

ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE CABILDO



ESTUDIO PLAN REGULADOR COMUNAL DE CABILDO

ANEXO 6

ESTUDIO FUNDADO DE RIESGOS

1.	ESTUDIO DE RIESGOS NATURALES Y PROTECCIÓN AMBIENTAL	6
1.1	Introducción	6
1.2	Objetivos del estudio	6
1.3	Área de estudio	7
1.4	Alcances y limitaciones	8
1.5	Marco jurídico	9
2.	AREAS DE RIESGO ASOCIADAS A AVALANCHAS, RODADOS, ALUVIONES O EROSIONES ACENTUADAS	10
2.1	Caracterización del medio físico	10
2.1.1	Clima y Meteorología	10
2.1.2	Geología	16
2.1.3	Geomorfología.....	18
2.1.4	Edafología.....	20
2.1.5	Hidrología e hidrogeología.....	23
2.2	Áreas de riesgo por remoción en masa	25
2.2.1	Metodología General del Estudio	25
2.3	Área de riesgo por Actividad o Intervención Humana (Relaves, Faenas Mineras y Vertederos).	51
2.3.1	Antecedentes históricos de colapsos de tranques de relaves.....	52
2.4	Conclusiones	54
3.	ESTUDIO DE ÁREAS DE RIESGO POR ZONAS INUNDABLES	56
3.1	Estudio de Crecidas y Modelación Hidráulica	57
3.1.1	Metodología	57
3.1.2	Marco Climático.....	64
3.1.3	Marco Hidrológico	65
3.1.4	Modelación Hidráulica.....	88
3.1.5	Listado de Proyectos Asociados	118
3.1.6	Conclusiones	120
3.1.7	Restricciones	123
4.	PLANOS ESTUDIO DE RIESGOS PRC CABILDO	123
5.	BIBLIOGRAFIA	124
5.1	Listado de Fuentes Consultadas	124
6.	ANEXOS.....	125
6.1	Gráficos de análisis de frecuencias de estaciones fluviométricas	125
6.2	Gráficos de análisis de frecuencias de estaciones pluviométricas	128

Tabla Nº 1: Climas presentes en la comuna de cabildo	10
Tabla Nº 2: Precipitaciones máximas anuales en 24 horas sobre 60 mm	12
Tabla Nº 3: Capacidad Uso de Suelo comuna Cabildo	23
Tabla Nº 4: Clasificación y caracterización de las remociones en masa	27
Tabla Nº 5: Valores absolutos según rango	28
Tabla Nº 6: valoración de pendientes	29
Tabla Nº 7: valoración de exposición de laderas	33
Tabla Nº 8: Valoración de vegetación	38
Tabla Nº 9: Valoración formaciones geológicas comuna de Cabildo	43
Tabla Nº 10: Valoración y ponderación de variable de pendientes	47
Tabla Nº 11: Valoración y ponderación de variable de exposición de laderas	47
Tabla Nº 12: Valoración y ponderación de formaciones vegetales	47
Tabla Nº 13: Valoración y ponderación formaciones geológicas	48
Tabla Nº 14: Empresas y faenas mineras 2016 – 2017, SERNAGEOMIN	51
Tabla Nº 15: Antecedentes históricos de fallas en relaves	53
Tabla Nº 16: Coeficientes de Escorrentía para ser Usados en el Método Racional	58
Tabla Nº 17: Coeficientes de Escorrentía para T = 10 Años	59
Tabla Nº 18: Valores para el cálculo del coeficiente de Manning mediante método de Cowan	64
Tabla Nº 19: Precipitaciones Medias Mensuales Registradas en las Estaciones Artificio, Chacrilla, La Viña y Alicahue	65
Tabla Nº 20: Temperaturas Medias Mensuales Registradas en la Estación Alicahue	65
Tabla Nº 21: Estaciones Fluviométricas	66
Tabla Nº 22: Estaciones Meteorológicas	66
Tabla Nº 23: Extensión Registro Estaciones Fluviométricas	68
Tabla Nº 24: Extensión Registro Estaciones Meteorológicas	68
Tabla Nº 25: Características Ríos / Esteros / Quebradas	72
Tabla Nº 26: Caudales Máximos Anuales [m³/s]	75
Tabla Nº 27: Caudales Máximos Anuales	76
Tabla Nº 28: Caudales Máximos Anuales	76
Tabla Nº 29: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (5 estaciones)	77
Tabla Nº 30: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (5 estaciones)	78
Tabla Nº 31: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (5 estaciones)	79
Tabla Nº 32: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (3 estaciones)	80
Tabla Nº 33: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (5 estaciones)	80
Tabla Nº 34: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (5 estaciones)	81
Tabla Nº 35: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (5 estaciones)	81
Tabla Nº 36: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (3 estaciones)	81
Tabla Nº 37: Determinación del Tiempo de Concentración	82
Tabla Nº 38: Cálculo Intensidad de Precipitaciones en las Cuencas	83
Tabla Nº 39: Caudales Máximos para cada Cuenca, Estimados a Partir del Método Racional	83
Tabla Nº 40: Caudales Máximos para cada Cuenca, Estimados a Partir del Método DGA-AC	83
Tabla Nº 41: Caudales Máximos para cada Cuenca, Estimados a Partir del Método Verni y King Modificado	83
Tabla Nº 42: Determinación del Tiempo de Concentración	85
Tabla Nº 43: Coeficientes de Frecuencia según Zonas Homogéneas	86
Tabla Nº 44: Estimación de Caudales (Quebradas) mediante Método Racional	87
Tabla Nº 45: Condiciones de borde de modelos hidráulicos	89
Tabla Nº 46: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Sector La Vega	90
Tabla Nº 47: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Sector El Quemado	91

Tabla Nº 48: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Sector San José.....	93
Tabla Nº 49: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Sector Cabildo	94
Tabla Nº 50: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Sector Artificio.....	97
Tabla Nº 51: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Río Petorca en Artificio	97
Tabla Nº 52: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Río Ligua en Cabildo	98
Tabla Nº 53: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Río Ligua en El Quemado.....	100
Tabla Nº 54: Ancho máximo de inundación – Río Petorca en Artificio	101
Tabla Nº 55: Ancho máximo de inundación – Río Ligua en Cabildo	103
Tabla Nº 56: Ancho máximo de inundación – Río Ligua en El Quemado.....	106
Tabla Nº 57: Ancho máximo de inundación - Quebradas Sector El Quemado	107
Tabla Nº 58: Ancho máximo de inundación - Quebradas Sector San José	109
Tabla Nº 59: Ancho máximo de inundación y régimen de escurrimiento- Quebradas Sector Cabildo	113
Tabla Nº 60: Ancho máximo de inundación y régimen de escurrimiento- Quebradas Sector Artificio.....	116
Tabla Nº 61: Caudales Máximos Anuales Ríos y Estero.....	120
Tabla Nº 62: Estimación de Caudales (Quebradas) mediante Método Racional	121
Figura Nº 1: Localización de la Intercomuna en la Región de Valparaíso	7
Figura Nº 2: Clasificación de climas de Koppen, actualizado	11
Figura Nº 3: Rosa de los vientos año completo Ciudad Cabildo	14
Figura Nº 4: Geología área de estudio	16
Figura Nº 5: Esquema de cordones transversales área de estudio	19
Figura Nº 6: Pendientes en grados comuna de Cabildo	29
Figura Nº 7: Exposición de laderas comuna de Cabildo	34
Figura Nº 8: Cubierta de vegetación	39
Figura Nº 9: Caracterización geológica	43
Figura Nº 10: Modelación remoción en masa Cabildo y San José	48
Figura Nº 11: Modelación remoción en masa Sector de Artificio	49
Figura Nº 12: Modelación remoción en masa Sector La Vega	50
Figura Nº 13: Modelación remoción en masa Sector el Quemado	50
Figura Nº 14: Empresas y faenas mineras 2016 – 2017, SERNAGEOMIN	52
Figura Nº 15: Estaciones Fluviométricas y Meteorológicas en la Zona de Estudio	67
Figura Nº 16: Delimitación de Cuencas Artificio y San José	69
Figura Nº 17: Delimitación de Cuencas Cabildo y El Quemado	70
Figura Nº 18: Delimitación de Cuencas La Vega	71
Figura Nº 19: Delimitación de Cuencas Ríos y Esteros	71
Figura Nº 20: Valor Promedio de Caudales Máximos Instantáneos en Río Ligua	73
Figura Nº 21: Valor Promedio de Caudales Máximos Instantáneos en el Río Petorca	74
Figura Nº 22: Polígonos de Thiessen	82
Figura Nº 23: Izquierda vista del Arroyo Beaver (RCNC, 1967). Derecha fotografías sector La Vega (26-09-2016)	90
Figura Nº 24: Izquierda vista del Arroyo Beaver (RCNC, 1967). Derecha fotografías sector El Quemado (26-09-2016)	92
Figura Nº 25: Izquierda y derecha arriba vista de sector San José (Google Earth). Derecha abajo fotografías mismo sector (26-09-2016)	93
Figura Nº 26: Izquierda canal en Sector Cabildo (13-03-2017). Derecha lecho aguas arriba canal en Sector Cabildo (Google Earth).	95
Figura Nº 27: Arriba vistas del Arroyo Beaver (RCNC, 1967). Abajo fotografías sector Artificio (26-09-2016)	96
Figura Nº 28: Izquierda vista del Río Middle Fork Flathead; (RCNC, 1967). Derecha fotografía Río Petorca en Artificio (13-03-2017)	98
Figura Nº 29: Izquierda vista del Río Middle Fork Flathead; (RCNC, 1967). Derecha fotografías Río Ligua en Cabildo (13-03-2017)	99
Figura Nº 30: Izquierda vista del Río Middle Fork Flathead; (RCNC, 1967). Derecha fotografía Río Ligua en El Quemado (13-03-2017)	100
Figura Nº 31: Resultados modelación Río Petorca en Artificio	101

Figura Nº 32: Ampliación vista resultados modelación Río Petorca en Artificio	102
Figura Nº 33: Resultados modelación Río Ligua en Cabildo	103
Figura Nº 34: Ampliación vista resultados modelación Río Ligua en Cabildo 1	104
Figura Nº 35: Ampliación vista resultados modelación Río Ligua en Cabildo 2	104
Figura Nº 36: Ampliación vista resultados modelación Río Ligua en Cabildo 3	105
Figura Nº 37: Resultados modelación Río Ligua en El Quemado	106
Figura Nº 38: Resultados modelación quebradas en sector El Quemado T=100	108
Figura Nº 39: Resultados modelación quebradas en sector San José	109
Figura Nº 40: Resultados modelación quebradas en sector La Vega	110
Figura Nº 41: Resultados modelación quebradas en sector Cabildo	114
Figura Nº 42: Ampliación resultados modelación quebrada C8 en sector Cabildo	115
Figura Nº 43: Resultados modelación quebradas en sector Artificio	117

1. ESTUDIO DE RIESGOS NATURALES Y PROTECCIÓN AMBIENTAL

1.1 Introducción

El estudio “Plan Regulador Comunal de Cabildo”, fue adjudicado por Licitación pública a NOMADE CONSULTORES, de la ciudad de Valparaíso. Los principios de NOMADE CONSULTORES, se orientan en la búsqueda de un Desarrollo territorial sustentable, en concordancia con los principios fundamentales del diseño de las Políticas Públicas que establece la reciente modificación de la Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente mediante la ley 20.417 que crea el Ministerio de Medio Ambiente.

Esta modificación establece la obligatoriedad de someter a los Instrumentos de Planificación Territorial, entre ellos los Planes Reguladores comunales, a la herramienta de gestión denominada “Evaluación Ambiental Estratégica” (E.A.E). La E.A.E es una herramienta de gestión ambiental que busca incorporar la dimensión ambiental en el diseño del Plan en todas sus etapas. Por lo cual, la Evaluación Ambiental Estratégica (E.A.E) acompañara todo el estudio del “Plan Regulador Comunal de Cabildo”, en sus diferentes Etapas y fases.

El “Estudio fundado de riesgos naturales protección ambiental”, delimita las áreas de riesgos que han de ser incorporadas y/o adecuadas en la formulación del PRC, con el objetivo de mitigar los eventuales riesgos naturales en la zona de estudio, de acuerdo con lo señalado por el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

1.2 Objetivos del estudio

El objetivo de este trabajo es reconocer y delimitar las áreas de riesgos que han de ser incorporadas y/o adecuadas en la modificación del PRC, con la finalidad de mitigar los eventuales riesgos naturales en la zona de estudio (de acuerdo con lo señalado por el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones), generando un estudio fundado de Riesgos Naturales en los sectores urbanos de la comuna

Dentro de este estudio, como productos, se elaboraron cartas de peligro por efectos de: inundaciones causadas por desbordes de ríos, activación de líneas de quebradas y remoción en masa en sus diferentes manifestaciones- (aluviones, derrumbes de rocas, deslizamiento de tierra, licuefacción de suelos u otros relevantes).

