997	DGA	Pp mensuales	2
		Pp diaria mes del evento	2
		PP antecedente	2
	CEAZA	Pp diaria mes del evento	-
		Pp por hora día del evento	-

Evento	Fuente	Datos disponibles dentro del radio de 30 km	Estaciones con datos
23 de abril 2004	DGA	Pp mensuales	7
		Pp diaria mes del evento	7
		PP antecedente	7
	CEAZA	Pp diaria mes del evento	1
		Pp por hora día del evento	1
15 de febrero 2006	DGA	Pp mensuales	6
		Pp diaria mes del evento	6
		PP antecedente	6
	CEAZA	Pp diaria mes del evento	-
		Pp por hora día del evento	-
24 de marzo 2015	DGA	Pp mensuales	13
		Pp diaria mes del evento	13
		PP antecedente	13
	CEAZA	Pp diaria mes del evento	6
		Pp por hora día del evento	6
11 de mayo 2017	DGA	Pp mensuales	33
		Pp diaria mes del evento	32
		PP antecedente	32
	CEAZA	Pp diaria mes del evento	14
		Pp por hora día del evento	14
26 de junio 2017	DGA	Pp mensuales	7
		Pp diaria mes del evento	6
		PP antecedente	6
	CEAZA	Pp diaria mes del evento	3
		Pp por hora día del evento	3

**Anexo C:** Ejemplo de regresión lineal para completar series de precipitación.



En este caso la precipitación mensual de la estación Mincha Norte puede ser calculada en base a los datos de la estación La Canela DMC por medio de la siguiente relación:

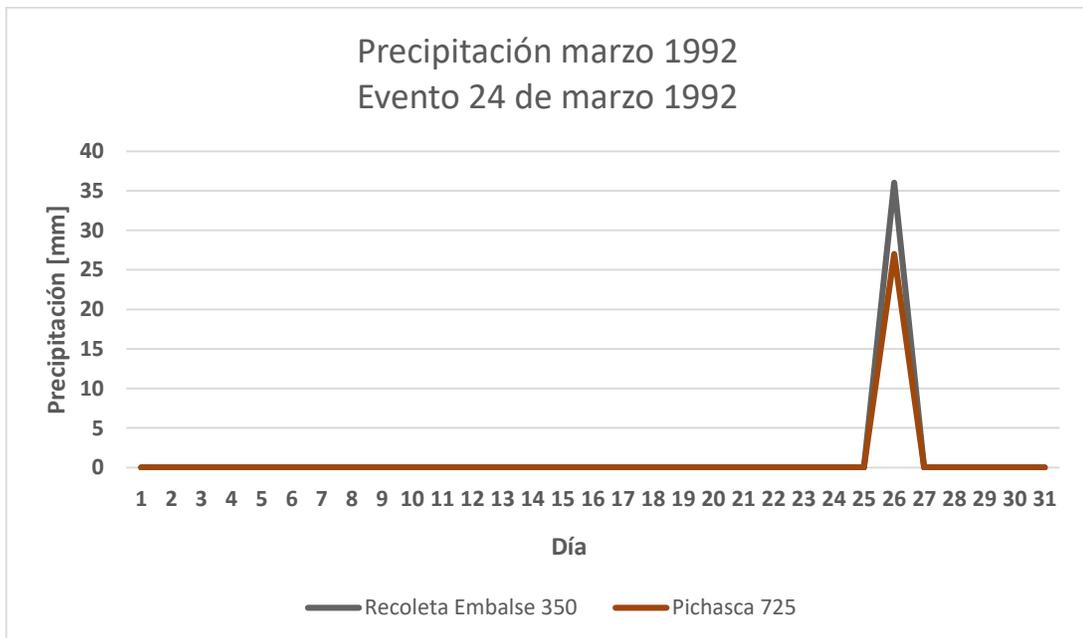
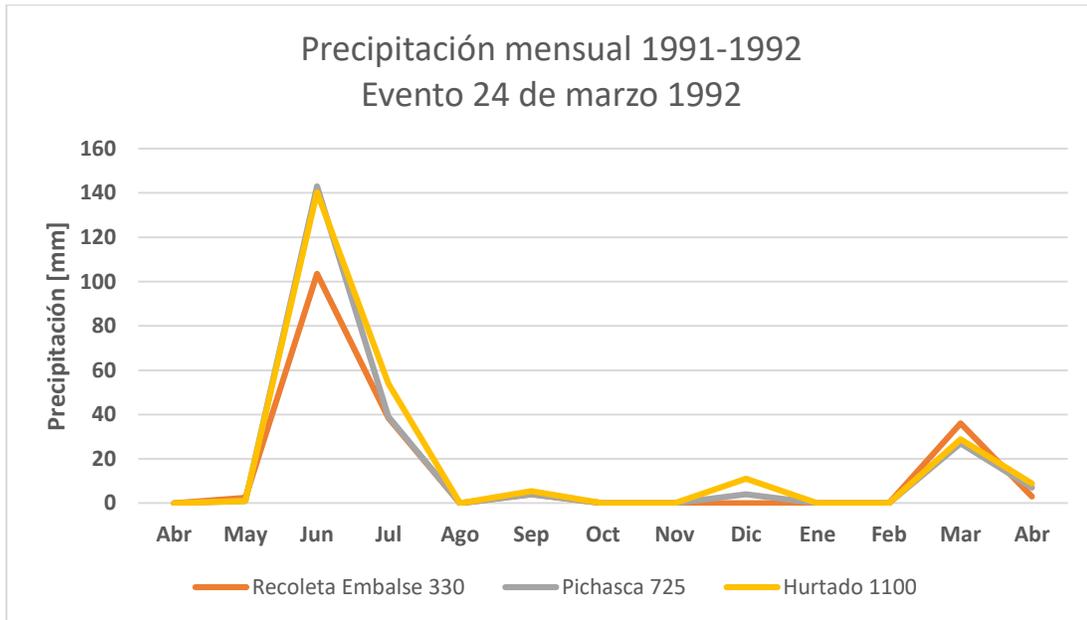
$$y = 0,9143x + 2,8132$$

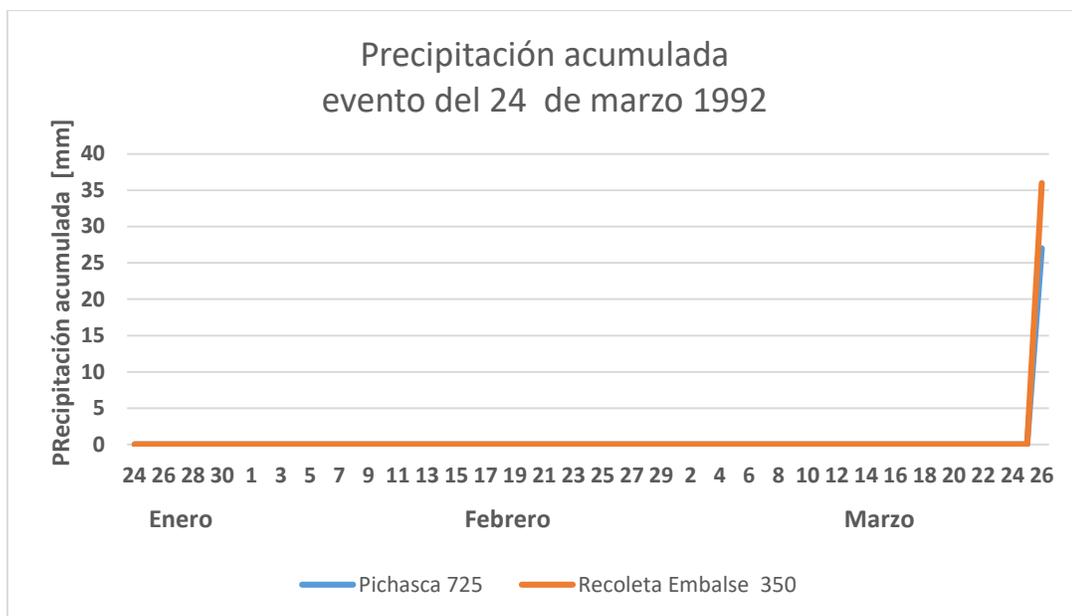
Donde “y” corresponde a la precipitación mensual de Mincha Norte y “x” corresponde a la precipitación mensual de La Canela DMC.

## Anexo D: Gráficos de precipitación.

### Evento 24 de marzo 1992

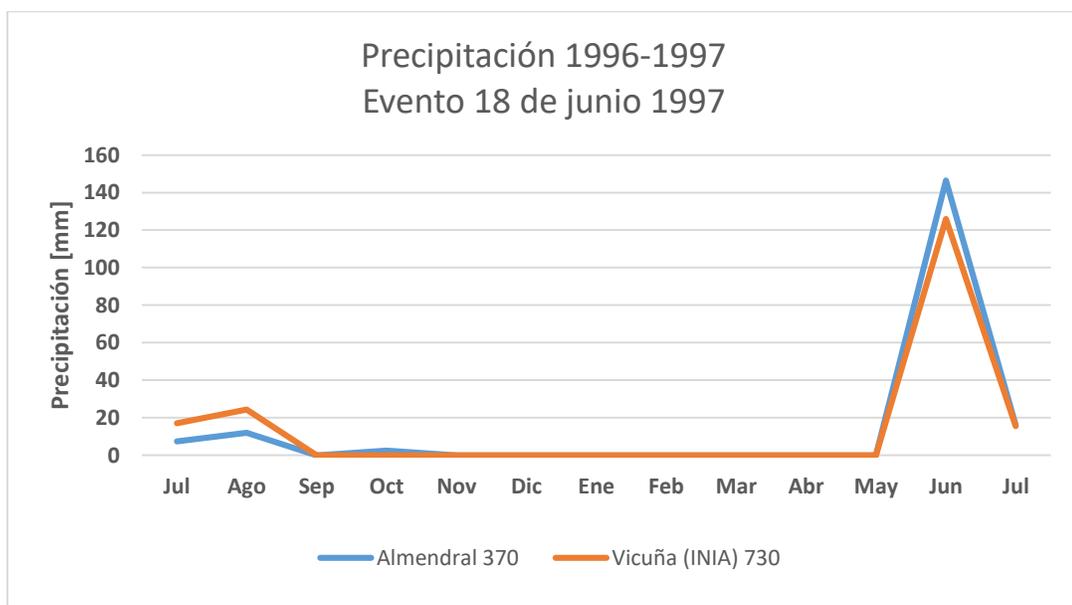
Los gráficos asociados a esta fecha corresponden únicamente a datos de la DGA.

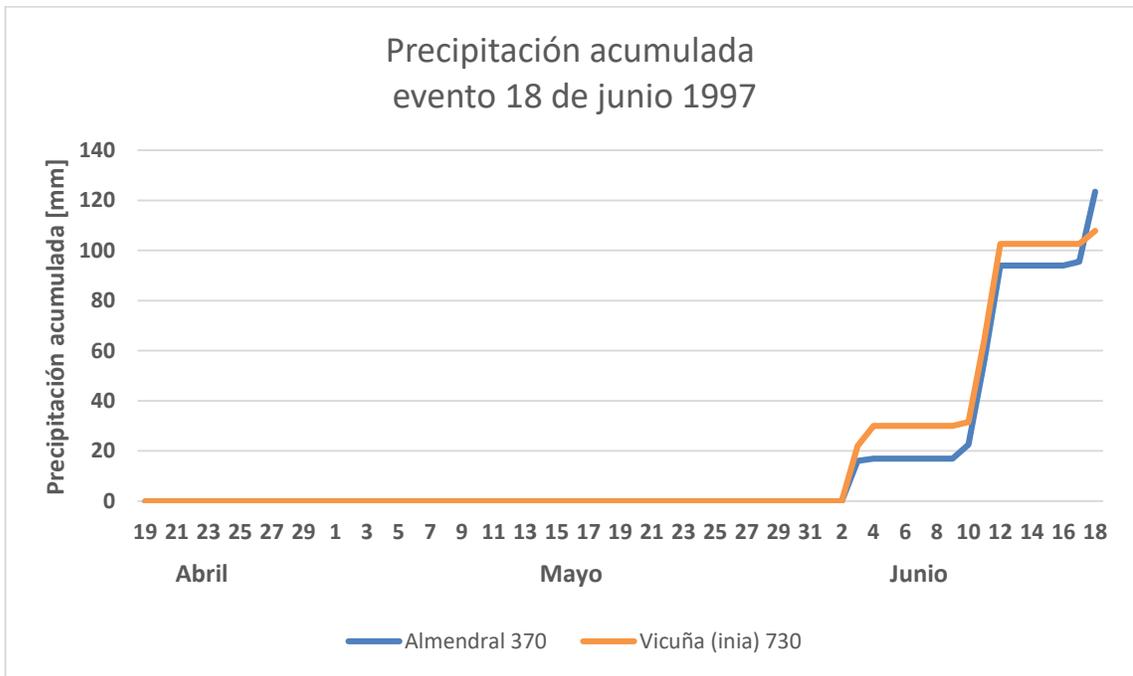
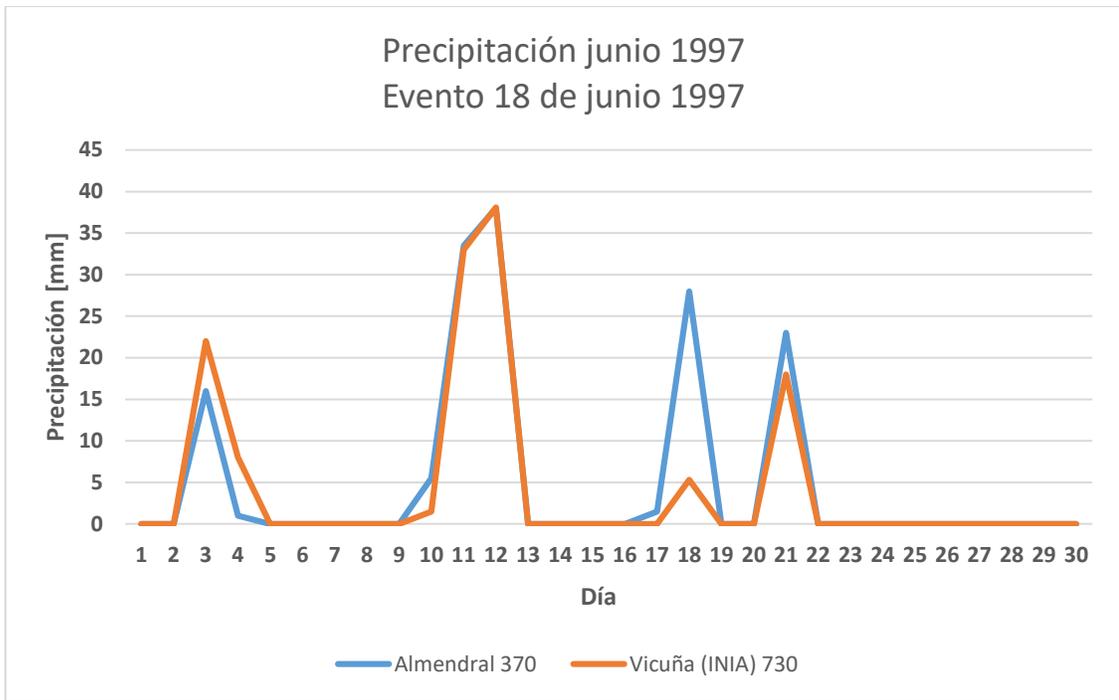




