



**Universidad
Andrés Bello®**

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Geología

**PELIGRO GEOLÓGICO ASOCIADO A INUNDACIONES EN LA
CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA, COMUNA DE LA CALERA,
REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE**

Tesis para optar al Título de Geóloga

María José Cabrera Olivares

Profesor Guía:

Iván de la Cruz Vargas Cordero

Profesor Co-guía:

Paula Escobar Loyola

Viña del Mar, Chile, 2018

RESUMEN

El peligro de inundación fluvial es común, reiterativo y catastrófico a lo largo de Chile y el mundo y sus efectos pueden generar grandes daños a la población. En el contexto mundial la sequía, la desertificación, la deforestación y el cambio climático son factores que pueden magnificar los daños.

Se ha seleccionado la zona de estudio ubicada en la Comuna de La Calera, Región de Valparaíso, debido a tener en su registro histórico episodios de inundación a lo largo de los años, siendo la última en 1987 dejando a cientos de personas damnificadas y aisladas debido a que por las intensas lluvias, el puente 19 de Junio fue arrasado por la fuerza del agua. Dicho esto esta investigación ha requerido de evaluar y zonificar las áreas susceptibles de inundación y por sobre todo establecer la recurrencia de grandes inundaciones. Se han realizado diversos estudios y análisis sedimentológicos, geomorfológicos, asociaciones climáticas, vinculaciones municipales con mapas de peligro y finalmente asociaciones de caudales máximos, que junto a los resultados de caudales de verificación se ha estimado que para un periodo de retorno de 100 años la zona de estudio se vería bajo amenaza de peligro de inundación debido a la intensas precipitaciones superiores a 100 mm en 24 horas, con un caudal superior a los 1800 m³/seg. en la Cuenca del Río Aconcagua, sector de La Calera. Por último, se han reconocido relaciones entre las características geomorfológicas, sedimentológicas, antrópicas y la estimación de caudal que permite inferir que una eventual inundación en la zona podría magnificar sus efectos.

ABSTRACT

Along Chile and worldwide the flooding danger is common and catastrophic and its effects can generate huge damages in the population. In the worldwide context the water drought, desertification, deforestation and global warming are factors that can increase the damages.

The study area located in Calera, Valparaíso, was selected for having flood records, the last one was registered during the year 1987 leaving hundreds of people affected and isolated due to intense precipitations, in which the bridge of “19 de Junio” was devastated by the strength water. This research aims to evaluate and zoning susceptible areas of floodings and to calculate the huge event recurrences.

The research includes sedimentological, geomorphological, climatic and maximum river flow analyses. Results allow us to estimate a verification river flow for recurrence interval equal to 100 years. Thus, flooding danger it is probable, in which the rainfall forecasts would be >100 mm observed during 24 hours with a flow equal to $1800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Finally, relationships between geomorphology, sedimentology and anthropic features besides our flow estimate for a recurrence interval equal to 100 years can magnify the effects of an eventual flooding.

AGRADECIMIENTOS

Espero que la lista de personas a quien darle mis más eternas gracias, no se alargue demasiado, pero aquí vamos:

De forma muy especial a mis profesores guías Iván Vargas, Paula Escobar y a Pedro Santis que participó en la primera parte de este trabajo. Gracias por tomar mi tema y apoyarme durante todo este año, con la mejor disposición siempre. A Lucía, por ser maravillosa persona y por acompañarnos a terreno.

A mis amigas por ser maravillosas: María Francisca por darme apoyo moral jaja cuando cual de las dos estaba peor, te agradezco mucho por todos estos años acogiéndome en tu familia y por tu hermosa amistad te quiero mucho!!

A Gabriela por preguntarme siempre “¿Jose cómo vas? Si vas alcanzar yo sé”, preguntas como esas son signos de preocupación, gracias por todo, te quiero un montón!

A Josefa que las últimas semanas éramos la ultimas en cerrar la u, dándonos apoyo todos los días! A todas muchas gracias las tengo en mi corazón.

A Mey Basáez, que participó desde el primer momento y me ayudo en cada cosa que se escapaba de mis talentos en confección de mapas, esquemas, etc., siempre con la mejor disposición, Gracias a ti quedo todo bello!

A Ximena Toledo, por siempre facilitar un espacio para trabajar en la universidad y con la mejor sonrisa aunque estuviera llena de trabajo

A Pablo por apoyarme siempre, desde cosas tan simples como ir a buscarme cuando salía muy tarde de la u, hasta ayudarme con la tesis, cuando se que tu tiempo es muy poco y sencillamente por sopórtame así como soy.

A Ximena Moncada, por entregarme su computador cuando el mío decidió morir en el último mes de trabajo, gracias tía xime!

A ti papá por acompañarme a terreno.

A mis abuelos que durante toda la carrera los vi muy poco, gracias por entenderme.

A mi prima Ignacia que siempre puedo contar con ella para todo.

A ti mamá por siempre por confiar en mi y por cuidar siempre de nuestra familia.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Antecedentes	12
1.2 Objetivos Generales	14
1.3 Objetivos Específicos	14
1.4 Hipótesis de Trabajo	15
1.5 Limitaciones	15
2. MARCO GEOGRÁFICO	15
2.1 Ubicación y Accesos	15
2.2 Flora terrestre	16
2.3 Fauna acuática	16
2.4 Clima	16
2.4.1 Clima Templado Mediterráneo con estación seca prolongada	16
2.4.2 Clima Frío de Altura	17
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	17
3.1 Trabajo de pre-terreno	18
3.2 Trabajo de terreno	18
3.3 Trabajo de post-terreno	19
4. MARCO TEÓRICO	21
4.1 Inundaciones y llanuras de inundación	21
4.2 Causas de Inundación	23
4.3 Riesgo y Peligro Geológico	23
4.4 Distribución Areal de precipitaciones	24
4.5 Tiempo de Concentración	24
4.5 Caudales de Diseño y Coeficiente de Rugosidad de Manning	25
4.6 Periodos de Retorno	26
4.6.1 Distribución de Gumbel	26
4.6.2 Probabilidad de Excedencia y Periodo de retorno	27
4.7 Caudales Máximos	27
4.7.1 Método Racional	28
4.7.2 Método Verni King Modificado	29
4.8 Caudal de Verificación	30
5. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	31

5.1 Formación Quebrada del Pobre (Jurásico Inferior; Sinemuriano)	31
5.2 Formación Ajial (Jurásico Medio; Aalaniense)	32
5.3 Formación Cerro Calera (Jurásico Medio; Aalaniense – Bajociense)	32
5.5 Formación Lo Prado (Cretácico Inferior; Valanginiense - Berriasiano)	33
6. MARCO GEOLÓGICO LOCAL	33
5.1 Sedimentos Cuaternarios No Consolidados Qel, Qac, Qg	33
6. RESULTADOS	35
6.1 Análisis Sedimentario y Estratigráfico	35
6.2 Análisis Geomorfológico	39
6.3 Análisis y Estimación de Precipitaciones Futuras	43
6.3.1 Determinación del Coeficiente de Rugosidad de Manning	43
6.3.2 Estimación de precipitaciones futuras	46
6.3.3 Periodos de Retorno	47
6.3.4 Tiempo de Concentración	49
6.3.5 Estimación de Caudales Máximos	50
6.3.6 Caudal de Verificación	52
7. DISCUSIÓN	56
7.1 Asociación de la Sedimentología y Estratigrafía	56
7.2 Variación extensional de la Llanura de inundación	60
7.2.1 Control Litológico	60
7.2.2 Control Estructural	60
7.3 Impacto de la urbanización en zonas susceptibles de Inundación	61
7.4 Asociación de las predicciones de ENOS con la estimación de precipitaciones futuras	63
7.5 Vinculación de Mapa de Peligro con Plan Regulador Municipal	65
7.6 Asociación de Caudales	67
8. CONCLUSIONES	68
REFERENCIAS	71
ANEXOS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Ubicación general de la Cuenca del Río Aconcagua, La Calera, Chile (Mapa de Elaboración propia, Google Earth, 2018).	11
Figura 2. Área preseleccionada de estudio, en parte de la cuenca del Río Aconcagua, entre la comuna de Artificio y La Calera (Mapa de Elaboración propia, Google Earth, 2018)	11
Figura 3. Información Hídrica de la Cuenca del Río Aconcagua, Fichas Temáticas Dirección General de Aguas.....	13
Figura 4. Fotografía del Diario Apsi Extra, 20 de Junio de 1987. Puente 19 de Junio cortado por las intensas lluvias (Apsi, 1987).	14
Figura 5. Montos de Precipitaciones Medias Mensuales registradas en Estación Pluviométrica de Resguardo Los Patos, ubicada a 65 km al NE de la zona de estudio, en la Comuna de Putaendo (Dirección General de Aguas, 2004).	17
Figura 6. Estaciones Meteorológicas correspondientes a la Cuenca Hidrográfica del Río Aconcagua (Mapa de Elaboración propia, Google Earth, 2018).	20
Figura 7. Mapa del Valle del Aconcagua. Extracto Carta Geológica Quillota-Portillo, Rivano 1996, SERNAGEOMIN.	31
Figura 8. Fotografía y respectivo perfil esquemático de Columna 1.	36
Figura 9. Fotografía y respectivo perfil esquemático de Columna 2.	37
Figura 10. Fotografía y respectivo perfil esquemático de Columna 2.	39
Figura 11. Mapa Geomorfológico del Valle del Aconcagua.....	40
Figura 12. Mapa de ubicación espacial de los perfiles topográficos A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', F-F'.	40
Figura 13. Perfiles de la llanura de inundación, designados como A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', F-F'.	42
Figura 14. Perfil de elevación de 1,4 km de extensión, donde se ha medido el CRM.	43
Figura 15. A-B: Río Clark Fork at St. Regis, Montana, EEUU, con $n=0,028$. C: Río Aconcagua vista W. D: Río Aconcagua vista NW.....	44

Figura 16. A-B: Salt River Below Stewart Mountain Dam, Arizona con $n= 0,032$. C-D: Vista Sur. E: Vista Oeste. F: Vista Sur.....	45
Figura 17. A-B: Moyie River at Eastport, Idaho con $n= 0,038$. C-D: Río Aconcagua Vista SE.	46
Figura 18. Estaciones Meteorológicas correspondientes a la Cuenca Hidrográfica del Río Aconcagua (Google Earth, 2018).	47
Figura 19. Coeficientes de Rugosidad de Manning para cauces naturales.	52
Figura 20. Transecta 1 sobre el puente de camino Internacional (ubicación de este puente en mapa geomorfológico).....	53
Figura 21. Dimensiones de los pilares y estructuras de los puentes de camino internacional, La Calera.....	53
Figura 22. Transecta 2, paralela al puente 19 de Junio, La Calera (ubicación de este puente en mapa geomorfológico).....	54
Figura 23. Dimensiones de los Pilares y estructuras de la Transecta 2.	55
Figura 24. Esquema representativo de la Columna Estratigráfica 3 (Anexo 3), donde la flecha superior indica la dirección del flujo y la flecha inferior indica la imbricación de los clastos.	57
Figura 25. Columnas Estratigráficas correlacionadas desde la base de los depósitos fluviales.....	58
Figura 26. Ilustración comparativa entre suelos arenosos, y arcillosos y el volumen entre poros según tamaño de grano.	59
Figura 27. Evolución de un sistema fluvial con la llegada del asentamiento humano y las respectivas consecuencias en caso de inundación.....	62
Figura 28. Hidrograma de respuesta hidrológica de una cuenca no urbanizada y una cuenca urbanizada.	63
Figura 29. Proyecciones del fenómeno ENOS para el año 2050 y 2250.	64
Figura 30. Mapa de Peligro de Inundaciones y Remociones en Masa, junto al Plan Regulador de la Comuna de La Calera.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos sedimentológicos de los depósitos fluviales de la Columna Estratigráfica 1.....	35
Tabla 2. Datos sedimentológicos de los depósitos fluviales de la Columna Estratigráfica 2.....	37
Tabla 3. Datos sedimentológicos de los depósitos fluviales de la Columna Estratigráfica 3.....	38
Tabla 4. Precipitaciones de diseño para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, para cada estación.....	49
Tabla 5. Datos y tiempo de concentración de la Cuenca del Río Aconcagua.....	50
Tabla 6. . Datos y caudal máximo del Método Racional de la cuenca del Río Aconcagua para cada periodo de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.....	50
Tabla 7. Datos y caudal máximo con el Método Verni-King Modificado de la cuenca del Río Aconcagua para cada periodo de retorno de 10,25, 50 y 100 años.....	51
Tabla 8. Comparación de caudales máximos según Método Racional y Verni-King Modificado.....	51
Tabla 9. Datos y resultado de Caudal de verificación para la Transecta 1.....	54
Tabla 10. Datos y resultado de Caudal de verificación para la Transecta 2.....	55
Tabla 11. Comparación de Caudales.....	68

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones corresponden al resultado y/o consecuencia de un aumento en el volumen de un cuerpo de agua, ya sea de origen fluvial, lacustre, costero, marino y son parte natural de la geosfera, sin embargo, la urbanización y la carencia de la planificación urbana ha llevado a la humanidad a encontrarse en zonas de peligro por inundación reiteradas veces a lo largo del tiempo.

El Cambio Ambiental Global acelera estos procesos naturales, degrada el sistema terrestre, y genera episodios más intensos de precipitación (Duarte et al., 2006); que sumado a la construcción de caminos, obras hidráulicas y agricultura alteran el régimen de caudal de muchos ríos (Chu et al., 2010; Banasik & Pham, 2010; Olang & Furst, 2011). Por tales motivos se proyecta un aumento de las inundaciones (IPCC, 2007; Eissa & Zaqui, 2011) y de los costos asociados, en las próximas décadas (Octavio Rojas 2015).

El proceso natural se transforma en un evento peligroso cuando el ser humano ocupa las zonas inundables desconociendo la función natural de éstas áreas, transformando el fenómeno en una amenaza para el asentamiento humano instalado. El nivel de peligro dependerá de la ubicación del asentamiento con respecto al cauce y del intervalo de recurrencia o tasa de retorno (T), entendido como el tiempo promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud determinada (Aparicio, 1989; OEA, 1993; Walsh et al., 1994; Chow et al., 1994; Keller & Blodgett, 2007).

Chile no ha estado exento de eventos de esta naturaleza, trayendo como impacto inmediato no sólo la destrucción de asentamientos rurales y urbanos, sino que también han cobrado la vida de muchas personas dejando un importante saldo de individuos damnificados. En este contexto de potencial peligro, se ha seleccionado la zona de estudio (Figura 1), la cual se encuentra en la Comuna de La Calera, Región de Valparaíso. El área comprende parte de la cuenca del Río Aconcagua (Figura 2) la cual presenta una alta probabilidad de ocurrencia de un evento de inundación, que podría afectar a las comunidades emplazadas en zonas aledañas al río, dado que la urbanización impediría que en momentos de crecida el río pueda ocupar las llanuras de inundación de forma natural, debido a que las casas construidas sobre el suelo de sedimentos fluviales,

obstaculizan y dificultan la infiltración de las aguas, provocando mayor escorrentía a través de las construcciones antrópicas.

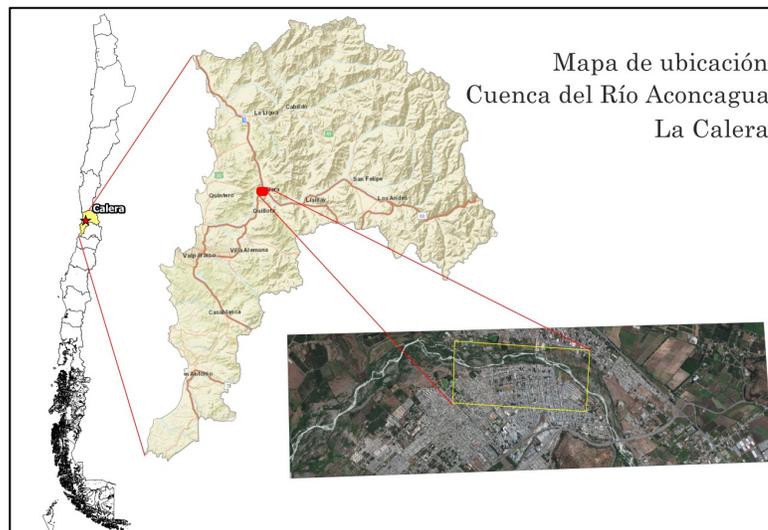


Figura 1. Mapa de Ubicación general de la Cuenca del Río Aconcagua, La Calera, Chile (Mapa de Elaboración propia, Google Earth, 2018).

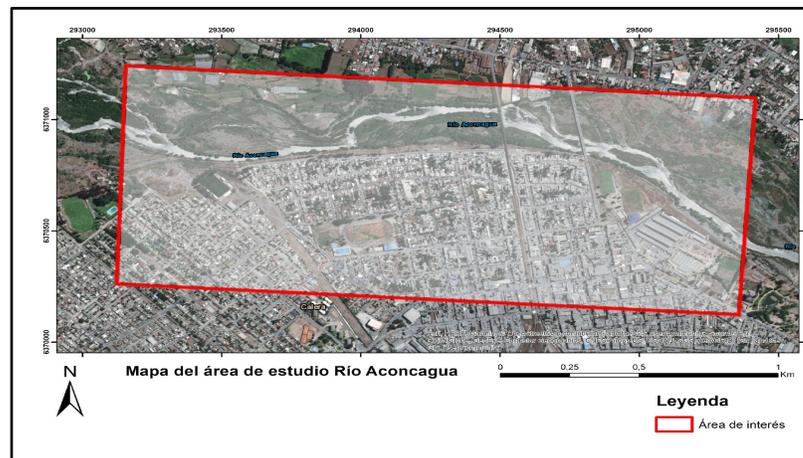


Figura 2. Área preseleccionada de estudio, en parte de la cuenca del Río Aconcagua, entre la comuna de Artificio y La Calera (Mapa de Elaboración propia, Google Earth, 2018)

1.1 Antecedentes

En el período 1960-1991 se registran 16 inundaciones catastróficas en Chile relacionadas con eventos pluviométricos; el 63% afecta la zona central; lugar donde se concentra un 73% de la población nacional (INE, 2012). Diversos estudios (Mariangel, 1990; Smith y Romero, 2009; CIREN, 2010; Rojas et al., 2013) demuestran que en esta área ocurren cambios ambientales profundos en los últimos 30 años, los que también se vinculan con una alta recurrencia de eventos fluviales (González, 1987; Mardones y Vidal, 2001; Romero y Mendonça, 2009). En las últimas dos décadas (1990-2010), nuevas zonas han sido dañadas por inundaciones asociadas principalmente al vaciamiento de lagos glaciares (Dussaillant et al., 2010; Carrión, 2010).

La gran cuenca exorreica del río Aconcagua nace en la Cordillera de Los Andes y desemboca al mar, en el océano Pacífico, en la bahía de Concón, en la zona central de Chile. Exactamente se encuentra ubicada entre los paralelos 32° 20' y 33° 07' de la latitud sur y entre los meridianos 71° 31' y 70° 00' de la longitud oeste (Figura 3). Tiene una extensión cubierta aproximada de 7.337 Km². El río Aconcagua, se forma al juntarse los ríos Juncal y Blanco (Departamento de Administración de Recursos Hídricos, 2004).

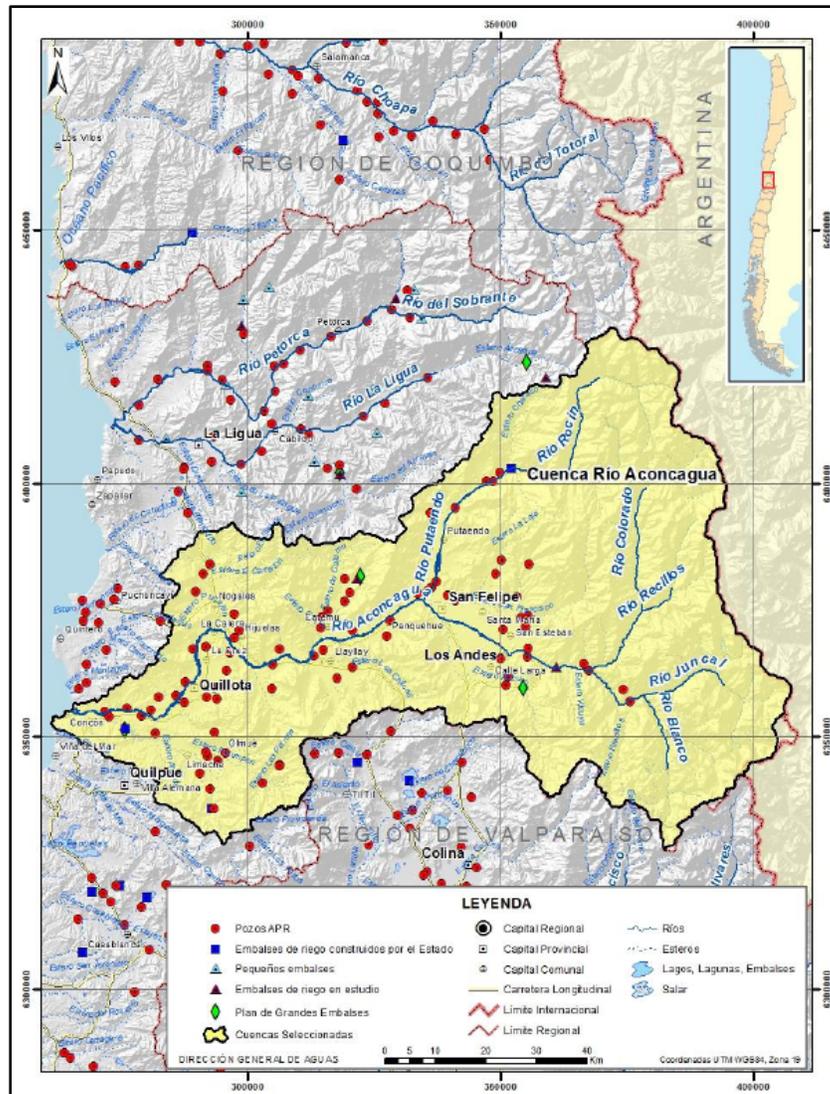


Figura 3. Información Hídrica de la Cuenca del Río Aconcagua, Fichas Temáticas Dirección General de Aguas.

Dentro del registro histórico, existe evidencia de que la última gran inundación en esta zona fue en Junio de 1987, donde aconteció un periodo de intensas lluvias de tal magnitud que el puente 19 de Junio, el cual une la ciudad de La Calera con Artificio fue arrasado por el agua (Figura 4). El evento de catástrofe dejó cientos de personas damnificadas y hogares destruidos por el agua.

Hoy existe un potencial peligro por inundación en la misma zona, los años de sequía en la región han dejado ver que no hay problema alguno por asentarse en las llanuras de

inundación o dedicarse a la agricultura en el cauce que hoy no lleva más que un pequeño canal (Apsi, 1987).