El objetivo específico de este proyecto consiste en la elaboración de un catastro, descripción y reconocimiento de los principales peligros geológicos que pueden afectar al área de estudio, así como sus factores condicionantes y detonantes.

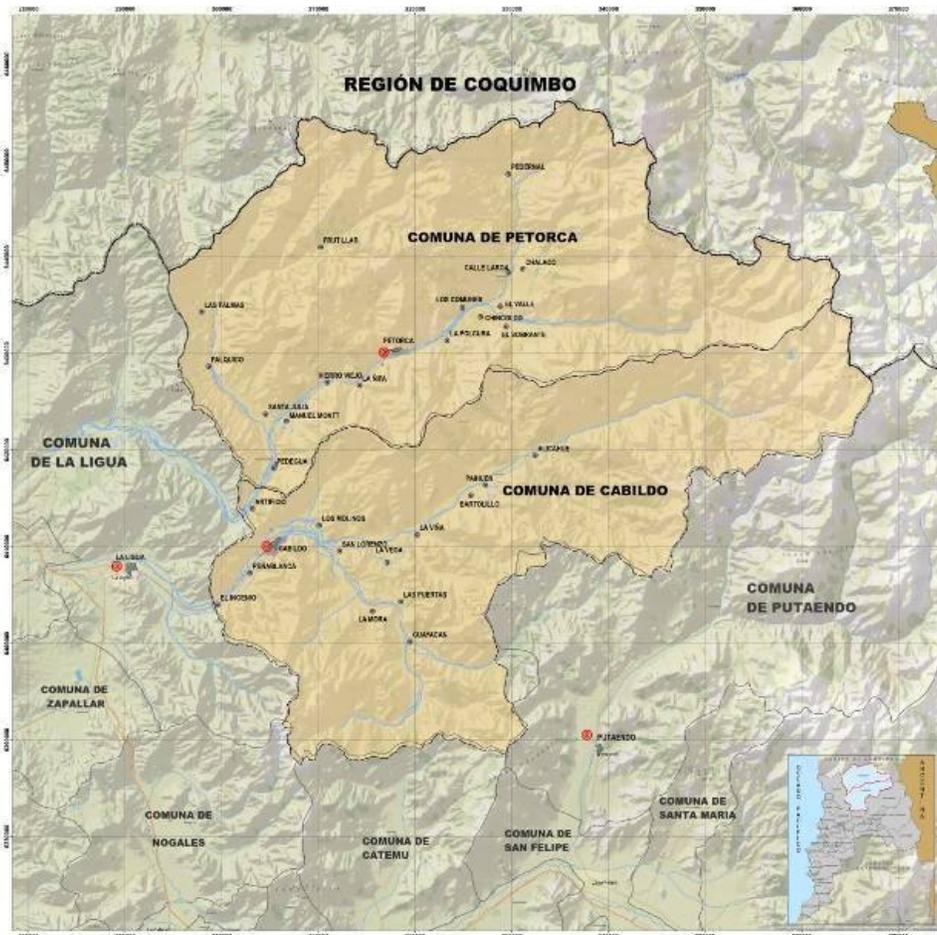
1.3 Área de estudio

La comuna Cabildo se inserta en el sistema morfo dinámico: Cordillera de los Andes-Precordillera- Valles Transversales. Este medio geográfico ha determinado el desarrollo de los asentamientos humanos y las actividades económicas. En efecto, los asentamientos humanos se han asentado en los sectores planos de los valles transversales y las actividades económicas son agrícolas y mineras.

La comuna, pertenece a la provincia de Petorca, la cual es la más septentrional de la Región de Valparaíso. La comuna de Cabildo se localiza a 132 kms., de Valparaíso, la capital regional y 169 km de Santiago.

La comuna de Cabildo tiene una superficie de 1455.3 km², con una población total de 18.196 habitantes (INE 2002), con una población urbana de un 65.8% y rural de un 34.1%. El crecimiento poblacional entre 1992- 2002 es de 2.967 habitantes.

Figura N° 1: Localización de la Intercomuna en la Región de Valparaíso



Fuente: Nomade Consultores LTDA.

1.4 Alcances y limitaciones

Para este estudio se realizó una compilación de referencias bibliográficas, antecedentes históricos, revisión de fotografías aéreas, visitas a terreno y la evaluación de los distintos factores condicionantes para zonificar las áreas susceptibles a ser afectadas por un peligro geológico, a una escala 1:5.000 (considerando que la gran mayoría de la información geológica está a una escala mayor a 1:250.000). Se debe destacar que los resultados de este trabajo no deberían ser utilizados a una escala más detallada que la de referencia, ya que esto podría llevar a errores en la planificación territorial.

El resultado de este estudio corresponde a mapas de factores condicionantes, principalmente morfológicos y geológicos y mapas inventarios. A partir del análisis de los anteriores, se generaron mapas de susceptibilidad para los peligros geológicos reconocidos en la zona a escala 1:5.000.

Respecto de la modelación de inundación fluvial se registran los siguientes alcances y limitaciones:

Para realizar el estudio de inundaciones, se realizó revisión de antecedentes, visitas a terreno, estudio de crecidas y estudio hidráulico.

El estudio de crecidas se realizó en base a la información de las estaciones pluviométricas y fluviométricas de la DGA ubicadas en la zona de estudio, además de las características geomorfológicas. Al respecto, se puede señalar que los resultados de este estudio provienen de un análisis estadístico según metodologías establecidas.

El estudio hidráulico se realizó en base al estudio de crecidas, la topobatimetría de los cauces y sus características. La modelación se realizó con el software Hec Ras, en 1 dimensión, para representar el escurrimiento en quebradas y ríos, con el objeto de determinar las zonas de inundación para la condición más desfavorable de periodo de retorno $T = 100$ años. Al respecto, es importante señalar que, para realizar este estudio, se requiere como información base la topobatimetría del cauce, la cual fue levantada de manera adecuada para el proyecto, sin embargo, hubo sectores puntuales donde no se pudo levantar por diversos motivos. Para describir algunos ejemplos de esto, se puede destacar que no se cuenta con los proyectos de los canales realizados en Cabildo, en algunos casos se desconoce el detalle de su trazado y desembocadura, toda vez que en ocasiones éstos tienen su trazado por debajo de las calles, no pudiendo observarse así en su totalidad. Por otra parte, los canales cuyos trazados pasan por la propiedad del grupo minero Las Cenizas no pudieron levantarse en su totalidad puesto que no se tuvo acceso a estas instalaciones.

1.5 Marco jurídico

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), en su apartado 2.1.17 “Disposiciones complementarias” indica que: “En los planes reguladores podrán definirse áreas restringidas al desarrollo urbano, por constituir un riesgo potencial para los asentamientos humanos. Dichas áreas, se denominarán, “áreas de riesgo”, según sea el caso, como se indica a continuación:

Por “áreas de riesgo”, se entenderán aquellos territorios en los cuales, previo estudio fundado, se limite determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole, suficientes para subsanar o mitigar tales efectos.

En el marco de este informe, “áreas de riesgo” son definidas como las zonas susceptibles a ser afectadas por un “peligro geológico”.

Las “zonas no edificables” corresponderán a aquellas franjas o radios de protección de obras de infraestructura peligrosa, tales como aeropuertos, helipuertos, torres de alta tensión, embalses, acueductos, oleoductos, gaseoductos, u otras similares, establecidas por el ordenamiento jurídico vigente.

De acuerdo con la OGUC, las “áreas de riesgo” se determinarán en base a las siguientes características:

Zonas inundables o potencialmente inundables, Debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos. De acuerdo a las definiciones utilizadas en este informe, corresponde a los peligros geológicos de inundación.

Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas, Corresponde a los peligros geológicos de remociones en masa, caída de bloques y flujos de barro y detritos.

Zonas con riesgo de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas,

Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana

Para autorizar proyectos a emplazarse en áreas de riesgo, se requerirá que se acompañe a la respectiva solicitud de permiso de edificación un estudio fundado, elaborado por profesional especialista y aprobado por el organismo competente, que determine las acciones que deberán ejecutarse para su utilización, incluida la Evaluación de Impacto Ambiental correspondiente conforme a la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, cuando corresponda.

2. AREAS DE RIESGO ASOCIADAS A AVALANCHAS, RODADOS, ALUVIONES O EROSIONES ACENTUADAS

2.1 Caracterización del medio físico

2.1.1 Clima y Meteorología

De acuerdo con la Clasificación de climas de Koppen, actualizado por Sarricolea P., MJ. Herrera, O. Meseguer-Ruiz. (2017), se obtiene para la comuna de Cabildo la siguiente Clasificación

Tabla N° 1: Climas presentes en la comuna de cabildo

KOPPEN	DENOMINACIÓN	PP_MM	T_MEDIA	ALT_MIN	ALT_MAX
BSk (s)	Clima semiárido de lluvia invernal	130	12.5	50	3100
Csb	Clima mediterráneo de lluvia invernal	700	11.0	100	1000
Csb (h)	Clima mediterráneo de lluvia invernal de altura	900	9.0	1000	3000
ET (s)	Clima de tundra de lluvia invernal	700	3.0	1800	4750

Fuente: Sarricolea P., MJ. Herrera, O. Meseguer-Ruiz. (2017)

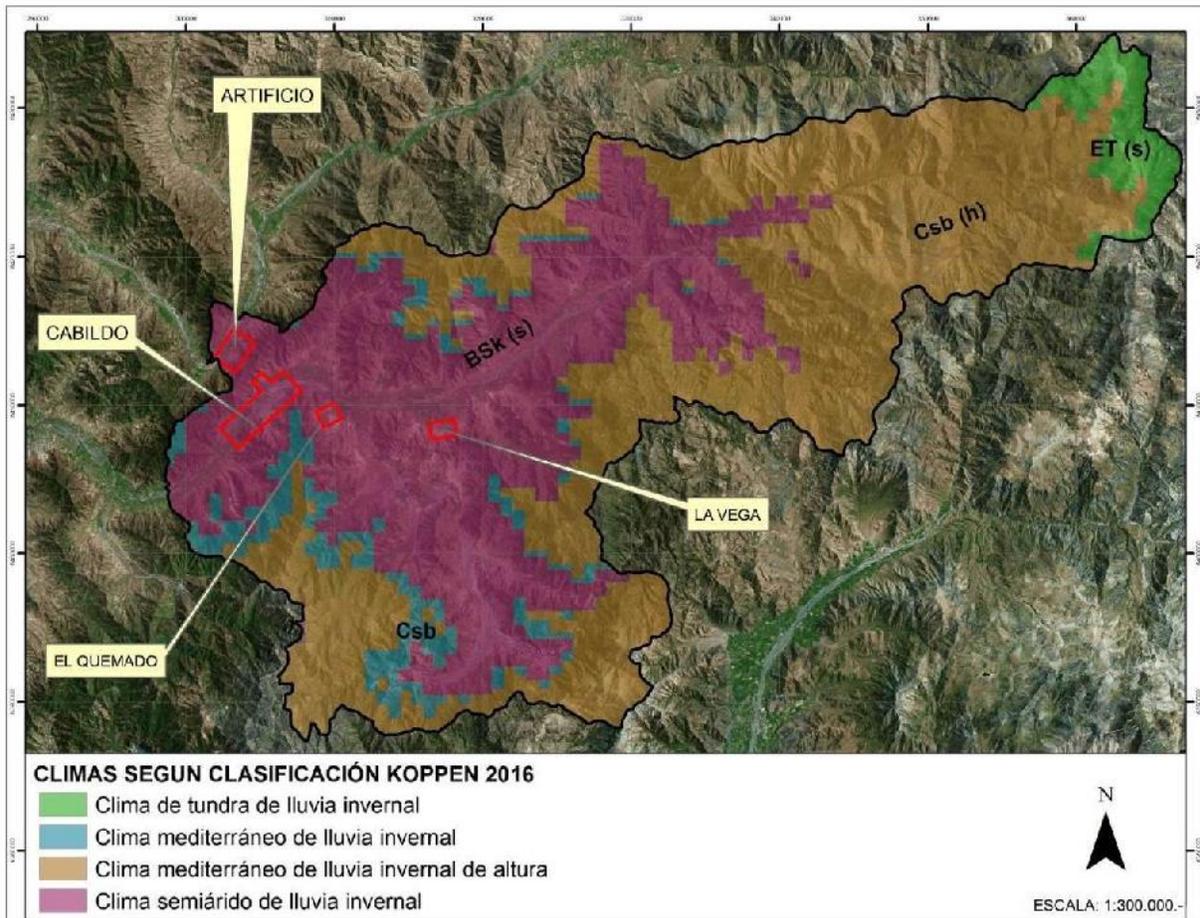
Clima semiárido de lluvia invernal, se localiza en la parte baja del valle, es el que presenta menor precipitación en mm y una temperatura media más alta y corresponde al sector donde se localizan las localidades en estudio.