### Evento 18 de junio 1997

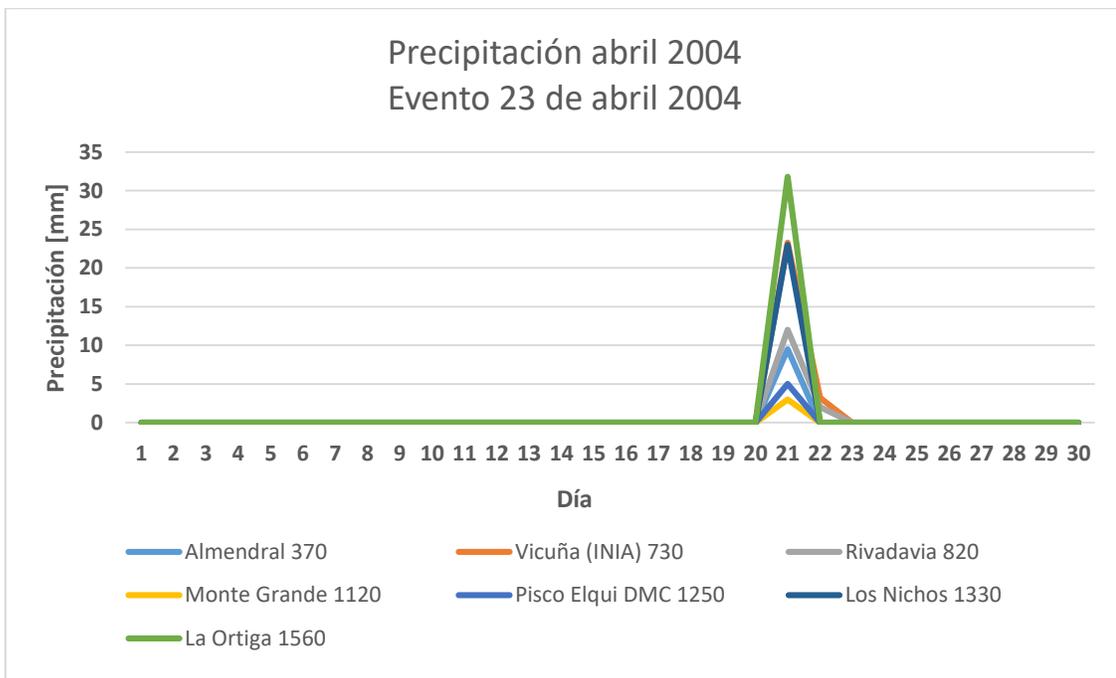
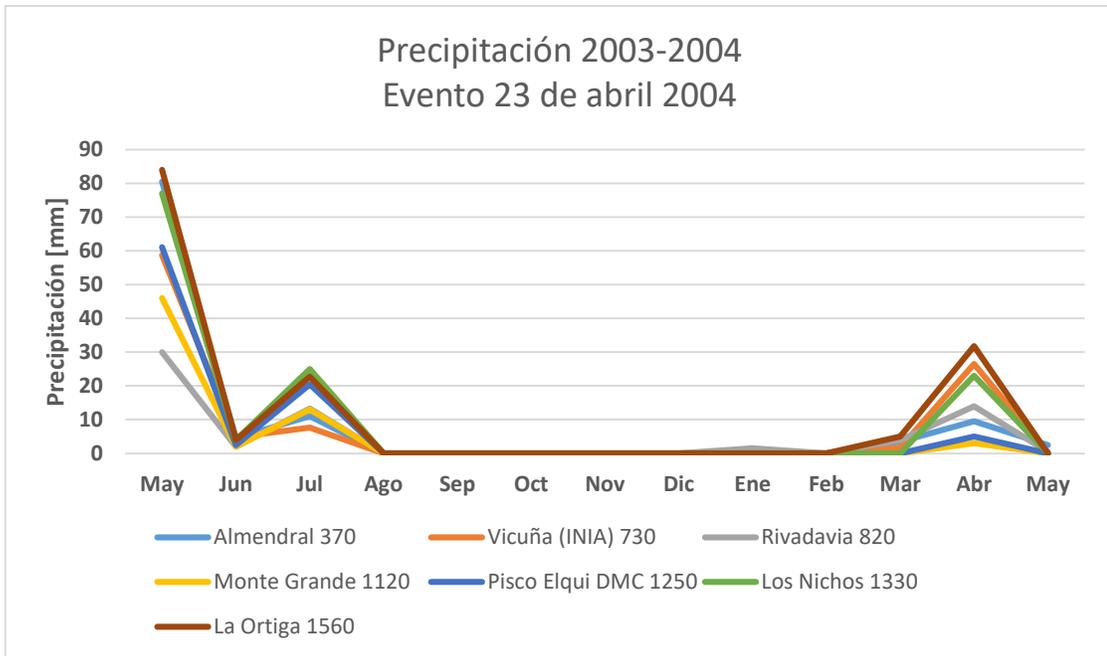
Los gráficos asociados a esta fecha corresponden únicamente a datos de la DGA.

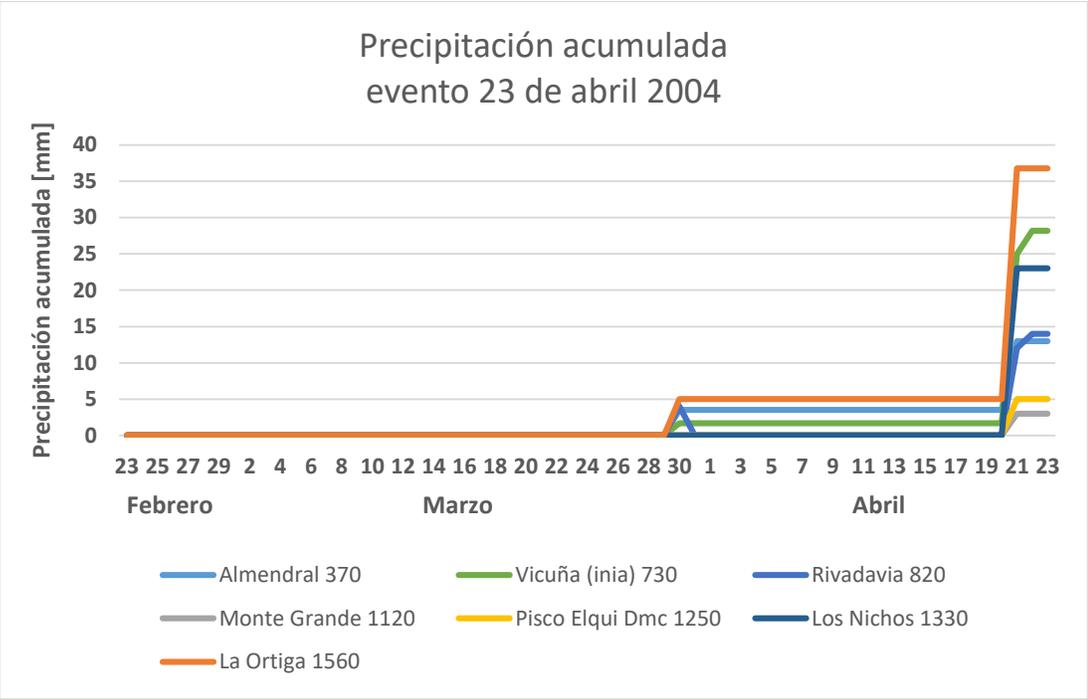




### Evento 23 de abril 2004

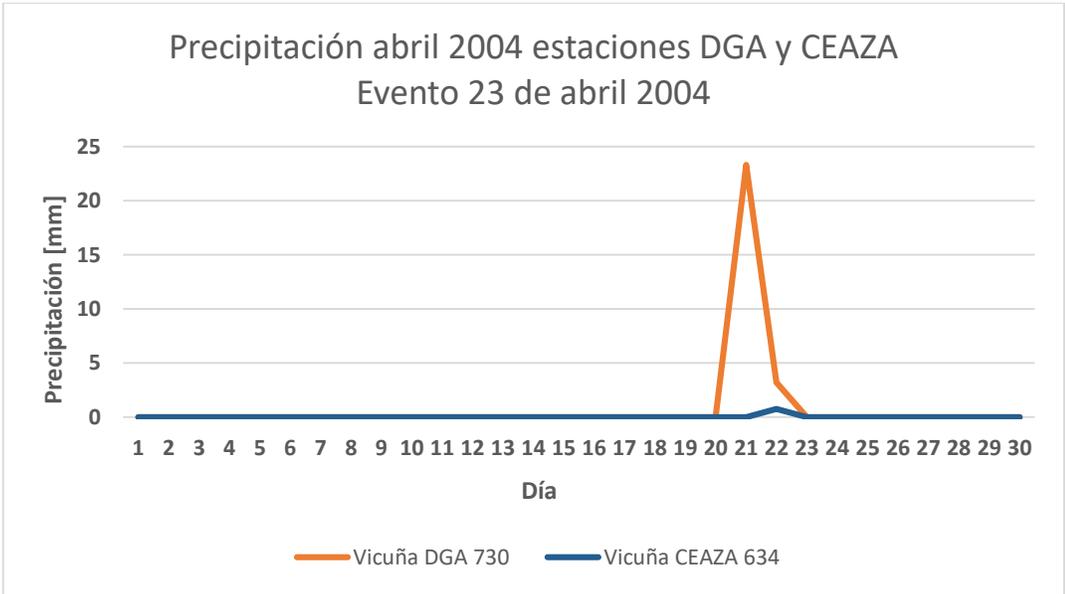
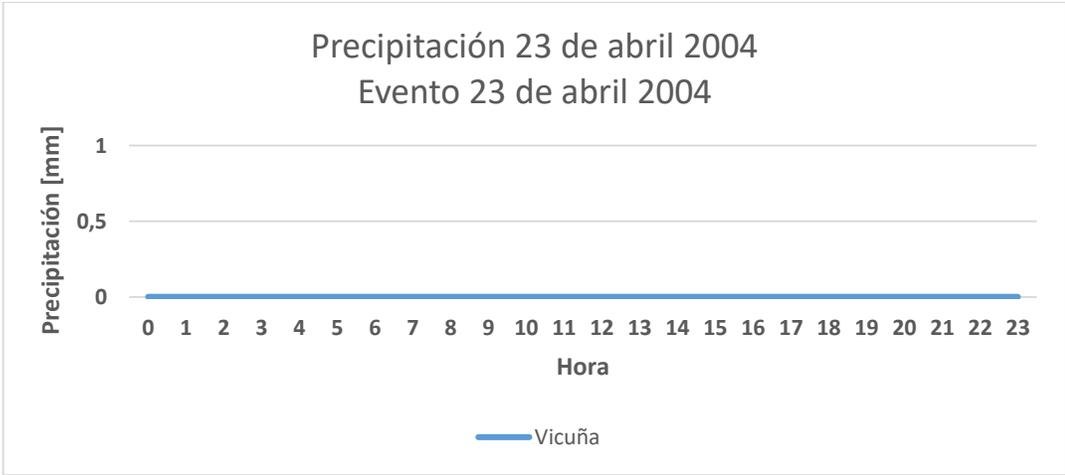
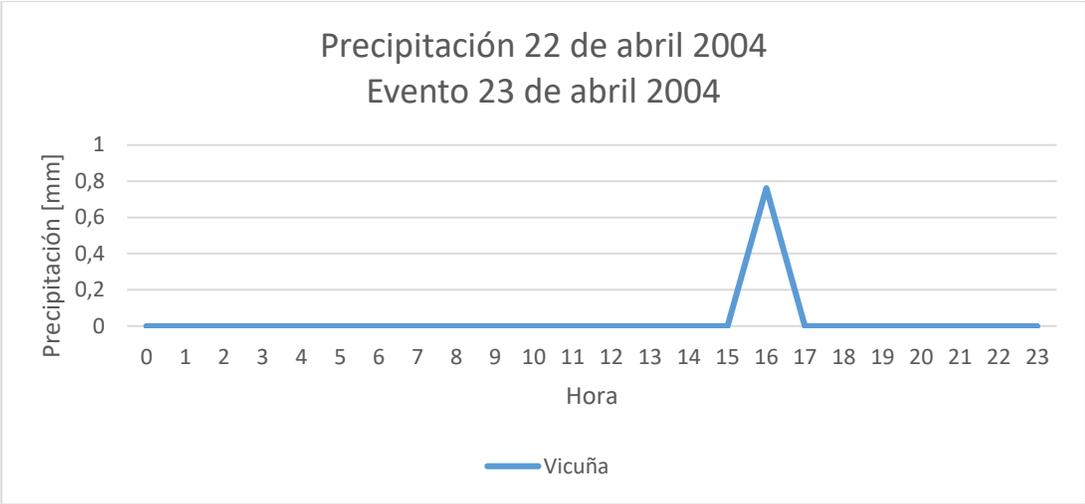
Los gráficos asociados a esta fecha corresponden a información de la DGA y CEAZA. En primer lugar se presentan los gráficos asociados a la información de la DGA.