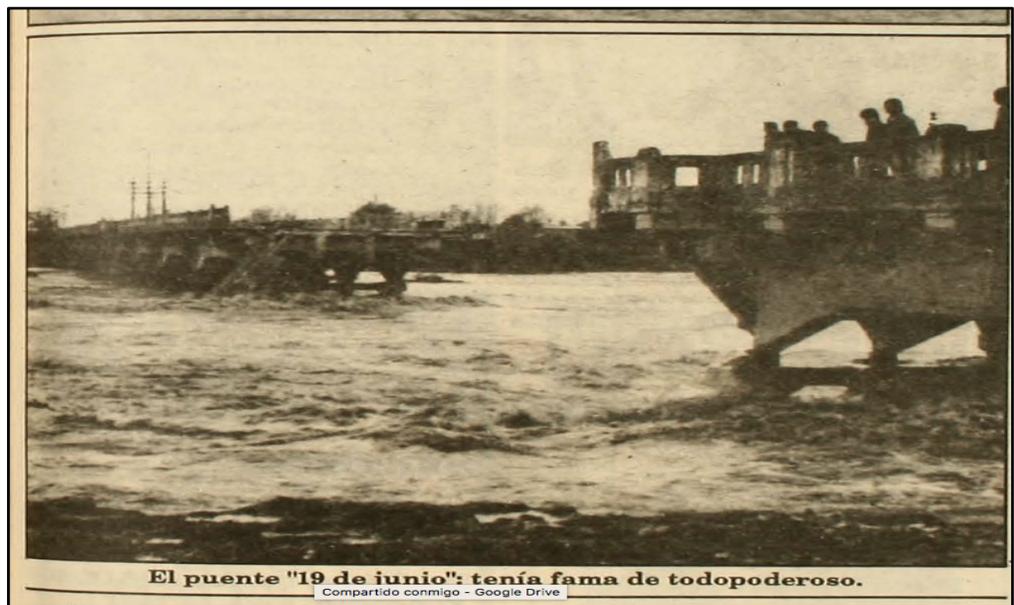


Figura 4. Fotografía del Diario Apsi Extra, 20 de Junio de 1987. Puente 19 de Junio cortado por las intensas lluvias (Apsi, 1987).

La problemática de esta investigación será enfrentada con una metodología que se apega bastante a las herramientas de sensores remotos, el uso de SIG, antecedentes meteorológicos e hidrológicos disponibles en la Dirección General de Aguas y Análisis sedimentológico. En el capítulo de Metodología serán detallados estos procedimientos.

1.2 Objetivos Generales

Evaluar y zonificar áreas con peligro de inundaciones en parte de la cuenca hidrográfica del Río Aconcagua, entre el sector Artificio-La Calera, y poder establecer la recurrencia de grandes inundaciones.

1.3 Objetivos Específicos

1. Identificar depósitos asociados a inundaciones a través de un análisis sedimentológico para determinar procesos de infiltración.
2. Estimar los caudales máximos a partir de los cálculos de las precipitaciones futuras a través del estudio de las máximas precipitaciones de los últimos 20 años para identificar y dimensionar la próxima inundación.

3. Zonificar posibles áreas de desborde de caudal en periodos de intensas lluvias.

1.4 Hipótesis de Trabajo

En la comuna de La Calera existe un alto peligro geológico asociado a inundaciones en la cuenca del Río Aconcagua, el cual es magnificado a causa del asentamiento de la población en las llanuras de inundación, tal como sucedió en el invierno de 1987, donde aconteció un periodo de intensas lluvias, donde solo la precipitación mensual para Julio de ese año fue de 525.9 mm medida en la estación pluviométrica Estero Rabuco (Dirección General de Aguas, 2018), fue tal la magnitud que el puente 19 de Junio, el cual une la ciudad de La Calera con Artificio fue arrasado por el agua, por lo tanto, en tiempos de crecidas por intensas precipitaciones existe un potencial peligro de inundación para las comunidades que se encuentran viviendo actualmente en la zona adyacente a la cuenca del río Aconcagua.

1.5 Limitaciones

Las limitaciones de esta investigación se presentan precisamente en la base de datos dispuesta por la Dirección General de Agua (DGA) en cuanto a la cantidad de datos de las estaciones Fluviométricas y Meteorológicas, ya que de existir mayor cantidad de datos las estimaciones de esta investigación podrían ser más exactas y probablemente incrementarse las estimaciones.

2. MARCO GEOGRÁFICO

2.1 Ubicación y Accesos

El área de estudio se ubica en la comuna de La Calera, Provincia de Quillota, Región de Valparaíso, en las coordenadas 19H 293158,95 E/ 6371239,84 S; 19H 293118,88 E/6370260,17 S; 19H 295418,75 E/ 6371096,92 S; 19H 295358,97 E/ 6370127,80 S (Figura 1) a aproximadamente 53 km de la ciudad de Viña del Mar. La comuna de La Calera, se encuentra adyacente al sector seleccionado de la cuenca del Río Aconcagua. Para acceder a La Calera, desde Viña del Mar, se toma la Ruta 60, por 50 minutos y luego continuar por el desvío de la Autopista Los Andes.

2.2 Flora terrestre

La flora terrestre de la cuenca, se caracteriza por la presencia de Matorral Esclerófilo Andino presente en la zona alta del río Aconcagua. Matorral Espinoso de las serranías y Bosque esclerófilo costero, en el valle y desembocadura del río respectivamente. La flora acuática de la cuenca, se caracteriza por la presencia de Algas de la Familia *Clorófitaceae* *Myriophyllum sp otamogeton sp azolla sp Cladophora sp Jussiaea sp Ceratophyllum sp*. (Dirección General de Aguas, 2004).

2.3 Fauna acuática

Las taxas macroinvertebradas más comunes que se encuentran en la cuenca del río Aconcagua son Crustáceos, Insectos, Anélidos y Platelminetos.

2.4 Clima

Los climas que se distinguen en la cuenca del Río Aconcagua corresponden a: Templado de tipo Mediterráneo con estación seca prolongada y Frío de altura en la Cordillera de los Andes.

2.4.1 Clima Templado Mediterráneo con estación seca prolongada

Se desarrolla prácticamente en toda la cuenca del río Aconcagua. Su característica principal es la presencia de una estación seca prolongada y un invierno bien marcado con temperaturas extremas que llegan a cero grados. Los Andes registra una temperatura media anual de 15.2°C pero los contrastes térmicos son fuertes. En verano las máximas alcanzan valores superiores a 27°C durante el día.

Los montos de precipitación media anual registrados en el sector costero de la cuenca alcanzan valores aproximados de 395 mm/año y temperaturas de 14.5°C. Por efectos del relieve, en el sector centro de la cuenca, se presentan áreas de mayor sequedad y montos menores de precipitación (261 mm/año). En sectores más elevados, las precipitaciones aumentan alcanzando valores medios anuales de 467 mm y temperaturas medias anuales de 14.1°C (Estación Vilcuya).

2.4.2 Clima Frío de Altura

El Clima Frío de Altura, se localiza en la Cordillera de los Andes por sobre los 3.000 metros de altura. Las bajas temperaturas y las precipitaciones sólidas, caracterizan este tipo climático, permitiendo la acumulación de nieve y campos de hielo de tipo permanentes en cumbres y quebradas de la alta Cordillera. En general, para ambos tipos climáticos, los valores registrados de precipitación, son mayores durante las temporadas invernales especialmente durante los meses de Junio, Julio y Agosto (Figura 5) (Dirección General de Aguas, 2004).

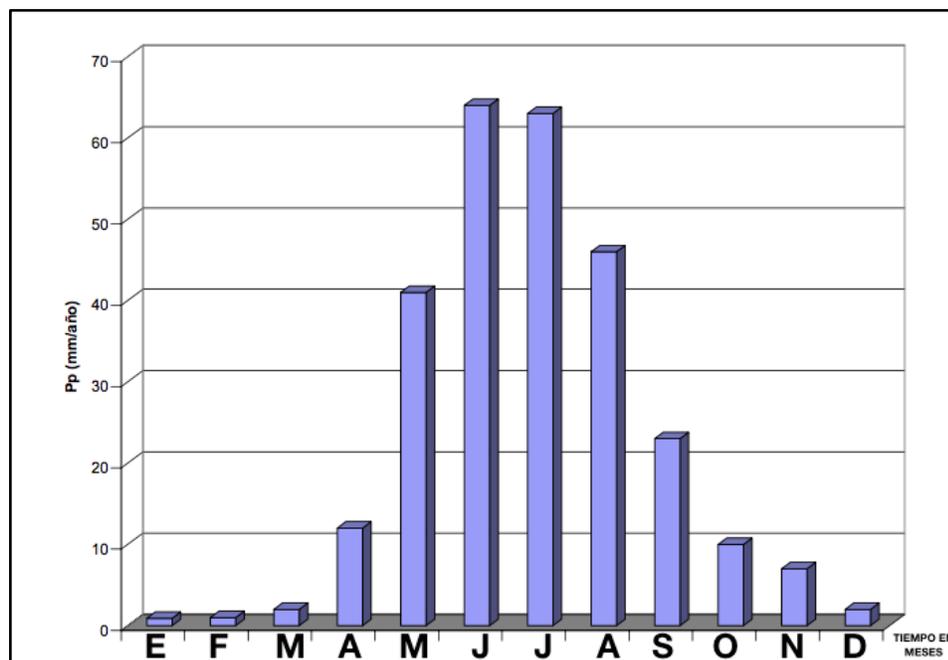


Figura 5. Montos de Precipitaciones Medias Mensuales registradas en Estación Pluviométrica de Resguardo Los Patos, ubicada a 65 km al NE de la zona de estudio, en la Comuna de Putaendo (Dirección General de Aguas, 2004).

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de esta investigación incluye tres etapas: 3.1 Trabajo de pre-terreno, 3.2 Trabajo de terreno y 3.3 Trabajo de post-terreno.

3.1 Trabajo de pre-terreno

El trabajo de pre-terreno incluye un estudio bibliográfico que incorpora revisión y comprensión conceptual de lo que significa e implica el estudio del Peligro Geológico asociado a Inundaciones. Además se estudiarán diversas metodologías usadas en contexto de peligro por inundación. Se analizará el contexto geológico de la región considerando las morfologías principales, depósitos y posibles fallas. Por último se elaborará un mapa geomorfológico preliminar a partir de imágenes satelitales y cartas topográficas.

3.2 Trabajo de terreno

El trabajo de terreno consistirá en la identificación de depósitos relacionados a inundaciones a través de la elaboración de columnas estratigráficas y perfiles longitudinales in situ al cauce del río con el principal objetivo de observar de forma explícita el orden y disposición de los depósitos fluviales.

El análisis sedimentológico permitirá determinar el tamaño de grano, selección, grado de esfericidad y redondez. Se han considerado las propiedades de los clastos, ya que, estos reflejan la historia del ambiente de proveniencia y de la roca; se estudiará la relación entre los clastos, los tipos y la orientación en la que se encuentran. Esta clase de información también permitirá tener una idea preliminar de la capacidad de infiltración que el suelo del cauce tiene.

Se realizarán transectas paralelas a infraestructuras como puentes de la zona de estudio, tomando las dimensiones de estos y posteriormente esquematizarlos.

La determinación del Coeficiente de Rugosidad de Manning (CRM) ha sido obtenido a través de una comparación entre fotografías de ríos con el CRM ya establecido por el USGS (U.S. Geological Survey), dicho esto, se recorrerá la zona de estudio buscando cuál de estas fotografías presenta más semejanzas con el área de estudio, en diversos puntos, puesto que el CRM, varía a lo largo de un mismo río. Los coeficientes se encuentran en la página oficial del sitio web

(<https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/>) con 22 ríos con sus respectivas fuentes de información, de esta forma cada vez que se asignaba un río de la fuente U.S. Geological Survey, a un determinado punto a lo largo del Río Aconcagua, este tomaba el valor n del río con el cual ha sido comparado.

3.3 Trabajo de post-terreno

El trabajo de post terreno incluirá: a) Análisis sedimentológico y estratigráfico, b) Análisis Geomorfológico, c) Estimación de precipitaciones futuras, d) Estimación de caudales máximos futuros.

Análisis sedimentológico y estratigráfico: consiste en la recopilación y materialización esquemática de los depósitos del río, es decir analizar las mediciones de terreno, para poder conceptualizar los tamaños el grano, y en general la sedimentología de la zona de estudio y así posteriormente interpretar en el Capítulo 7 de Discusiones.

Análisis Geomorfológico: consiste en la recopilación de las observaciones medidas en terreno, respecto de las geoformas del sistema fluvial, como cauce, llanura de inundación, terrazas, barras, patrones de drenaje y formas del lecho y así posteriormente interpretar en el Capítulo 7 de Discusiones.

Estimación de precipitaciones futuras: para estimar las precipitaciones futuras se define primero la cuenca aportante, y luego se consideran las mediciones de las estaciones pluviométricas que se encuentren en ella (río arriba de la zona de estudio). Se recopilan las Precipitaciones Máximas Anuales en 24 horas, a partir de los Reportes Meteorológicos disponibles en Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea de la Dirección General de Aguas. Con dicha información se obtendrán estimaciones de las precipitaciones futuras de cada estación, para ciertos periodos de retorno, considerando que las frecuencias de las precipitaciones pasadas se mantienen en el tiempo. Existen 25 estaciones meteorológicas en la cuenca hidrográfica del Río Aconcagua (Figura 6) de las cuales 7 han sido seleccionadas por cercanía a la zona de estudio y por presentar una correlación con la estación más representativa (Estero Rabuco) de las precipitaciones que caen sobre la cuenca aportante.

El coeficiente de correlación más aceptado, que para esta investigación el criterio ha sido sobre 0,75, descartando así las estaciones que presenten un valor inferior a este. Las estaciones seleccionadas son: Estero Rabuco, Catemu, Río Aconcagua en San Felipe, San Felipe, Río Aconcagua en Chacabuquito, Vilcuya, y Riecillos.

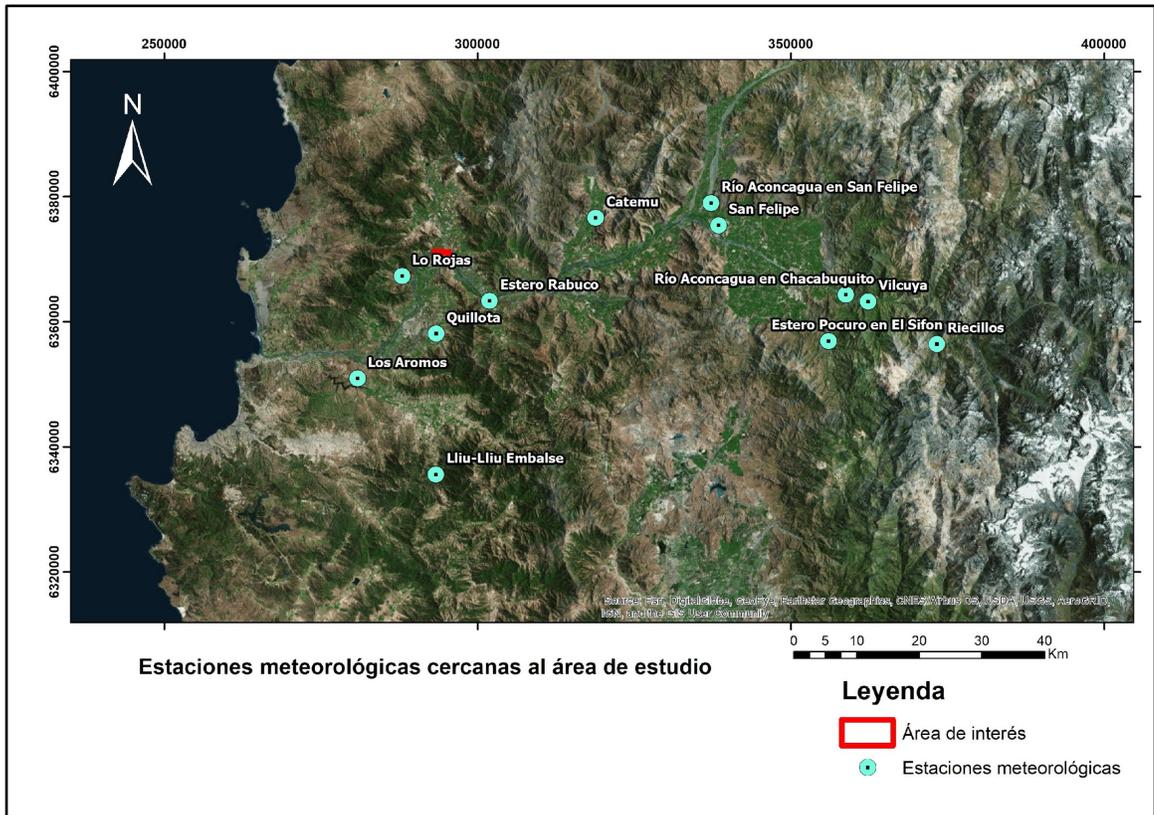


Figura 6. Estaciones Meteorológicas correspondientes a la Cuenca Hidrográfica del Río Aconcagua (Mapa de Elaboración propia, Google Earth, 2018).

De las estaciones seleccionadas se extrae información de Precipitaciones Máximas Anuales en 24 horas a partir del año 2000, esto debido a la falta de datos de años anteriores, posteriormente se tabulan y ordenan los datos en Microsoft Excel, donde se analizan las frecuencias de las precipitaciones máximas diarias por año con el método de distribución de Gumbel (Ponce, 1989), la cual es utilizada para modelar la distribución del máximo (o el mínimo), calculando de esta forma valores extremos. Los resultados de

este método permiten calcular la precipitación máxima en 24 horas con periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

Estimación de caudales máximos: para saber el volumen precipitado en tales eventos extremos en la cuenca aportante, se hacen mapas de isoyetas para los diferentes periodos de retorno, mediante herramientas de interpolación de datos y análisis espacial en el software ArcGis. Luego se convierten las isoyetas que son polilíneas a polígonos y se realiza el procedimiento indicado en la sección 4.3 del Marco Teórico, utilizando herramientas de calcula el área entre dos isoyetas, y se les asigna el valor promedio entre las dos isoyetas que lo limitan.

Mediante uso de ArcGIS, se calculará el volumen precipitado en tales eventos extremos mediante mapas de isoyetas, el tiempo de concentración y se utilizarán algunos de los métodos definidos por la DGA para estimar el caudal del río durante esos eventos extremos. Esta información se contrastará con los caudales de diseño en las zonas críticas a inundarse como los puentes existentes en La Calera, los cuales han sido estimados mediante perfiles transversales y el coeficiente de rugosidad de Manning.

4. MARCO TEÓRICO

Para el marco teórico de esta investigación se requieren de conceptos claves que enmarcan la hipótesis de trabajo tales como: inundaciones, llanura de inundación y sus causas, riesgo, peligro, vulnerabilidad, tiempo de concentración, caudales de diseño, coeficiente de Rugosidad de Manning. Estos conceptos son claves para estimar el caudal de diseño y los periodos de retorno.

4.1 Inundaciones y llanuras de inundación

Existen amenazas de origen hidrológico como lo son las inundaciones, las crecidas repentinas y los aludes torrenciales (conocidos también como flujos de detritos o barro). Las crecidas repentinas se refieren al paso de gran cantidad de agua en periodos de tiempo muy cortos y a grandes velocidades, mientras que las inundaciones son cantidades de agua fuera de su cauce natural, que se producen en tiempos relativamente

más largos. "Aludes torrenciales" se refiere al transporte de sedimentos (tierra, bloques, escombros) en gran concentración. Todos estos son fenómenos ampliamente relacionados puesto que, por ejemplo, las inundaciones se producen a partir de una cierta intensidad de crecida.

En función de la velocidad del escurrimiento y de la velocidad con la cual se producen las variaciones de nivel de las aguas, los fenómenos hidrológicos pueden clasificarse en: ascensionales y torrenciales, lentos y repentinos, estáticos y dinámicos.

Los procesos ascensionales o inundaciones ocurren por lo general en las partes medias y bajas de las cuencas y son producidas por lluvias fuertes o continuas que sobrepasan la capacidad de absorción de los suelos y por la insuficiente capacidad de descarga de las quebradas, riachuelos y ríos (represamiento). Se manifiestan por la elevación paulatina del nivel de agua. Se producen especialmente en zonas de baja pendiente ($<2\%$), a orillas de lagos, lagunas, etc. Dan oportunidad para que las comunidades asentadas en las riveras de los ríos o lagos puedan trasladarse a lugares más seguros, hasta que los niveles del agua vuelvan a la normalidad, sin embargo causan daños o desplomes por remojamiento de cimientos o sobresaturación de bases (Instrumentos de apoyo para el análisis y gestión de los riesgos naturales dirigida al especialista en análisis de Riesgos Naturales, 2002).

Las llanuras de inundación corresponden a un espacio de terreno llano colindante con un río, principalmente con sus tramos inferiores y constituido por aluviones depositados por el río. Se origina por la migración de la franja de meandros aguas abajo; ensanchando por lo tanto el valle, cuyas laderas pueden llegar a separarse algunos kilómetros. En épocas de inundación, cuando el río rebosa sus orillas se depositan sedimentos a lo largo de éstas y en el mismo canal. (Llanura de inundación superficie de inundación, 2012).

Debido a su naturaleza siempre cambiante, las llanuras de inundación y otras áreas inundables deben ser examinadas para precisar la manera en que pueden afectar al desarrollo de las comunidades. Este capítulo presenta una visión general de los conceptos importantes relacionados con las evaluaciones del peligro de inundaciones y

explora el uso de datos de percepción remota de satélites para complementar las técnicas tradicionales de evaluación.

4.2 Causas de Inundación

Según el factor detonante se identifican 5 tipos principales de inundaciones asociadas a: procesos volcánicos, procesos nivo-glaciares, deslizamientos, intervenciones antrópicas y precipitaciones; estas últimas causan el 71% de las inundaciones en el período de 1574-2012 (Rojas O, 2014).

Los factores desencadenantes de inundaciones fluviales pueden estar relacionados con diversas causas tales como: precipitaciones persistentes, lluvias intensas de corta duración, fusión de nieve y hielo, descarga de aguas represadas por glaciares, procesos de remoción en masa, rotura de embalses e infraestructura hidráulica y crecidas asociadas a erupciones volcánicas (Ollero, 1997; Adhikari et al., 2010).

Para el caso de esta investigación las inundaciones son del tipo fluvial, las cuales, son un proceso natural por el cual el flujo desborda los límites de un cauce (Tockner et al., 2010). Este proceso deviene peligroso cuando el hombre ocupa zonas inundables, transformando el fenómeno en una amenaza para los asentamientos humanos (Keller & Blodgett, 2007). Al materializarse la amenaza, produce catástrofes o desastres, iniciándose el conflicto entre los sistemas natural y social (Merz et al., 2010; Rojas y Martínez, 2011).