Clima mediterráneo de lluvia invernal, este bordea la parte alta del clima BSk(s), presenta mayor registro de precipitaciones y una disminución de la temperatura media por efecto de la altura.

Clima mediterráneo de lluvia invernal de altura, corresponde a la parte alta de los cordones transversales, por ende presenta un aumento de las precipitaciones y disminución de la temperatura.

Clima de tundra de lluvia invernal, corresponde al sector oriente de la comuna y a las mayores alturas de la cuenca las precipitaciones en este sector se pueden producir de forma líquida o sólida ocasional y presenta la temperatura media más baja.

Figura N° 2: Clasificación de climas de Koppen, actualizado



Fuente: Sarricolea P., MJ. Herrera, O. Meseguer-Ruiz. (2017)

Precipitaciones

Las precipitaciones varían dependiendo de la altura y de la cercanía a la costa. En sentido poniente-oriente se denota la influencia marítima, por ejemplo, en el sector de Cabildo durante los meses más lluviosos se registran precipitaciones de 300 mm., mientras que en sectores más andinos como es el caso de Chalaco las precipitaciones disminuyen considerablemente a casi la mitad registrándose un total de 198 mm.

Respecto de la influencia de la altura se observa que bajo los 2.000 metros de altitud la precipitación es de tipo líquido y sobre dicho límite, es preferentemente sólida (agua nieve) la que suele permanecer como reservorio durante un periodo más prolongado en laderas de exposición Sur.

Las precipitaciones de las comunas tienen un registro de: El Sobrante Hda. 301 mm, Chicolco 200 mm, Pedernal Hda. 282 mm, Petorca 221 mm, Alicahue Hda. 255 mm y Cabildo 300 mm.

Respecto del registro de precipitaciones máximas en 24 hrs, de los últimos 20 años (1997 – 2017) de la Dirección General de Aguas, respecto de las estaciones de Alicahue, Artificio y La vega, se obtiene los siguientes resultados con precipitaciones sobre 60 mm en 24 hrs, considerados como de riesgo para procesos de remoción en masa y/o inundaciones.

Tabla N° 2: Precipitaciones máximas anuales en 24 horas sobre 60 mm

Estación	Año	Día/Mes	Pp/Mm
Alicahue	1997	16/08	91.00
Alicahue	2000	14/06	65.50
Alicahue	2002	04/06	73.00
Alicahue	2007	13/06	62.50
Artificio	2000	23/06	74.20
Artificio	2001	18/07	62.20
Artificio	2002	03/06	114.40
Artificio	2008	15/08	60.60
Artificio	2015	07/08	76.00
La Viña	2000	14/06	78.00
La Viña	2001	18/07	73.00
La Viña	2002	03/06	84.50

Fuente: DGA

Temperaturas

La influencia del relieve y la distancia a la influencia marítima marcan fuertemente las diferencias climáticas. Lo anterior denota diferencias no sólo a nivel regional, sino que también a nivel local, desarrollándose variaciones de lluvia y temperatura en una misma latitud.

Las condiciones van cambiando en forma gradual desde el sector costero hacia el interior. Mientras en el litoral, por influencia del mar, las temperaturas son moderadas y con escasa variabilidad diaria y estacional y la humedad relativa es alta, estas condiciones van cambiando paulatinamente hacia el interior con mayores oscilaciones de las temperaturas, menor humedad relativa, mayor radiación solar.

Una acotación importante es la referente a las condiciones “micro climáticas” que se produce, por acción de la “inversión térmica”, es decir, estratificación de las masas de aire por densidad, donde las más frías se ubica en el fondo de los valles y las más cálidas alcanzan las laderas de los cerros, las plantaciones de paltos en esta última posición no

se ven afectadas por las heladas. Informaciones obtenidas de agricultores que poseen termómetros en ambas posiciones, aseguran que se producen gradientes entre 3°C y 6°C entre valle y laderas lo que, como se demuestra más adelante, tiene gran relevancia económica en cultivos subtropicales, especialmente en paltos (MOP, “Diagnóstico de las obras de Riego de los valles de La Ligua y Petorca”, 2003)

En el extremo oriente del valle, existen temperaturas extremas, con mayor oscilación térmica diaria y estacional, producto de tres factores incidentes: características morfológicas, mayor elevación con respecto al nivel del mar (sobre 500 m.s.n.m.) y distancia respecto del litoral. En dicho sentido, las temperaturas presentes en Cabildo, marcan temperaturas medias del orden de los 4,6°C en invierno y de 28,2° C en verano, con temperaturas medias anuales de 14,4°C

La condición térmica determina una acumulación de horas de frío anual de 895 horas, lo que permite la plantación de frutales de hoja caduca con moderado requerimientos de frío invernal (durazneros, nogales, etc.). La acumulación de calor anual alcanza a 1.780 días – grado base 10. El período libre de heladas es de sólo 240 días, con 8 heladas al año, promedio, en los sectores bajos del valle.

Agroclimas

Agroclima La Ligua (Clima Mediterráneo Subtropical Semiárido). Ubicado al poniente del agroclima Ovalle, el régimen térmico de esta zona se caracteriza por una temperatura media anual de 4,4° C con una máxima media del mes más cálido (febrero) de 26,5° C y una media mínima del mes más frío de 4,5° C (julio).

El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación anual de 340 mm., siendo junio el mes más lluvioso, con 75 mm. La estación seca es de 6 meses de noviembre a abril. Son posibles varios cultivos pero dependen del riego.

Agroclima Alicahue (Clima Mediterráneo Frío). Se caracteriza por presentar una temperatura media anual de 8,6° C con una máxima media del mes más cálido de 21,8° C (enero) y una media mínima del mes más frío de -3,2° C. La temperatura media mensual entre los meses de septiembre a abril se mantiene sobre los 7° C.

El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación anual de 323,8 mm siendo el mes de mayo el más lluvioso, con 91 mm. La evaporación anual es de 1.267 mm, con un máximo mensual en enero de 140 mm. Y un mínimo mensual en junio con 64 mm. La estación seca es de 7 meses, de octubre a abril.

Baja capacidad agrícola, es principalmente ganadera y silvícola. Con riego en las partes más bajas es posible lograr algunos cultivos. Se ubica en pequeños y aislados sectores de la mediana cordillera, especialmente en la comuna de Cabildo

Agroclima Cordillera Central (Clima Tundra) Su invierno es frío con temperaturas medias anual de -1.43, con una media mínima del mes más frío (junio) de -9.5° C y con una máxima media del mes más cálido (enero) de 7,6° C. Su régimen hídrico es húmedo y se caracteriza por una precipitación media anual de 902 mm, sin estación seca, existiendo dos meses enero y febrero, que no son húmedos. Es un agroclima sin aptitudes agrícolas, abarca parte del área de estudio correspondiente a la alta montaña.

Calidad del aire

Por ser un área rural con muy baja concentración de población existen pocos eventos donde se haya medido la calidad del aire con relación al PM10.

La calidad del aire de la comuna de Cabildo se considera en términos relativos muy buena, pues se trata de un área rural donde las actividades contaminantes se localizan en puntos específicos, correspondiendo, más bien a fuentes fijas asociadas a la actividad minera.

SIGLA	Nombre de la formación	Características	Ubicación predominante
Ki1	Unidad Chalinga	Granodioritas y dioritas cuarcíferas	En el sector de entrada a los valles de Petorca y La Ligua. Corresponde a un sector de choque entre las formaciones del jurásico del sector costero y las del mesozoico de la cordillera.
Klc	Formación Las Chilcas	Volcanoclástica, continental lagunar.	Amplio sector de ambas comunas abarca la media montaña. En esta área se encuentran alteraciones hidrotermales, preferentemente en la comuna de Petorca.
Ktc1	Unidad Fredes	Diorita gris de grano medio	Se encuentra de manera aislada principalmente en la cabecera del río Alicahue, en la comuna de Cabildo. En Petorca son unidades de menor representación. Corresponden a unidades emplazadas dentro de la formación de Salamanca (Ks).
Ks	Formación Salamanca	Volcánica continental (Lavas andesíticas)	Amplio sector de la alta cordillera, continuo a la Formación de las Chilcas.
Tf	Formación Farellones	Volcánica continentales (Ignimbritas y tobas riolíticas.)	Formación localizada de manera aislada y puntual, en la comuna de Cabildo. Específicamente se encuentra contenida dentro de la formación Salamanca.
Tch1	Unidad Tambillos	Porfidos dacíticos, blancos.	Unidad ubicada entre la Formación de Salamanca y la Formación de Pelambres. Tiene una extensión poco importante y se ubica sobre las cabeceras de los ríos Pedernales y Alicahue a unos 1.200 m de altitud.
Klp	Formación los Pelambres	Volcánica marina continental, lavas andesíticas, tobas; intercalaciones de calcarenitas fósiles.	Ubicado a gran altura sobre los 3500 m de altitud.

Fuente: Elaboración propia

2.1.3 Geomorfología

La comuna de Cabildo se encuentra emplazada en el sector Nor Oriental de la V Región de Valparaíso, teniendo un gran componente andino dominado por valles transversales. Es por esencia un sector de transición entre el Norte Chico y la Zona Centro.

En este lugar La Cordillera de Los Andes continúa con su aspecto macizo y amurallado del Norte Chico. Por esta razón predominan pendientes mayores a 30°, el volcanismo sigue ausente y los pasos y portezuelos andinos continúan siendo altos y difíciles de cruzar.

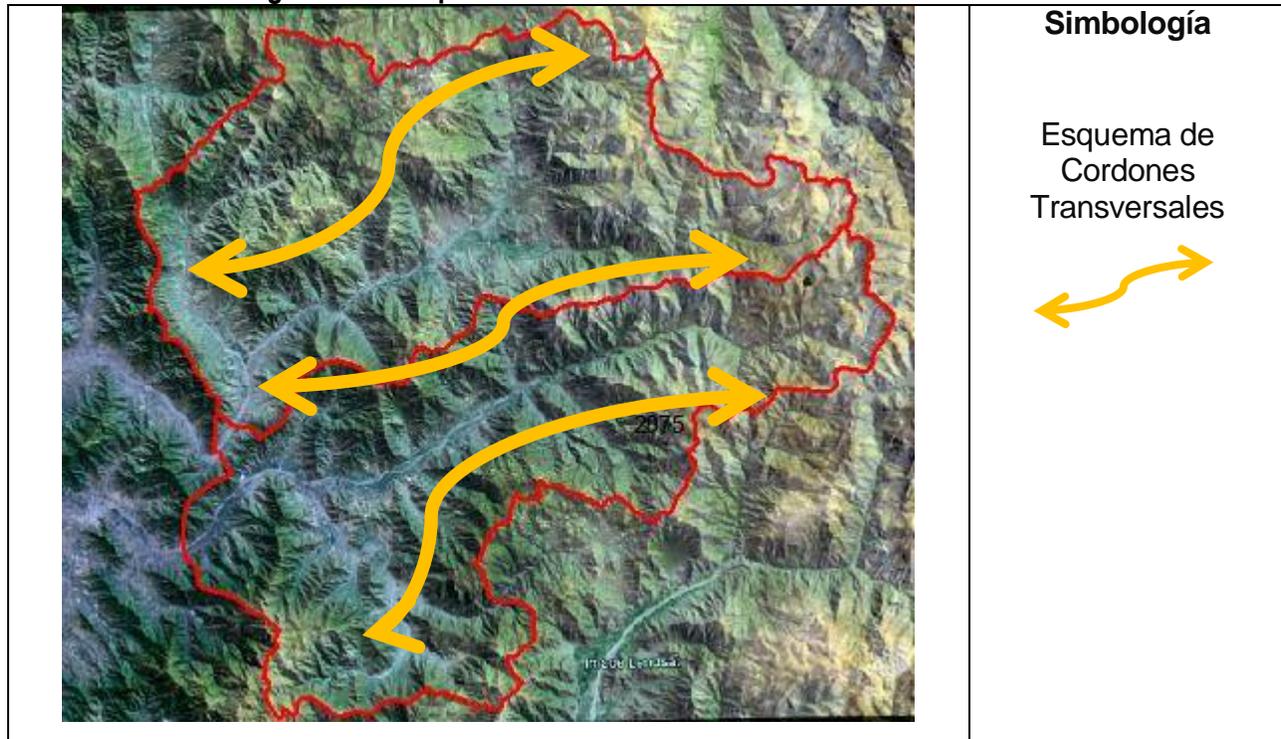
En la zona comprendida por la comuna de Cabildo, se encuentran los últimos valles transversales típicos del norte Chico, representados por la cuenca del Río La Ligua.