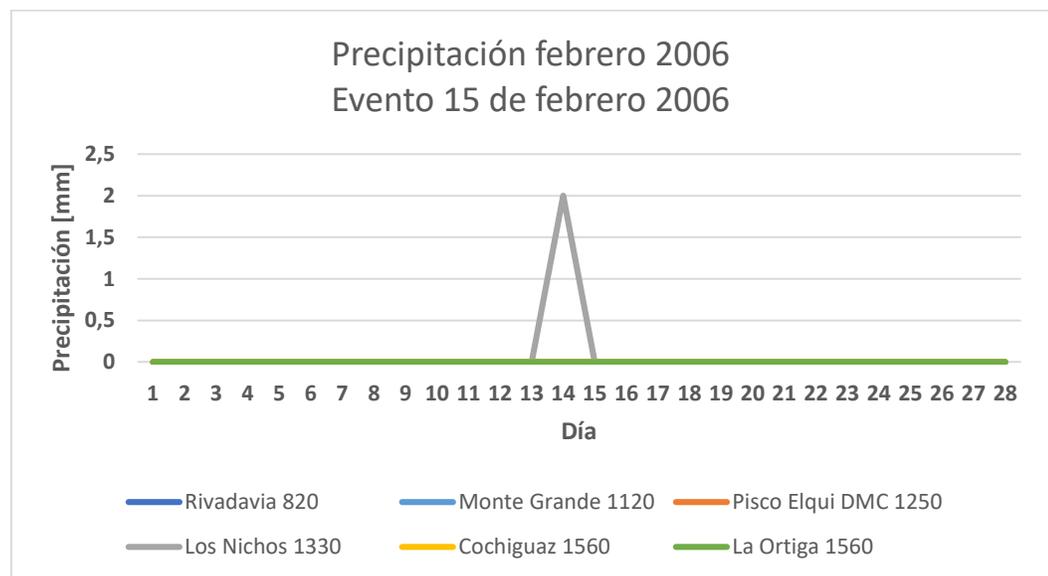
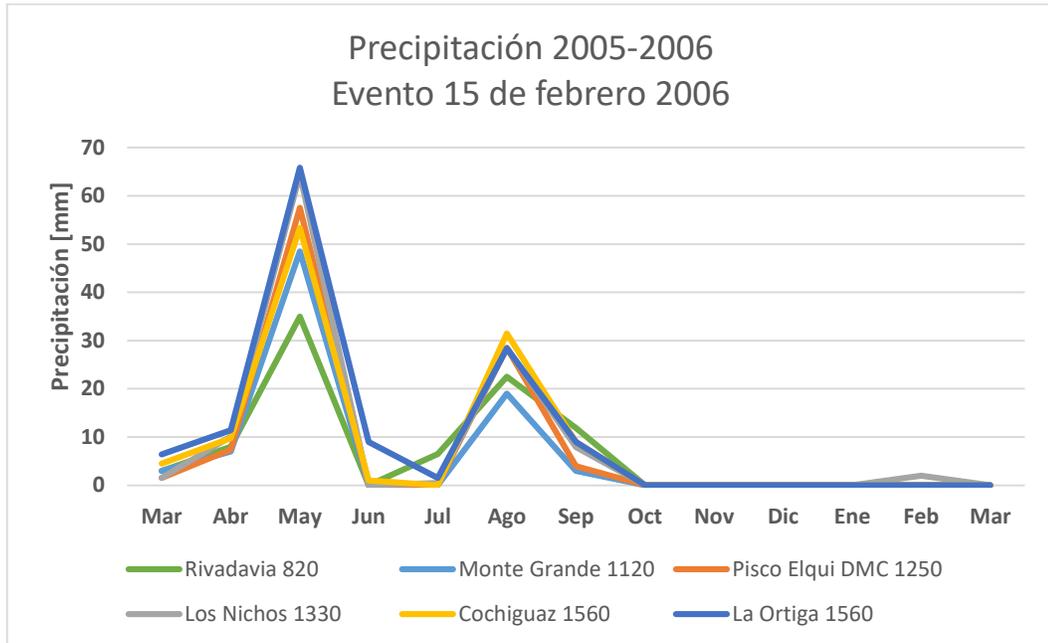
Los gráficos a continuación corresponden a información de CEAZA.

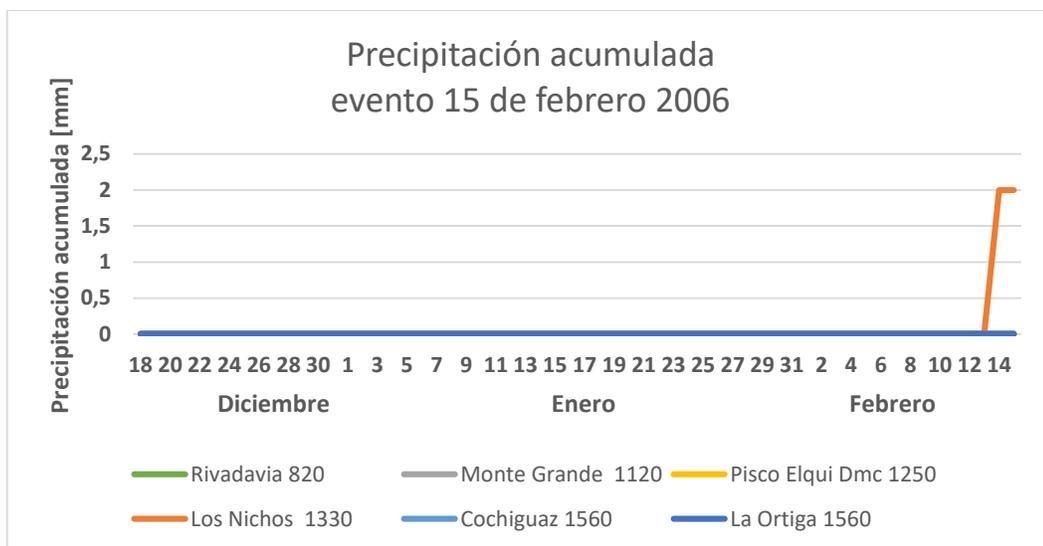




## Evento 15 de febrero 2006

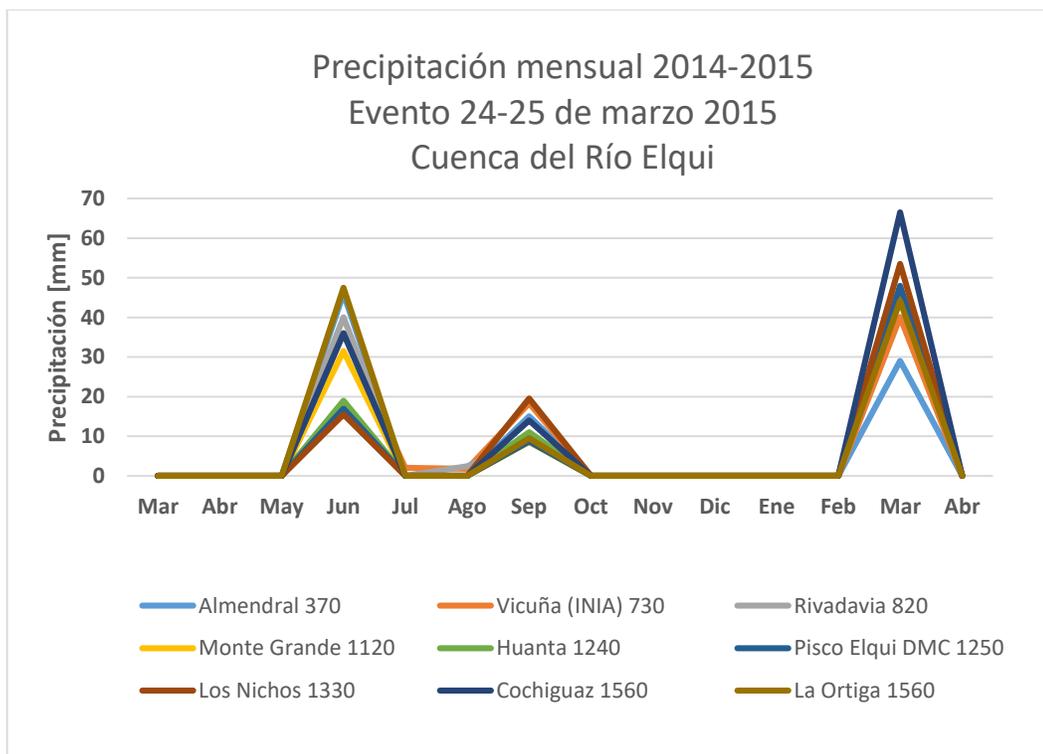
Los gráficos asociados a esta fecha corresponden únicamente a datos de la DGA.



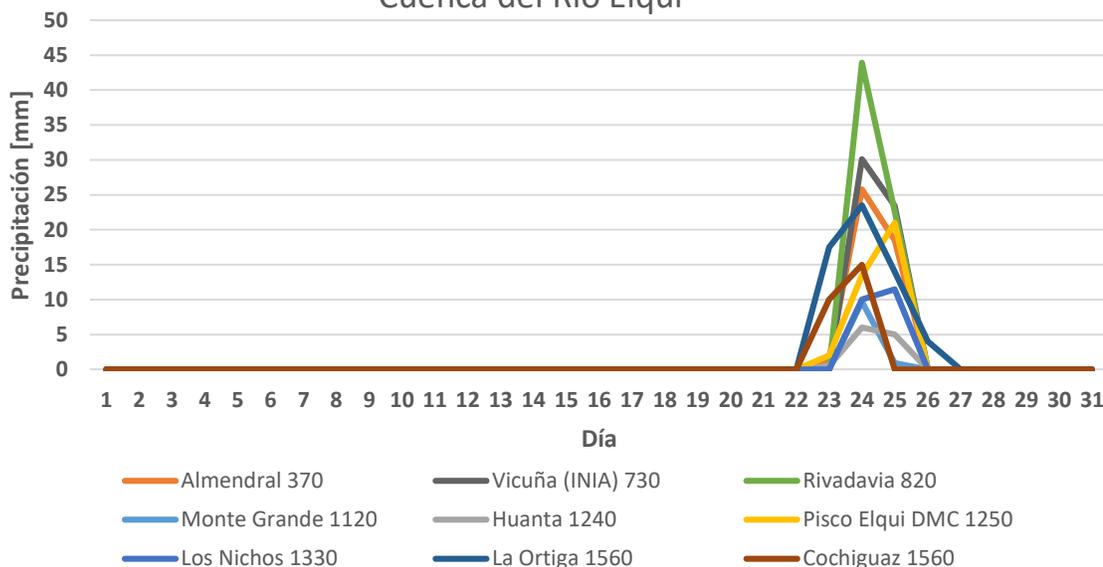


Evento 24-25 de marzo 2015

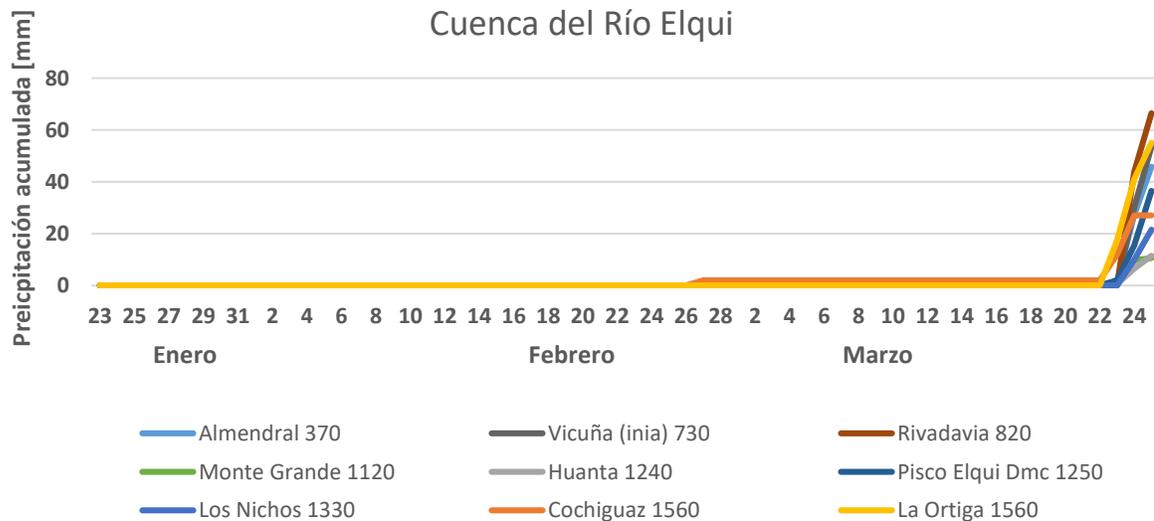
Los gráficos asociados a esta fecha corresponden a información de la DGA y CEAZA. En primer lugar se presentan los gráficos asociados a la información de la DGA. Los gráficos se dividieron en zona norte y zona sur para facilitar la visualización de la información.