4.3 Riesgo y Peligro Geológico

Lo anteriormente descrito indica que las amenazas de origen hidrológico conllevan peligro, riesgo geológico y vulnerabilidad que afectan a las comunidades perjudicadas. El peligro geológico corresponde a un evento físico, potencialmente perjudicial, fenómeno y/o actividad humana que podría causar la muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental. El peligro puede ser individual, combinado o secuencial en su origen y efectos. (Sernageomin, 2015). El riesgo geológico corresponde a la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, daño a la propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro del

ambiente), resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad. (Sernageomin, 2015). La vulnerabilidad, según Cannon (1994), es una condición de la población o de los individuos en función de sus características económicas y sociales en las que se desarrolla, además de su localización geográfica, lo cual los hace más o menos susceptibles a ser afectados por un fenómeno natural. En el caso de esta investigación, la población se encuentra adyacente al cauce del río, lo que hace a sectores de la comuna de La Calera altamente vulnerables. $\text{Riesgo} = \text{Peligro (Amenaza)} * \text{Vulnerabilidad}$. El riesgo es más concreto mientras que el peligro es genérico.

4.4 Distribución Areal de precipitaciones

Se usa el Método de trazado de Isoyetas. Se denomina isoyeta a la línea que une los puntos con igual precipitación. El procedimiento a seguir es el siguiente: a) Usando los datos de las estaciones pluviométricas dentro o cercanas a la cuenca, mediante interpolación, se trazan las isoyetas sobre la cuenca, b) se asigna al área encerrada por dos isoyetas la media aritmética de éstas, c) se multiplica el área calculada y la precipitación asignada obteniendo el volumen de agua caída. La suma en toda la cuenca da el volumen total precipitado, d) la precipitación media de la cuenca es el volumen total precipitado dividido por el área de la cuenca.

4.5 Tiempo de Concentración

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda una gota de lluvia que ingresa a la parte más distal de la cuenca en pasar por su punto de salida. Su determinación define las duraciones de las precipitaciones de diseño. El tiempo de concentración depende de las características geomorfológicas de la cuenca y está relacionado con la velocidad del flujo a través de la pendiente media de la cuenca (Santis Sepúlveda, 2015).

El tiempo de concentración puede calcularse mediante ecuaciones empíricas definidas por diversos autores, dentro de las que se encuentran:

1. Método de Kirpich

$$t_c = 0,01947 * \left(\frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \right)$$

2. Método de Témez

$$Tc = 0,3 * \left(\frac{L^*}{S_0^{0,25}} \right)^{0,75}$$

3. Método de California Culverts Practice

$$t_c = 0,0195 * \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

Dónde:

t_c : tiempo de concentración en minutos

T_C : tiempo de concentración en horas

L: longitud del cauce principal en m

L*: longitud del cauce principal en km

S: pendiente promedio de la cuenca en m/m

S_0 : diferencias de cotas sobre L en porcentaje

H: diferencia entre cota máxima y mínima de la cuenca.

4.5 Caudales de Diseño y Coeficiente de Rugosidad de Manning

Para el diseño de un sistema de recolección y evacuación de aguas lluvias se debe estimar el caudal de diseño.

El coeficiente de Rugosidad de Manning es un factor que considera otras variables, asociadas a irregularidades presentes en el cauce que pudiesen afectar el caudal de

diseño y para ello, se utiliza el método de Cowan (Chow, 1983) donde se propone la siguiente ecuación: $n = m (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$ (Santis Sepúlveda, 2015).

Dónde:

n_0 : Valor de n para un canal recto, uniforme, prismático y con rugosidad homogénea.

n_1 : Corrección por irregularidades del perímetro mojado a lo largo del tramo estudiado.

n_2 : Corrección por variación de forma y de dimensiones de las secciones.

n_3 : Corrección por obstrucciones: troncos, rocas, etc.

n_4 : Corrección por presencia de vegetación.

m : Factor que mide la frecuencia de meandros o curvas

4.6 Periodos de Retorno

El estudio de las precipitaciones máximas es necesario en múltiples aplicaciones. Así en hidrología para la estimación de avenidas es necesario conocer el valor de la máxima precipitación probable registrada para un determinado período de retorno. El "período de retorno o de recurrencia" (T) es el intervalo medio expresado en años en el que un valor extremo, para este caso un evento de precipitaciones durante 24 horas, alcanza o supera al valor " x ", al menos una sola vez (Elías y Ruiz, 1979).

4.6.1 Distribución de Gumbel

La distribución de Gumbel, una variante de la distribución de valor extremo, es muy popular en la hidrología para modelar eventos extremos que no se adecuan a la distribución normal, su distribución acumulada se muestra en la siguiente función:

$$F(x) = e - e^{-d(x - u)}$$

$F(X)$ es la probabilidad de que un evento de lluvia sea menor o igual que x mm. Lo que significa que la probabilidad de que ocurra un evento extremo sobre x mm es de $1 - F(X)$, despejando x tenemos:

$$x = u - \frac{\ln(-\ln(F(x)))}{d}$$

d y u son parámetros modelables según características de los datos con los que se trabajan, como la media y la desviación estándar:

$$u = \bar{x} - 0,450047 * S$$

$$\frac{1}{d} = 0,779696 * S$$

En esta expresión, \bar{x} es la media y S la desviación estándar de los datos.

4.6.2 Probabilidad de Excedencia y Periodo de retorno

Para definir la probabilidad presente en un evento extremo se requiere conocer dos conceptos, que son el periodo de retorno y la probabilidad de excedencia:

Periodo de Retorno: se define como el tiempo que transcurre entre dos sucesos iguales. Sea ese tiempo, T. Por ejemplo: El periodo de retorno para un terremoto de 9,5 grados escala de Richter es de 350 años.

Probabilidad de Excedencia: es la probabilidad de que ocurra un evento con periodo de retorno T.

$$P_{\text{excedencia}} = P(x) = \frac{1}{T}$$

Con esto, sabiendo que la probabilidad de que ocurra un evento extremo sobre X mm es de $(1 - F(X))$, se puede definir la probabilidad, asociada a un periodo de retorno T, de que ocurra un evento extremo como:

$$1 - F(X) = \frac{1}{T}$$

Con esto, se puede despejar F(X) y obtener un valor de evento extremo de x mm asociado a un periodo de retorno de T años.

4.7 Caudales Máximos

Los caudales máximos para distintos periodos de retorno se determinarán mediante relaciones indirectas del tipo precipitación-escorrentía.

4.7.1 Método Racional

Se utilizará el método racional, para verificar el comportamiento de cada cuenca donde se emplaza el proyecto, frente a eventos pluviométricos extremos a diferentes períodos de retorno, según la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{C * I_{tc}^T * A}{3,6}$$

Dónde:

Q = caudal en m³/seg.

C = Coeficiente de escorrentía o fracción de la precipitación que escurre superficialmente, que se estimó según tabla propuesta por el Manual de Carreteras Volumen 3, el cual entrega recomendaciones para determinar el coeficiente de escorrentía para distintos periodos de retorno, de acuerdo a las características de la cuenca analizada.

I_{tc}^T = Intensidad de lluvia con período de retorno "T" y una duración "tc", expresada en mm/hora.

A: Área aportante de la subcuenca en km².

La intensidad máxima de la lluvia se obtiene de la relación Grunsky según la siguiente expresión:

$$I_{tc} = \frac{P_{24}^T}{24} * \frac{\sqrt{24}}{t_c}$$

Dónde:

I_{tc} = Intensidad media máxima para el periodo (mm/hr).

P₂₄^T = Precipitación máxima en 24 horas para el periodo de retorno de T.

t_c = Tiempo de concentración (hr).

Siguiendo la metodología indicada en el “Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información pluviométricas” (DGA, 1995), usamos la siguiente ecuación para calcular:

$$Q = \frac{1}{3,6} (C(T = 10 \text{ años}) * \frac{C(T)}{C(T = 10 \text{ años})} * A_p * I_{tc}^T$$

Dónde:

Q: Caudal máximo dado el periodo de retorno en m³/s.

C(T=10 años) : Coeficiente de esorrentía asociado a la Fórmula Racional para un periodo de retorno de 10 años variable según la ubicación geográfica.

C(T)/C(T=10 años) : Factor de Frecuencia que depende de la ubicación geográfica y del periodo de retorno.

A_p: área pluvial en Km².

I_{tc}^T: Intensidad de lluvia con período de retorno "T" y una duración "tc", expresada en mm/hora.

4.7.2 Método Verni King Modificado

Como las cuencas son de una amplia extensión, se usará además el método de Verni y King Modificado, que funciona para cuencas entre 20 y 10000 Km². La fórmula es la siguiente (DGA, 1995):

$$Q = C(T) * 0,00618 * P_{24}^{1,24} * A_p^{0,88}$$

Dónde:

Q: Caudal máximo en m³/s dado un periodo de retorno T.

C(T) : Coeficiente empírico para un periodo de retorno de T años. Se calcula multiplicando el coeficiente empírico para un periodo de retorno de 10 años (0.027 para la III Región) por un factor de frecuencia que varía según la ubicación geográfica de la cuenca y el periodo de retorno a usar.

A_p: área pluvial en Km².

P : Precipitación diaria máxima asociada a un periodo de retorno de T años.

4.8 Caudal de Verificación

Una vez definidas las características para cada transecta realizada dentro del cauce, se realizará una verificación en cada una de ellas, para verificar que el cauce tenga la capacidad de contener una crecida centenaria, para eso, se usará la Fórmula de Manning (Chow, 1983) usada para el sistema internacional de unidades, la cual consiste en lo siguiente:

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}} * \frac{\sqrt{S}}{n}$$

Dónde:

A: Área de la sección transversal mojada en m².

P: Perímetro de la sección transversal mojado en m.

S: Pendiente del curso en m/m.

n: Coeficiente de rugosidad de Manning.

Q: Caudal de diseño en m³/s.

5. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El marco geológico regional de esta investigación consta de las Formaciones que se encuentran cercanas al área de estudio del Río Aconcagua (Figura 7). A continuación se describen las Formaciones Quebrada del Pobre, Ajjal, Cerro Calera, Horqueta, y Lo Prado.

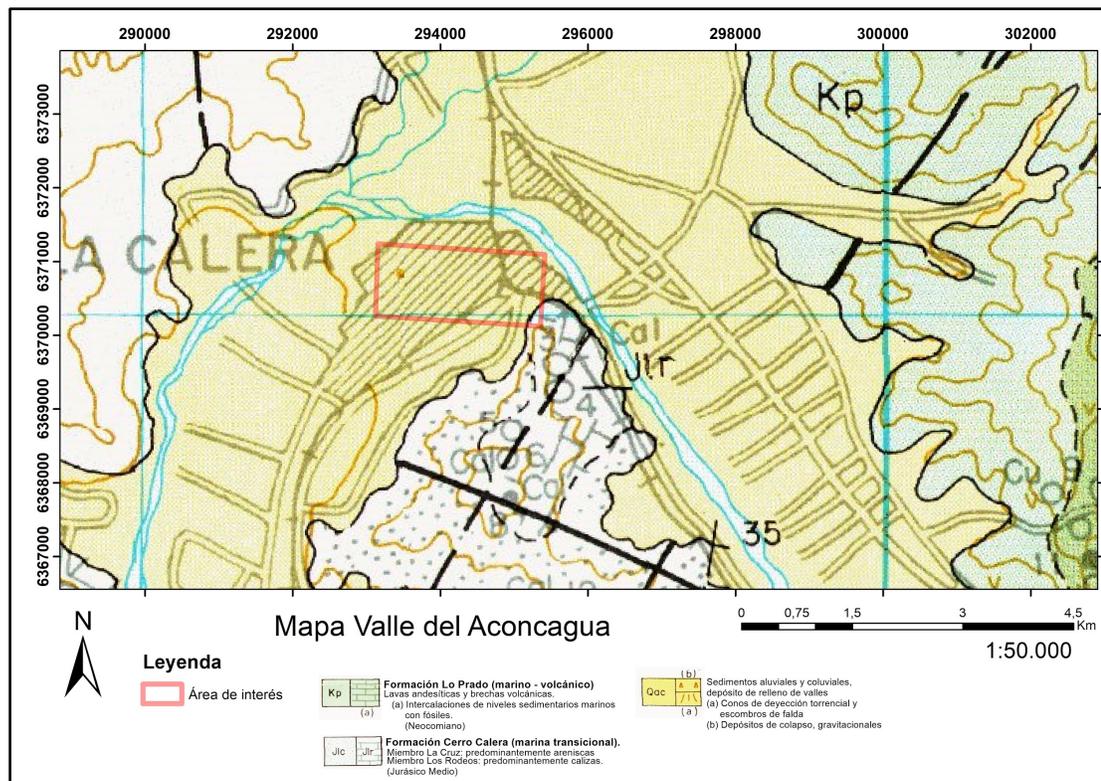


Figura 7. Mapa del Valle del Aconcagua. Extracto Carta Geológica Quillota-Portillo, Rivano 1996, SERNAGEOMIN.

5.1 Formación Quebrada del Pobre (Jurásico Inferior; Sinemuriano)

Se ubica en la Cordillera de la Costa a la altura de Petorca en la Región de Valparaíso. Al norte de la región es discordante sobre rocas volcánicas del Triásico mientras que al norte del río Aconcagua es discordante con basamento paleozoico. Se presenta como unidad sedimentaria marina, con areniscas, conglomerados e intercalaciones de limonitas, calizas e ignimbritas. Por su contenido fósil (ammonites, corales y pelecípodos) se le asigna una edad Sinemuriano. De acuerdo con litología y contenido fosilífero se interpreta una depositación en plataforma en un ambiente litoral a sublitoral.

La existencia de una zona continental al oeste, en la parte superior de la unidad, es sugerida debido a las intercalaciones de ignimbritas (Vergara et al. 1995).

5.2 Formación Ajial (Jurásico Medio; Aalaniense)

Se encuentra en la Cordillera de la Costa desde la altura de Petorca hasta bajo el río Aconcagua en la Región de Valparaíso. Subyace de manera concordante con la Formación Cerro Calera, mientras que al Norte esta unidad desaparece pasando directamente a la Formación Horqueta, y yace concordante a la Formación Quebrada del Pobre. Esta Formación consiste en una secuencia inferior de lavas ácidas y una secuencia superior de depósitos piroclásticos de caída e ignimbritas, intercaladas con rocas sedimentarias y calizas hacia el Este. Respecto a la geoquímica, las lavas basálticas tienen tendencia calcoalcalina y presentan bajo contenido en HREE y un alto contenido de Rb, K, Ba y Th. Los diversos fósiles (corales, equinodermos, pelecípodos y amonitas) indican una edad Aalaniense. Hacia el norte de la Formación en su parte superior se evidencian areniscas rojizas similares a las de la Formación Cerro Calera. Debido a la geoquímica se interpreta que esta formación representa un arco (Vergara et al. 1995).

5.3 Formación Cerro Calera (Jurásico Medio; Aalaniense – Bajociense)

Aflora en una franja NS desde La Calera hasta el sur de Olmué. Sobreyace de manera concordante a la Formación Ajial y subyace también concordantemente a la Formación Horqueta. Se define como una unidad marina sedimentaria compuesta de conglomerados, areniscas y limolitas con intercalaciones de calizas principalmente oolíticas (Figura 7). Se ha determinado una edad Aaleniense-Bajociense en base a su contenido fosilífero (ammonites) (Thomas 1958; Covacevich y Piracés, 1976; Rivano et al., 1993). Su litología y fauna indican condiciones litorales a sublitorales (Vergara et al. 1995).

5.4 Formación Horqueta (Jurásico Medio - Cretácico Inferior)

Aflora en una franja elongada NS desde el sector de la mina el Soldado hasta unos 20 km al norte de Curacaví. Se apoya concordantemente sobre la Formación Cerro Calera y subyace en probable discordancia al miembro inferior de la Formación Lo Prado

(Piracés, 1976). Se define como una unidad volcánica y volcanoclástica continental, compuesta por una parte inferior de lavas ácidas y básicas con intercalaciones de areniscas, areniscas conglomerádicas y conglomerados (Vergara et al. 1995). La edad de esta Formación solo se ha establecido por su posición estratigráfica, entre el Jurásico Medio y el Cretácico Inferior (Rivano et al., 1993).

5.5 Formación Lo Prado (Cretácico Inferior; Valanginiense - Berriasiano)

Aflora de manera NS en la Cordillera de la Costa en la V región y región Metropolitana. Se separa de las unidades Jurásicas y del basamento Paleozoico occidental por discordancia (Carter, 1963; Corvalán y Dávila, 1964) y hacia el este está en contacto concordante con la Formación Veta Negra. Se divide en un miembro inferior sedimentario marino el cual consiste en una secuencia marina de grauvacas, limonitas y calizas (Figura 7) y un miembro superior compuesto de rocas sedimentarias alternadamente marinas y continentales con intercalaciones volcánicas de química bimodal (ignimbritas ácidas y lavas básicas subordinadas). La fauna fósil está compuesta principalmente por ammonites y algunos pelecípodos que definen una edad Valanginiense al Berriasiano.

6. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

El marco geológico local de esta investigación se enfoca principalmente en depósitos fluviales, coluviales y aluviales correspondientes a los depósitos propios del río (Figura 7) y donde se encuentran las poblaciones más cercanas a la llanura de inundación.

5.1 Sedimentos Cuaternarios No Consolidados Qel, Qac, Qg

Como depósitos No Consolidados se reconocen y diferencian en las Hojas Quillota y Portillo los sedimentos eólicos y litorales recientes (Qel) , los sedimentos aluviales y coluviales (Qac) y los sedimentos fluvio-glaciales y glaciales (Qg) , asignados en general al Cuaternario Superior o Reciente.

Los sedimentos aluviales, coluviales y depósitos de relleno de valles (Qac) están relacionados a los cursos de agua actuales y tiene su expresión más importante en la Hoya del río Aconcagua, en la mitad sur del área están formados por acumulaciones de

gravas y ripios, regular a mal estratificados, y por arenas y limos, con buena estratificación, se trata en la mayoría de los casos de sedimentos efímeros, especialmente los depósitos de valle y algunos conos de eyección (Qac(a)), los que suelen evolucionar año a año, de acuerdo con la abundancia e intensidad de las precipitaciones.

Los depósitos de colapso gravitacional (Qac(b)) corresponden a deslizamientos en masa de grandes proporciones, actualmente estabilizados y colonizados por vegetación en la mayoría de los casos; los principales se ubican a lo largo de la Megafalla Pocuro (derrumbes de Conchuca, Alicahue, Los Patos y Campos de Ahumada), otros, de dimensiones más modestas aparecen en La Olla (Río Rocín) Salto del Soldado y Juncalillo (por el camino Internacional a Mendoza) el derrumbe de Juncalillo, que taponó y dio origen a la Laguna del Inca, ha sido erróneamente figurado en el mapa como un depósito morrénico correspondiendo en realidad a un derrumbe. Estos depósitos se habrían generado probablemente por colapso gravitacional debido a movimientos sísmicos, llama la atención su ubicación preferencial a lo largo de la traza de la Megafalla de Pocuro la que durante estos sismos pudo haber constituido una zona de inestabilidad; igualmente llama la atención la relación espacial entre estos derrumbes y las terrazas del borde oriental de la cuenca de San Felipe-Los Andes (Qt).

Los depósitos glaciales y fluvioglaciales exponen sólo en la parte oriental del área, Hoja Portillo, generalmente estas acumulaciones se presentan en zonas fronterizas y asociadas a formas de erosión glacial; estas son especialmente notorias en el curso superior del río Colorado y en los nacientes del río Juncal y esteros Navarro y San José; También en el límite norte de la Hoja se pueden apreciar en el sector del paso Los Teatinos importantes acumulaciones morrénicas, las que están compuestas por abundante material clástico grueso, anguloso, incluido en una matriz arenosa; es común encontrar asociados a estos depósitos lóbulos glacio-nivales recientes. Se han incluido en estos últimos depósitos mencionados morrenas de glaciares actuales como el del Juncal y morrenas de glaciares de roca como el que se observa en el río Blanco (Rivano, 1996).

6. RESULTADOS

Los resultados se detallan en subcapítulos e incluye: 6.1 Análisis sedimentario y estratigráfico. 6.2 Análisis geomorfológico. 6.3 Análisis de estimación de precipitaciones futuras.

6.1 Análisis Sedimentario y Estratigráfico

El sistema fluvial del Río Aconcagua contiene sedimento acumulado dentro de los canales y en las llanuras de inundación. La zona de estudio presenta depósitos de canal, los cuales están compuestos generalmente de material grueso, además de sedimentos tamaño limo, los clastos tamaño grava van desde los 2 a los 30 cm, este material incluye gravas, troncos, y fango parcialmente consolidado que ha sido erosionado de las paredes y algunas barras del canal. A continuación se tienen tres columnas representativas del área de estudio. El mapa de ubicación para estas columnas se encuentra en la Figura 11.

La Columna Estratigráfica 1 (Anexo 1), descrita de base a techo (donde base es 1 y techo es 2 (Tabla 1). El primer estrato tiene un espesor de 70 cm aproximadamente y granulometría tamaño grava, sus clastos varían desde 2 a 20 cm, con forma redondeada y baja esfericidad, de moderada selección, clasto soportado con clastos del tipo lavas andesíticas e intrusivos. El segundo estrato de 50 cm de espesor aproximado, está caracterizado con una granulometría tamaño limo, su forma es redondeada con alta esfericidad, muy buena selección, textura matriz soportada y presenta abundantes raíces (Figura 8).

Tabla 1. Datos sedimentológicos de los depósitos fluviales de la Columna Estratigráfica 1.

Nº de estratos	Tamaño de los individuos o Granulometría (mm)	Forma, Esfericidad y Redondez de los individuos	Selección	Empaquetamiento	Composición
1	Grava (2 a 63)	Redondeado y baja esfericidad	Moderadamente seleccionado	Clasto soportado	Clastos de andesíticas y rodados intrusivos (granitoides)
2	Limo (0,002 a 0,063)	Redondeado y alta esfericidad	Muy bien seleccionado	Matriz soportada	

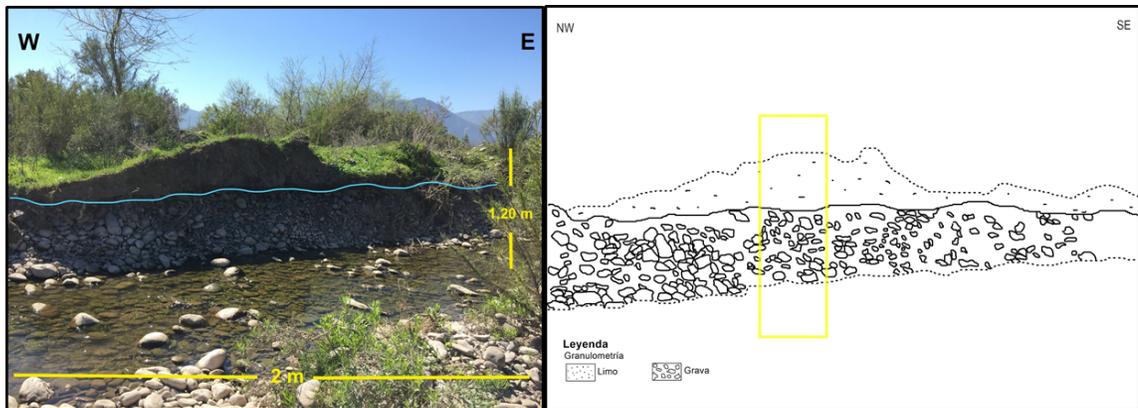


Figura 8. Fotografía y respectivo perfil esquemático de Columna 1.