Las unidades de relieve más reconocibles son los Cordones Transversales, correspondientes al sistema andino – costero, los cuales presentan cuencas tradicionales, en donde aún se presenta la condición semidesértica del Norte Chico de nuestro país. A continuación, se describe cada una de las macroformas imperantes por separado, a decir: cordones transversales, Valles transversales, Valles longitudinales y pie de monte. Pero ante todo, es necesario describir de manera general las características morfológicas integradas de la unidad espacio territorial en estudio.

Cordones transversales

Esta macroforma ocupa las mayores proporciones de ambas comunas se trata de un relieve montañoso con alturas máximas entre 700 y 3700 m.s.n.m. Los principales cordones y cerros y la disposición espacial que alcanzan éstos en el territorio se observan en la siguiente figura

Figura N° 5: Esquema de cordones transversales área de estudio



Fuente: Estudio Plan Regulador Intercomunal Satélite Cabildo Petorca

Los cordones transversales se caracterizan por representar un homogéneo conjunto montañoso, en el que los dorsos principales se encuentran alineados en dirección de los principales valles del área en estudio E-W y NW-SE. Las alturas principales, están generalmente entre los 700 y no más de los 2.500 m en los cerros situados al poniente del eje que conforma el río Pedernal y Quebrada de Chicolco, hasta los 3.500 m. de altitud en los sectores de alta cordillera.

La continuidad del sentido de los flancos valle o dorso, principalmente aquellos que presentan una orientación E-W favorece la diferenciación morfogénica, entre las vertientes de exposición norte respecto de las de exposición sur, sin embargo, los procesos erosivos de origen antrópico han favorecido ambos flancos en muchos casos, incluyendo las laderas que no poseen un grado de exposición definido.

Si bien la existencia de caracterizados cordones montañosos genera la presencia de microclimas al interior de ambos valles; también se presenta como un elemento de aislamiento entre; los poblados de las mismas comunas (por su disposición lineal, dada la geoforma), entre ambas comunas, y entre, otras comunas de la provincia.

Valles transversales

Los valles transversales tienen una gran importancia en cuanto al desarrollo de la agricultura y el turismo, pues en ellos no sólo se generan microclimas, sino que también constituyen elementos paisajísticos particulares concebidos por la exposición de laderas generándose de forma natural un contraste respecto del tipo y abundancia vegetacional.

Los valles corresponden a rellenos de origen fluvial que escinden las unidades morfológicas de los cordones transversales. Los principales valles en el área de estudio están formados por la cuenca del Río La Ligua, en la comuna de Cabildo, la cual se presenta alargada en sentido este-oeste y con mayor desarrollo en la vertiente Sur, correspondiente a la Subcuenca del Estero Los Ángeles.

El valle del río La Ligua desde su confluencia con el río Alicahue, presenta llanuras fluviales reducidas y su cauce presenta un trazado de tipo recto, desde la localidad de Cabildo hacia su desembocadura en el mar las llanuras son más amplias con respecto al tramo anterior, y el tipo de trazado que representa el río es de tipo anastomosado. El valle de Cabildo presenta mayor desarrollo agrícola que el Valle de Petorca. Hacia el Oriente los valles se abren manteniéndose permanentemente ambos valles de manera paralela.

Valles longitudinales

Los valles longitudinales, tienen características específicas; son valles angostos y de corta extensión formados básicamente por acción fluvial de pequeñas quebradas con un gran componente torrencial.

En el caso de la comuna de Cabildo el valle transversal formado por la acción del Estero Alicahue y La Ligua, se ve intersectado por un único valle longitudinal, que a su vez tiene las mismas características de estrechez y baja longitud que los valles longitudinales del sector de Petorca. Dicho valle en el sector de Cabildo se encuentra conformado por la acción de desgaste y depositación de material del Estero Los Ángeles, en dicho valle no se localizan poblamientos importantes salvo la localidad de La Mora.

2.1.4 Edafología

Dada las condiciones morfológicas y morfogenéticas de las cuencas de montaña, los suelos muestran características donde predominan los procesos de remoción de material por sobre los procesos deposicionales. Por este motivo, son suelos residuales que se encuentran sometidos a un importante proceso de erosión hídrica.

Específicamente, los suelos del área de secano interior de la provincia figuran integrando la formación de Las Chilcas, la que está compuesta por una gran variedad litológica (basalto, andesitas, brechas, tobas, areniscas, lutitas y conglomerados) formando estratas lenticulares y variaciones laterales.

El material generador de estos suelos varía desde graníticos y rocas muy antiguas, tanto ígneas como sedimentarias. Sin embargo, su origen es coluvial-aluvial reciente, aunque es posible encontrar terrazas y restos de terrazas de material volcánico, característico de topografía ondulada a quebrada o también plano depositacional.

Los suelos de la Provincia de Petorca se caracterizan por su origen aluvial con ligera influencia coluvial, perteneciendo a la zona de los suelos pardos no cálcicos, según la clasificación de los grandes grupos de suelo de Chile que incluyen la zona central entre Los Vilos y Talca.

En el área de lomaje y piedemont, que representa aproximadamente el 60% del área, corresponde a grumosotes que se caracterizan por presentar un horizonte (A) de 4,0 a 8,0 cm. de espesor, de pH neutro a ligeramente ácidos. En su textura dominan las arcillas de alto coeficiente de expansión y contracción a procesos de humedecimiento y desecación. El sector saturado es muy plástico y adhesivo, al perder humedad pasa de firme a duro. Estructura de bloques fuertes y finos. No existe horizonte (B). Por otra parte, en los suelos de alta pradera, moderada permeabilidad y buena aireación.

Finalmente, es necesario agregar, que el mal manejo por rotación de cultivos, ha permitido la disminución o pérdida de la fertilidad de suelos que se traduce en una baja productividad.

Capacidad de uso de los suelos

De acuerdo a sus capacidades productivas, los suelos pueden ser clasificados en ocho distintas clases, que se diferencian de acuerdo a las limitantes y restricciones que presentan al desarrollo agrícola de los diversos cultivos existentes. De este modo, es posible identificar distintas clases de capacidades de usos que permite clasificar a los suelos en las siguientes categorías

Clase I: Su uso presenta pocas limitaciones, por lo que se asocia a prácticas de manejo simples. Son suelos con alta productividad.

Clase II: presentan ligeras limitaciones que reducen la elección de los cultivos o requieren moderadas prácticas de conservación. Corresponden a suelos planos con ligeras pendientes. Son suelos profundos o moderadamente profundos, de buena permeabilidad y drenaje, presentan texturas favorables, que pueden variar a extremos más arcillosos o arenosos que la Clase anterior

Clase III: Su uso presenta moderadas limitaciones que restringen la elección de cultivos o requieren de prácticas moderadas de conservación y manejo. La productividad se vincula ciertos cultivos que se adaptan a sus limitaciones.

Clase IV: Su uso presenta severas limitaciones que restringen la elección de cultivos. Requieren de cuidadosas prácticas de conservación, más difíciles de practicar y de mantener que las de los suelos clase III. La productividad se vincula ciertos cultivos que se adaptan a sus limitaciones.

Clase V: Escaso o ningún riesgo de erosión. Su uso está limitado a empastadas, praderas naturales de secano o forestales.

Clase VI: Asociada a pendientes pronunciadas, presenta susceptibilidad a la erosión severa. Su uso está limitado a pastos y forestales.

Clase VII: Asociada a pendientes muy pronunciadas, presenta restricciones más severas que la clase VI. Su uso es fundamentalmente pastoreo y forestal

Clase VIII: Suelos sin valor agrícola, ganadero o forestal.

Las capacidades productivas los suelos de clases I, II y III, constituyen un potencial de gran desarrollo económico para un territorio, por cuanto a partir de ellos se conforman una serie de sistemas productivos.

En este sentido, el territorio de la comuna de Cabildo se caracteriza por un predominio de los suelos de clase VIII, los cuales representan un 94% de su superficie total. Asociados, principalmente a la presencia de la Cordillera de Los Andes y Valles Transversales. Constituyen la capacidad de uso de suelo que por excelencia se asocia con la presencia de vegetación nativa o arbustiva introducida

En Cabildo los sectores de suelo VII se concentran principalmente en el valle de los esteros Los Ángeles, Guayacán y ladera Sur del tramo entre La Viña y Paihuén.

Si se suman ambas proporciones de superficie, suelos de aptitud VII y VIII, se tiene que el 95,9% de la superficie total comunal presenta suelos sin o con escasa aptitud agrícola.

En dicho escenario espacial, no es de extrañar que la comuna sólo cuente con un 3,4% del total de su superficie con suelos de clase I, II y III, destacando entre ellos el predominio de clase III el cual representa un 2%. En lo referente a las clases I y II, y en consideración a su innegable valor agropecuario, la representatividad 1.5% de su superficie total

La ubicación de los suelos de mayor capacidad para uso agropecuario es a lo largo y ancho de las cuencas del río La Ligua; los sectores que mayor superficie de clase I, II y III, se encuentran ubicados en las terrazas más amplias que se ha generado por el río. En el caso de la comuna de Cabildo, los sectores con capacidad de uso I, II y III están representadas preferentemente en el sector central del valle principal, desde Cabildo hasta La Viña de manera más abundante

Tabla N° 3: Capacidad Uso de Suelo comuna Cabildo

Clase de Suelo	Cabildo	
	Hectáreas	%
I	242,75	0,2%
II	1785,67	1,3%
III	2800,09	2,0%
IV	790,1	0,6%
VI	227,93	0,2%
VII	2307,56	1,6%
VIII	134681,77	94,3%
Total I, II y III	4828,51	3,4%
Tota IV y VI	1018,03	0,7%
Total VII y VIII	136989,33	95,9%
Superficie Comunal	142835,87	100,0%

Fuente: CIREN, Estudio agrológico V Región

*No incluye clase V, porque el territorio provincial no presenta dicha categoría

* Sólo se consideran las superficies relacionadas con las clases de suelo I al VIII. Las áreas urbanas, caja de ríos y otros elementos no se incluyen.

2.1.5 Hidrología e hidrogeología

En el sector norte de la Región de Valparaíso, dominan dos redes hidrográficas, la de Petorca y La de La Ligua. Ambas conforman sistemas hídricos particulares de gran trascendencia para las actividades que se desarrollan a lo largo de su trazado desde EW. A continuación, se describe de manera general ambas cuencas hidrográficas, dirección, afluentes principales y características del valle.

Hidrología

Río La Ligua en comuna de Cabildo:

La hoya del Río La Ligua en la comuna de Cabildo se desarrolla en su mayor extensión con dirección aproximadamente NE/SW, tiene régimen mixto y su longitud es del orden de 28 Km, en el sector de la comuna de Cabildo, donde aparecen numerosos tributarios caracterizados por sus cortos recorridos.

En general, el mayor aporte de área drenada se encuentra junto a la vertiente Sur del valle. La mayor amplitud de la cuenca desarrollada en dirección Norte – Sur, se encuentra específicamente frente a San Lorenzo, donde alcanza unos 35 Km debido, a la influencia del Estero Los Ángeles.

A partir de su nacimiento, el río principal recibe el nombre de Estero de Alicahue, nombre que conserva hasta la localidad del mismo nombre a 622 m.s.n.m.

Estero Alicahue, este cauce muestra un rumbo relativamente irregular y se encajona en un valle profundo y angosto, con fuerte pendiente de escurrimiento; en este tramo los afluentes son cortos y no señalan aparentemente direcciones o alineamientos preferenciales.