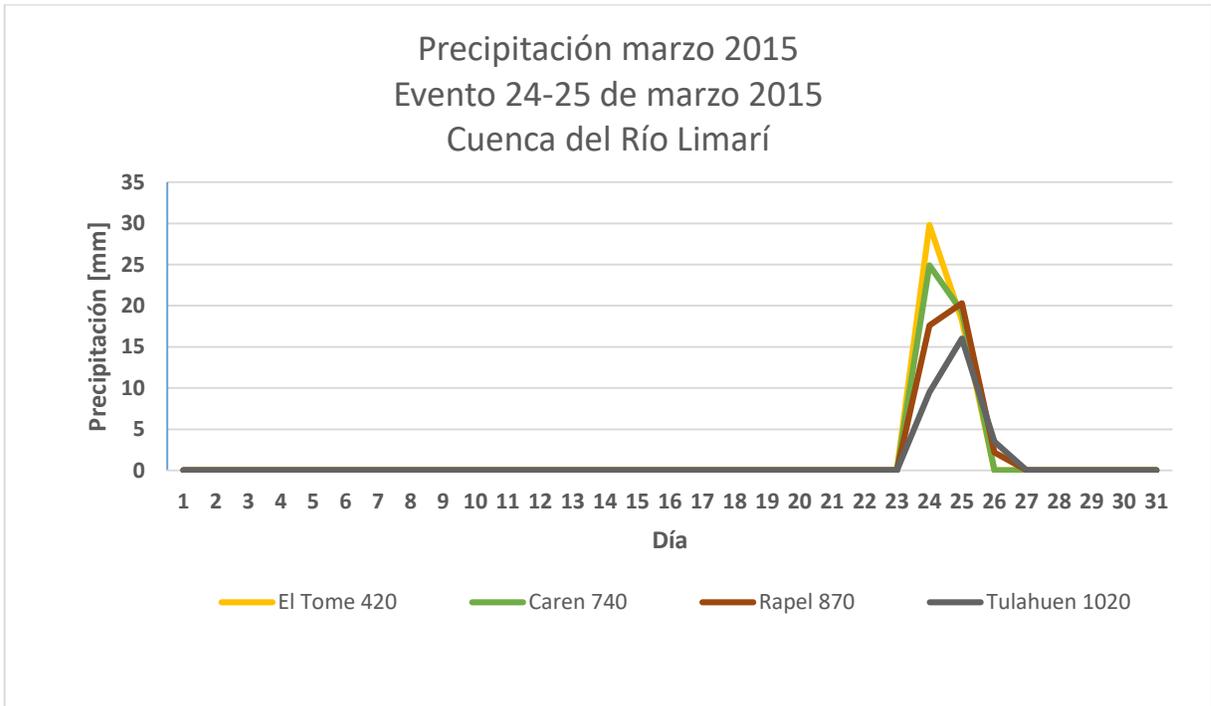
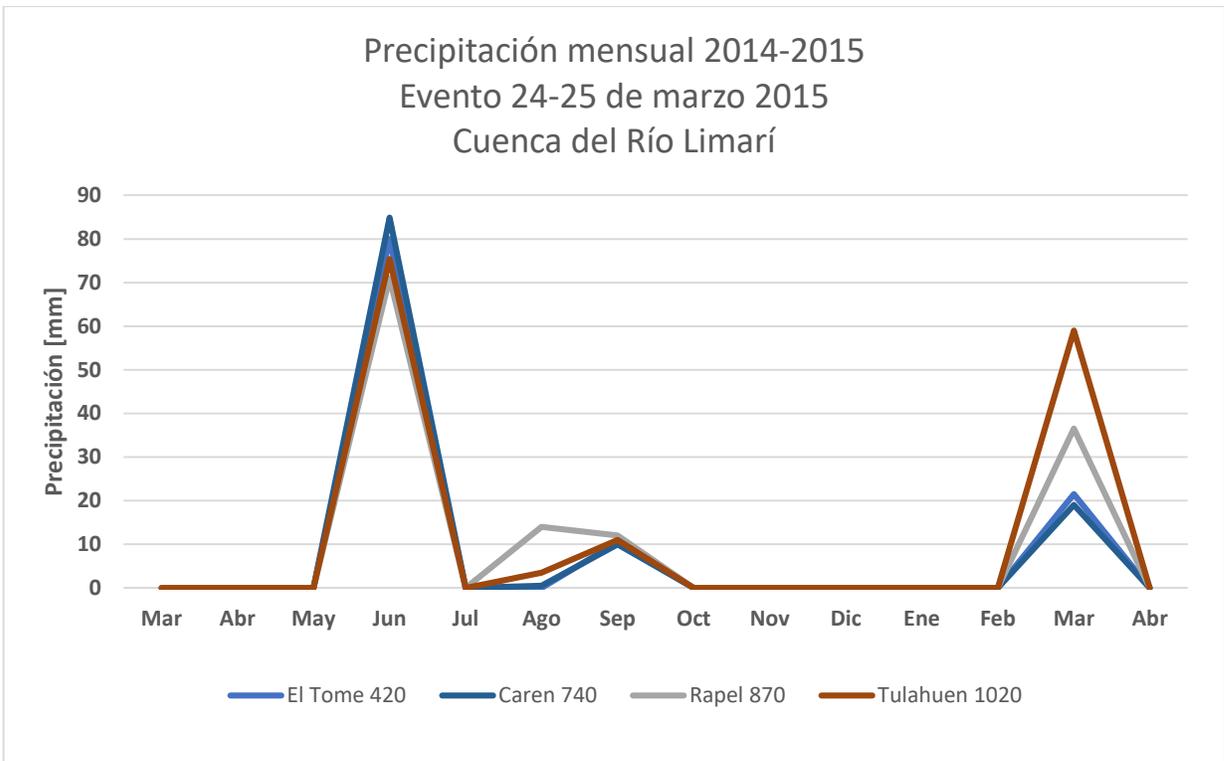


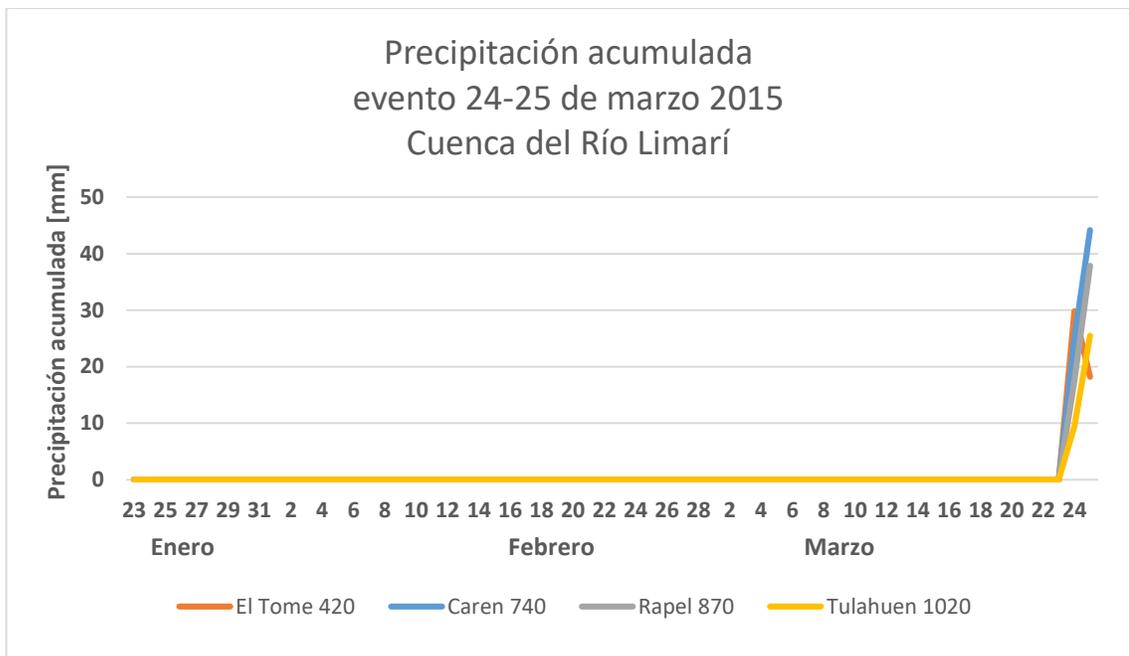
### Precipitación marzo 2015 Evento 24-25 de marzo 2015 Cuenca del Río Elqui



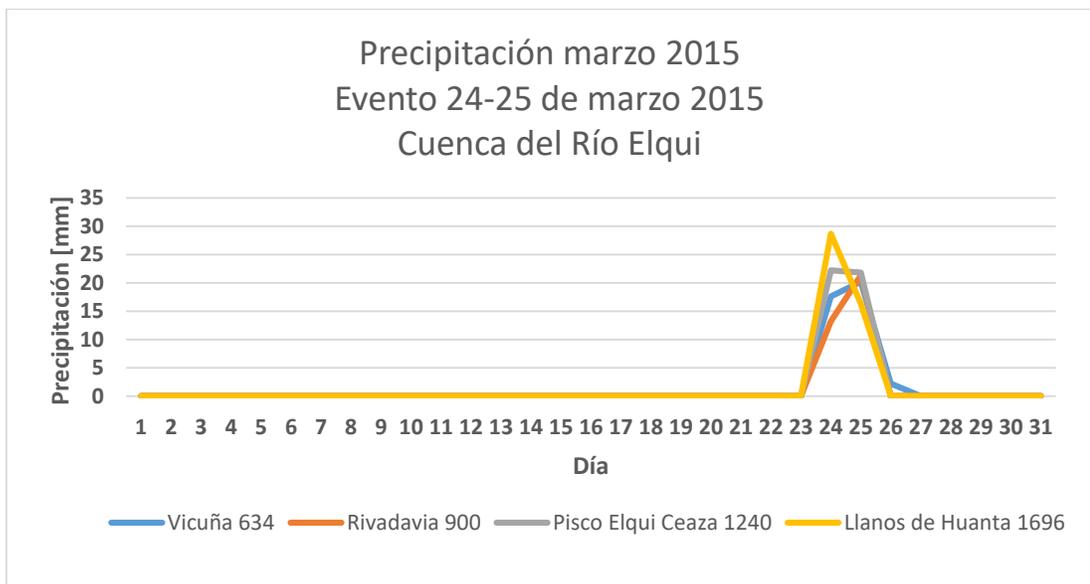
### Precipitación acumulada evento 24-25 de marzo 2015 Cuenca del Río Elqui



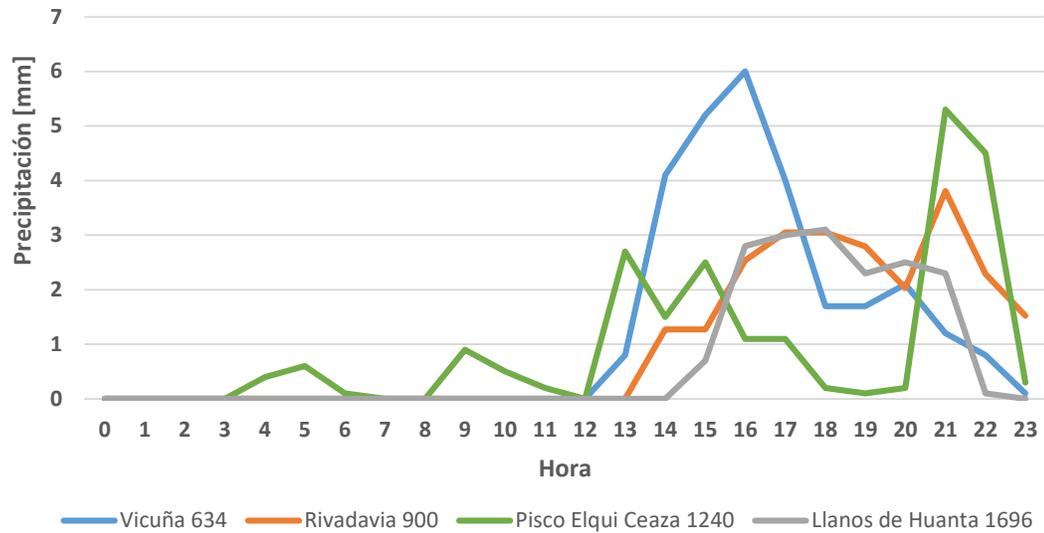




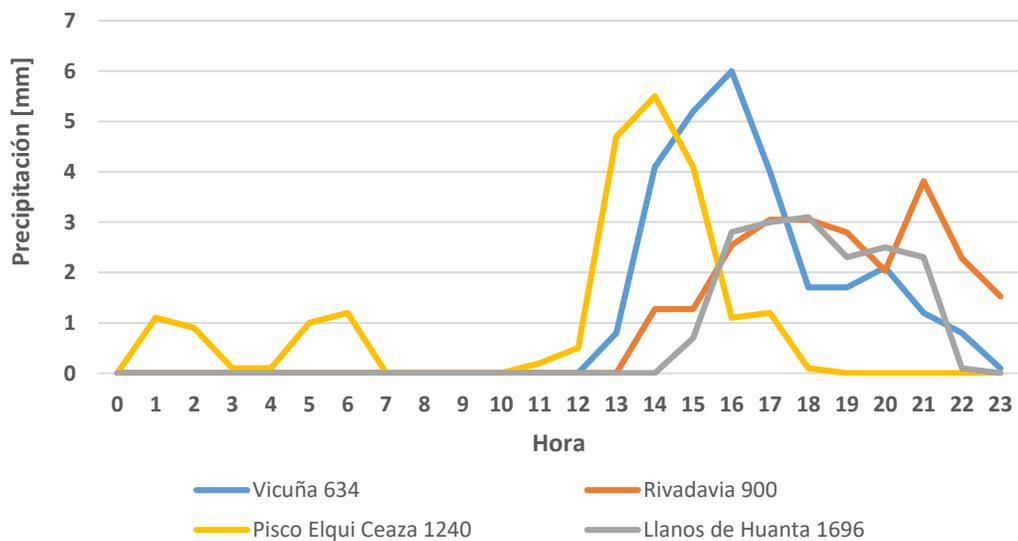
Los gráficos a continuación corresponden a información de CEAZA.