La Columna Estratigráfica 2 (Anexo 2), descrita de base a techo, donde la base es 1 y techo es 4 (Tabla 2). El primer estrato tiene un espesor de 15 cm aproximadamente y granulometría limo con clastos tamaño grava, los cuales miden 15 cm en su extremo más largo, con forma redondeada y de baja esfericidad, pobremente seleccionado, matriz soportada, la composición de los clastos tamaño grava es de lavas andesíticas y rodados de intrusivos (granitoides). El segundo estrato tiene un espesor de 50 cm aproximadamente, granulometría tgrava, con clastos de 25 cm a 2 cm, con forma redondeada y de baja esfericidad, selección moderada, clasto soportado y sus clastos son en general de composición andesítica e intrusivos (granitoides). El tercer estrato tiene un espesor de 10 cm aproximadamente, granulometría tamaño limo con clastos tamaño grava o bolones de 5 a 10 cm de forma redondeada y baja esfericidad, selección moderada, matriz soportada y sus clastos tamaño grava son de composición de lavas andesíticas y rodados intrusivos. El cuarto estrato tiene un espesor de 78 cm aproximadamente, granulometría grava con forma redondeada y de baja esfericidad, pobremente seleccionado, clasto soportado y la composición de los clastos es de lavas andesíticas y rodados intrusivos (granitoides), presenta raíces y una fina capa cementante de color gris (Figura 9).

Tabla 2. Datos sedimentológicos de los depósitos fluviales de la Columna Estratigráfica 2.

Nº de estratos	Tamaño de los individuos o Granulometría (mm)	Forma, Esfericidad y Redondez de los individuos	Selección	Empaquetamiento	Composición
1	Limo (0,002 a 0,063) con bolones	Redondeado y baja esfericidad	Pobrementemente Seleccionado	Matriz Soportada	
2	Grava (2 a 63)	Redondeado y alta esfericidad	Moderadamente seleccionado	Clasto soportado	Clastos de lavas andesíticas y rodados intrusivos (granitoides)
3	Limo (0,002 a 0,063) con bolones	Muy redondeado y baja esfericidad	Moderadamente seleccionado	Matriz soportada	
4	Grava (2 a 63)	Redondeado y baja esfericidad	Pobrementemente seleccionado	Clasto soportado	Clastos de lavas andesíticas y rodados intrusivos (granitoides)

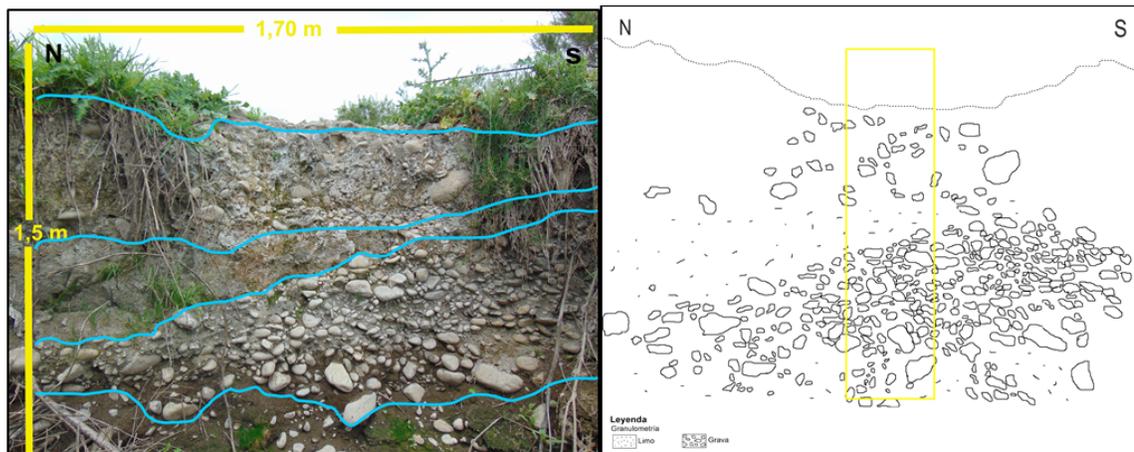


Figura 9. Fotografía y respectivo perfil esquemático de Columna 2.

La Columna Estratigráfica 3 (Anexo 3), descrita de base a techo, donde base es 1 y techo es 3 (Tabla 3). El primer estrato tiene un espesor de 20 cm aproximadamente y granulometría tamaño grava, sus clastos varían desde 2 a 20 cm, con forma redondeada

y baja esfericidad, de moderada selección, clasto soportado y sus clastos en general son lavas andesíticas y rodados intrusivos. El segundo estrato tiene un espesor de 28 cm aproximadamente, la granulometría es tamaño limo, su forma es redondeada y de alta esfericidad, de buena selección, matriz soportada, además de presencia de raíces. El tercer estrato tiene un espesor de 32 cm aproximadamente, granulometría tamaño grava, sus clastos son redondeados y de baja esfericidad, pobremente seleccionado, clasto soportado, su composición es de clastos de andesíticas y rodados intrusivos (granitoides), por encima de este último estrato, hay una fina capa de suelo y raíces, de material muy fino (Figura 10).

Tabla 3. Datos sedimentológicos de los depósitos fluviales de la Columna Estratigráfica 3.

N° de estratos	Tamaño de los individuos o Granulometría (mm)	Forma, Esfericidad y Redondez de los individuos	Selección	Empaquetamiento	Composición
1	Grava (2 a 63)	Redondeado y baja esfericidad	Pobremente Seleccionado	Clasto soportado	Clastos de andesíticas y rodados intrusivos (granitoides)
2	Limo (0,002 a 0,063)	Redondeado y alta esfericidad	Bien seleccionado	Matriz soportada	
3	Grava (2 a 63)	Muy redondeado y baja esfericidad	Moderadamente seleccionado	Clasto soportado	Clastos de andesíticas y rodados intrusivos (granitoides)

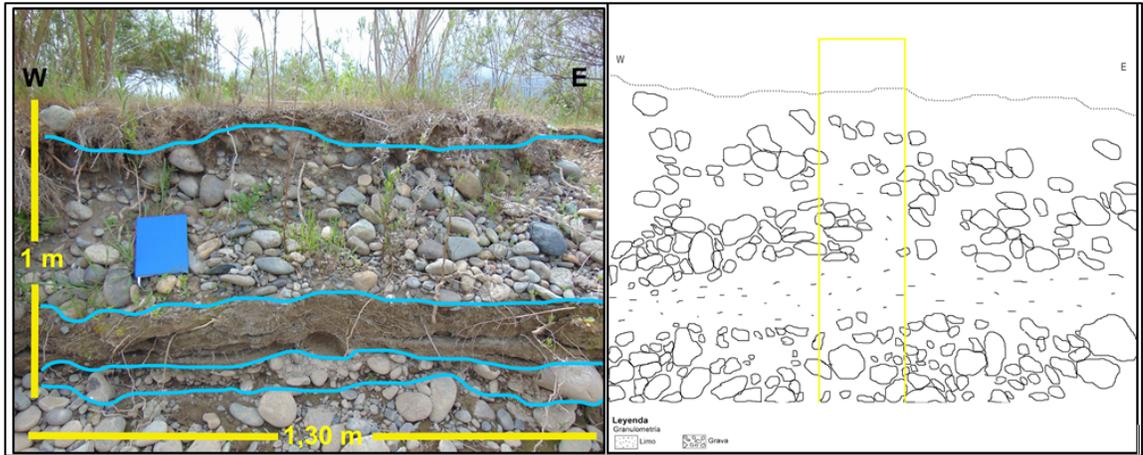


Figura 10. Fotografía y respectivo perfil esquemático de Columna 2.

6.2 Análisis Geomorfológico

La Geomorfología de la zona se describe a partir de la confección de un mapa geomorfológico (Figura 11), el cual muestra la extensa llanura de inundación en color anaranjado, los colores rosados, azules y amarillo representan el cauce del río, donde se observa abundante vegetación, el cuerpo principal de agua superficial, barras longitudinales y laterales respectivamente, en verde oscuro se muestran cordones montañosos, correspondiente a Formación Cerro Calera y Formación Lo Prado. Además se identifican las rutas de carretera y los puentes que unen la comuna de la Calera con Artificio e Hijuelas. Se muestran también los puntos donde se ha medido el CRM y los puntos donde se han realizado las Columnas Estratigráficas 1, 2 y 3.

La llanura de inundación en el polígono de estudio tiene un área de 2.394.660 m² y una distribución de E-W, considerando su ancho desde el término del cauce hasta el primer afloramiento de la Formación Cerro Calera. Las barras longitudinales abarcan un área entre 1.057 m² y 41.670m² y las barras laterales tienen un área entre 4.100 m² y 23.630 m².

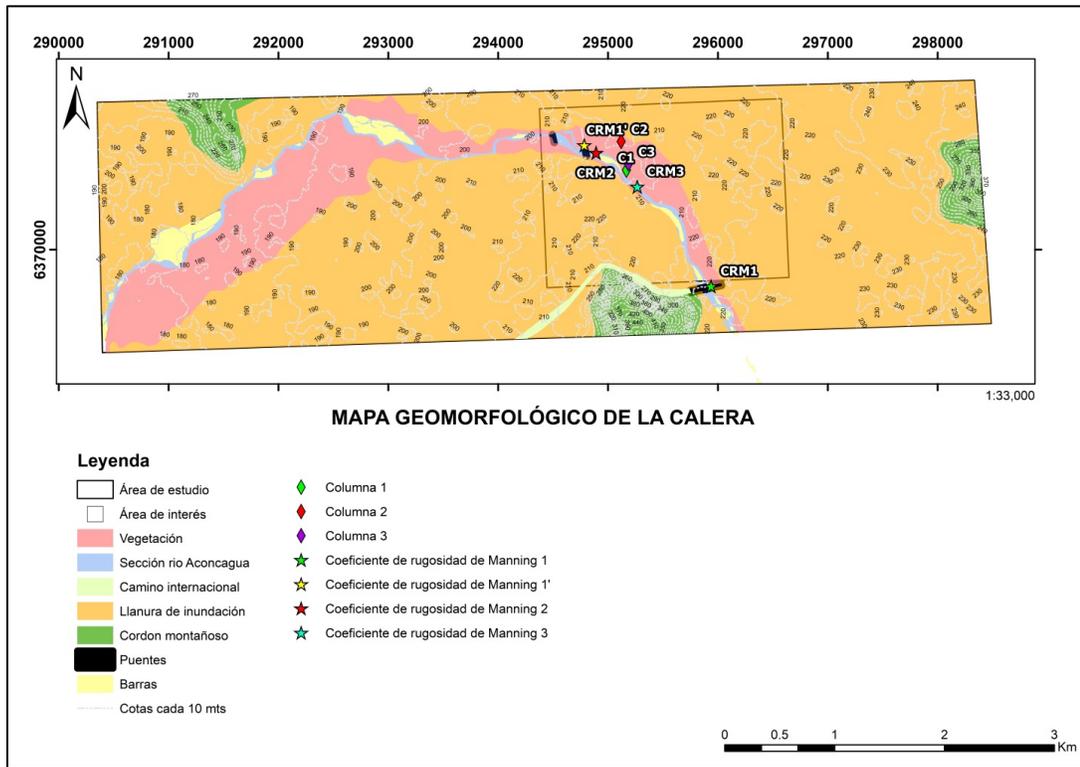


Figura 11. Mapa Geomorfológico del Valle del Aconcgua.

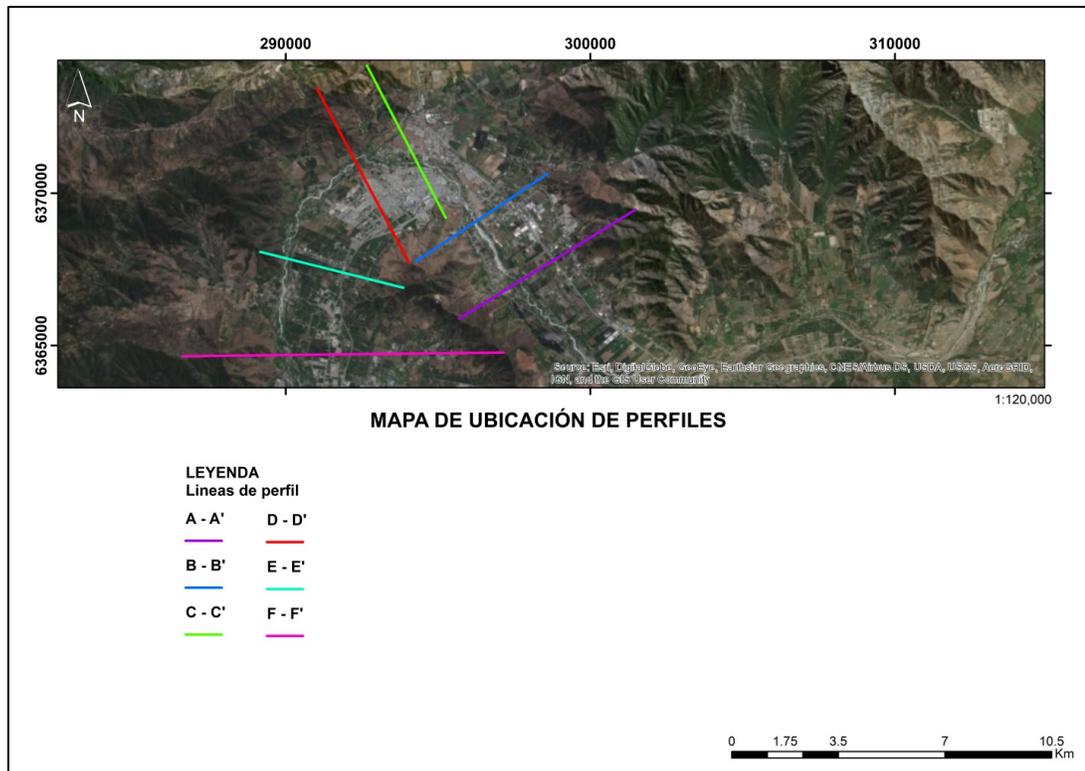


Figura 12. Mapa de ubicación espacial de los perfiles topográficos A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', F-F'.

A continuación se describen y presentan perfiles topográficos transversales a lo largo de la cuenca del Río Aconcagua (Figura 12). Se observa que en los cambios de pendiente, se encuentran las Formaciones Lo Prado, Ajial y Cerro Calera.

El perfil topográfico A-A' (Figura 13), se ubica a aproximadamente 4 km al SE, de la zona de estudio, se observa que la llanura de inundación tiene un ancho de 2,55 km, quitando el ancho del cauce (0,45 km en ese punto). Se observa que el dominio NE con 2,06 km, en ese punto es mucho más extenso que la parte occidental que tiene 0,69 km de ancho. Los puntos más altos corresponden a la Formación Cerro Calera y Lo Prado al SW y NE respectivamente.

El perfil topográfico B-B' (Figura 13), se ubica a 0,8 metros al SE de la zona de estudio, en el se observa que la llanura de inundación tiene una extensión de 3,1 km, quitando el ancho del cauce (0,23 km en ese punto). Se observa el dominio NE con 3,23 km, es mucho más extenso que la zona occidental, la cual tiene una extensión mucho inferior con 0,029 km, esto debido a que en esta zona el canal se encuentra muy próximo a la Formación Cerro Calera, la cual en el Perfil B-B corresponde el cambio de pendiente del sector SW y al NE, se encuentra la Formación Lo Prado, con el miembro inferior Las Pataguas.

El perfil topográfico C-C' (Figura 13), se encuentra dentro de la zona de estudio, en el se observa que la llanura de inundación tiene una extensión de 4,2 km, quitando el ancho del cauce (0,14 km en ese punto). Se observa que el dominio del Norte, con 2,34 km es más bien de similar en extensión entre el sector Sur de la zona de estudio en es punto, la cual tiene una extensión de 2,02 km.

El perfil topográfico D-D' (Figura 13), se ubica a 1,28 km al SW de la zona de estudio, en el se observa que la llanura de inundación tiene una extensión de 3,26 km, quitando el ancho del cauce (0,14 km en ese punto). Se observa que el dominio SE tiene una extensión de 2,7 km, mientras que el dominio NW tiene una extensión de 0,7 km.

El perfil topográfico E-E' (Figura 13) se ubica a 3 km al W de la zona de estudio, en el se observa que la llanura de inundación tiene una extensión de 3,1 km, quitando el ancho del cauce (0,37 en ese punto). Se observa que el dominio SE tiene una extensión de 2,8 km, mientras que el dominio NW tiene una extensión de 0,16 km.

El perfil topográfico F-F' (Figura 13), se ubica a 7,6 km al sur de la zona de estudio, en el se observa que la llanura de inundación tiene una extensión de 5,25 km, quitando el ancho del cauce (0,77 en ese punto). Se observa que el dominio Este tiene una extensión de 5,11 km, mientras que el dominio Oeste tiene una extensión de 0,15 km.

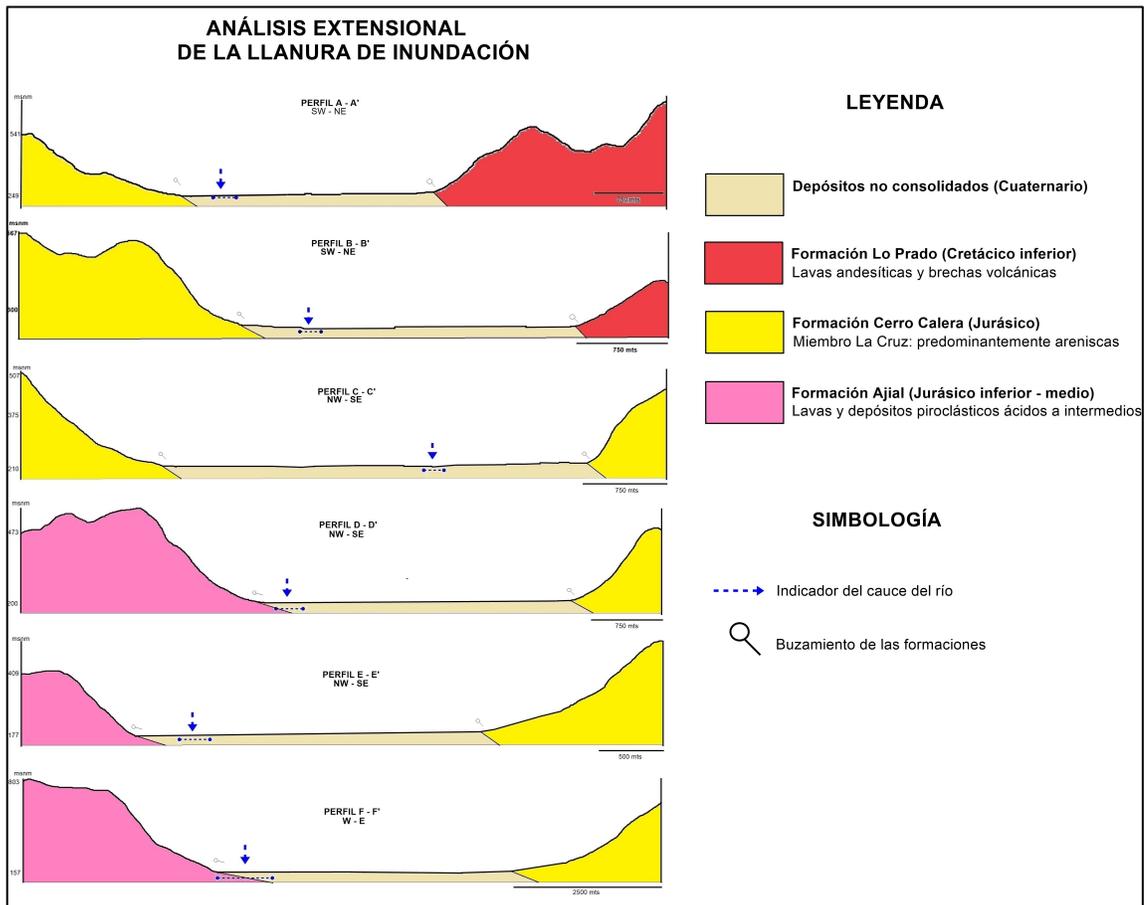


Figura 13. Perfiles de la llanura de inundación, designados como A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', F-F'.

6.3 Análisis y Estimación de Precipitaciones Futuras

6.3.1 Determinación del Coeficiente de Rugosidad de Manning

La determinación del CRM (la ubicación de donde se midieron los CRM, se muestra en la Figura 11, correspondiente al Mapa Geomorfológico) se realizó a través de un análisis comparativo utilizando imágenes de diferentes ríos de EE.UU, cuyo CRM ha sido calculado previamente y múltiples veces. Los resultados permiten reconocer 3 valores de CRM que corresponden, a los valores de los ríos Clark Fork at St. Regis, Montana con $n= 0,028$ (Figura 15); Salt River Below Stewart Mountain Dam, Arizona con $n= 0,032$ (Figura 16); Moyie River at Eastport, Idaho con $n= 0,038$ (Figura 17). La distribución de estos valores aumentan de E-W. Los valores del CRM aumentan mientras disminuye la altitud del cauce del río (Figura 14).

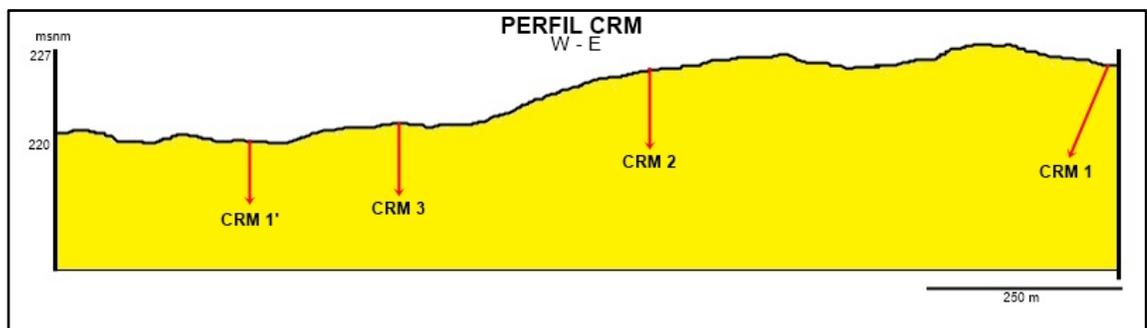


Figura 14. Perfil de elevación de 1,4 km de extensión, donde se ha medido el CRM.

Las semejanzas existentes entre el Río Clark Fork at St. Regis, Montana, EEUU y el Río Aconcagua (Figura 15) en las áreas identificadas son principalmente que el cauce presenta una pendiente uniforme, los depósitos fluviales se presentan en los bordes del cauce, al igual que la vegetación, es abundante en los bordes, este CRM se ha obtenido en dos puntos distintos CRM 1, como muestra la Figura 14, en un perfil de elevación, estas dos zonas se caracterizan por tener el agua dispersa y con abundante caudal, esto se presume debido a que va más encajonado que en los otros dos sectores (Figura 15).



Figura 15. A-B: Río Clark Fork at St. Regis, Montana, EEUU, con $n=0,028$. C: Río Aconcagua vista W. D: Río Aconcagua vista NW.