Desde la cota de los 1.300 m hasta la localidad de Alicahue, el río principal toma un rumbo marcadamente NE – SW, muy rectilíneo. Aquí el valle gradualmente se ensancha en la medida de su avance a la costa y disminuye la pendiente de escurrimiento, pero conserva las características propias de un cauce montañoso y capaz de provocar aluviones con ocasión de precipitaciones anormalmente intensas; la frecuencia de dichos aluviones se manifiesta en la abundante existencia de cubierta de grava o ripios muy gruesos, muy recientes y dispuestos a todo lo ancho del valle en esta parte.

Aguas abajo del poblado de Alicahue el río escurre sobre un valle bien conformado, con ancho variable de 1 a 2 km, donde las pendientes de escurrimiento son menores que 1.8% río debajo de la curva de los 500 m.s.n.m.

Entre Alicahue y la Vega (aproximadamente 350 m.s.n.m.) el cauce principal todavía sigue un curso próximo a NE-SW, aunque menos nítido que en el tramo anterior. En éste sector el valle empieza a disminuir sensiblemente el calibre de los materiales acumulados. Los afluentes de ambas vertientes se presentan muy poco desarrollados.

Desde el poblado La Vega hasta la confluencia del Estero Los Ángeles, el Río La Ligua mantiene dirección cercana E-O y un valle bien conformado que se ensancha ligeramente en relación con los sectores situados inmediatamente aguas arriba y aguas abajo. Así, en éste sector comienza a manifestarse en los costados del valle remanentes de acumulaciones fluviales más antiguas y las cuales aparecen cortadas y reemplazadas por el relleno más reciente del río; tales remanentes, como terrazas muy modificadas por procesos de erosión, se presentan especialmente hacia la vertiente Norte y precisamente el río actual corre adosado a dicho costado, mientras hacia el Sur existen terrenos relativamente bajos, con cotas similares a la del lecho del río, que han sido inundados en épocas recientes y pueden ser ocupados por el río en cualquier crecida importante.

El Estero Los Ángeles representa uno de los afluentes mayores del Río La Ligua. Su hoya se desarrolla mayoritariamente sobre un relieve de 1.000 a 1.500 m.s.n.m. El curso inferior del mismo ha labrado un valle aproximado de 1 Km de ancho.

Finalmente, en el tramo del río La Ligua comprendido entre Estero Los Ángeles y el poblado de Cabildo (184 m.s.n.m) escurre sobre un valle que forma un gran arco de convexidad hacia el Norte, en esta zona el curso principal fluye adosado al costado Sur del Valle, ya que debe haber conservado esta posición por efecto del cono de la quebrada Las Chacarillas emplazado al Norte.

Hidrogeología

En la caja del río se encuentran sedimentos de gran permeabilidad, a través de los cuales escurre el agua subterráneamente, a menor velocidad que en la superficie.

Los rellenos acuíferos existentes, constituyen un mecanismo natural de regulación interanual, ya que estos sedimentos actúan como una esponja, amortiguando los caudales durante los años secos y normales.

Se observa que durante años extremadamente lluviosos la capacidad de éstos reservorios de atenuar la escorrentía superficial se ve superada vertiendo ambas subcuencas caudales significativos al mar (Gamboa, 2001).

DGA, IPLA y AC (1998) señalan que el valle de La Ligua presenta un acuífero libre se extiende a lo largo de todo el valle, con un espesor variable de 10 m a 30 m.; está compuesto por material granular (gravas y arena) y presenta una estructura y ubicación tal que permite una gran interacción de aguas subterráneas con aguas superficiales.

En 1996 la DGA, basándose en estudios del CNR et al (1982) determinó que la carga media del acuífero del valle de Petorca es de 570 l/seg., mientras que en el valle de La Ligua, la recarga es cerca del doble (1.106 l/seg)

2.2 Áreas de riesgo por remoción en masa

Medio afección por procesos naturales

En el marco del desarrollo del estudio del PRC, ha sido necesario elaborar un estudio que permita determinar los niveles de riesgos por fenómenos naturales que es posible definir a escala urbana. La escala de análisis corresponde a 1:5.000.

A continuación, se efectúa el análisis respecto de los componentes físicos del riesgo y su evaluación en función de los objetivos del estudio. Dentro de los procesos que han sido considerados como potenciales generadores de situaciones de riesgo sobre el espacio antropizado (vinculados con el objetivo de este estudio), se han desarrollado los siguientes:

2.2.1 Metodología General del Estudio

El método utilizado para la definición de riesgos corresponde a la superposición de cartas temáticas digitales utilizando como herramienta un sistema de información geográfico, obteniendo de esta forma una carta integradora de distintas variables que condicionan la ocurrencia de fenómenos naturales que se traducen en riesgo para la población.

Los pasos metodológicos aplicados se describen a continuación.

Definición de variables que determinan el riesgo

Las variables que determinan los distintos tipos de riesgos (Remoción en Masa)

corresponden a distintos factores que por una parte son componente importante del riesgo y que a su vez se encuentran disponibles a la escala de análisis necesaria para los objetivos del estudio.

Elaboración de Cartas temáticas para cada variable que determina el riesgo, determinando sub-unidades espaciales.

Para cada una de las variables o factores que determinan los distintos tipos de riesgos se elabora una carta temática que busca identificar las condiciones específicas de cada variable que permiten desencadenar distintos niveles de riesgo. Estas condiciones específicas de cada variable son espacializadas y representan sub unidades al interior de cada carta temática.

Determinación de valores relativo para cada sub-unidad espacial

Cada una de las sub-unidades descritas anteriormente, reciben un valor relativo a la potencialidad de generar riesgo. El valor numérico asociado a cada valor relativo ha sido extraído de diversas fuentes, principalmente Ferrando (1998) y Brignardello (1997).

Determinación del Peso absoluto que tiene cada variable en la ocurrencia del riesgo.

Del mismo modo que los valores relativos establecido para cada sub- unidad al interior de las cartas temáticas, Ferrando (Op. Cit.) define pesos absolutos de los distintos factores que determinan el tipo de riesgo. Sin embargo, al no utilizarse los mismos modelos de riesgo, sino que adaptaciones relacionadas a la disponibilidad de información, se modificaron dichos ponderadores mediante herramientas de evaluación multicriterio con consulta a expertos.

Asociación del peso absoluto y los valores relativos que posee cada variable y sub-unidades al interior de cada carta temática.

Como resultado de proceso anterior, se obtendrá una serie de cartas temáticas con sub unidades o polígonos. Cada sub-unidad tendrá asociado un valor relativo y cada carta temática tiene asociado un peso absoluto vinculado a la importancia que tiene dicho componente en la generación del tipo de riesgo. El siguiente paso del modelo es realizar una factorización de cada sub-unidad con el peso absoluto de la carta temática a la cual corresponde, es decir, se realiza a través del SIG, la multiplicación del peso absoluto definido para la carta temática por los valores relativos asociados a cada polígono.

Superposición de las distintas cartas temáticas

Finalmente, las cartas temáticas asociadas a cada tipo de riesgo serán superpuestas a través del SIG, el objetivo es realizar una suma de los valores que tendrá cada sub unidad de las distintas cartas temáticas, generando nuevas subunidades en una carta final resultante. Los valores que resulten de la suma de las distintas sub unidades serán agrupados en cuartiles que definirán (desde los rangos mayores a los menores) los distintos niveles de riesgo para la región.

A continuación, se presentan los resultados y metodología específica de cada tipo de

riesgo asociado a este estudio.

Área de riesgo por ser propensa a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas

El riesgo de remoción en masa considera los deslizamientos y flujos de detritos, rocas y barro. Las áreas asociadas a este tipo de riesgo se definen en función de antecedentes históricos y recientes de ocurrencia, de valores de pendiente en relación a umbrales potenciales de desencadenamiento de procesos, del grado de erosión geológico-geomorfológica detectado y en parte evidenciado por hechos tectónicos y acumulación de sedimentos, y de la variable vegetación como factor de protección del suelo. A continuación, se presenta una clasificación y caracterización de los tipos de remoción en masa:

Tabla N° 4: Clasificación y caracterización de las remociones en masa

Remociones Gravitacionales	Características	Energía Potencial Relativa	Remociones Aluvionales	Características	Energía Cinética
Derrumbes	En rocas desclasadas sobre cornizas y laderas de fuerte pendiente (acantilados) las masas rocosas en paquetes se desprenden y caen al vacío en un movimiento rápido de desplome	Muy Alta	Flujos de barro	Grandes volúmenes de agua se encauzan por un talweg a gran velocidad, en dirección a la pendiente, acarreado gran cantidad de sedimentos finos o moderadamente gruesos	Muy Alta
Deslizamientos	Las rocas en paquetes se desprenden y resbalan en celeridad sobre una superficie lisa de gran pendiente	Alta	Flujo de Detritos	Grandes volúmenes de agua de desplazan en sentido de la pendiente a gran velocidad, trasportando sedimentos moderadamente gruesos y otros clastos	Alta
Corrimientos	Las masas rocosas de diferente granulometría se desprenden y resbalan sobre la ladera de fuerte pendiente, rotando al mismo tiempo respecto del eje de la horizontal	Moderada	Flujo de escombros	Grandes volúmenes de masas embebidas en agua se desplazan en dirección de la pendiente con celeridad, trasportando materiales de gruesa granulometría, incluyendo bloques y materiales orgánicos	Moderada
Desmoronamientos	Las rocas fuertemente meteorizadas en una cornisa se van desprendiendo según su masa y competencia	Baja	Soliflucción	En pendientes moderadas se desplaza el regolito en forma lenta en dirección de la pendiente al embeberse de agua.	Baja

Fuente: Brignardero en base a Hauser 1993, Jaque 1995, Sheko 1998, Stralher y Stralher 1989

La información relevante para la modelación del riesgo de remoción en masa o riesgo morfodinámico que ha sido analizada, espacializada e integrada a través de un SIG (ArcGIS – Spatial Analyst), corresponde a las siguientes variables:

- Pendientes en grados
- Exposición de laderas
- Cubierta vegetal
- Caracterización geológica

De esta manera, el modelo de remoción en masa queda esbozado de la siguiente ecuación:

$$RM = ((PEND * 0,4) + (EXP * 0,1) + (VEG * 0,3) + (GEO * 0,2))$$

Considerando que los valores mínimos y máximos que pueden resultar de la aplicación de esta relación corresponden a 0.2 y 3.8 respectivamente se establecen los siguientes límites a los rangos resultantes de una distribución lineal del universo valórico. Paralelamente, se les asigna un nuevo Peso Relativo atendiendo a su posterior superposición con los resultados de la evaluación de los niveles de riesgo por remoción en masa.

Tabla N° 5: Valores absolutos según rango

Rango	Va	Nivel De Riesgo
0.7 a 1.5	1	Riesgo Bajo
1.5 a 2.3	2	Medio
2.3 a 4.0	3	Alto

Fuente: Elaboración Propia

En las siguientes tablas se resumen las variables y sus respectivos niveles de riesgos y ponderación de acuerdo con el modelo de remoción en masa.