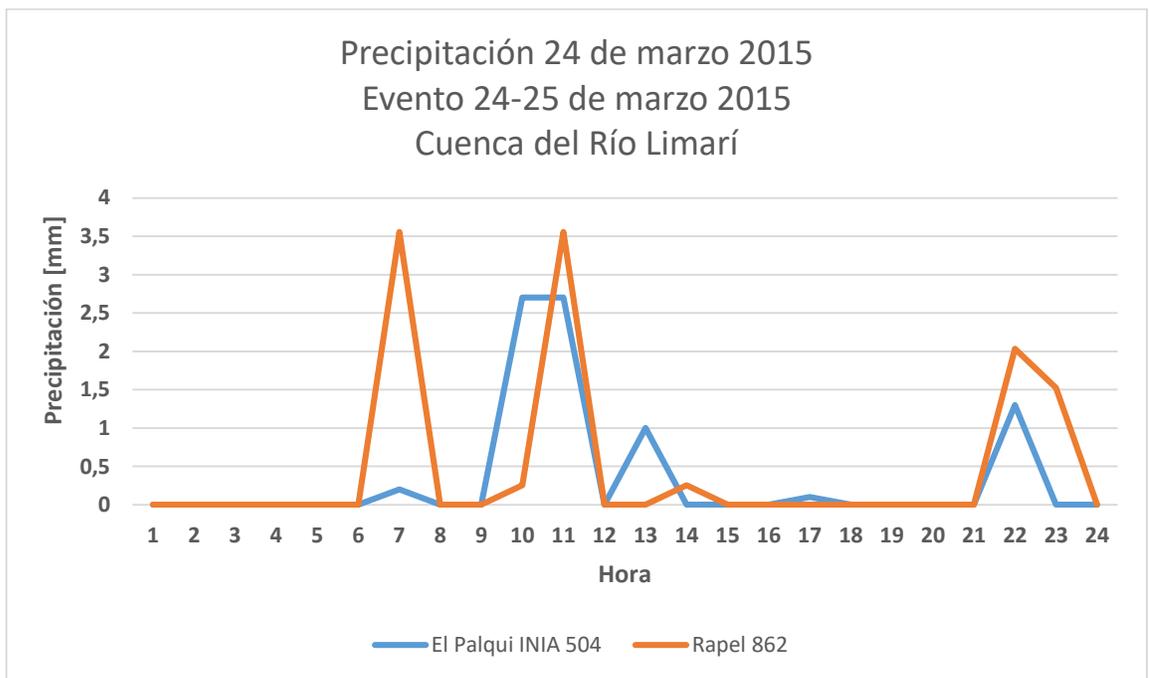
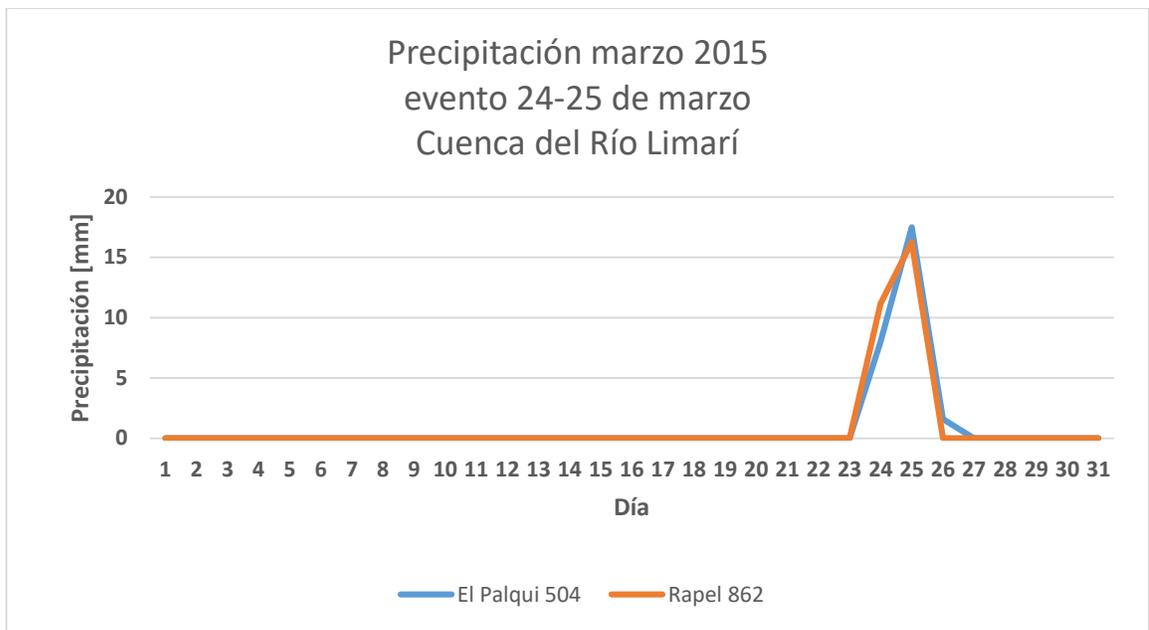


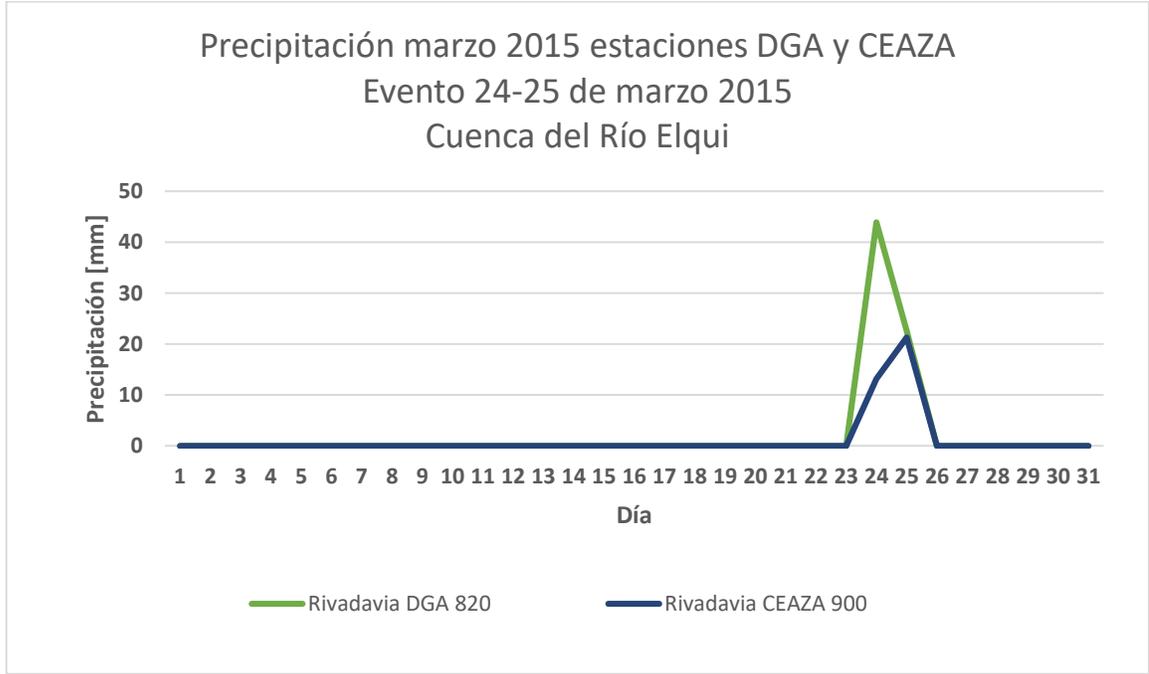
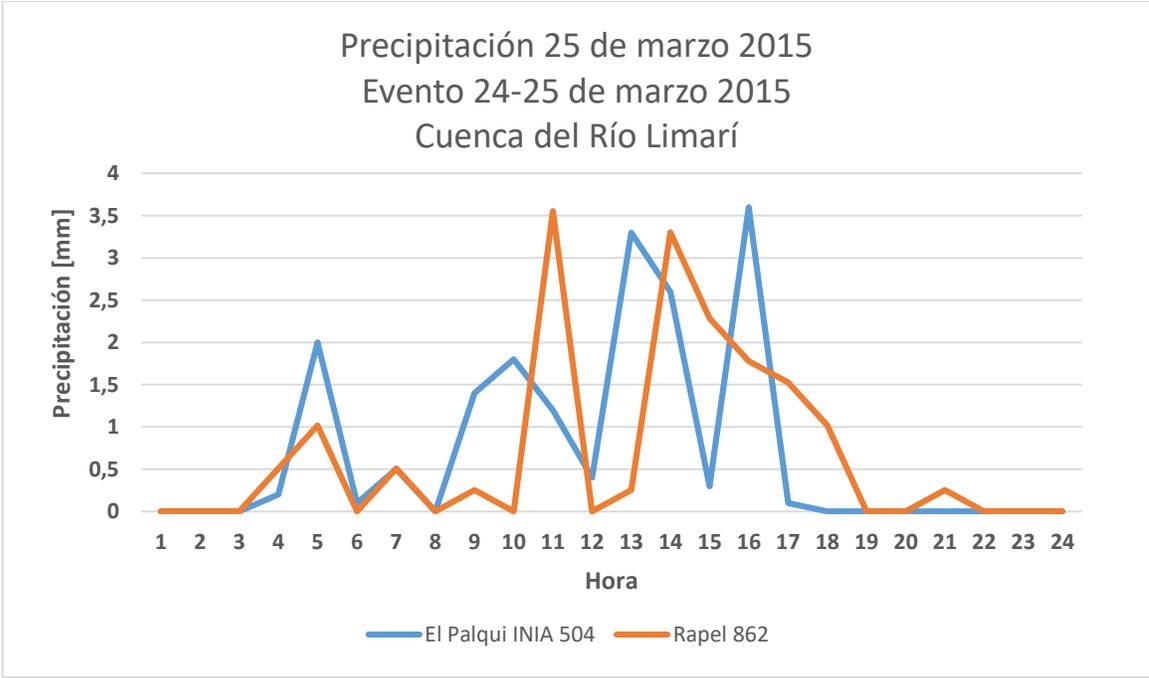
Precipitación 24 de marzo 2015  
 Evento 24-25 de marzo 2015  
 Cuenca del Río Elqui