Las semejanzas existentes entre el Salt River Below Stewart Mountain Dam, Arizona Río Clark Fork at St. Regis, Montana, EEUU y el Río Aconcagua en las áreas identificadas (Figura 16) son principalmente que el cauce presenta una pendiente uniforme, bastante plana, uniforme y homogénea, el volumen de agua disminuye considerablemente respecto de la zona más oriental, ya que, se encuentra canalizada a través de un pequeño surco, debido a esto los depósitos tamaño grava se encuentran descubiertos. Bajo estas similitudes entre ambos ríos se atribuye para este punto del Río Aconcagua un valor de $n=0,032$.



Figura 16. A-B: Salt River Below Stewart Mountain Dam, Arizona con $n= 0,032$. C-D: Vista Sur. E: Vista Oeste. F: Vista Sur.

Las semejanzas observadas entre Moyie River at Eastport, Idaho, EEUU y el Río Aconcagua (Figura 17), en la áreas identificadas, son principalmente los depósitos tamaño grava en los bordes del río, pero ausentes como barras longitudinales en la parte central del río, también presenta un volumen de agua intermedio respecto de las otras dos mediciones de CRM, menor que la medición más oriental, pero de mayor volumen que la medición en la parte más occidental, la vegetación también ha sido un indicador semejante, ya que árboles y arbustos se encuentran en los bordes del cauce. Bajo estas similitudes entre ambos ríos se atribuye para este punto del Río Aconcagua un valor de $n= 0,038$.

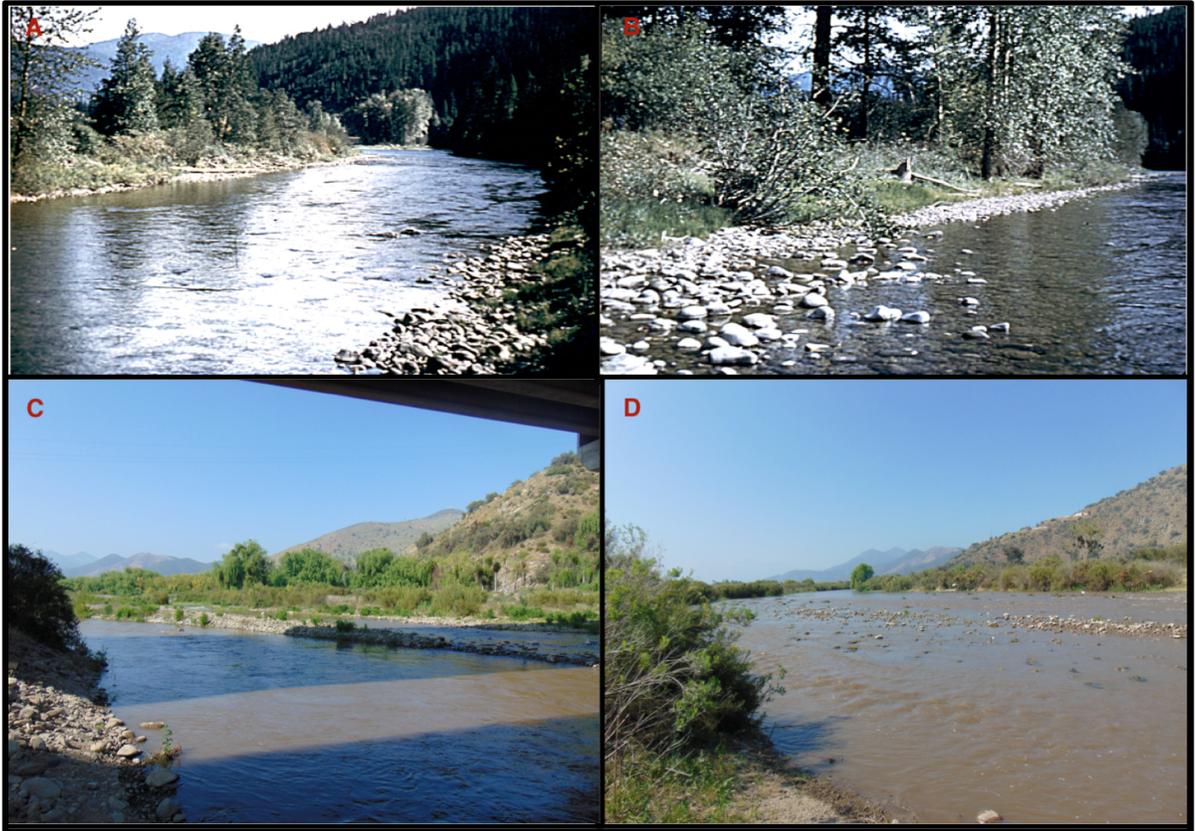


Figura 17. A-B: Moyie River at Eastport, Idaho con $n= 0,038$. C-D: Río Aconcagua Vista SE.

6.3.2 Estimación de precipitaciones futuras

La Cuenca Hidrográfica del Aconcagua cuenta con 26 (Figura 18) estaciones con información de Precipitaciones Máximas anuales en 24 horas, de ellas se han seleccionado 7, las cuales corresponden a Estero Rabuco, Catemu, Río Aconcagua en San Felipe, San Felipe, Río Aconcagua en Chacabuquito, Vilcuya, y Riecillos, la selección de estas estaciones ha sido bajo el criterio de aguas arriba y en función de las disponibilidad de datos de la Dirección General de Aguas.

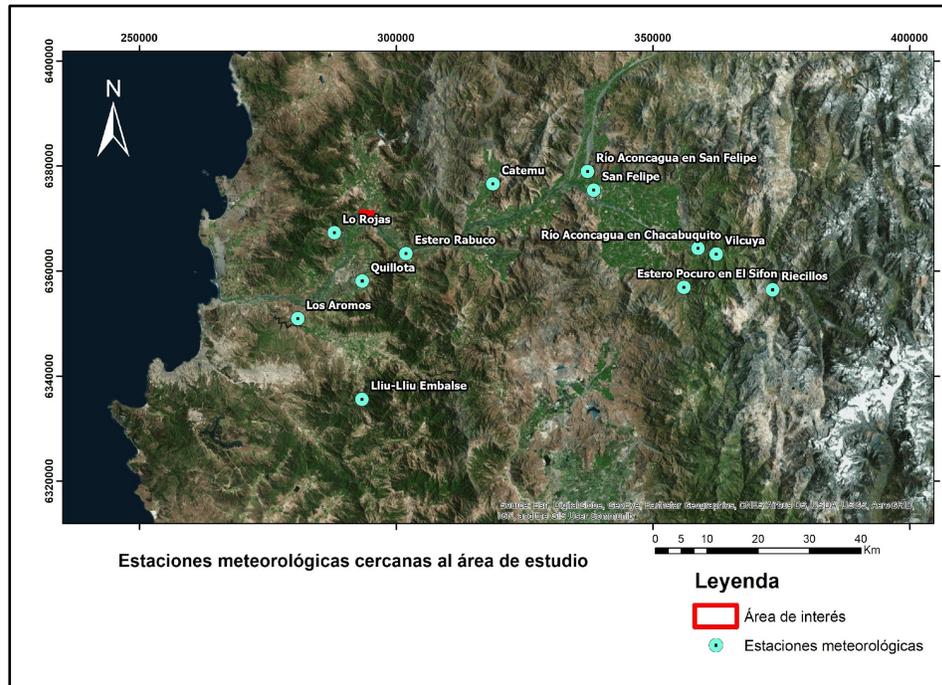


Figura 18. Estaciones Meteorológicas correspondientes a la Cuenca Hidrográfica del Río Aconcagua (Google Earth, 2018).

6.3.3 Periodos de Retorno

La Tabla 4 contiene los datos de los periodos de retorno de precipitación máxima en 24 horas para 10, 25, 50 y 100 años. Para la estación Estero Rabuco, se estiman 99 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años, 119 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 25 años, 134 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 50 años y 149 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años.

Para la estación Catemu se estiman 72 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años, 87 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 25 años, 99 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 50 años, 110 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años.

Para la estación Río Aconcagua en San Felipe se estiman 60 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años, 74 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 25 años, 84 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 50 años, 95 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años.

Para la estación San Felipe se estiman 66 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años, 80 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 25 años, 90 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 50 años, 101 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años.

Para la estación Río Aconcagua en Chacabuquito se estiman 61 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años, 70 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 25 años, 77 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 50 años, 83 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años.

Para la estación Vilcuya se estiman 76 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años, 89 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 25 años, 99 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 50 años, 109 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años.

Para la estación Riecillos se estiman 121 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años, 148 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 25 años, 167 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 50 años, 187 mm en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 4. Precipitaciones de diseño para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, para cada estación.

ESTACIÓN	UTM ESTE	UTM NORTE	ALTITUD msnm	PR 10 mm/24hrs	PR 25 mm/24hrs	PR 50 mm/24hrs	PR 100 mm/24hrs
ESTERO RABUCO	301556	6362964	300	99	119	134	149
CATEMU	318021	6373877	440	72	87	99	110
RÍO ACONCAGUA EN SAN FELIPE	337335	6374251	650	60	74	84	95
SAN FELIPE	340094	6374545	640	66	80	90	101
RÍO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO	358752	6364286	950	61	70	77	83
VILCUYA	362293	6363236	1100	76	89	99	109
RIECILLOS	373110	6356480	1290	121	148	167	187

6.3.4 Tiempo de Concentración

El tiempo de concentración se ha calculado según los tres métodos descritos el Capítulo 4. Marco Teórico, Sección 4.4 Tiempo de Concentración. En la Tabla 5 se muestran los datos área pluvial, longitud del cauce principal en metros y kilómetros y la pendiente promedio de la cuenca, resultando T_{c1} , T_{c2} y T_{c3} los respectivos tiempos de concentración de los métodos Kirpich, Témez y California Culverts Practice, dispuestos en horas. Finalmente el T_c , corresponde al tiempo de concentración promedio de la cuenca y la desviación estándar de los mismo datos.

Tabla 5. Datos y tiempo de concentración de la Cuenca del Río Aconcagua

ÁREA (km ²)	LONGITUD (m)	LONGITUD (km)	PENDIENTE (m/m)	T _{c1} (horas)	T _{c2} (horas)	T _{c3} (horas)	TC SELECCIONADO (horas)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (horas)
5.848	143.232,4	143,2	222,2	0,37	10,25	12,02	7,54	6,27

6.3.5 Estimacion de Caudales Máximos

Los resultado del Método Racional se exponen en la Tabla 6, donde para cada periodo de retrono de 10, 25, 50 y 100 años se asocia un Coeficiente de Escurrimiento, el cual tiene un valor de 0,080 definido por la DGA en el Manual de Calculo de Crecidas y Caudales Minimos en Cuencas sin Información Fluviometrica, segun su ubicación Geográfica, en este caso la Región de Valparaiso. El Coeficiente de Frecuencia se obtiene a partir de valores tabulados por la DGA en el mismo manual mencionado anteriormente, el cual también depende de la ubicación geográfica de la cuenca asociado a los respectivos periodos de retorno, la intensidad ha sido calculada mediante el método de trazado de isoyetas, para finalmente obtener el caudal máximo.

Tabla 6. . Datos y caudal máximo del Método Racional de la cuenca del Río Aconcagua para cada periodo de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

PERIODO DE RETORNO (años)	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO	COEFICIENTE DE FRECUENCIA	INTENSIDAD (mm/hr)	ÁREA (km ²)	CAUDAL MÁXIMO (m ³ /s)
10	0,080	1,00	6,14	5.848	797
25	0,080	1,22	7,69	5.848	1.219
50	0,080	1,38	7,81	5.848	1.400
100	0,080	1,59	8,23	5.848	1.700

Los resultado del Método Verni-King Modificado se exponen en la Tabla 7, donde para cada periodo de retorno de 10, 25, 50 y 100 años se asocia un Coeficiente Empirico, el

cual tiene un valor de 0,290 tabulado en el Manual de Calculo de Crecidas y Caudales Minimos en Cuencas sin Información Fluviometrica, asociado segun la ubicacion geografica de la cuenca. El Coeficiente de Frecuencia es el mismo utilizado para el Método Racional. La precipitación máxima en 24 horas se obtiene mediante el método de trazado de isoyetas, para finalmente obtener el caudal máximo.

Tabla 7. Datos y caudal máximo con el Método Verni-King Modificado de la cuenca del Río Aconcagua para cada periodo de retorno de 10,25, 50 y 100 años

PERIODO DE RETORNO (años)	COEFICIENTE EMPÍRICO	COEFICIENTE DE FRECUENCIA	PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)	ÁREA (km ²)	CAUDAL MÁXIMO (m ³ /s)
10	0,290	1,00	82	5.848	884
25	0,290	1,22	103	5.848	1.170
50	0,290	1,38	105	5.848	1.192
100	0,290	1,59	110	5.848	1.271

En la Tabla 8 se muestran los valores obtenidos a través de ambos métodos, donde para el Método Verni-King Modificado para el periodo de retorno 10 años ha sido superior que método racional y para los otros periodos (25, 50 y 100 años) de retorno el Método Racional es superior.

Tabla 8. Comparación de caudales máximos según Método Racional y Verni-King Modificado.

PERIODO DE RETORNO (años)	CAUDAL MÁXIMO MÉTODO RACIONAL (m ³ /s)	CAUDAL MÁXIMO MÉTODO VERNI Y KING MODIFICADO (m ³ /s)
10	797	884
25	1.219	1.170
50	1.400	1.192
100	1.700	1.271

6.3.6 Caudal de Verificación

Para el dato del coeficiente de rugosidad de Manning, se utilizara la Figura 20, donde, se tienen valores para cauces naturales (Oliveras, 2016) con abundante vegetacion y arboles de tronco grueso. Se usará el valor de 0,20 para corrientes máximos de zonas arboreas en ambas transectas.

Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
A Cauces naturales			
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida < 30 m)			
<i>A.1.1 Cursos en planicies</i>			
- Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0,025	0,030	0,033
- Rectos con algunas piedras y pastos	0,030	0,035	0,040
- Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos	0,033	0,040	0,045
- Meandros con algunas piedras y pastos	0,035	0,045	0,050
- Meandros con muchas piedras	0,045	0,050	0,060
- Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
- Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y matorral	0,075	0,100	0,150
<i>A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida</i>			
- Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
- Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0,040	0,050	0,070
A.2 Cursos en planicies inundadas			
<i>A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos</i>			
- Pasto corto	0,025	0,030	0,035
- Pasto alto	0,030	0,035	0,050
<i>A.2.2 Zonas cultivadas</i>			
- Sin cultivo	0,020	0,030	0,030
- Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0,025	0,035	0,045
- Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica	0,030	0,040	0,050
<i>A.2.3 Zonas arbustivas</i>			
- Escasos arbustos y pasto abundante	0,035	0,050	0,070
- Pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal)	0,035	0,050	0,060
- Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0,040	0,060	0,080
- Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0,045	0,070	0,110
- Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0,070	0,100	0,160
<i>A.2.4 Zonas arbóreas</i>			
- Sauces densos, temporada invernal	0,110	0,150	0,200
- Terreno claro con ramas sin brotes	0,030	0,040	0,050
- Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0,050	0,060	0,080
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0,080	0,100	0,120
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas	0,100	0,120	0,160
A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida > 30 m)			
En este caso, los valores del coeficiente <i>n</i> son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor,			
- Sección regular sin rocas ni arbustos	0,025		0,060
- Sección irregular y rugosa	0,035		0,100

Figura 19. Coeficientes de Rugosidad de Manning para cauces naturales.

En la Figura 20 se muestra la Transecta 1 paralela al Puente de Camino Internacional en la Comuna de La Calera, el cual tiene una altura de 7 metros aproximadamente y 250 metro de ancho sobre el cauce del Río Aconcagua. En la Figura 21 se muestra un esquema de las dimensiones del puente con el fin de obtener área y perímetro y en efecto el caudal de verificación para conocer con qué caudal dicho puente se vería sobrepasado en caso de inundación.

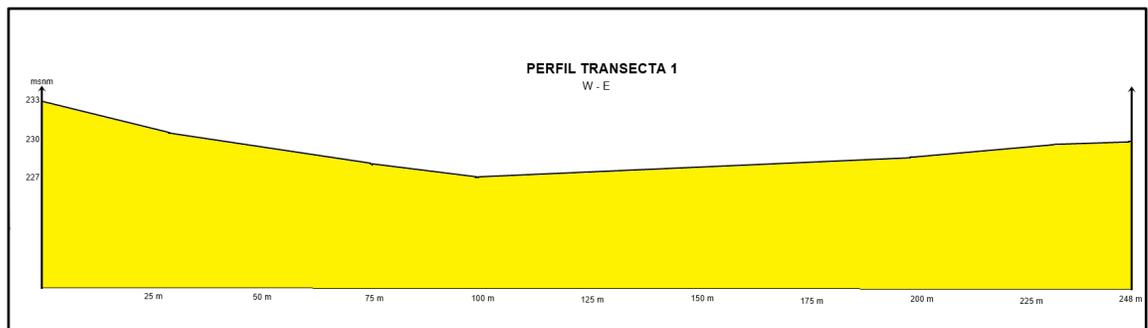


Figura 20. Transecta 1 sobre el puente de camino Internacional (ubicación de este puente en mapa geomorfológico).

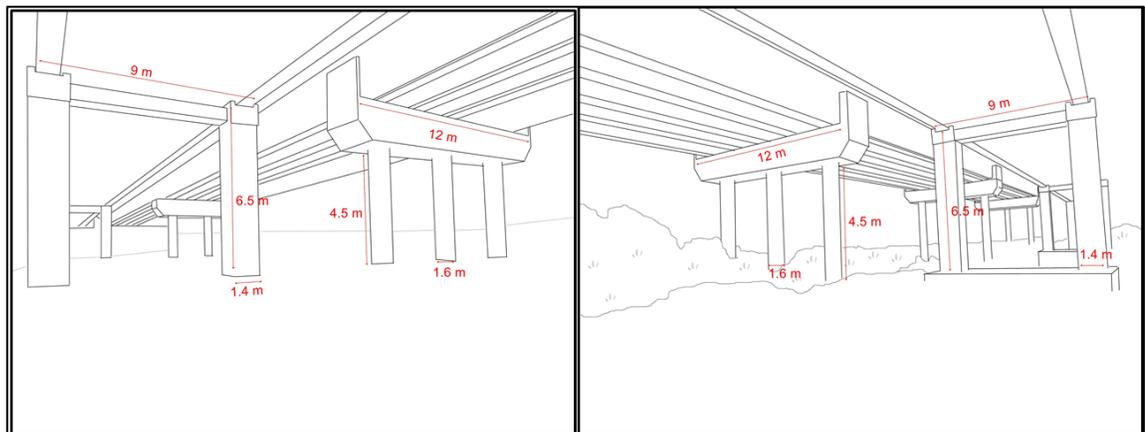


Figura 21. Dimensiones de los pilares y estructuras de los puentes de camino internacional, La Calera.

En la Tabla 9, se muestran los valores obtenidos a través del Caudal de verificación, con un valor de 15.419 (m³/s). Lo que significa que se requiere de un caudal superior o igual a este para que sobrepase el puente de Camino Internacional.

Tabla 9. Datos y resultado de Caudal de verificación para la Transecta 1.

ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL MOJADA EN m ²	PERÍMETRO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL MOJADO EN m	PENDIENTE DEL CURSO m/m	COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING	CAUDAL (m ³ /s)
1681	577	0,57	0,2	12.944

En la Figura 22 se muestra la Transecta 2 paralela al Puente 19 de Junio, La Calera, el cual tiene una altura aproximada de 5,5 metros y 280 metros de ancho sobre el cauce del Río Aconcagua. En la Figura 23 se muestran las dimensiones de los pilares del puente.

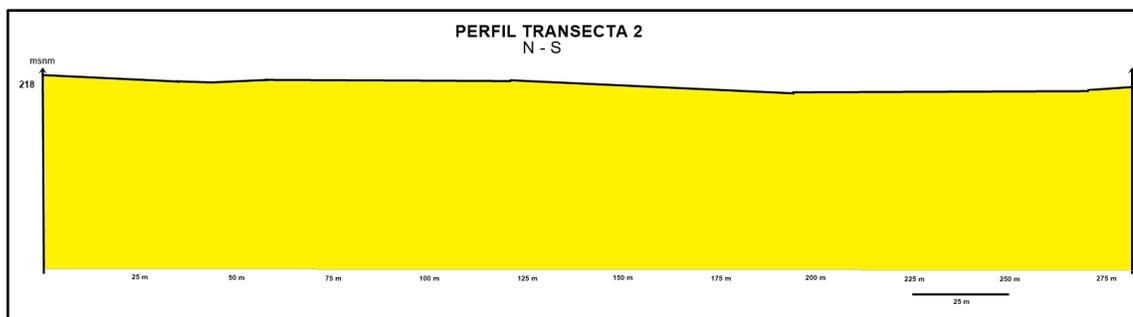


Figura 22. Transecta 2, paralela al puente 19 de Junio, La Calera (ubicación de este puente en mapa geomorfológico).

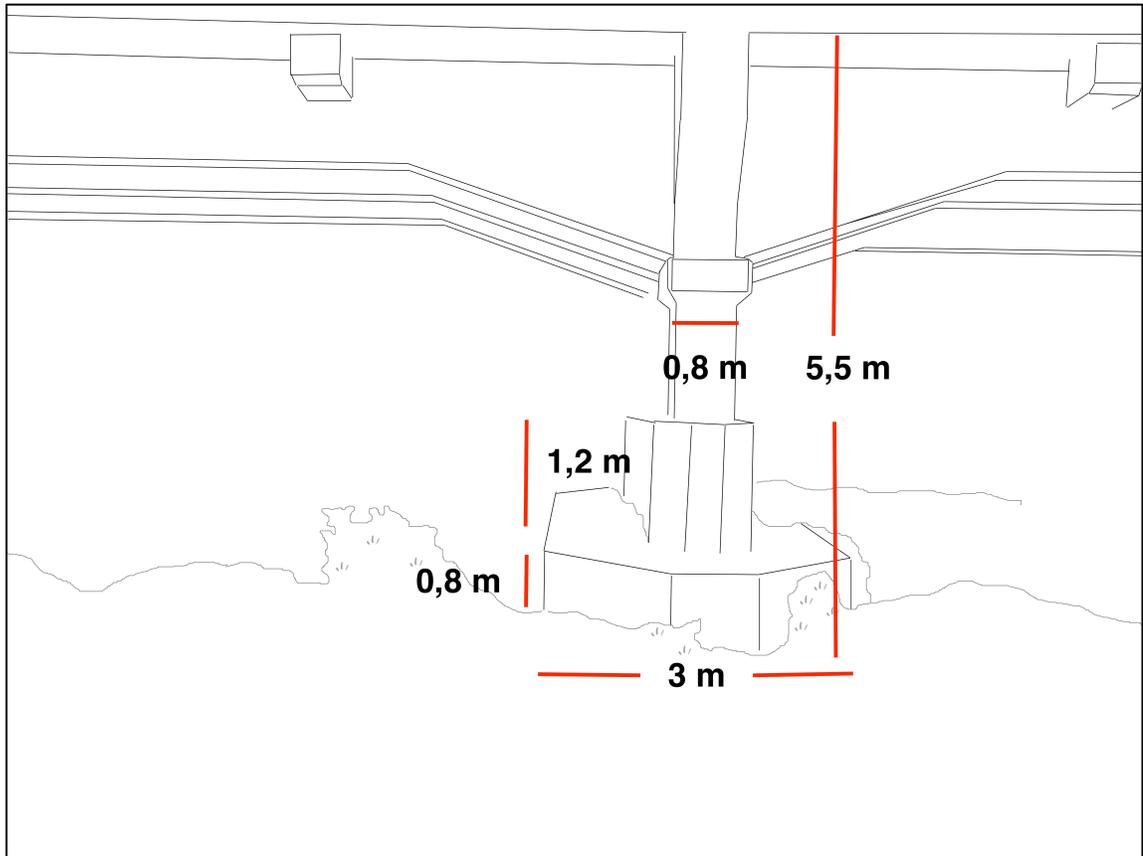


Figura 23. Dimensiones de los Pilares y estructuras de la Transecta 2.