Pendientes

De acuerdo con bibliografía específica en modelaciones de riesgos naturales, se consideraron las valoraciones de Fragilidad de Laderas para Chile central, esta valoración de pendientes está asociada a los procesos de remoción en masa expresados en la siguiente tabla

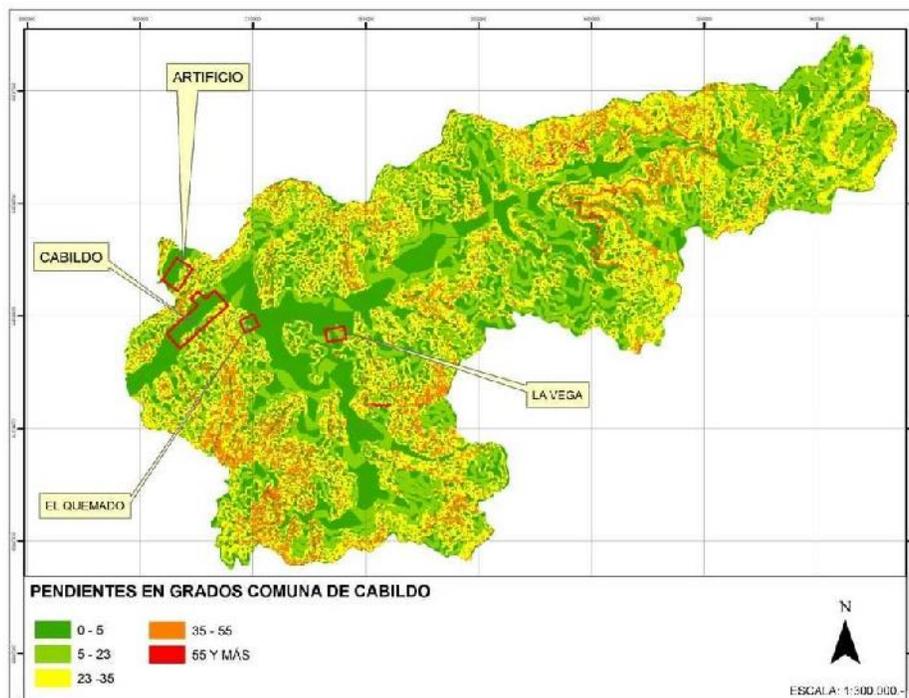
Tabla N° 6: valoración de pendientes

Pendientes	Erosión	Desmoronamientos	Corrimientos	Deslizamientos	Derrumbes	Valor
0 - 5	Libre	Libre	Libre	Libre	Libre	0
5 - 23	Moderado a Leve	Libre	Libre	Libre	Libre	1
23 - 35	Moderado a Fuerte ^a	Moderado a Fuerte	Moderado	Leve a Moderado ^a	Leve	2
35 - 55	Fuerte	Fuerte	Moderado a Fuerte ^a	Moderado a Fuerte ^a	Moderado a Fuerte	3
> - 55	Fuerte a Moderado ^a	Fuerte a Moderado	Fuerte	Fuerte	Fuerte	4

Fuente: Luigi Andre Brignardello en base a Araya y Borgel (1976), Andrade y Castro (1981), Hauser (1993) y Jaque (1995)

Los resultados de la carta de pendientes, para el territorio comunal arroja el siguiente resultado

Figura N° 6: Pendientes en grados comuna de Cabildo



Fuente: Elaboración propia

Figura Nº 6a: Pendientes en grados Cabildo y San José



Figura Nº 6b: Pendientes en grados Artificio

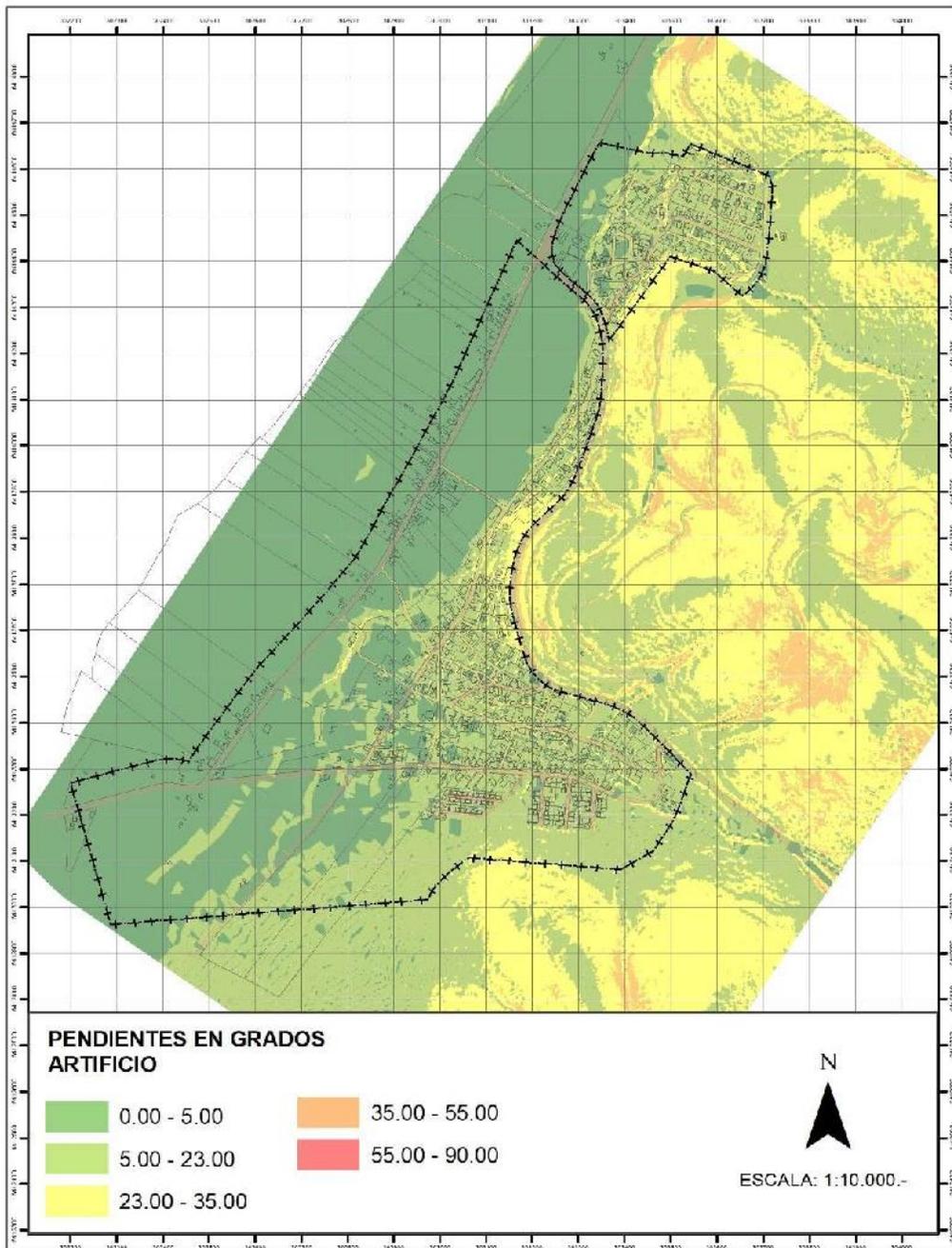


Figura Nº 6c: Pendientes en grados La Vega

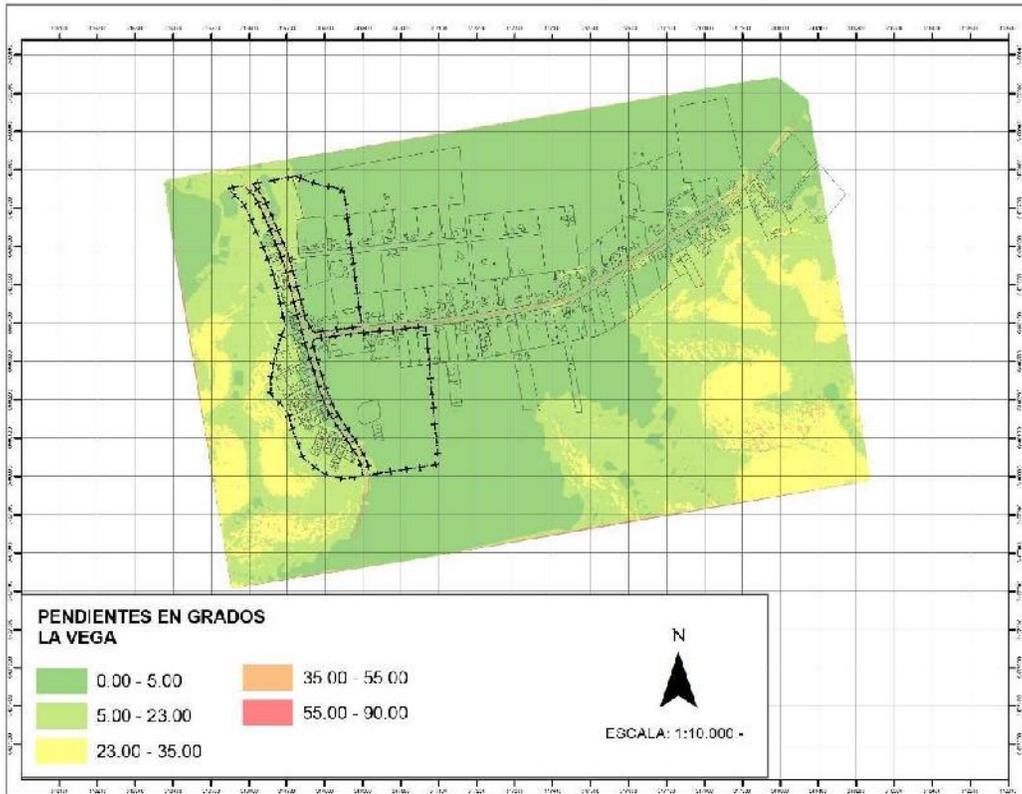
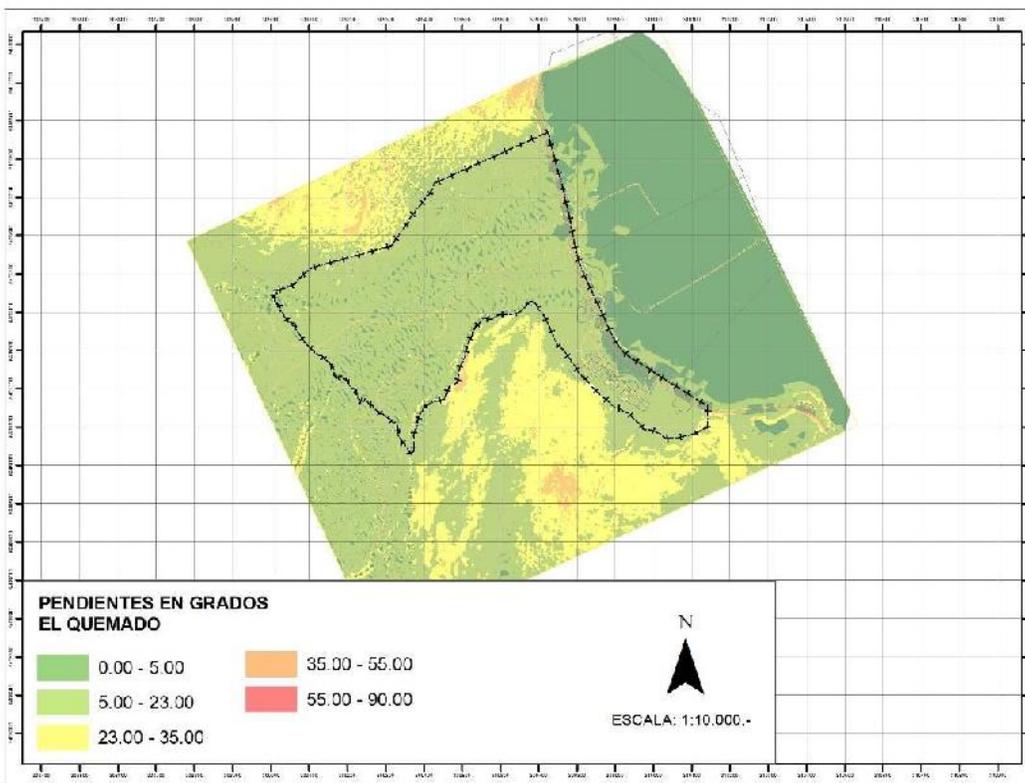


Figura Nº 6d: Pendientes en grados El Quemado



Exposición de laderas

La exposición de laderas se relaciona principalmente con los efectos de la explosión del sol respecto la pendiente de la ladera, así es posible diferenciar solana y humbría, que el contexto del área de estudio puede significar mayor o menor cubierta vegetal, influyendo esta última directamente en los procesos erosivos, así también la presencia de humedad que interviene en los procesos de meteorización de formaciones rocosas. En general las laderas de exposición Norte se asocian a laderas de solana, con una mayor radiación solar, disminución de la humedad y formaciones vegetales de tipo matorrales abiertos y cactáceos, estas condiciones sumadas a una pendiente pronunciada hacen a estas laderas más vulnerables a los procesos de remoción en masa.