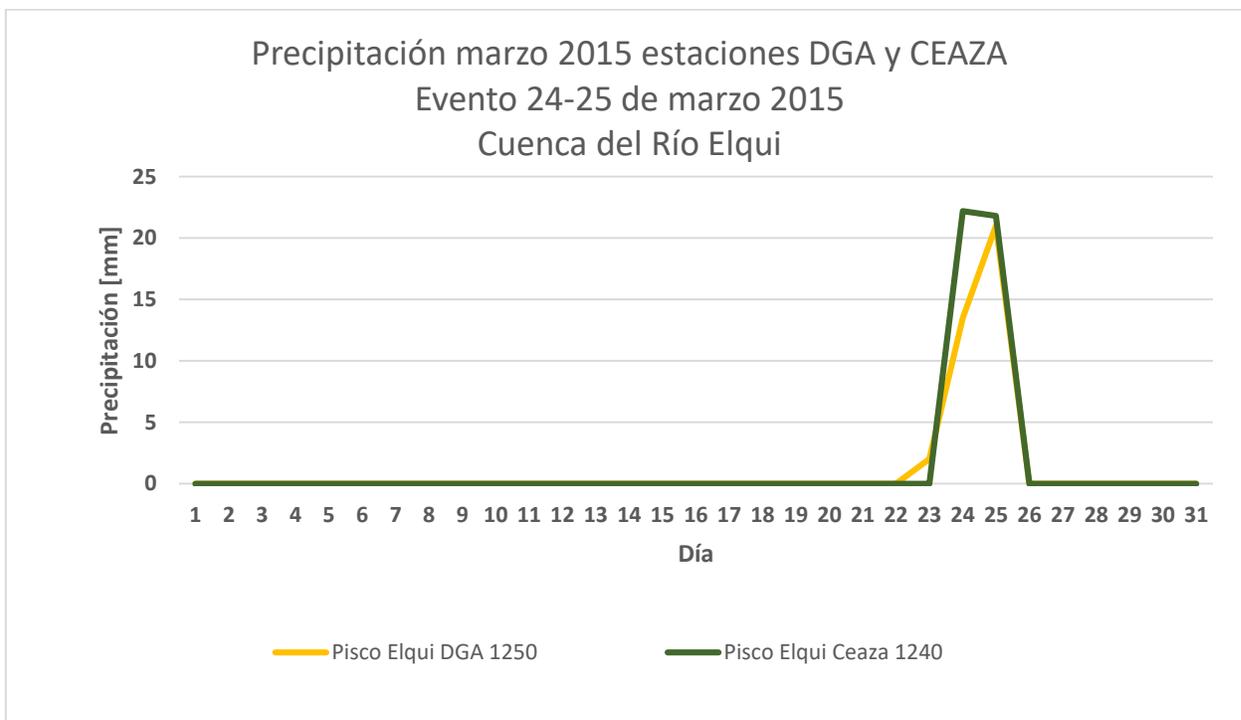
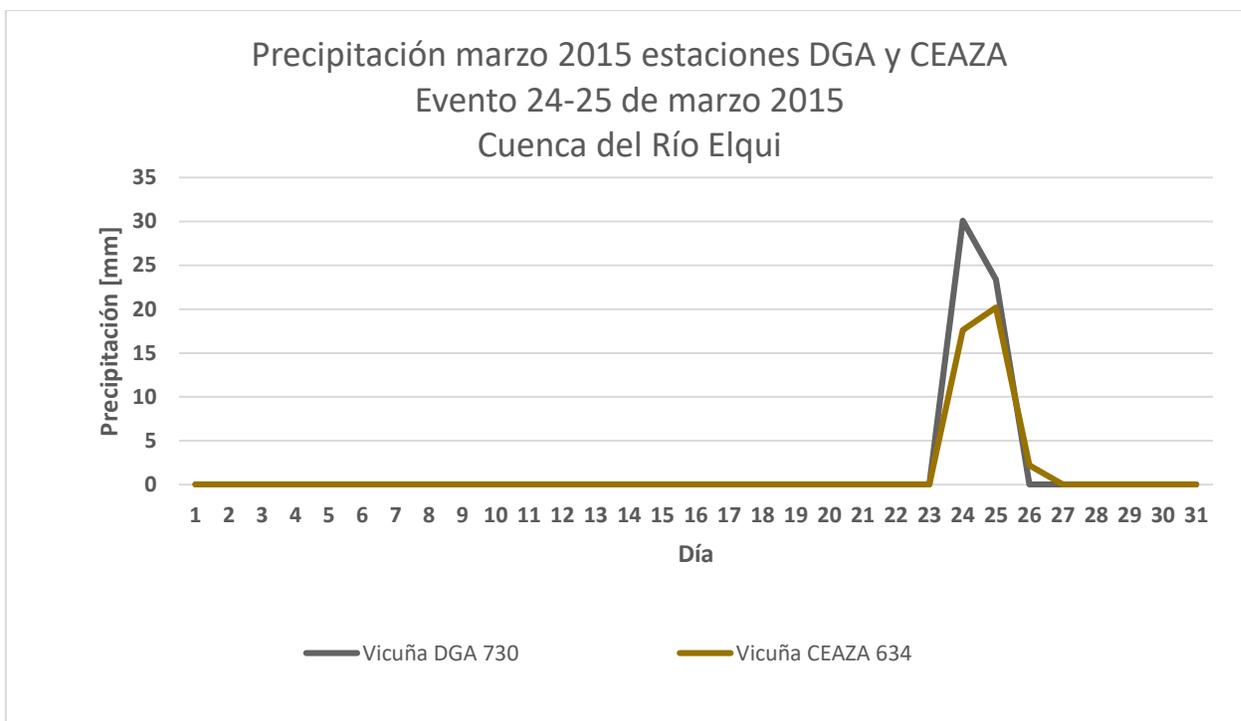


Precipitación 25 de marzo 2015  
 Evento 24-25 de marzo 2015  
 Cuenca del Río Elqui



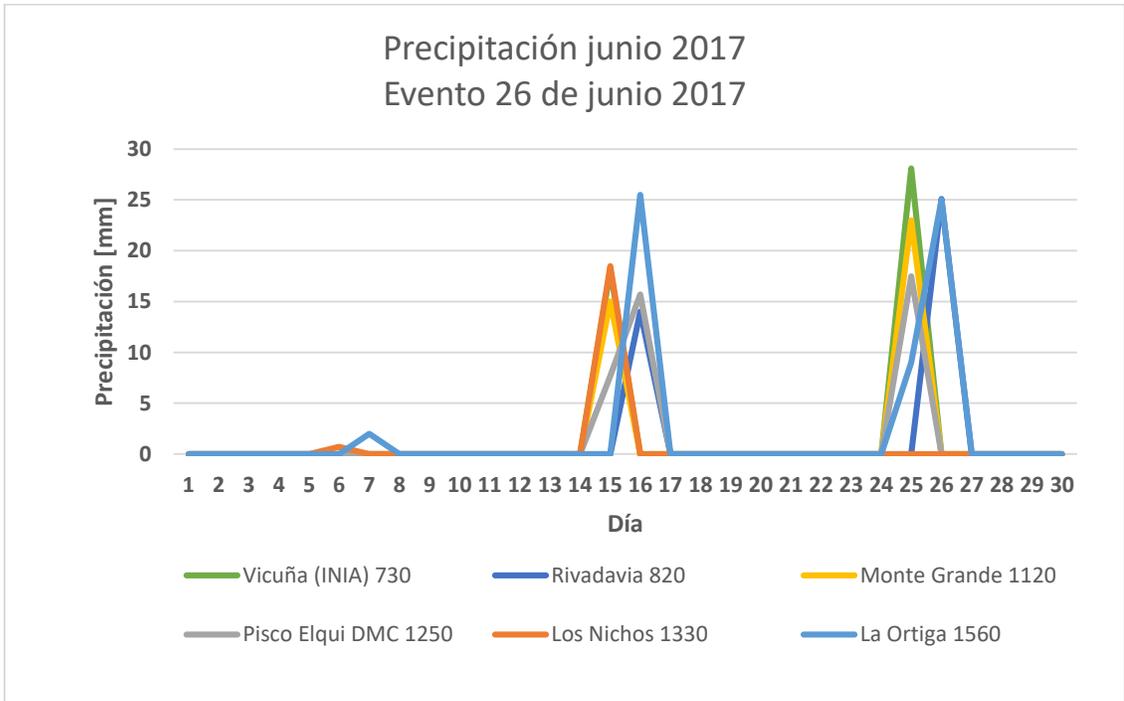
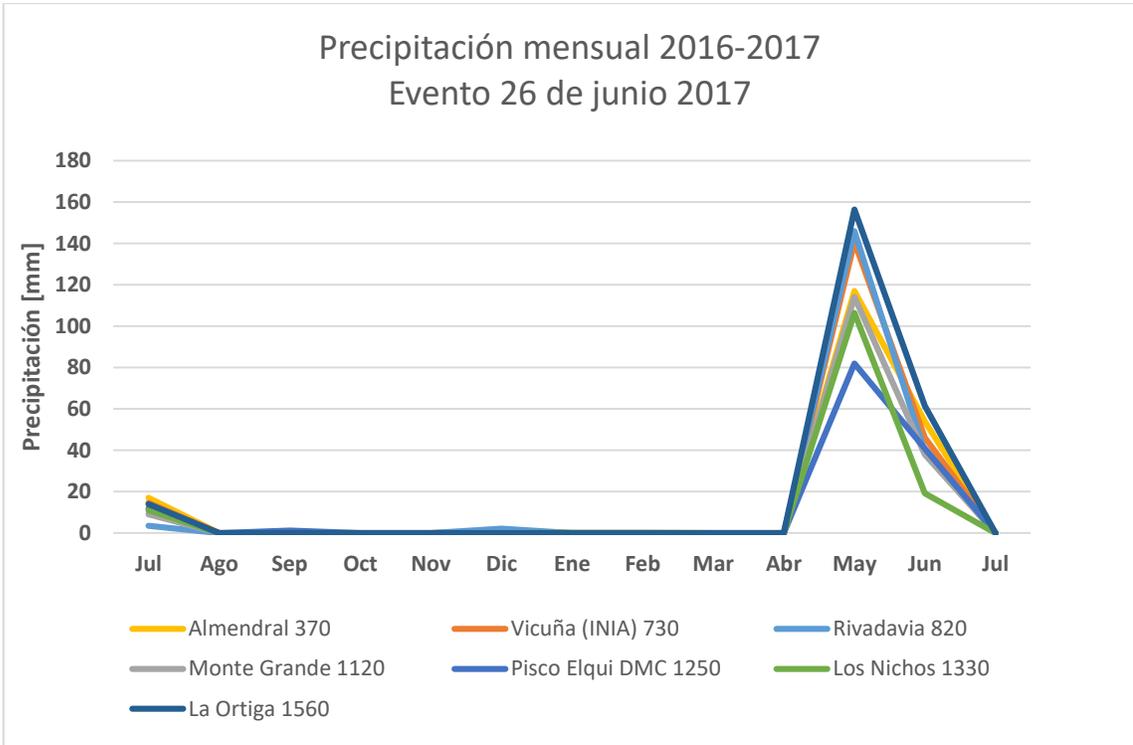


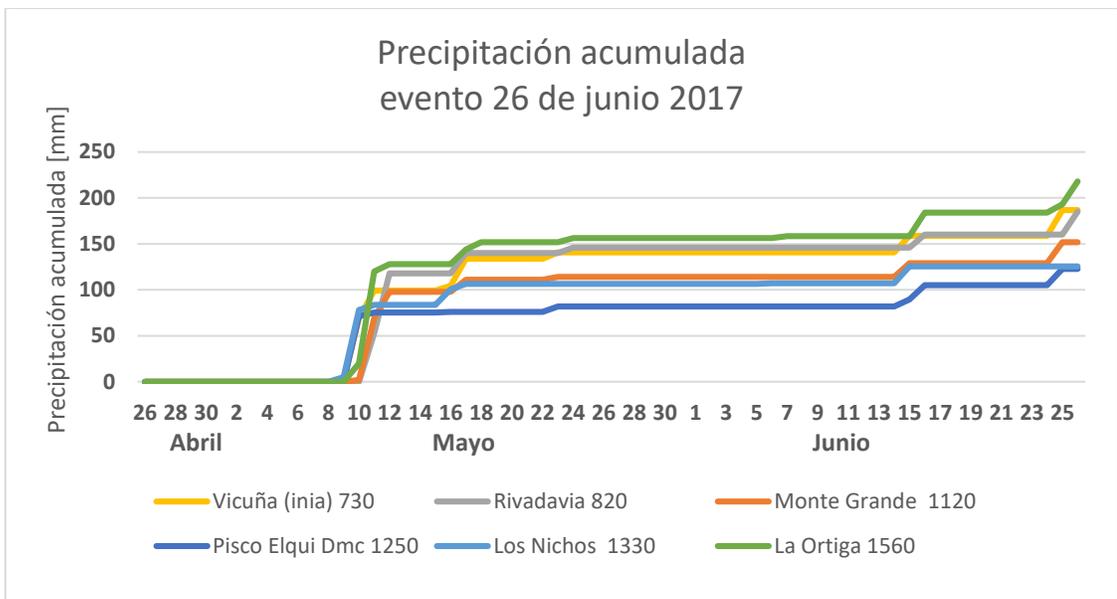




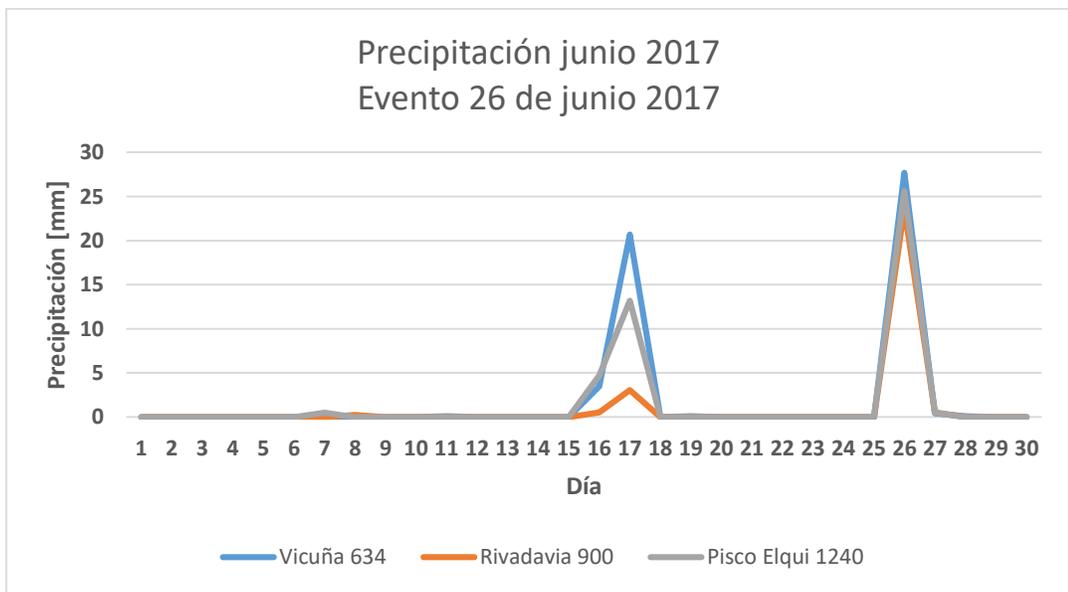
Evento 26 de junio 2017

Los gráficos asociados a esta fecha corresponden a información de la DGA y CEAZA. En primer lugar se presentan los gráficos asociados a la información de la DGA.