En la Tabla 10, se muestran los valores obtenidos a través del Caudal de verificación, con un valor de 1.890 (m³/s). Lo que significa que se requiere de un caudal superior o igual a este para que sobrepase el puente 19 de Junio.

Tabla 10. Datos y resultado de Caudal de verificación para la Transecta 2

ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL MOJADA EN m ²	PERÍMETRO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL MOJADO EN m	PENDIENTE DEL CURSO m/m	COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING	CAUDAL (m ³ /s)
530	556	0,75	0,2	1.890

7. DISCUSIÓN

7.1 Asociación de la Sedimentología y Estratigrafía

El tamaño de grano y las estructuras sedimentarias en los depósitos del canal del río están determinadas por suministro de detritus, el gradiente del río, la descarga total y las variaciones estacionales del flujo. La estratigrafía de la cuenca del Río Aconcagua en la Comuna de La Calera, es bastante extrema, respecto de los tamaños de grano, ya que existe una clara diferenciación de los estratos por su granulometría. Se identifican intercalaciones evidentes de depósitos fluviales de tamaño grava y limo. Los depósitos de tamaño grava indicarían eventos de alta energía que el río puede mover o transportar durante los períodos de máxima competencia de las corrientes, mientras que los depósitos de tamaño limo se asociarían a procesos de estancamiento del río donde la energía ha disminuido considerablemente, como eventos de sequía o donde el o los brazos del río han cambiado su dirección o simplemente han disminuido su caudal, dando origen a la formación de horizontes de suelo de tamaño fino clasificado como limo.

En la columna 3 (Anexo 3), se observa imbricación de ciertos granos, lo cual corresponde al orden de los guijarros o bloques en un sedimento, de forma que sus ejes mayores se coloquen aproximadamente paralelos y formando un cierto ángulo con la horizontal que apunta en la dirección de la corriente o flujo que los depositó, como se muestra en la Figura 24.

Estos clastos poseen un eje de longitud mayor a los otros dos (es decir, están alargados en una cierta dirección). Cuando la corriente pierde fuerza y los deposita en el fondo estos clastos se colocan en la posición hidrodinámicamente más estable, de no ser así la corriente los voltearía (Navarro, 2011).

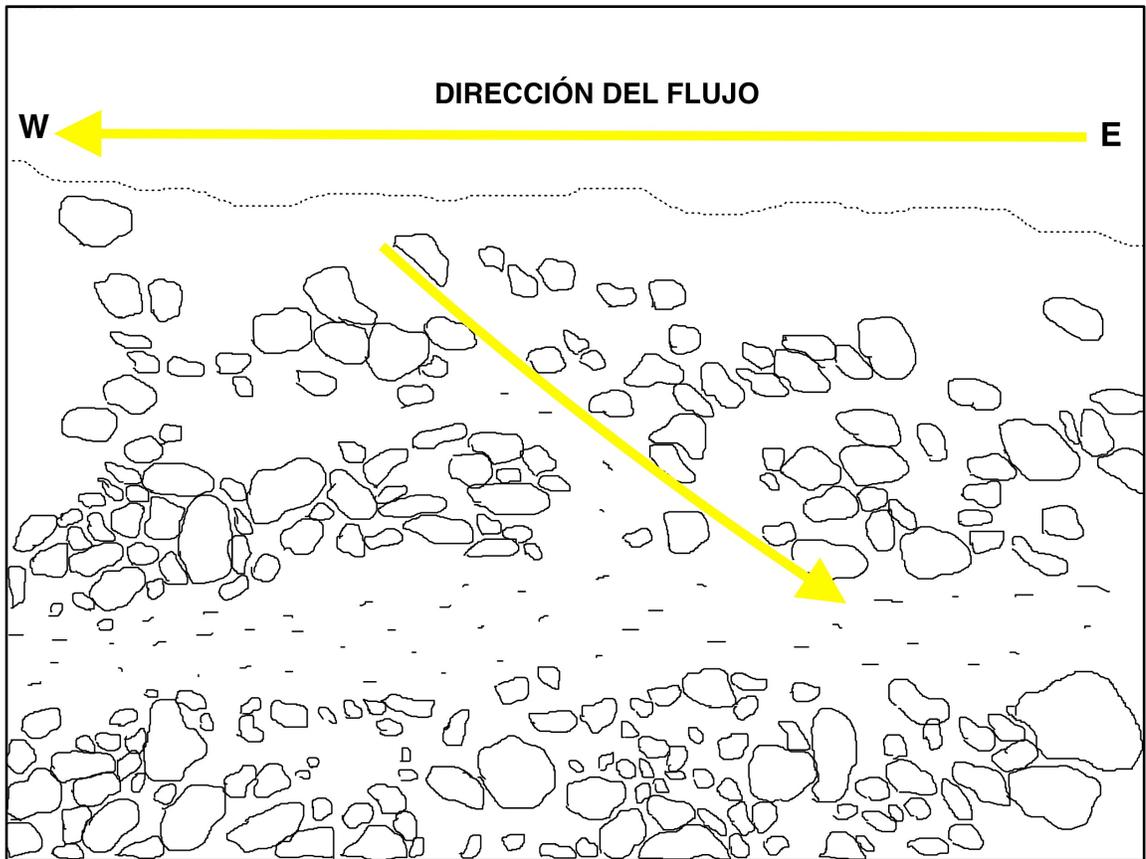


Figura 24. Esquema representativo de la Columna Estratigráfica 3 (Anexo 3), donde la flecha superior indica la dirección del flujo y la flecha inferior indica la imbricación de los clastos.

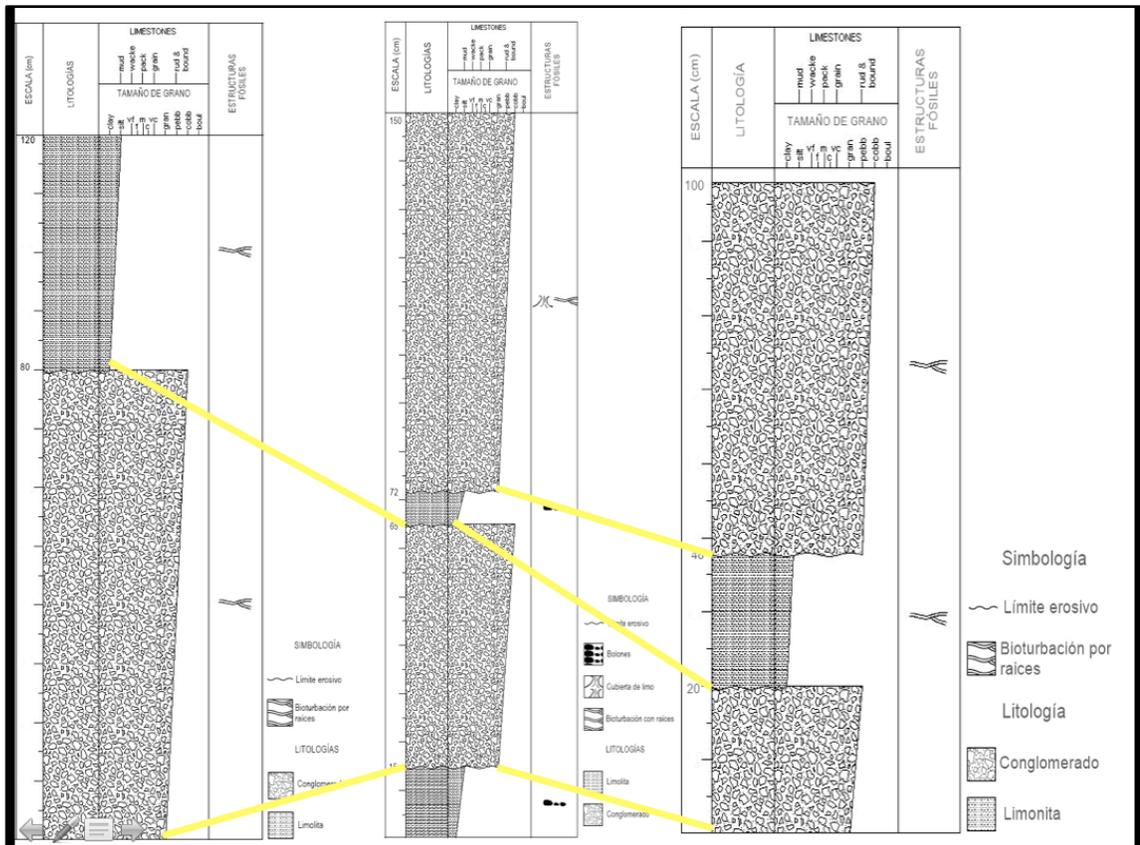


Figura 25. Columnas Estratigráficas correlacionadas desde la base de los depósitos fluviales.

Según la correlación de las Columnas estratigráficas (Figura 25), se evidencia que el techo de las columnas, no es el mismo para todas, lo que indica que la distribución de los depósitos del río no es homogénea, lo que será un factor diferenciador respecto de la infiltración del agua debido al tamaño del grano, ya que, la textura del suelo determina la cantidad de agua que el suelo puede contener bajo distintas condiciones de humedad. Los suelos de tamaño limo tienen partículas minerales muy pequeñas y sus poros también son muy pequeños. Los suelos arenosos y/o conglomerádicos se componen de partículas minerales más grandes y, por tanto, tienen un espacio poroso más grande. Aunque parece contrario a la intuición, (Figura 26) los espacios porosos más pequeños de un suelo arcilloso contienen una cantidad total de espacio mayor que los espacios porosos de un volumen equivalente de suelo arenoso (University Corporation of Atmospheric Research, 2006). Dicho esto, la capacidad de infiltración del suelo no será la misma en todos los niveles, de esta forma la velocidad de infiltración del flujo de agua va a depender del tamaño del poro, es así como en sedimentos finos donde el tamaño de

poro es pequeño el flujo fluye lentamente, mientras que en el caso de tamaño de poro grande este fluirá rápidamente. Esto dependerá de la estratigrafía en profundidad del lecho de la zona de estudio, en caso de encontrarse con gravas, la infiltración será más rápida, ya que un flujo cualquiera siempre busca la zona de más fácil acceso y tardará más en infiltrarse si es que se encuentra con capas de grano fino aunque tengan mayor cantidad de poros, al ser de menor volumen se oponen al paso del agua y otorga mayor resistencia a fluir. Estas relaciones entre espacio poroso y velocidad de infiltración, permiten anticipar los efectos de las inundaciones en donde zonas caracterizadas por sedimentos finos, se relacionarían a mayores volúmenes de agua en el tiempo, mientras que zonas caracterizadas por sedimentos gruesos, se asociarían a menores volúmenes de agua a igual intervalo de tiempo. En este caso la distribución del tipo de sedimento evidencia una disminución del tamaño del grano hacia la parte norte centro lo que nos permite relacionar estas zonas con un mayor grado de inundación.

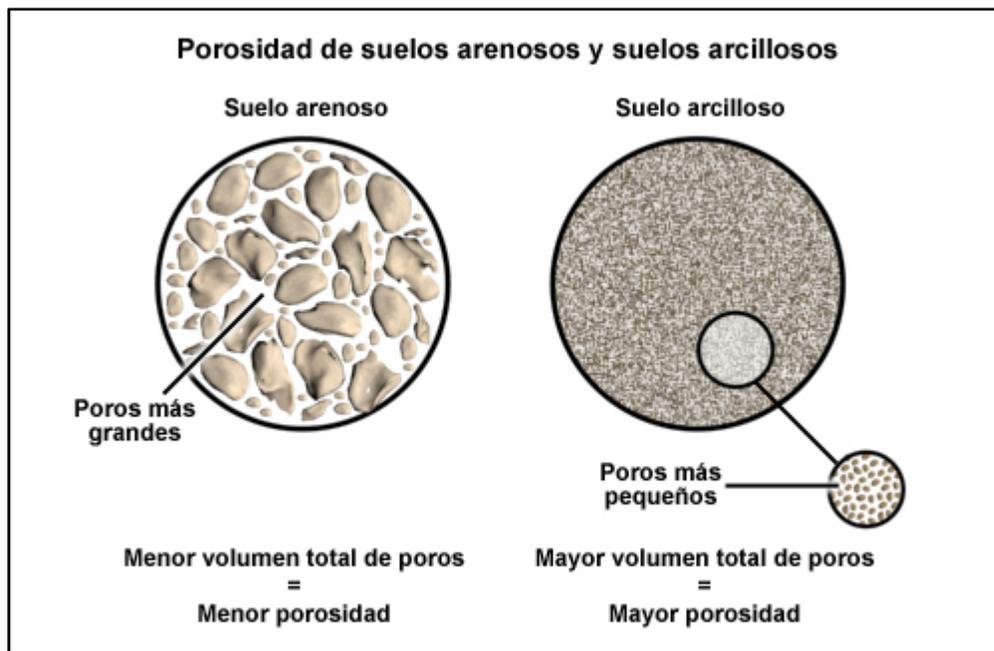


Figura 26. Ilustración comparativa entre suelos arenosos, y arcillosos y el volumen entre poros según tamaño de grano.

7.2 Variación extensional de la Llanura de inundación

En el Capítulo 6.1, se describen 6 perfiles topográficos, los cuales evidencian la variación de la extensión de los dominios de la zona oriente y occidente (estos dominios son respecto del cauce del río) de la llanura de inundación del Río Aconcagua. A continuación se presentan algunas hipótesis o explicaciones del por qué de estas variaciones en el ancho de llanura aluvial:

7.2.1 Control Litológico

El río viene con dirección E-W desde la comuna de Panquehue, San Felipe (a 32 km de la zona de estudio), al encontrarse con Formación Cerro Calera, desvía su cauce hacia el Norte de la Comuna de la Calera, esto se atribuye a que la Fm Cerro Calera compuesta por areniscas, tobas y calizas subordinadas (Piracés, 1976) es de una composición litológica de mayor competencia, es decir mayor resistencia a la erosión del agua, generando el desvío del flujo superficial, evidenciando un control litológico, puesto que, la disposición natural de un cuerpo fluvial es incidir donde el sustrato es menos competente. Notar que parte del valle del Río Aconcagua coincide con el contacto entre rocas sedimentarias de edad jurásica hacia el oeste (Fm. Cerro Calera) y rocas volcánicas de edad cretácica hacia el este (Fm. Lo Prado). A partir de estas observaciones es posible asociar también que el río en el área fluye siguiendo el contacto entre ambas formaciones, las cuales presentan manteos regionales que podrían explicar la variación en el ancho de la llanura de inundación a cada lado del cauce (Rivano *et al.*, 1996). En efecto al este del cauce los manteos son ligeramente mayores que los del lado oeste, lo que explicaría el gran desarrollo de la llanura de inundación al este del cauce.

7.2.2 Control Estructural

Los lineamientos estructurales, se asocian al desvío en la zona SW del cauce, los cuales corresponden a manteos regionales con orientación NE descritos por Rivano *et al.* en efecto la orientación de las estructuras coinciden con el área erosionada de la Fm. Ajjal compuesta por flujos piroclásticos.

Los resultados de las características morfológicas de la llanura de inundación, en particular su ancho a lo largo del cauce, permiten identificar que la mayor densidad de población se encuentra asentada en las zonas más estrechas de la llanura, mientras que terrenos destinados al cultivo y agricultura coinciden con las zonas más extensas de la llanura de inundación. Los efectos de una eventual inundación se verían magnificados en las zonas estrechas, debido a que un mayor volumen de agua se concentraría en una zona más pequeña, por el contrario en la zona extensa el volumen de agua tendería a propagarse disminuyendo sus efectos.

7.3 Impacto de la urbanización en zonas susceptibles de Inundación

Existe una secuencia de procesos e intervención humana, los cuales son los principales responsables de que un proceso natural, como precipitaciones extremas, se vuelva un evento peligroso. En la Figura 26 se muestra como en un inicio, antes de que de la zona sea habitada, el entorno o el sistema se encuentra en equilibrio, es decir, el volumen de agua ocupa las áreas inundables, sin generar ningún problema en caso de desbordes (producto de precipitaciones), sino no hay población a la cual afectar, seguido de esto, llegan los poblados, las construcciones y asentamientos humanos, poco a poco hay un aumento en la cantidad de habitantes y en periodos de intensas lluvias, el río desborda en la zona que le corresponde. En efecto la construcción antrópica genera procesos de deforestación y esto conlleva a una mayor tasa de erosión de los suelos, ya que no están protegidos o cubiertos por la flora de la zona, la capacidad de infiltración de los suelos disminuye debido a la ausencia de la vegetación y además las zonas urbanas son susceptibles de experimentar inundaciones, puesto que un elevado porcentaje del área de la superficie está compuesto de tejados impermeables, calles y estacionamientos, donde la escorrentía es muy rápida debido a la nula infiltración del agua a través del pavimento (Edward J. Tarbuck, 2005).

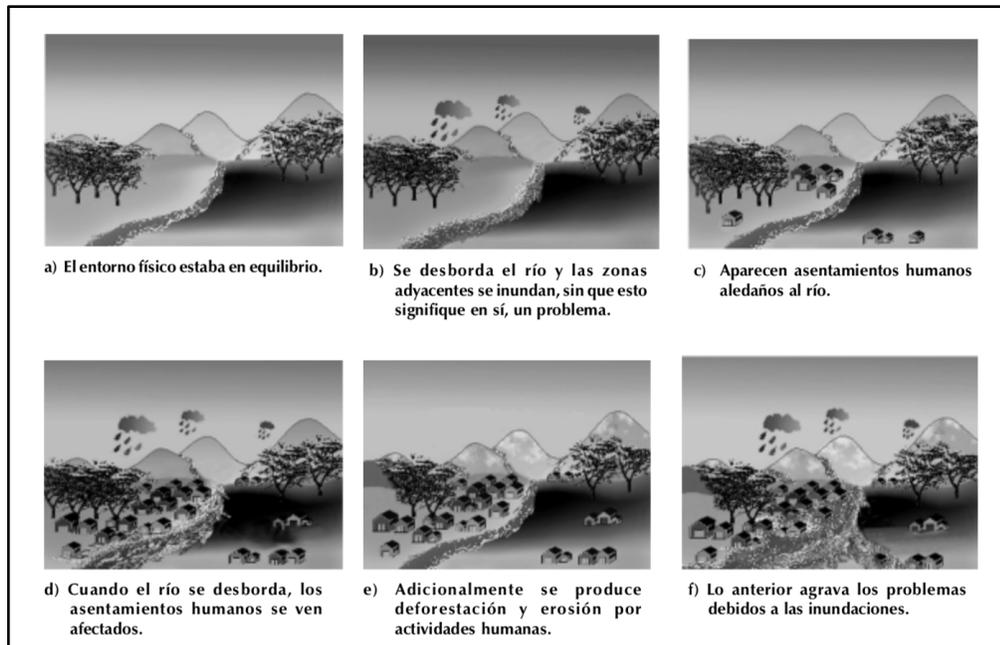


Figura 27. Evolución de un sistema fluvial con la llegada del asentamiento humano y las respectivas consecuencias en caso de inundación.

En la Figura 27 a se presenta una inundación (hidrograma de entrada) en una cuenca no urbanizada (rural) y el hidrograma a la salida de dicha cuenca. Se observa que el gasto o caudal máximo de entrada es, aproximadamente, de $740 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el de salida es de $380 \text{ m}^3/\text{s}$ y se presenta 2 horas después del gasto o caudal máximo de entrada. En la Figura 27 b se muestra la misma inundación, pero en una cuenca urbana. En este caso el gasto máximo a la salida es de $660 \text{ m}^3/\text{s}$ y se presenta aproximadamente 35 minutos después de la entrada. Lo anterior pone de manifiesto que en la cuenca urbanizada del ejemplo, se tendría un caudal casi dos veces mayor que en la cuenca no urbanizada, además de contar con menos tiempo (35 minutos contra 2 horas) para alertar a la población, de la llegada de la creciente (CENAPRED, 2004). Esto se debe a que en una cuenca urbanizada las obras de infraestructura (como pavimentos, techos, calles de infraestructuras) hacen disminuir la impermeabilización del suelo contribuyendo a la disminución de la infiltración, consecuentemente esto hace aumentar el volumen y velocidad de la escorrentía superficial dentro de la cuenca, lo cual explica la diferencia en tiempo de 35 minutos de la respuesta hidrológica del caudal para cuenca urbanizada y 2 horas para cuenca no urbanizada. En el caso de la cuenca sin intervención antrópica

(no urbanizada) la infiltración sería mayor, pues la impermeabilización del suelo no se ve afectada, por ende gran parte de la escorrentía se infiltra disminuyendo el volumen y la velocidad del flujo respecto de la zona urbanizada, de esta forma el agua logra infiltrarse, tardando más tiempo en escurrir, mientras que en la zona urbanizada, el agua no logra infiltrarse como debiese ser naturalmente, por el pavimento, de esta forma la escorrentía aumenta y en consecuencia la velocidad del flujo también.

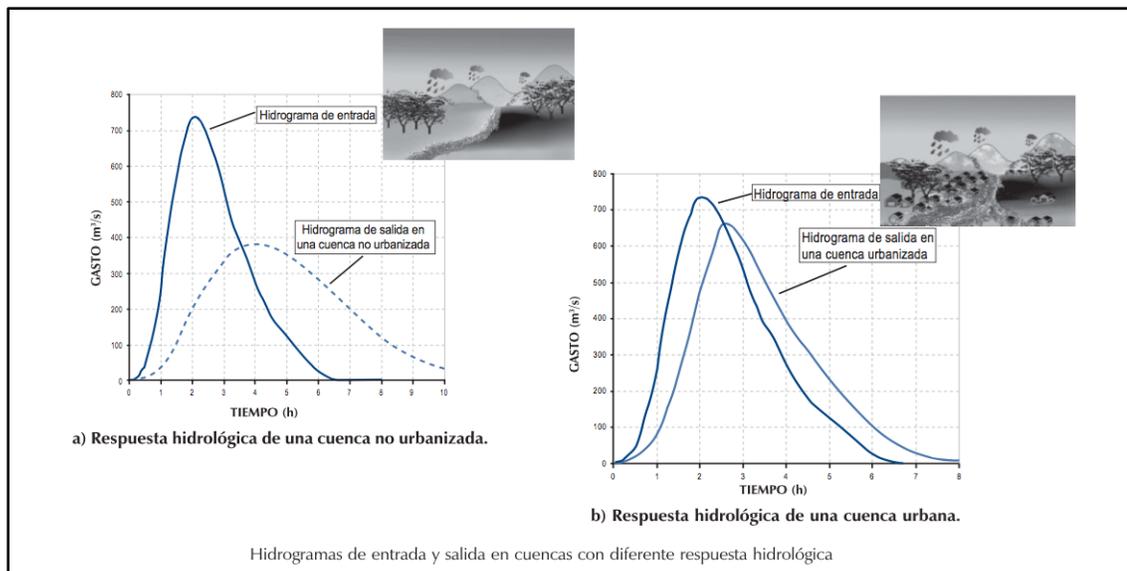


Figura 28. Hidrograma de respuesta hidrológica de una cuenca no urbanizada y una cuenca urbanizada.