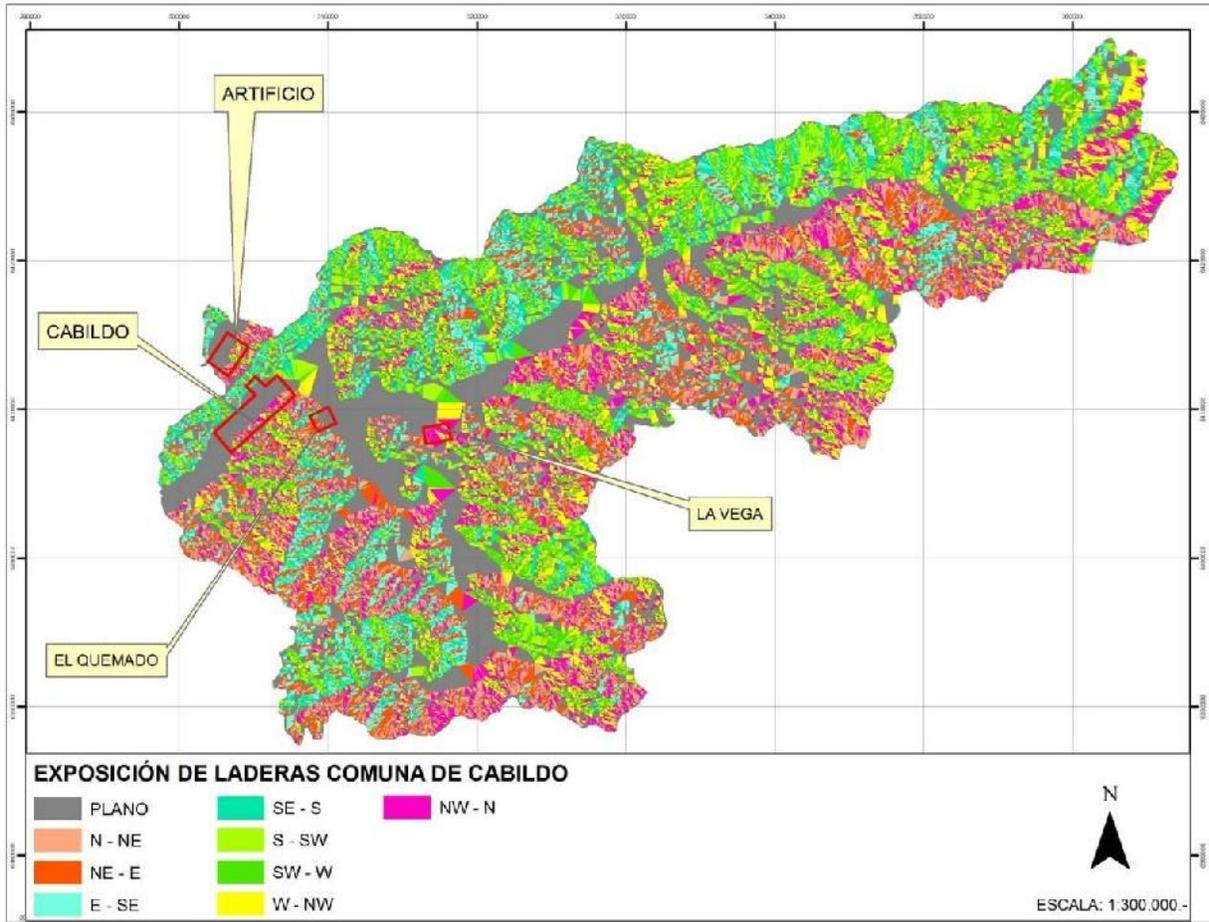
Tabla N° 7: valoración de exposición de laderas

Exposición	Erosión	Desmoronamientos	Corrimientos	Deslizamientos	Derrumbes	Valor
N - NE	Moderada a Fuerte	Moderada a Fuerte	Moderada a fuerte	Moderado a fuerte	Moderado a fuerte	4
NE - E	Leve a Moderada	Moderada	Moderado	Moderado	Moderado a leve	3
E - SE	Leve	Leve a Moderada	Leve a moderado	Moderado	Leve	2
SE - S	Leve	Leve	Leve	Moderado a leve	Leve	1
S - SW	Leve	Leve	Leve a moderado	Leve a Moderado	Leve a moderado	2
SW - W	Leve a Moderada	Leve a Moderada	Moderado	Moderado a fuerte	Moderado	3
W - NW	Moderada a Fuerte	Moderada	Moderado a Fuerte	Fuerte	Moderado a fuerte	4
NW - N	Fuerte	Moderado a Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte	4

Fuente: Luigi Andre Brignardello en base a Araya y Borgel (1976), Andrade y Castro (1981), Hauser (1993) y Jaque (1995)

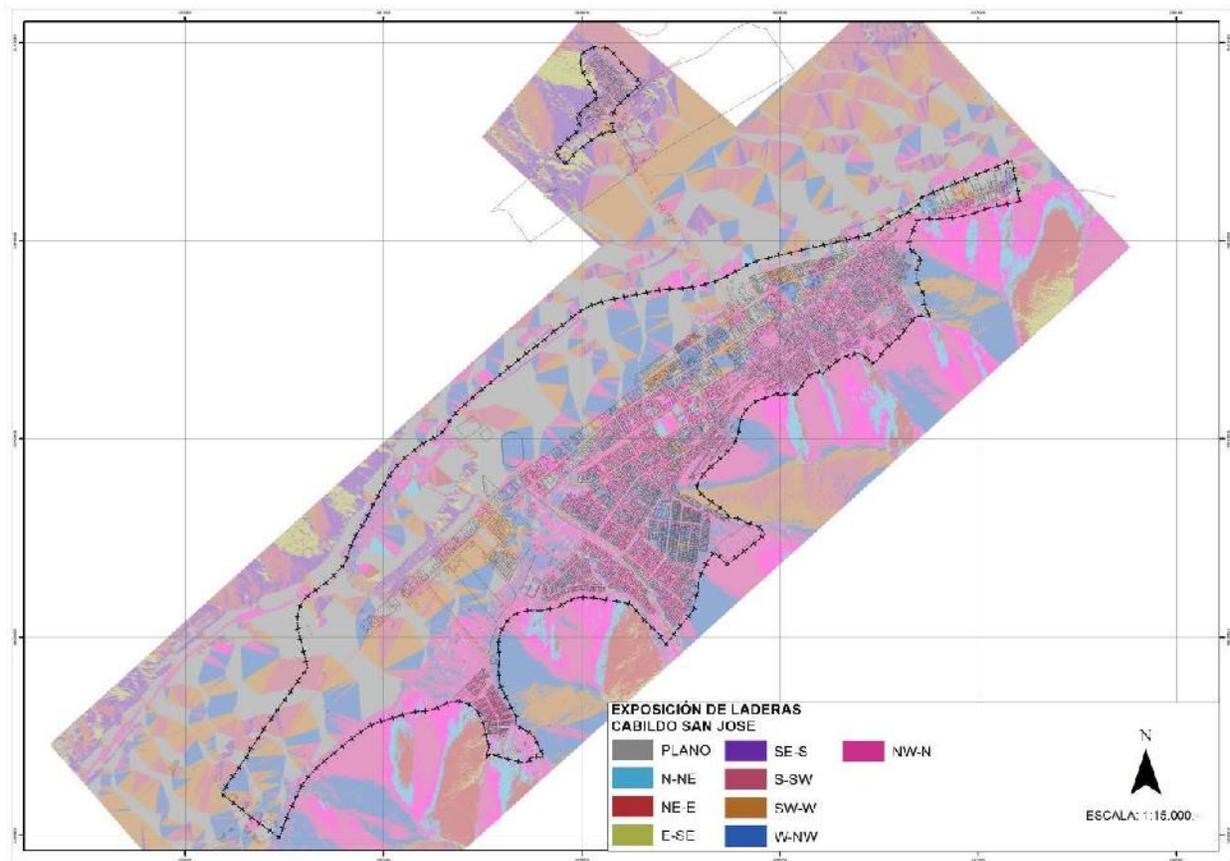
Los resultados de la carta de exposición de laderas, para el territorio intercomunal arrojan el siguiente resultado.