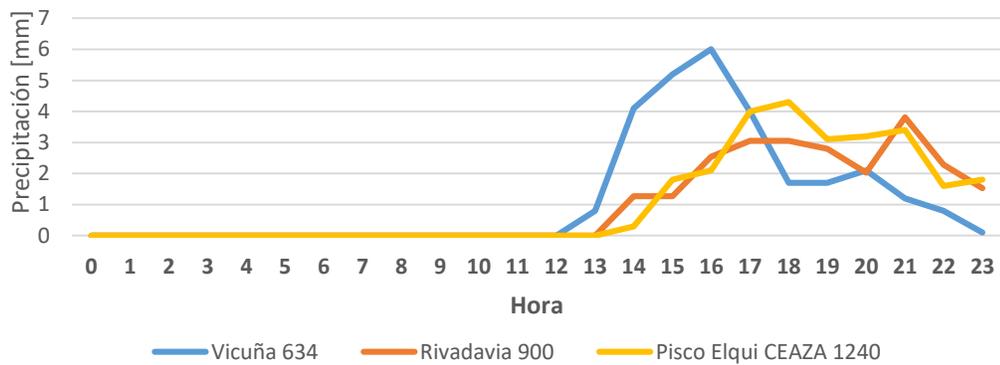




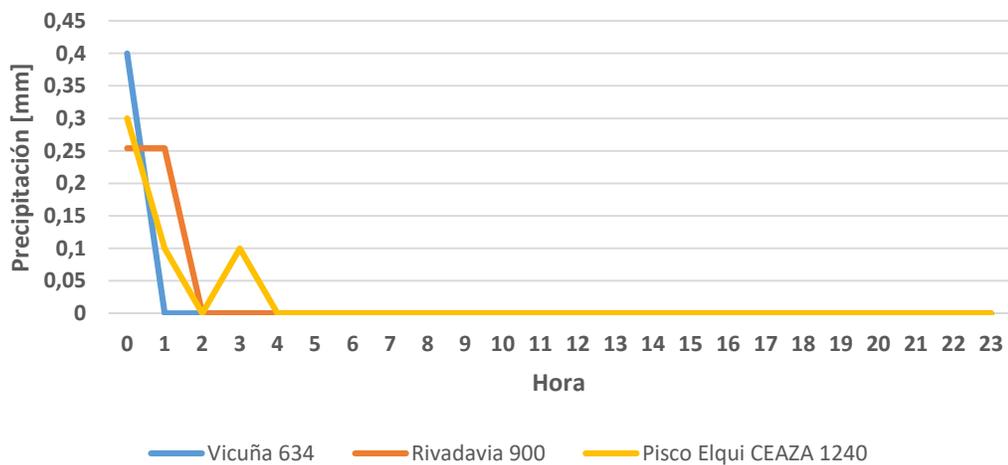
Los gráficos a continuación corresponden a información de CEAZA.



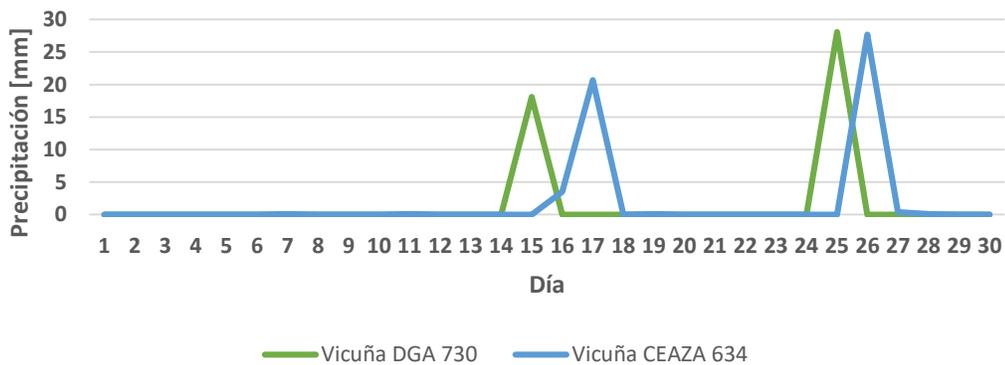
Precipitación 26 de junio 2017  
Evento 26 de junio 2017



Precipitación 27 de junio 2017  
Evento 26 de junio 2017



Precipitación junio 2017 estaciones DGA y CEAZA  
Evento 26 de junio 2017



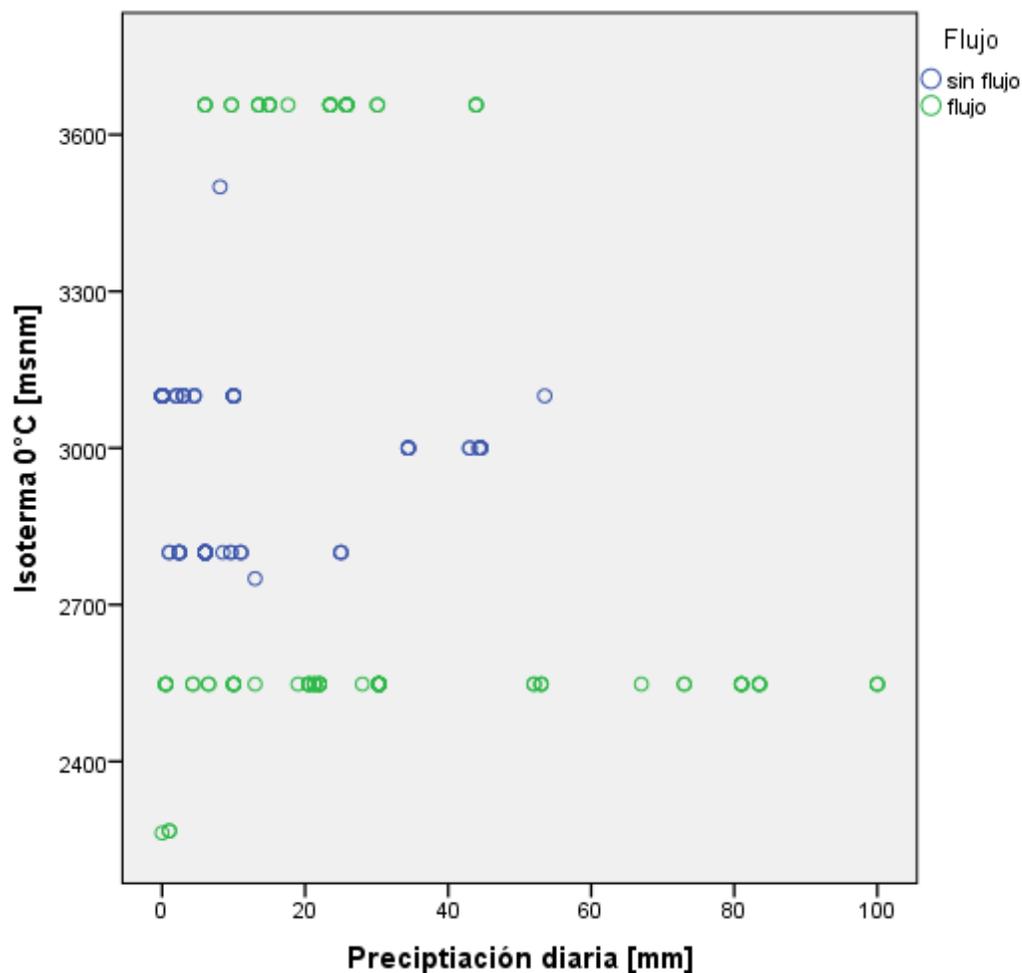


**Anexo E:** Detalle contenido base de datos SPSS

Ítem	Descripción
Fecha	Fecha de ocurrencia del flujo o fecha considerada para el análisis
Punto	Nombre del punto identificado como un flujo. Obtenido a partir de archivo ArcGis del SERNAGEOMIN
Sector	Sector de la región donde se ubica el punto. Solo hay datos para las fechas con muchos puntos
Flujo	Define si hubo o no flujo en la fecha
Isoterma	Altura de la isoterma 0°C para la fecha
Pp mensual X	Precipitación mensual en la estación x. Donde x va de 1 a 8 y corresponde al puesto de la estación, al ordenarlas de la más cercana a la más lejana, siendo la más cercana
Mensual prom	Precipitación mensual promedio según los datos de precipitación mensual por estación
Diaria X	Precipitación diaria en la estación x

Ítem	Descripción
Diaria prom	Precipitación diaria promedio según los datos de precipitación diaria por estación
Ac1EstX	Precipitación antecedente el día previo a la fecha en la estación x
Ac1Prom	Precipitación antecedente promedio el día previo a la fecha
Ac2EstX	Precipitación antecedente en los 2 días previos a la fecha en la estación x
Ac2Prom	Precipitación antecedente promedio en los 2 días previos a la fecha
Ac8EstX	Precipitación antecedente en los 8 días previos a la fecha en la estación x
Ac8Prom	Precipitación antecedente promedio en los 8 días previos a la fecha
Ac11EstX	Precipitación antecedente en los 11 días previos a la fecha en la estación x
Ac11Prom	Precipitación antecedente promedio en los 11 días previos a la fecha

## Anexo F: Correlación Isoterma 0°C y precipitación diaria



## Anexo G: Resultados de probabilidades calculadas por el modelo.

Fecha	Punto	Flujo	Probabilidad	Isoterma	Precipitación diaria	Precipitación antecedente a 1 día
23 de abril 2004	RCOQ-15	Sí	0,00207	2263,00	0,00	3,20
3 de junio 2016	RCOQ-117	No	0,01330	2800,00	1,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-118	No	0,01330	2800,00	1,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-35	No	0,01470	2800,00	2,40	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-36	No	0,01470	2800,00	2,40	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-37	No	0,01470	2800,00	2,40	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-45	No	0,01470	2800,00	2,40	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-54	No	0,01470	2800,00	2,40	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-55	No	0,01470	2800,00	2,40	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-83	No	0,01470	2800,00	2,40	0,00

Fecha	Punto	Flujo	Probabilidad	Isoterma	Precipitación diaria	Precipitación antecedente a 1 día
3 de junio 2016	RCOQ-59	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-60	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-67	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-68	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-69	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-70	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-71	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-72	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-73	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-74	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-75	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-76	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-77	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-78	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-79	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-80	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-81	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-82	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-84	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-85	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-86	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-87	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-88	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-89	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-91	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-92	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-93	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-94	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-95	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-96	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-97	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-98	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-99	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-100	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-101	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-102	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-103	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-104	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-105	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-106	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00

Fecha	Punto	Flujo	Probabilidad	Isoterma	Precipitación diaria	Precipitación antecedente a 1 día
3 de junio 2016	RCOQ-107	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-108	No	0,01899	2800,00	6,00	0,00
27 de abril 2012	RCOQ-13	No	0,02487	2750,00	13,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-52	No	0,03885	2800,00	6,00	3,50
3 de junio 2016	RCOQ-53	No	0,03885	2800,00	6,00	3,50
26 de abril 2012	RCOQ-4	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-7	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-10	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-12	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-14	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-128	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-131	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-133	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-134	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-139	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-140	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-144	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-145	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-146	No	0,04749	3100,00	0,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-6	No	0,05448	3100,00	2,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-126	No	0,05448	3100,00	2,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-127	No	0,05448	3100,00	2,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-38	No	0,05484	2800,00	11,00	3,50
3 de junio 2016	RCOQ-44	No	0,05484	2800,00	11,00	3,50
3 de junio 2016	RCOQ-51	No	0,05484	2800,00	11,00	3,50
26 de abril 2012	RCOQ-9	No	0,05833	3100,00	3,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-124	No	0,05833	3100,00	3,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-130	No	0,05833	3100,00	3,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-135	No	0,05833	3100,00	3,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-5	No	0,06458	3100,00	4,50	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-125	No	0,06458	3100,00	4,50	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-132	No	0,06458	3100,00	4,50	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-50	No	0,06869	2800,00	8,50	5,50
9 de abril 2002	RCOQ-15	No	0,09318	3100,00	10,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-8	No	0,09318	3100,00	10,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-129	No	0,09318	3100,00	10,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-141	No	0,09318	3100,00	10,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-142	No	0,09318	3100,00	10,00	0,00
26 de abril 2012	RCOQ-143	No	0,09318	3100,00	10,00	0,00
11 de mayo 2017	RCOQ-38	Sí	0,15372	2548,00	53,00	0,00

Fecha	Punto	Flujo	Probabilidad	Isoterma	Precipitación diaria	Precipitación antecedente a 1 día
11 de mayo 2017	RCOQ-44	Sí	0,15372	2548,00	53,00	0,00
11 de mayo 2017	RCOQ-51	Sí	0,15372	2548,00	53,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-47	No	0,15632	2800,00	9,60	9,50
3 de junio 2016	RCOQ-48	No	0,15632	2800,00	9,60	9,50
2 de junio 2016	RCOQ-187	No	0,27464	3000,00	34,40	0,00
2 de junio 2016	RCOQ-188	No	0,27464	3000,00	34,40	0,00
2 de junio 2016	RCOQ-189	No	0,27464	3000,00	34,40	0,00
2 de junio 2016	RCOQ-190	No	0,27464	3000,00	34,40	0,00
2 de junio 2016	RCOQ-191	No	0,27464	3000,00	34,40	0,00
26 de junio 2017	232	Sí	0,30011	2267,00	1,00	28,10
26 de junio 2017	235	Sí	0,30011	2267,00	1,00	28,10
13 de abril 2000	RCOQ-3	No	0,36065	3500,00	8,10	0,00
2 de junio 2016	RCOQ-192	No	0,41354	3000,00	43,00	0,00
2 de junio 2016	RCOQ-193	No	0,41354	3000,00	43,00	0,00
11 de mayo 2017	RCOQ-50	Sí	0,43225	2548,00	67,00	2,00
2 de junio 2016	RCOQ-206	No	0,43651	3000,00	44,30	0,00
2 de junio 2016	RCOQ-198	No	0,44007	3000,00	44,50	0,00
2 de junio 2016	RCOQ-199	No	0,44007	3000,00	44,50	0,00
2 de junio 2016	RCOQ-202	No	0,44007	3000,00	44,50	0,00
2 de junio 2016	RCOQ-203	No	0,44007	3000,00	44,50	0,00
2 de junio 2016	RCOQ-204	No	0,44007	3000,00	44,50	0,00
2 de junio 2016	RCOQ-205	No	0,44007	3000,00	44,50	0,00
24 de marzo 2015	RCOQ-6	Sí	0,52575	3657,00	6,00	0,50
24 de marzo 2015	RCOQ-126	Sí	0,52575	3657,00	6,00	0,50
24 de marzo 2015	RCOQ-127	Sí	0,52575	3657,00	6,00	0,50
24 de marzo 2015	RCOQ-10	Sí	0,56597	3657,00	9,70	0,00
24 de marzo 2015	RCOQ-131	Sí	0,56597	3657,00	9,70	0,00
11 de mayo 2017	RCOQ-117	Sí	0,60610	2548,00	52,00	10,50
11 de mayo 2017	RCOQ-118	Sí	0,60610	2548,00	52,00	10,50
11 de mayo 2017	RCOQ-52	Sí	0,64151	2548,00	73,00	4,00
11 de mayo 2017	RCOQ-53	Sí	0,64151	2548,00	73,00	4,00
24 de marzo 2015	RCOQ-13	Sí	0,69776	3657,00	17,60	0,00
24 de marzo 2015	RCOQ-128	Sí	0,72331	3657,00	13,50	2,00
24 de marzo 2015	RCOQ-139	Sí	0,72331	3657,00	13,50	2,00
24 de marzo 2015	RCOQ-140	Sí	0,72331	3657,00	13,50	2,00
3 de junio 2016	RCOQ-41	No	0,80632	2800,00	25,00	19,00
3 de junio 2016	RCOQ-42	No	0,80632	2800,00	25,00	19,00
3 de junio 2016	RCOQ-43	No	0,80632	2800,00	25,00	19,00
24 de marzo 2015	RCOQ-4	Sí	0,85075	3657,00	30,10	0,00
24 de marzo 2015	RCOQ-7	Sí	0,85075	3657,00	30,10	0,00