7.4 Asociación de las predicciones de ENOS con la estimación de precipitaciones futuras

Existe una predicción del fenómeno climático ENOS, conocido como El Niño - Oscilación Sur, el cual corresponde a un patrón climático recurrente que implica cambios en la temperatura de las aguas en la parte central y oriental del Pacífico. Esta predicción ha demostrado que la frecuencia extrema de ENOS aumenta linealmente con la temperatura media global (GMT por sus siglas en inglés) hacia un aumento de 1,5°C. Los resultados del estudio indican que esta frecuencia creciente de eventos extremos de El Niño continúa hasta un siglo después de que la GMT se haya estabilizado, respaldada por una profundización de la termoclina oceánica (capa dentro de un cuerpo de agua donde la temperatura cambia rápidamente con la profundidad), la cual sostiene un

calentamiento más rápido en el Pacífico ecuatorial oriental que en la región no ecuatorial. En última instancia, esto implica un mayor riesgo de El Niño extremo para las generaciones futuras después de que el aumento de GMT se haya detenido o estabilizado.

La Figura 28 (indicada con la letra b) muestra que los valores cerca del círculo púrpura indican el promedio durante los 31 años centrado en 1.5°C de calentamiento (zona de color verde claro).

La Figura 28 (indicada con la letra d) muestra las tendencias lineales y sus intervalos de confianza del 90% durante el período 2050–2150 y el período 2151–2250 indican que aunque el GMT disminuye, el gradiente de temperatura meridional continúa debilitándose y la frecuencia extrema de El Niño continúa aumentando antes de que se invierta. (Wang, 2017).

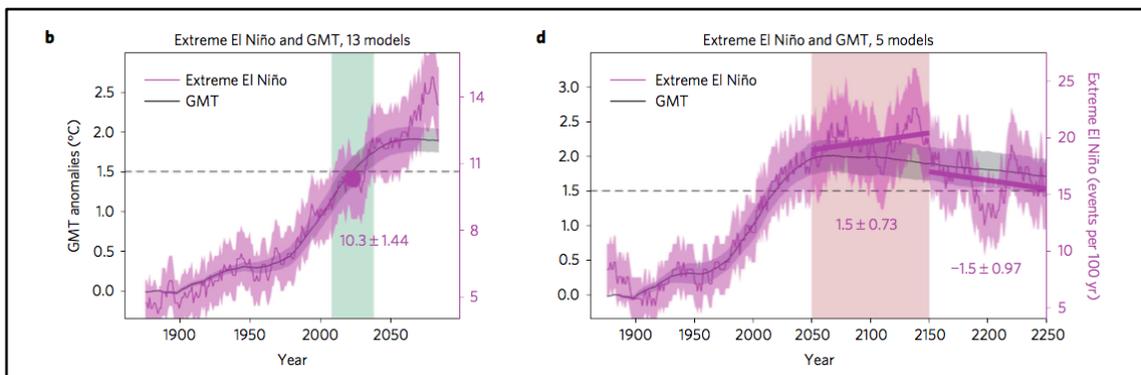


Figura 29. Proyecciones del fenómeno ENOS para el año 2050 y 2250.

Bajo estas predicciones de incremento del fenómeno de El Niño, según el GMT, es posible garantizar que durante los próximos años 2028, 2043, 2068 y 2118, será altamente lluvioso, por lo tanto en caso, de cumplirse estos pronósticos es plausible un aumento en las precipitaciones futuras y por ende el valor de los caudales máximos para años venideros sean incluso mayores que los estimados en el Capítulo 6.

7.5 Vinculación de Mapa de Peligro con Plan Regulador Municipal

La Calera tiene en su base de datos (Ilustre Municipalidad de La Calera) dos planos de la ciudad, el primero elaborado en 1922 y el segundo en 1937 con la numeración oficial de las manzanas de la Asociación Chilena de Aseguradores Contra Incendio. Finalmente en 1991 se realizó el Plano de Zonificación perteneciente al Plan Regulador Comunal de La Calera, el cual no es vinculante con el Mapa de Susceptibilidad por Remociones en Masa en Inundaciones de la Región de Valparaíso, dispuesto por SERNAGEOMIN en 2004.

Esto puede atribuirse a múltiples razones, una de ellas evidentemente es la realización del Mapa de Peligro 13 años después del desarrollo del primer Plan Regulador de la zona, pero aún así el tiempo ha transcurrido y no existe una actualización teniendo esta información disponible dispuesta por SERNAGEOMIN. Dicho esto el plan regulador indica zonas ZR4 (Figura 30) como zona de restricción de protección de recursos de agua, lugar en el cual hay al menos 11 cuadras de viviendas. En esta área el Mapa de Peligro (Figura 30) indica fenómenos de inundación por desborde de cauces y susceptibilidad de moderada a baja, lo cual se describe como: Abanicos y llanuras aluviales que pueden ser afectadas por inundaciones provocadas por algunas actividades antrópicas como desbordamientos de canales de riego, colapso de tranques o embalses de agua. Por consiguiente no es menor la cantidad de personas que se verían afectadas en caso de precipitaciones extremas (causa que no es mencionada por SERNAGEOMIN, aun cuando la zona tiene antecedentes), dicho esto ni el plan regulador ni el mapa de peligrosidad están enlazados en sus propuestas, la ubicación de los barrios residenciales (y en efecto las zonas impermeables), los antecedentes del lugar, ni mucho menos hacer un estudio más elaborado, el cual combine y unifique la cantidad de habitantes viviendo en zonas de peligro y los peligros mismos.

Cabe mencionar que la Municipalidad de La Calera realizó hace aproximadamente 10 años, un hecho favorecedor en el área que aparece como ZE1 y ZE2 en el Plan Regulador denominado, zona especial 1, áreas deportivas y zona especial 2, equipamiento, llamado Complejo Deportivo Nueva Esperanza de La Calera, lo que durante años fue un campamento que llevaba el mismo nombre, esto manifiesta que una

construcción deportiva, es un establecimiento ideal para mitigar las zonas inundables, ya que, son zonas donde la concentración alta de personas es relativa y en caso de temporales o sistemas frontales de alta intensidad este tipo de lugares se cierran durante estos eventos, no así los hogares los cuales no son fáciles de abandonar para ir a albergues o zonas de refugio en caso de emergencia.

Otro punto importante es descrito por el Artículo (Guzmán, 2016) “Construcción en zonas inundables: los vacíos legales que favorecen al negocio inmobiliario”. En él se menciona que en caso de que los dueños de una posesión inmueble quieran edificar o realizar una ampliación deben someterse a procesos en la Ordenanza General de la Ley General de Urbanismo y Construcción (OGUC), dicho esto, una vez iniciado los trámites las personas suelen encontrarse con un problema, el cual se define como emplazamiento en zonas de riesgo, afectando principalmente a los propietarios, cuyos inmuebles se ubican en el borde de ríos, esteros o quebradas. La respuesta es negar la ampliación por motivos de encontrarse en zonas de riesgo, por lo que, surgen contradicciones por parte de la (OGUC) contra el Ministerio de Obras Públicas (MOP), el cual en su sitio web menciona que la DOH (Dirección de Obras Públicas) es *“la entidad a cargo de revisar estudios técnicos y autorizar la definición o disminución de las Franjas de Restricción, asociadas a crecidas de los cauces de ríos, esteros y quebradas que afectan a una propiedad, de acuerdo al Plan Regulador comunal”*, pero la Ley Orgánica del MOP dice: *“Se prohíbe construir casas para viviendas y con mayor razón formar poblaciones en suelos periódicamente inundables, aun cuando la inundación se presente en períodos de hasta diez años”*. Esta prohibición sencillamente anula la supuesta facultad de la DOH para definir o disminuir las franjas de restricción cuando se trata de autorizar proyectos de viviendas. Finalmente luego de esta serie de conflictos de autoridad y contradicciones, quien tiene el problema es quien quiere ampliar su vivienda, por lo que, para ser revertida la negación de volver construir se requiere de que el dueño de la propiedad contrate a un especialista en obras civiles, el cual le diga cómo mitigar el riesgo de inundación de su vivienda, por ende el conflicto está en que ninguna entidad pública se relaciona con otra para otorgar permisos de construcción y ordenación urbana.

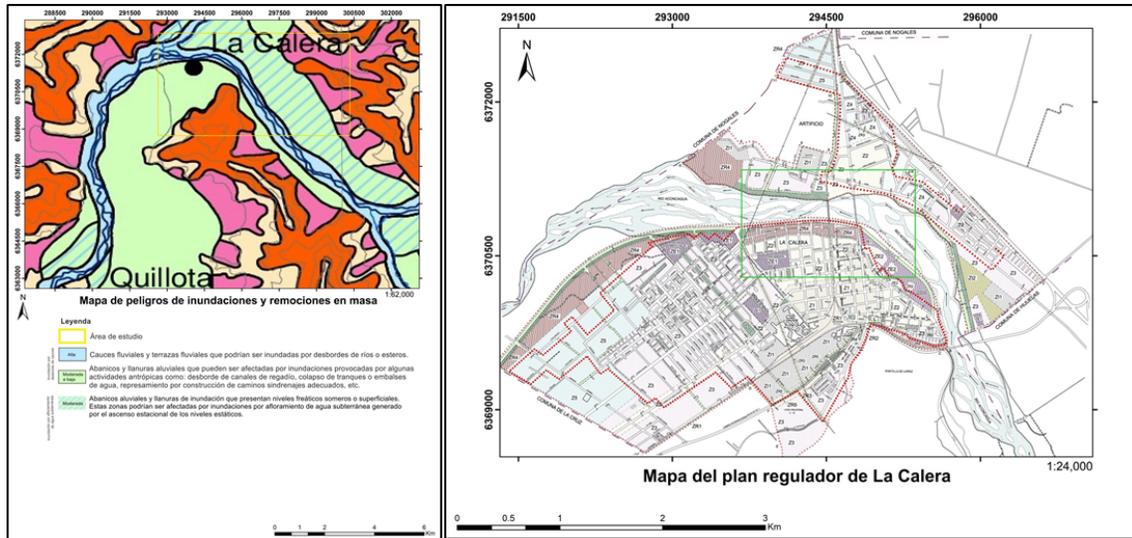


Figura 30. Mapa de Peligro de Inundaciones y Remociones en Masa, junto al Plan Regulador de la Comuna de La Calera.

7.6 Asociación de Caudales

Para poder tener una visualización clara y dimensionar qué significan los caudales máximos expuestos en el Capítulo 6, se tiene el registro del año 2000 en la Región Metropolitana, en Junio de ese año, las precipitaciones de dicho año dejaron a 16.706 personas damnificadas y a 1.158 albergadas. El reporte indica que la red hídrica de ese entonces para los ríos Maipo y Mapocho tenían un caudal de 700 (m³/s) y de 500 (m³/s) respectivamente, dejaron como consecuencia una total capacidad en el Puente Bulnes y riesgo para las provincias de Talagante y Melipilla. El Zanjón de la Aguda se había desbordado en San Joaquín, Pob. Oscar Bonilla y sectores Vicuña Mackenna, Santa Isabel, Puente Las Flores. El Canal San Carlos y las Perdices: tuvieron importante aumento de caudal, con peligro de desborde, llegando a su cota máxima (Panamerican Health Organization, 2000). Dicho esto, el cuadro de pronóstico para La Calera podría ser altamente más grave que lo sucedido en Santiago, ya que, los caudales resultantes de este estudio muestran valores muy por encima de los valores de los ríos Maipo y Mapocho, siendo esta una real comparación y visualización de lo que podría ocurrir en caso de inundación.

En el Capítulo 6, se obtuvieron caudales de verificación, lo cual implica estimar cuánto caudal se necesita para que sobrepase ciertas estructuras, en este caso los Puentes de

Camino Internacional y el Puente 19 de Junio equivalentes a la Transecta 1 y 2 respectivamente. Para la Transecta 1 se requiere de 12.944 (m³/s) lo cual se compara con el caudal del Método Racional en la Tabla 11, con un valor de 1700 (m³/s), con estos resultados del caudal de verificación se tiene que no existirá desborde del cauce en la Transecta 1 para un periodo de retorno de 100 años. Sin embargo para la Transecta 2 se obtuvo un caudal de verificación de 1.890 (m³/s), lo cual se acerca bastante al caudal obtenido con el Método Racional, indicando de esta forma que para un periodo de retorno de 100 años, esta zona podría desbordarse como ocurrió en el invierno de 1987 en la misma transeca.

Tabla 11. Comparación de Caudales

CAUDAL DE VERIFICACIÓN (m ³ /s). TRANSECTA 1	CAUDAL DE VERIFICACIÓN (m ³ /s). TRANSECTA 2	CAUDAL DEL MÉTODO RACIONAL (m ³ /s) CON PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS
12.944	1.890	1.700

8. CONCLUSIONES

El análisis sedimentológico y estratigráfico de la zona ha permitido asociar los depósitos tamaño grava a periodos de máxima capacidad del río, mientras que los depósitos de tamaño limo estarían relacionados a periodos de sequía, condición que ha perdurado por más de 8 años, de esta forma el sistema ha evolucionado (bajo caudal, inexistencia de múltiples brazos del río) formando suelos con abundante vegetación.

El análisis estratigráfico permite determinar relaciones del tamaño del grano con la infiltración del flujo vertical, el cual es de mayor velocidad en las zonas sur del cauce del río, donde predomina el tamaño grava, mientras que esta es de menor velocidad en la zona norte-centro del cauce del río, donde el tamaño es del tipo limo. Esto, consecuentemente condiciona el comportamiento del flujo superficial, debido a que, al infiltrarse el agua más rápido hacia el subsuelo, el flujo en superficie es de menor velocidad y al infiltrarse a través de granulometría fina como limo, la velocidad del flujo superficial es mayor. Esta información es relevante, puesto que permite zonificar

sectores donde los efectos de eventuales inundaciones pueden ser magnificados según el tamaño granulométrico del suelo.

Los análisis geomorfológicos indican que la variación extensional de la llanura de inundación se explica gracias a un control litológico, debido a la existencia de erosión diferencial que presentan las Formaciones Lo Prado, Cerro Calera y Ajial. El flujo del agua se ve obligado a desviar su recorrido en zonas donde el material es más competente (Fm Cerro Calera). Por otra la asimetría del ancho de la llanura de inundación estaría asociada a la incisión del cauce siguiendo el contacto entre formaciones, cuyos manteos regionales varían en varios grados, en efecto en las zonas donde la llanura es más extensa, los manteos son mayores favoreciendo de este modo el mayor desarrollo de la llanura. Es importante subrayar que la variación del ancho de la llanura de inundación aguas abajo, constituye un factor que condiciona una eventual inundación, puesto que zonas con menor desarrollo de llanura de inundaciones serían más afectadas que aquellas zonas donde su desarrollo es mayor.

La urbanización en zonas susceptibles de inundación se logra comprender con una secuencia de eventos que implican la deforestación de zonas inundables, el aumento de la población y por ende la impermeabilización de los suelos y viviendas. Dicho esto la respuesta hidrológica que tiene una cuenca no urbanizada y una urbanizada es muy diferente frente a eventos de intensas lluvias, ya que, en una no urbanizada, la infiltración del flujo superficial se hace de manera natural y no abrupta, debido a la vegetación y la permeabilidad natural del suelo, lo que significa un menor caudal, mientras que en una cuenca urbanizada la infiltración es casi nula por materiales impermeables de origen antrópico, aumentando el caudal muy por encima de lo natural provocando catástrofes. Adicionalmente es reconocible una correspondencia entre los factores sedimentológicos y geomorfológicos con la zona más urbanizada (zona urbana de Artificio por el norte del cauce y zona urbana de La Calera por el sur de este), lo que agregaría al sector mayores efectos ante una eventual inundación. Pues estos factores condicionantes se potenciarían, al incluir impermeabilidad, estrechez en la llanura y alto

grado de urbanización, favoreciendo que el volumen de agua por inundación desborde hacia las áreas urbanas.

Las predicciones del Fenómeno Climático ENOS (El Niño-Oscilación Sur), indican que durante los períodos de 2050–2250, la frecuencia extrema de El Niño, continuará aumentando antes de su inversión. Este pronóstico hace posible garantizar las predicciones hechas de las precipitaciones futuras para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

El Plan regulador no es vinculante con el Mapa de Peligros asociado a Remociones en Masa e Inundaciones de la Región de Valparaíso, ya que no existe participación conjunta ni mucho menos una convocatoria de parte de la entidades y autoridades para una actualización del Plan Regulador y de esta forma tener informada a la población acerca de dónde es que se ubican sus viviendas y por ende sus propias familias.

La asociación de caudales indica que para el puente de Camino Internacional no existirían desbordes respecto del caudal obtenido con el Método Racional con periodo de retorno de 100 años, ya que se requieren de 12.944 m³/s para poder desbordar dicho puente, esto se debe a sus grandes dimensiones. Para el puente 19 de Junio el pronóstico es diferente, pues se requieren de 1890 m³/s de caudal para que este puente esté bajo peligro de desborde, lo cual se acerca bastante al caudal obtenido con el Método Racional con periodo de retorno de 100 años. Si a todo esto le sumamos las características antrópicas, geomorfológicas y sedimentológicas antes descritas, los efectos de desborde por inundación podrían ser magnificados.

En síntesis durante esta investigación se ha logrado cumplir con evaluar y zonificar determinadas áreas con peligro de inundación en la cuenca del río Aconcagua, sector La Calera, consiguiendo así los caudales de retorno para los próximos 10, 25, 50 y 100 años.

REFERENCIAS

CENAPRED. Centro Nacional de Prevención de Desastres (2004), Secretaría de Gobernación. Inundaciones, México.

COSUDE – AMUNIC (2002): Instrumentos de apoyo para el análisis y gestión de riesgos naturales en el ámbito municipal de Nicaragua. EDISA, Managua.

Dirección General de Agua (DGA). Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, D, 2004. Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del Río Aconcagua, CADE-IDEPE, Consultores en Ingeniería.

Dirección General de Agua (DGA), 1995. Manual de Cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información pluviométricas.

Edward J. Tarbuck, Frederick K. Lutgens. (2005). Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física. Madrid: Pearson Prentice Hall.

MOP, Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas. Balance Hídrico de Chile. 1995

Rivano, S. 1996. Geología de las Hojas Quillota y Portillo, Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología. 304. 1 mapa escala 1:250.000. Santiago, Chile.

Rojas, O. 2014. Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencias y efectos geográficos. Revista de Geografía Norte Grande, 177-192, Chile.

Piracés, R. 1976. Estratigrafía de la Cordillera de la Costa entre La Cuesta el Melón y Limache, Provincia de Valparaíso, Chile. Primer Congreso Geológico Chileno. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago. Chile.

Santis. P. 2015. Anexo Estudio Hidrológico, Parques Solares Almeyda y Malgarida, III Región, 35, Chile.

Guojian Wang^{1,2}, Wenju Cai^{1,2*}, Bolan Gan¹, Lixin Wu^{1*}, Agus Santoso^{2,3}, Xiaopei Lin¹, Zhaohui Chen¹ and Michael J. McPhaden⁴. (24 de Julio 2017). Continued increase of extreme El Niño frequency long after 1.5 °C warming stabilization. Nature, Climate Change, 6.

University Corporation of Atmospheric . (2006). Curso Básico de Hidrología Comprensión del ciclo hidrológico. 2018, de University Corporation of Atmospheric.