Fecha	Punto	Flujo	Probabilidad	Isoterma	Precipitación diaria	Precipitación antecedente a 1 día
24 de marzo 2015	RCOQ-12	Sí	0,85134	3657,00	25,80	1,50
24 de marzo 2015	RCOQ-14	Sí	0,85134	3657,00	25,80	1,50
24 de marzo 2015	RCOQ-133	Sí	0,85134	3657,00	25,80	1,50
24 de marzo 2015	RCOQ-134	Sí	0,85134	3657,00	25,80	1,50
24 de marzo 2015	RCOQ-136	Sí	0,85134	3657,00	25,80	1,50
24 de marzo 2015	RCOQ-144	Sí	0,85134	3657,00	25,80	1,50
24 de marzo 2015	RCOQ-145	Sí	0,85134	3657,00	25,80	1,50
24 de marzo 2015	RCOQ-146	Sí	0,85134	3657,00	25,80	1,50
24 de marzo 2015	RCOQ-5	Sí	0,93925	3657,00	43,90	0,00
24 de marzo 2015	RCOQ-125	Sí	0,93925	3657,00	43,90	0,00
24 de marzo 2015	RCOQ-132	Sí	0,93925	3657,00	43,90	0,00
24 de marzo 2015	RCOQ-9	Sí	0,94005	3657,00	15,00	10,00
24 de marzo 2015	RCOQ-124	Sí	0,94005	3657,00	15,00	10,00
24 de marzo 2015	RCOQ-130	Sí	0,94005	3657,00	15,00	10,00
24 de marzo 2015	RCOQ-135	Sí	0,94005	3657,00	15,00	10,00
17 de junio 1991	113	No	0,97844	3100,00	53,50	14,00
11 de mayo 2017	RCOQ-192	Sí	0,98163	2548,00	6,50	43,00
11 de mayo 2017	RCOQ-193	Sí	0,98163	2548,00	6,50	43,00
24 de marzo 2015	RCOQ-8	Sí	0,99293	3657,00	23,50	17,50
24 de marzo 2015	RCOQ-129	Sí	0,99293	3657,00	23,50	17,50
24 de marzo 2015	RCOQ-141	Sí	0,99293	3657,00	23,50	17,50
24 de marzo 2015	RCOQ-142	Sí	0,99293	3657,00	23,50	17,50
24 de marzo 2015	RCOQ-143	Sí	0,99293	3657,00	23,50	17,50
11 de mayo 2017	RCOQ-41	Sí	0,99727	2548,00	100,00	20,00
11 de mayo 2017	RCOQ-42	Sí	0,99727	2548,00	100,00	20,00
11 de mayo 2017	RCOQ-43	Sí	0,99727	2548,00	100,00	20,00
11 de mayo 2017	RCOQ-198	Sí	0,99970	2548,00	81,00	37,00
11 de mayo 2017	RCOQ-199	Sí	0,99970	2548,00	81,00	37,00
11 de mayo 2017	RCOQ-202	Sí	0,99970	2548,00	81,00	37,00
11 de mayo 2017	RCOQ-203	Sí	0,99970	2548,00	81,00	37,00
11 de mayo 2017	RCOQ-204	Sí	0,99970	2548,00	81,00	37,00
11 de mayo 2017	RCOQ-205	Sí	0,99970	2548,00	81,00	37,00
11 de mayo 2017	RCOQ-174	Sí	0,99993	2548,00	21,30	64,50
11 de mayo 2017	RCOQ-175	Sí	0,99993	2548,00	21,30	64,50
11 de mayo 2017	RCOQ-176	Sí	0,99993	2548,00	21,30	64,50
11 de mayo 2017	RCOQ-177	Sí	0,99993	2548,00	21,30	64,50
11 de mayo 2017	RCOQ-178	Sí	0,99993	2548,00	21,30	64,50
11 de mayo 2017	RCOQ-47	Sí	0,99994	2548,00	4,30	71,10
11 de mayo 2017	RCOQ-48	Sí	0,99994	2548,00	4,30	71,10
11 de mayo 2017	RCOQ-35	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50

Fecha	Punto	Flujo	Probabilidad	Isoterma	Precipitación diaria	Precipitación antecedente a 1 día
11 de mayo 2017	RCOQ-36	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-37	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-45	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-54	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-55	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-67	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-68	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-69	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-70	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-71	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-72	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-73	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-74	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-75	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-76	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-77	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-78	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-79	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-80	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-81	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-82	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-83	Sí	0,99998	2548,00	30,30	67,50
11 de mayo 2017	RCOQ-171	Sí	0,99999	2548,00	83,50	52,00
11 de mayo 2017	RCOQ-172	Sí	0,99999	2548,00	83,50	52,00
11 de mayo 2017	RCOQ-173	Sí	0,99999	2548,00	83,50	52,00
11 de mayo 2017	RCOQ-179	Sí	0,99999	2548,00	83,50	52,00
11 de mayo 2017	RCOQ-180	Sí	0,99999	2548,00	83,50	52,00
11 de mayo 2017	RCOQ-187	Sí	0,99999	2548,00	0,50	81,00
11 de mayo 2017	RCOQ-188	Sí	0,99999	2548,00	0,50	81,00
11 de mayo 2017	RCOQ-189	Sí	0,99999	2548,00	0,50	81,00
11 de mayo 2017	RCOQ-190	Sí	0,99999	2548,00	0,50	81,00
11 de mayo 2017	RCOQ-191	Sí	0,99999	2548,00	0,50	81,00
11 de mayo 2017	RCOQ-206	Sí	1,00000	2548,00	13,00	80,00
11 de mayo 2017	RCOQ-153	Sí	1,00000	2548,00	19,00	78,50
11 de mayo 2017	RCOQ-154	Sí	1,00000	2548,00	22,00	87,00
11 de mayo 2017	RCOQ-155	Sí	1,00000	2548,00	22,00	87,00
11 de mayo 2017	RCOQ-156	Sí	1,00000	2548,00	22,00	87,00
11 de mayo 2017	RCOQ-157	Sí	1,00000	2548,00	22,00	87,00
11 de mayo 2017	RCOQ-159	Sí	1,00000	2548,00	22,00	87,00
11 de mayo 2017	RCOQ-160	Sí	1,00000	2548,00	22,00	87,00

Fecha	Punto	Flujo	Probabilidad	Isoterma	Precipitación diaria	Precipitación antecedente a 1 día
11 de mayo 2017	RCOQ-161	Sí	1,00000	2548,00	22,00	87,00
11 de mayo 2017	RCOQ-162	Sí	1,00000	2548,00	22,00	87,00
11 de mayo 2017	RCOQ-165	Sí	1,00000	2548,00	10,00	102,00
11 de mayo 2017	RCOQ-166	Sí	1,00000	2548,00	10,00	102,00
11 de mayo 2017	RCOQ-167	Sí	1,00000	2548,00	10,00	102,00
11 de mayo 2017	RCOQ-168	Sí	1,00000	2548,00	10,00	102,00
11 de mayo 2017	RCOQ-169	Sí	1,00000	2548,00	10,00	102,00
11 de mayo 2017	RCOQ-170	Sí	1,00000	2548,00	10,00	102,00
11 de mayo 2017	RCOQ-181	Sí	1,00000	2548,00	20,50	107,50
11 de mayo 2017	RCOQ-182	Sí	1,00000	2548,00	20,50	107,50
11 de mayo 2017	RCOQ-183	Sí	1,00000	2548,00	20,50	107,50
11 de mayo 2017	RCOQ-184	Sí	1,00000	2548,00	20,50	107,50
11 de mayo 2017	RCOQ-185	Sí	1,00000	2548,00	20,50	107,50
11 de mayo 2017	RCOQ-186	Sí	1,00000	2548,00	20,50	107,50
11 de mayo 2017	RCOQ-148	Sí	1,00000	2548,00	28,00	120,00
24 de marzo 1992	RCOQ-1	Sí			0,00	0,00
18 de junio 1997	113	Sí			28,00	1,50
15 de febrero 2006	RCOQ-3	Sí			0,00	0,00
24 de marzo 2015	RCOQ-137	Sí		3657,00		
24 de marzo 2015	RCOQ-138	Sí		3657,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-31	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-32	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-59	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-60	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-84	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-85	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-86	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-87	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-88	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-89	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-91	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-92	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-93	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-94	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-95	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-96	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-97	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-98	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-99	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-100	Sí		2548,00		

Fecha	Punto	Flujo	Probabilidad	Isoterma	Precipitación diaria	Precipitación antecedente a 1 día
11 de mayo 2017	RCOQ-101	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-102	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-103	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-104	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-105	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-106	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-107	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-108	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-109	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-110	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-111	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-112	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-113	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-120	Sí		2548,00		
11 de mayo 2017	RCOQ-121	Sí		2548,00		
26 de abril 2012	RCOQ-136	No		3100,00		0,00
26 de abril 2012	RCOQ-137	No		3100,00		
26 de abril 2012	RCOQ-138	No		3100,00		
17 de mayo 2013	RCOQ-171	No			37,50	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-172	No			37,50	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-173	No			37,50	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-174	No			33,00	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-175	No			33,00	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-176	No			33,00	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-177	No			33,00	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-178	No			33,00	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-179	No			37,50	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-180	No			37,50	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-181	No			37,50	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-182	No			37,50	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-183	No			37,50	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-184	No			37,50	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-185	No			37,50	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-186	No			37,50	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-154	No			37,00	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-155	No			37,00	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-156	No			37,00	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-157	No			37,00	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-159	No			37,00	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-160	No			37,00	0,00

Fecha	Punto	Flujo	Probabilidad	Isoterma	Precipitación diaria	Precipitación antecedente a 1 día
17 de mayo 2013	RCOQ-161	No			37,00	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-162	No			37,00	0,00
17 de mayo 2013	RCOQ-148	No			42,00	0,00
27 de mayo 2013	RCOQ-153	No			29,00	0,00
27 de mayo 2013	RCOQ-165	No			36,00	0,00
27 de mayo 2013	RCOQ-166	No			36,00	0,00
27 de mayo 2013	RCOQ-167	No			36,00	0,00
27 de mayo 2013	RCOQ-168	No			36,00	0,00
27 de mayo 2013	RCOQ-169	No			36,00	0,00
27 de mayo 2013	RCOQ-170	No			36,00	0,00
3 de junio 2016	RCOQ-31	No		2800,00		
3 de junio 2016	RCOQ-32	No		2800,00		
3 de junio 2016	RCOQ-109	No		2800,00		
3 de junio 2016	RCOQ-110	No		2800,00		
3 de junio 2016	RCOQ-111	No		2800,00		
3 de junio 2016	RCOQ-112	No		2800,00		
3 de junio 2016	RCOQ-113	No		2800,00		
3 de junio 2016	RCOQ-121	No		2800,00		

**Anexo H:** Resultados del modelo con las variables normalizadas.

**Pruebas ómnibus de coeficientes de modelo**

		Chi-cuadrado	gl	Sig.
Paso 1	Escalón	241,389	3	,000
	Bloque	241,389	3	,000
	Modelo	241,389	3	,000

**Resumen del modelo**

	Logaritmo de la verosimilitud -2	R cuadrado de Cox y Snell	R cuadrado de Nagelkerke
1	115,616 <sup>a</sup>	,606	,810

a. La estimación ha terminado en el número de iteración 8 porque las estimaciones de parámetro han cambiado en menos de ,001.

**Tabla de clasificación<sup>a</sup>**

		Pronosticado			
		Flujo		Corrección de porcentaje	
Observado		sin flujo	flujo		
Paso 1	Flujo	sin flujo	137	4	97,2
		flujo	14	104	88,1
Porcentaje global					93,1

a. El valor de corte es ,500

**Variables en la ecuación**

		B	Error estándar	Wald	gl	Sig.	Exp(B)
Paso 1 <sup>a</sup>	Isoterma 0°C	1,628	,269	36,519	1	,000	5,094
	Pp diaria	1,167	,302	14,945	1	,000	3,213
	Pp Ant1	7,276	1,464	24,699	1	,000	1444,925
	Constante	2,045	,805	6,445	1	,011	7,727

a. Variables especificadas en el paso 1: Isoterma 0°C, Precipitación diaria, Precipitación antecedente a 1 día.