Pan American Health Organization. (2000). Inundaciones en Chile: Reporte de estado de situación 14 Jun 2000. 2018, de Pan American Health Organization Sitio web: <https://reliefweb.int/report/chile/inundaciones-en-chile-reporte-de-estado-de-situación-14-jun-2000>

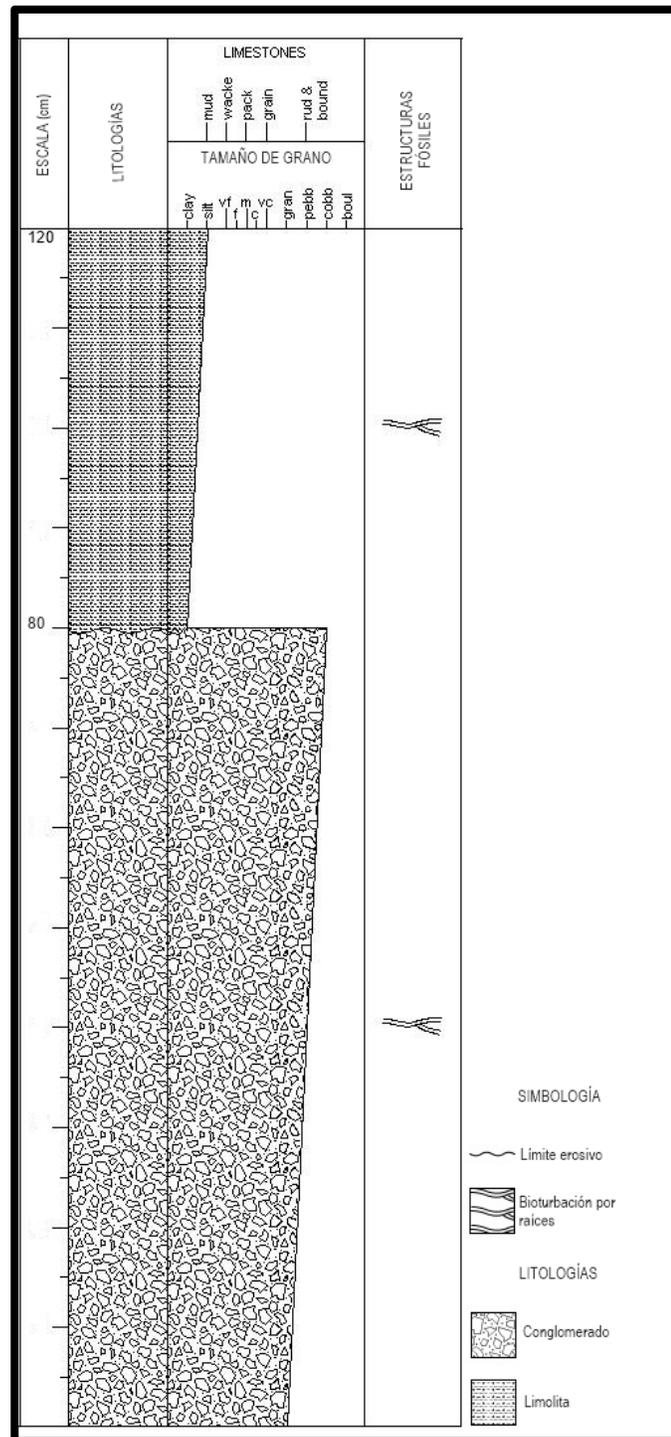
Jordi Oliveras. (2016). Como seleccionar el coeficiente de rugosidad de Manning en cauces naturales. 2018, de Hidrojing Sitio web: <http://www.hidrojing.com/como-seleccionar-el-coeficiente-de-rugosidad-de-manning-en-cauces-naturales/>

Daniel Guzmán. (2016). Construcción en zonas inundables: los vacíos legales que favorecen al negocio inmobiliario. 2018, de Ciper Sitio web: <https://ciperchile.cl/2016/05/04/construccion-en-zonas-inundables-los-vacios-legales-que-favorecen-al-negocio-inmobiliario/>

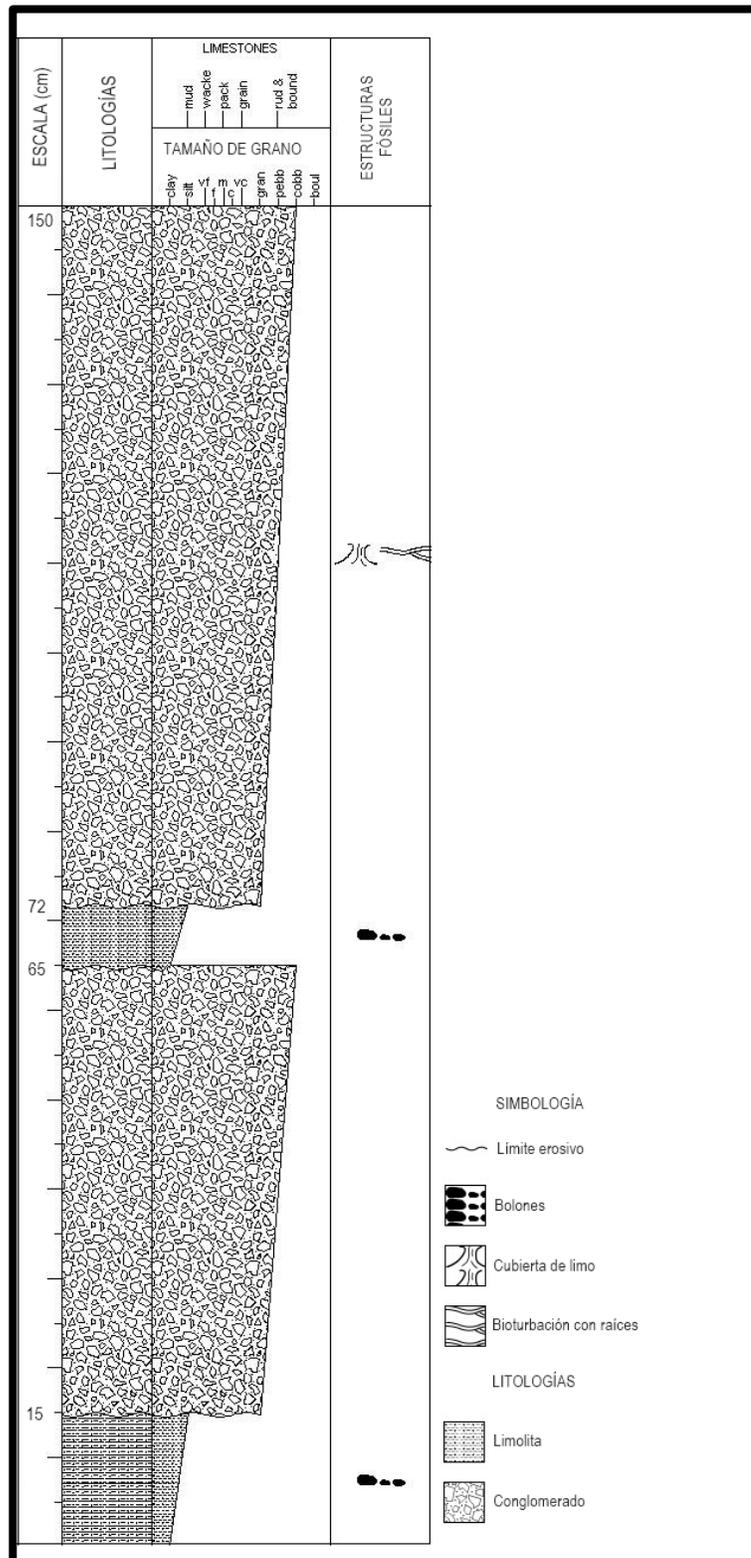
Oscar Navarro. (2011). Geología del Cuaternario. 2018, de Blog de Geología Sitio web: <https://www.aventurasgeologicas.com/2011/12/clastos-imbricados-pero-que-demonios-es.html>

ANEXOS

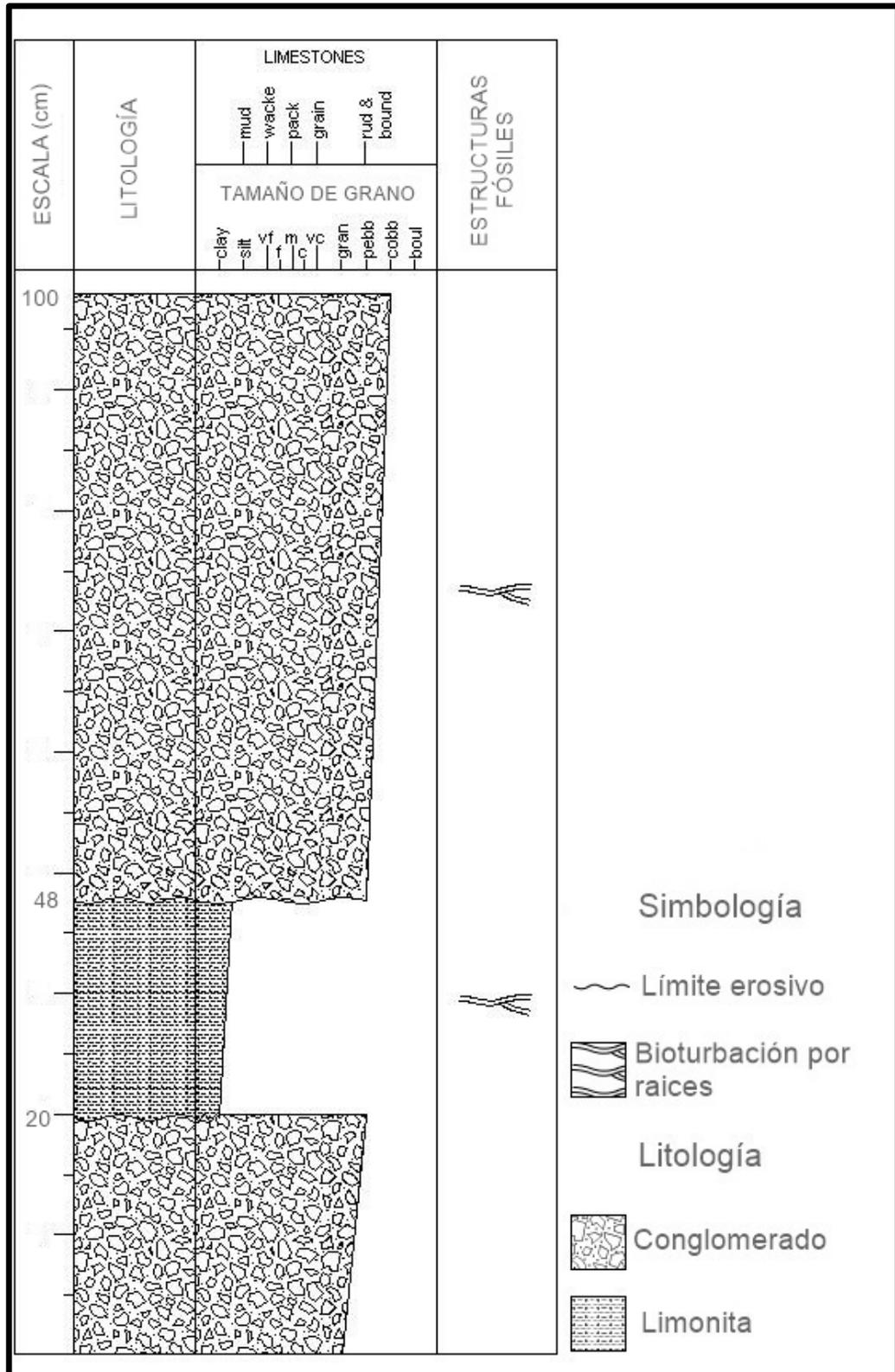
Anexo 1. Columna Estratigráfica N°1 de los depósitos fluviales del Río Aconcagua.



Anexo 2. Columna Estratigráfica N°2 de los depósitos fluviales del Río Aconcagua



Anexo 3. Columna Estratigráfica N°3 de los depósitos fluviales del Río Aconcagua



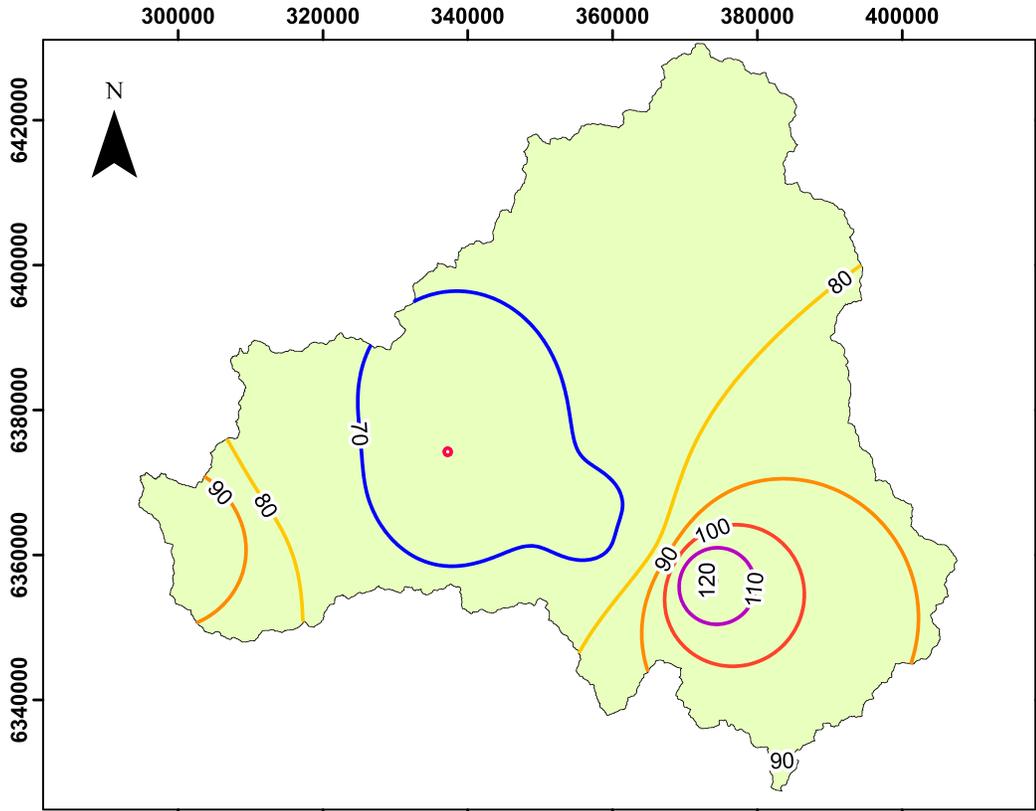
Anexo 4. Base de datos de Precipitaciones Máximas en 24 horas de las estaciones meteorológicas. Disponible en la Dirección General de Aguas.

AÑO	ESTERO RABUCO	RÍO ACONCAGUA EN SAN FELIPE	SAN FELIPE	RÍO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO	VILCUYA	RIECILLOS	CATEMU
1980	73	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	38
1981	106	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	46
1982	99	S/R	51	S/R	75	164	51
1983	54	S/R	43	S/R	50	75	33
1984	102	S/R	85	S/R	59	53	60
1985	39	S/R	23	S/R	41	39	19
1986	91	S/R	78	S/R	50	140	130
1987	90	S/R	74	S/R	107	47	49
1988	38	S/R	10	S/R	22	27	12
1989	50	S/R	30	S/R	52	117	39
1990	28	S/R	23	S/R	45	75	25
1991	74	S/R	42	S/R	71	98	60
1992	81	S/R	43	S/R	62	68	68
1993	48	S/R	29	S/R	45	90	32
1994	48	S/R	24	S/R	50	62	32

1995	13	S/R	29	S/R	29	42	34
1996	S/R	S/R	25	S/R	25	22	34
1997	80	S/R	56	S/R	66	121	65
1998	28	S/R	8	S/R	23	15	9
1999	59	23	40	S/R	48	75	46
2000	89	67	66	70	68	88	52
AÑO	ESTERO RABUCO	RÍO ACONCAGUA EN SAN FELIPE	SAN FELIPE	RÍO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO	VILCUYA	RIECILLOS	CATEMU
2001	80	0	52	56	80	129	56
2002	150	89	93	61	78	134	65
2003	46	36	42	45	52	70	40
2004	57	39	42	54	55	55	33
2005	52	24	32	35	56	111	32
2006	71	43	48	58	58	123	58
2007	43	30	39	54	59	100	30
2008	78	37	36	48	58	73	62
2009	70	26	35	45	49	63	31
2010	48	26	35	42	43	48	32

2011	39	25	27	27	35	37	31
2012	97	27	35	31	46	70	62
2013	47	28	32	37	48	61	41
2014	51	23	30	26	30	30	30
2015	64	49	50	51	75	92	55
2016	50	26	33	42	64	78	63
2017	41	33	37	43	47	55	38

Anexo 5. Mapa de Isoyetas para periodo de retorno de 10 años.



Mapa de isoyetas para periodos de retorno de 10 años

Leyenda

1:725,000

Región de Valparaíso

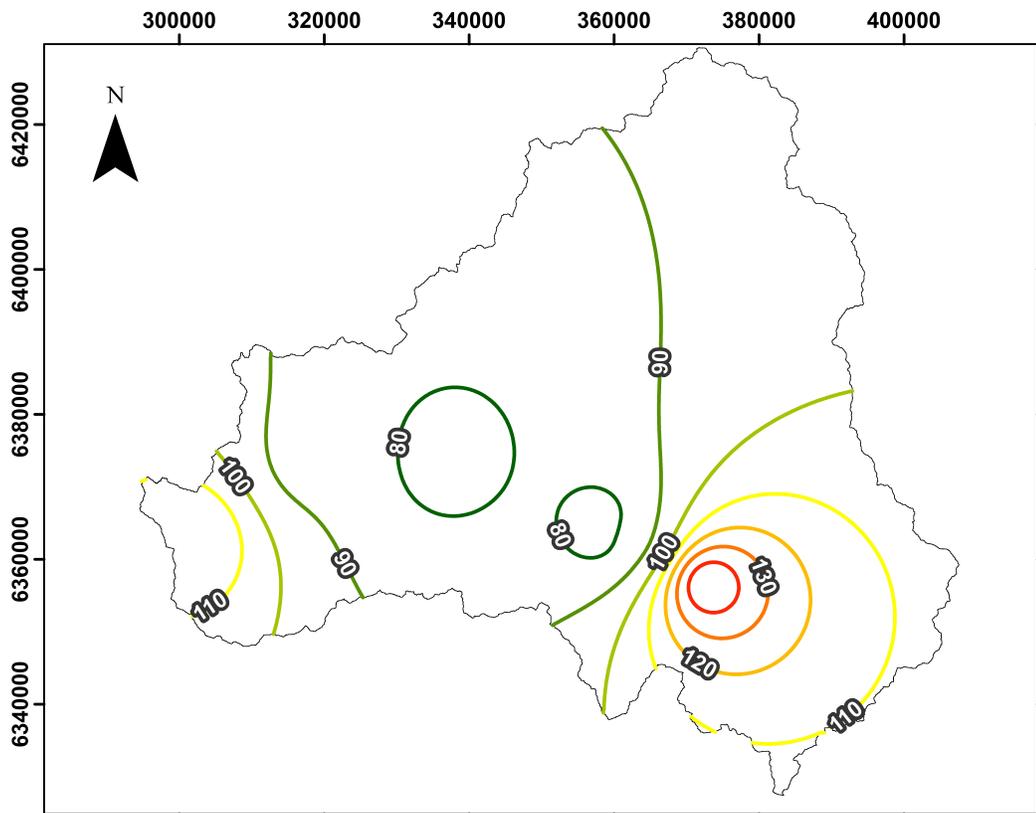
Isoyetas

Cantidad de precipitaciones

- 60
- 70
- 80
- 90
- 100
- 110
- 120



Anexo 6. Mapa de isoyetas con periodo de retorno de 25 años.



Mapa de isoyetas para periodos de retorno de 25 años

Leyenda

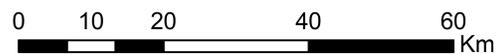
1:725,000

Región de Valparaíso

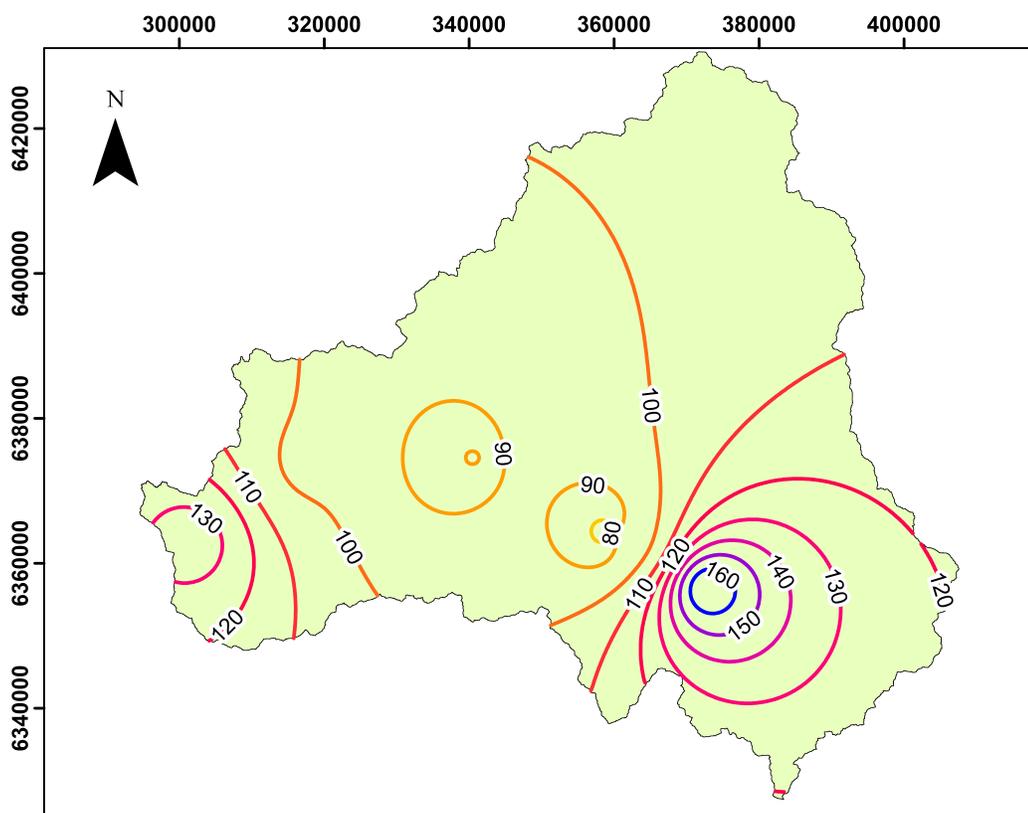
Isoyetas

Cantidad de precipitaciones

- 80
- 90
- 100
- 110
- 120
- 130
- 140



Anexo 7. Mapa de isoyetas para periodo de retorno de 50 años



Mapa de isoyetas para periodos de retorno de 50 años

Leyenda

1:725,000

 Región de Valparaíso

Isoyetas

Cantidad de precipitaciones

 80

 90

 100

 110

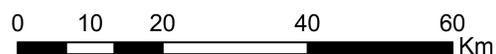
 120

 130

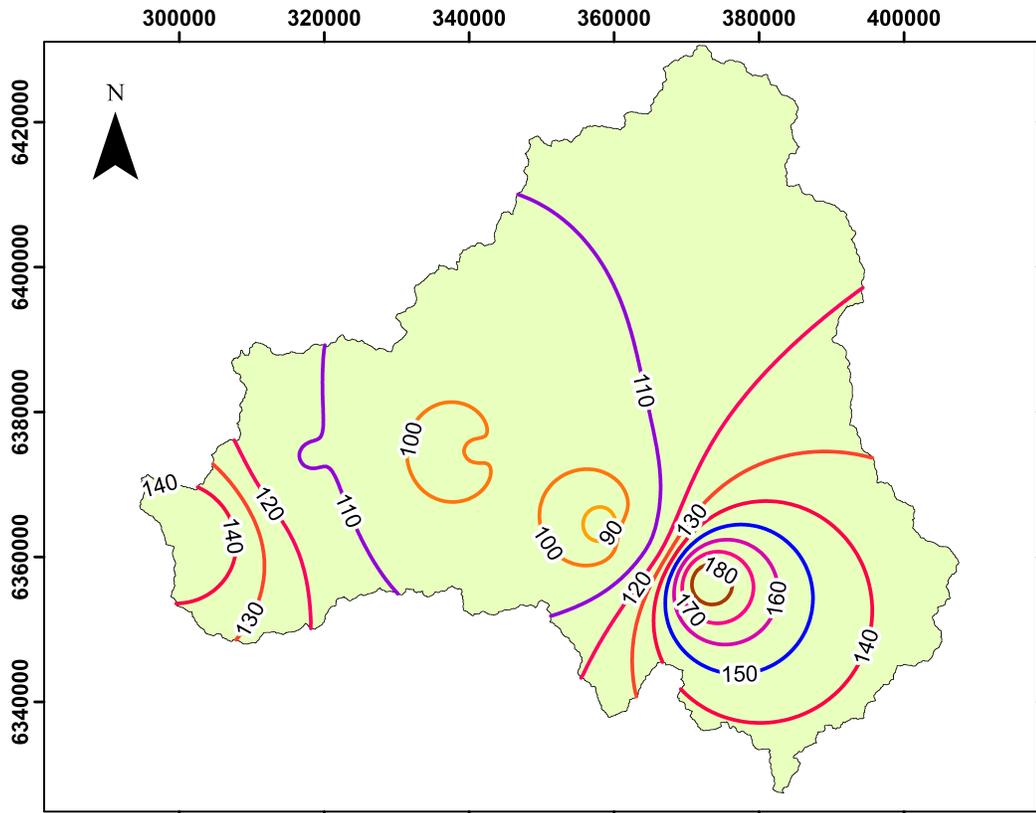
 140

 150

 160



Anexo 8. Mapa de Isoyetas para periodo de retorno de 100 años.



Mapa de isoyetas para periodos de retorno de 100 años

Legenda

1:725,000

Región de Valparaíso

Isoyetas

Cantidad de precipitaciones

90

100

110

120

130

140

150

160

170

180