Figura N° 7: Exposición de laderas comuna de Cabildo



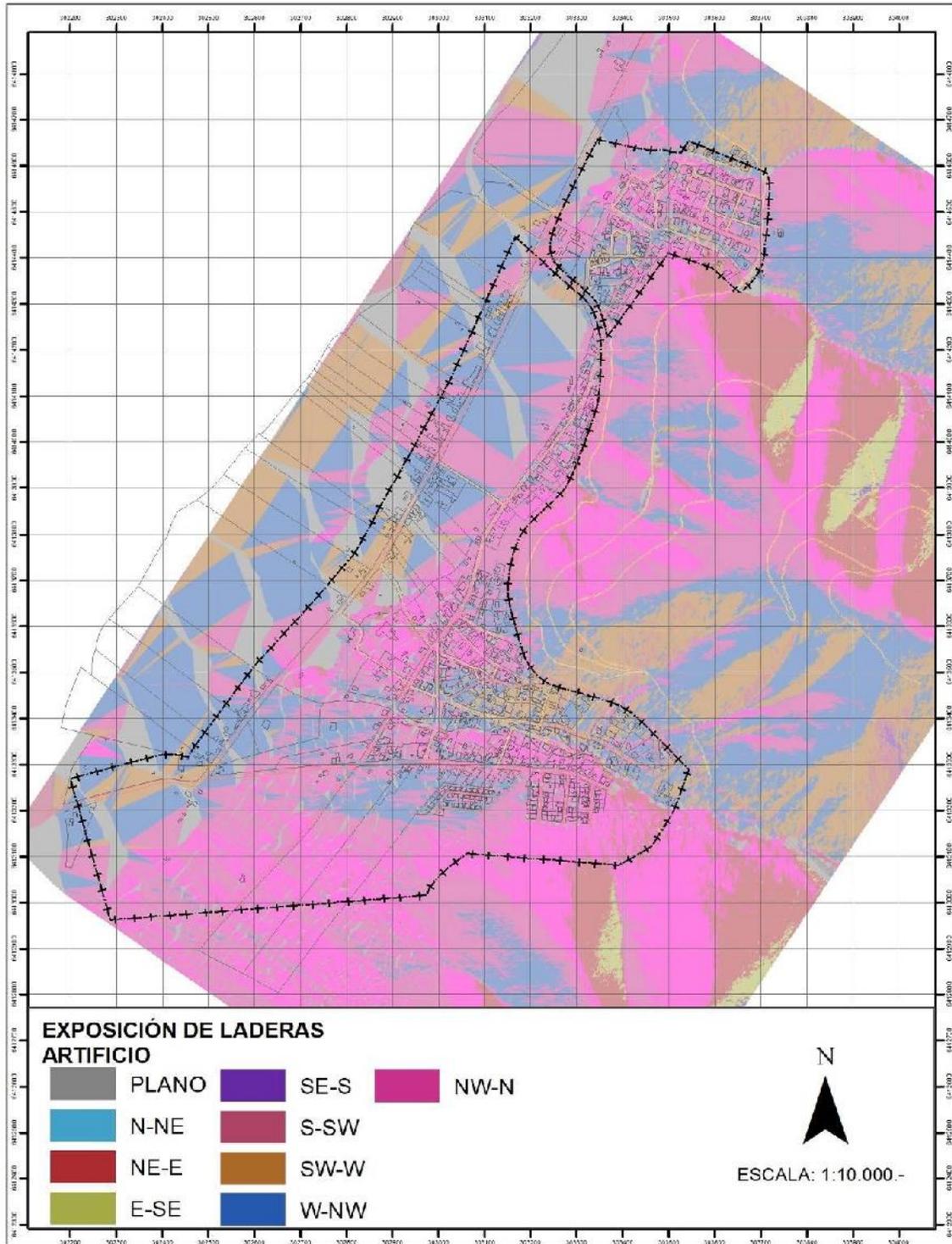
Fuente: Elaboración propia

Figura Nº 7a: Exposición de laderas Cabildo y San José



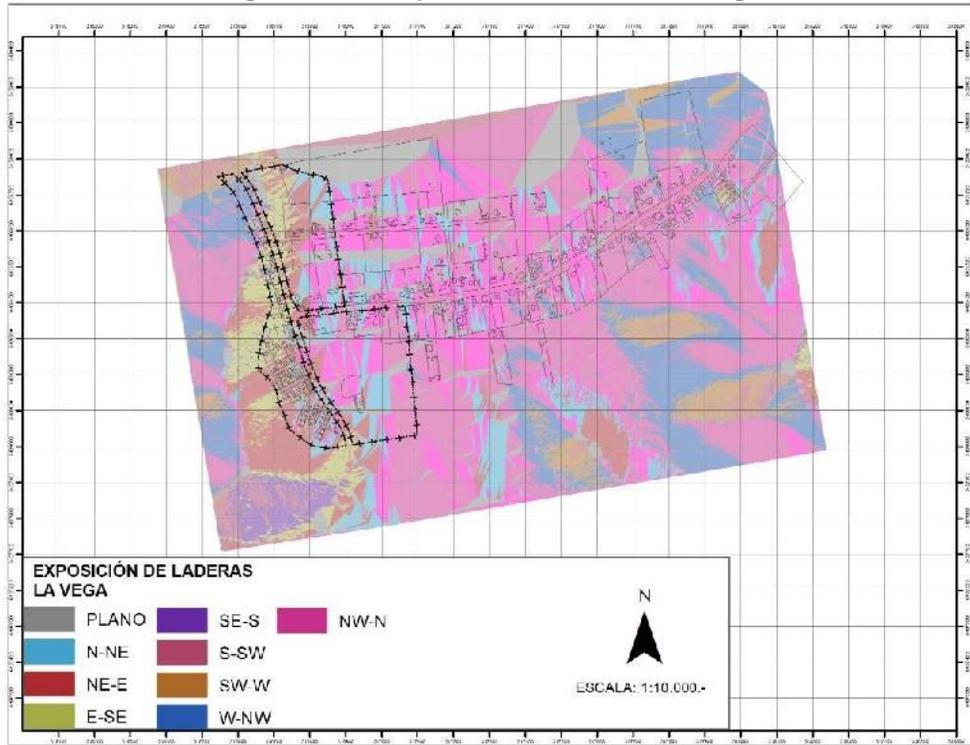
Fuente: Elaboración propia

Figura Nº 7b: Exposición de laderas Artificio



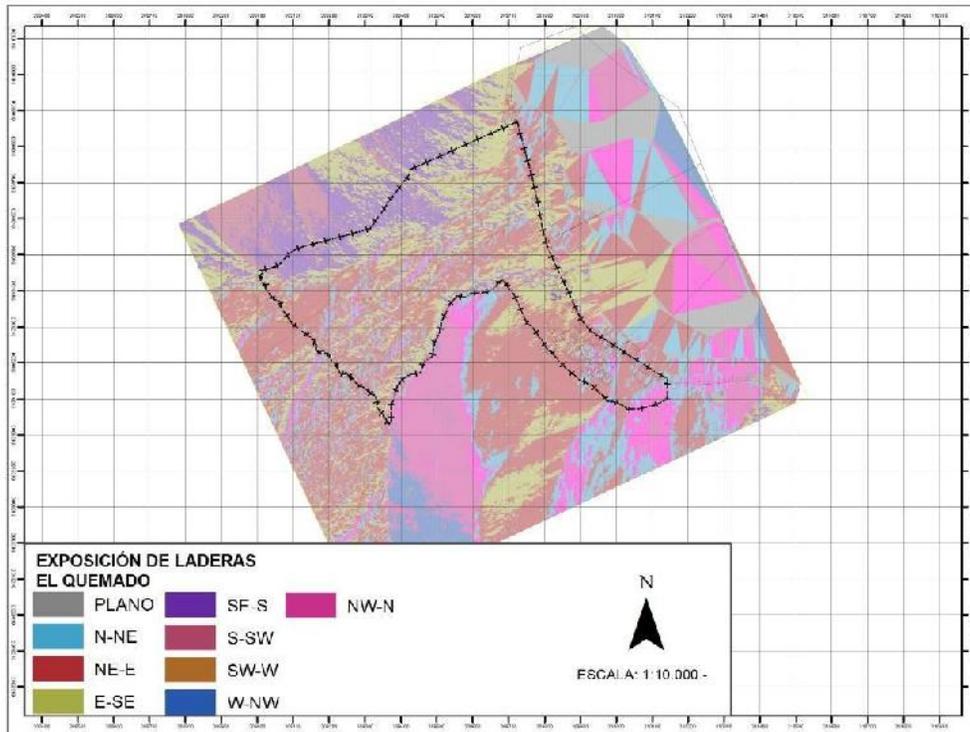
Fuente: Elaboración propia

Figura Nº 7c: Exposición de laderas La Vega



Fuente: Elaboración propia

Figura Nº 7d: Exposición de laderas El Quemado



Fuente: Elaboración propia

Vegetación

La vegetación del área comunal está compuesta principalmente por bosques aproximadamente 46% de la superficie comunal, seguida de las formaciones de praderas con un 34% y áreas desprovistas de vegetación 12% y terrenos agrícolas con un 7%. Las formaciones vegetales son de gran importancia para evitar la erosión hídrica por precipitaciones (impacto de la gota de agua lluvia sobre superficie de terreno) y en la contención de laderas disminuyendo la erosión laminar, lineal y formación de cárcavas, con el consiguiente arrastre de material no consolidado y depositación de éste en los cursos de agua principales.

Los tipos de formaciones vegetales infieren en área de cobertura y desarrollo de sus raíces, así las formaciones boscosas presentan mayor superficie de cubrimiento y mayor desarrollo reticular previniendo así, de mejor manera los procesos erosivos. Los matorrales por su parte presentan una menor superficie de cubrimiento y desarrollo reticular que los bosques, pero de igual forma son de mucha importancia en la contención de laderas.

Respecto de los terrenos agrícolas, su nivel de mitigación de los factores ambientales respecto de los procesos erosivos es de nivel moderado a alto, esto está relacionado con la pendiente de los terrenos, los tipos de cultivos (anuales o permanentes) y las labores de labranza. Los renovales, por tratarse de un repoblamiento por siniestro (incendio) o por corta de vegetación presenta un nivel de cubrimiento menor que los bosques por ende su potencial resguardo a la erosión es menor.

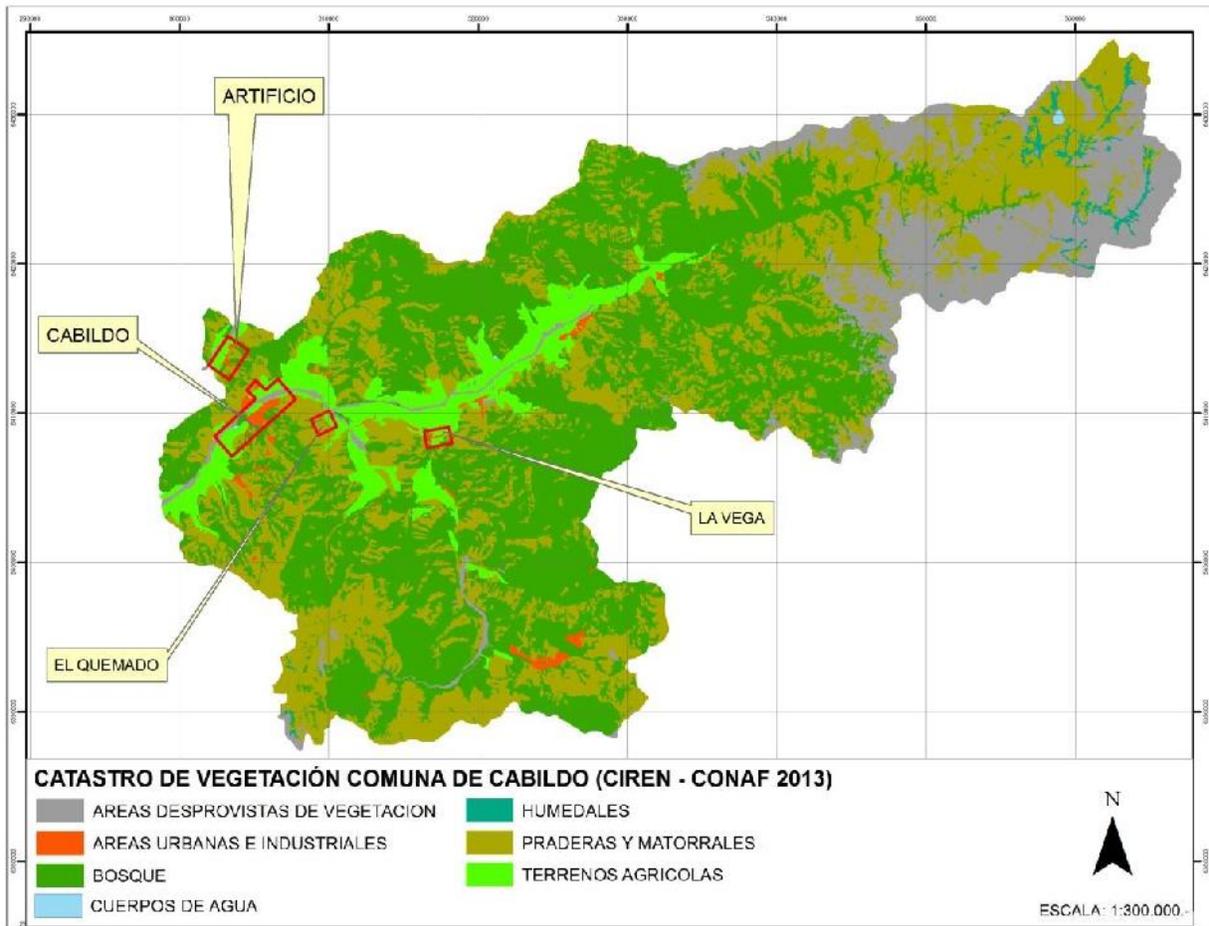
La siguiente tabla muestra una agrupación de los tipos vegetales en la Intercomuna en relación al cubrimiento de superficie y desarrollo de sus raíces como agentes de control de los factores climáticos en los procesos erosivos.

Tabla N° 8: Valoración de vegetación

Uso	Superficie	%	Valor
Bosque (Nativo y Exótico)	66,202.63	46%	1
Praderas y Matorrales	50,124.11	34%	2
Áreas Desprovistas De Vegetación	17,032.21	12%	4
Terrenos Agrícolas	9,765.39	7%	2
Humedales	1,210.35	1%	1

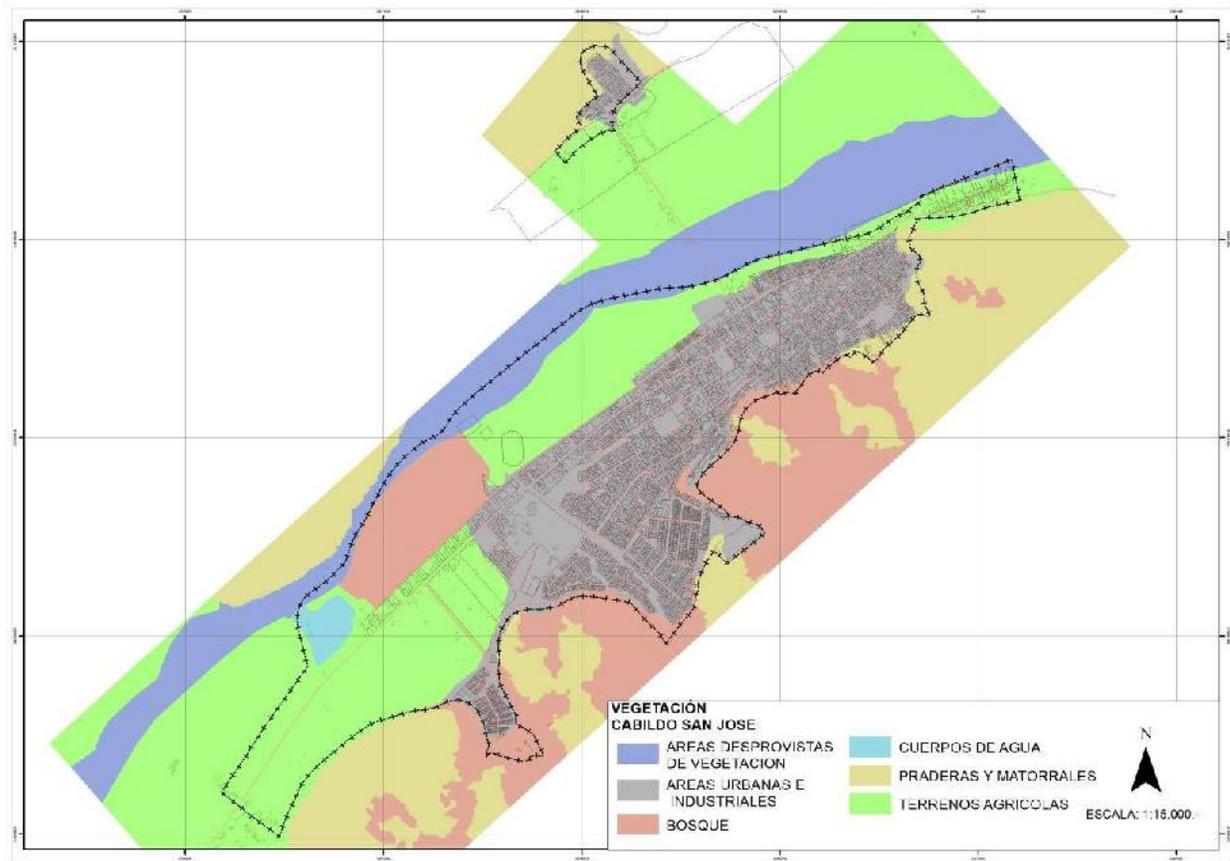
Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 8: Cubierta de vegetación



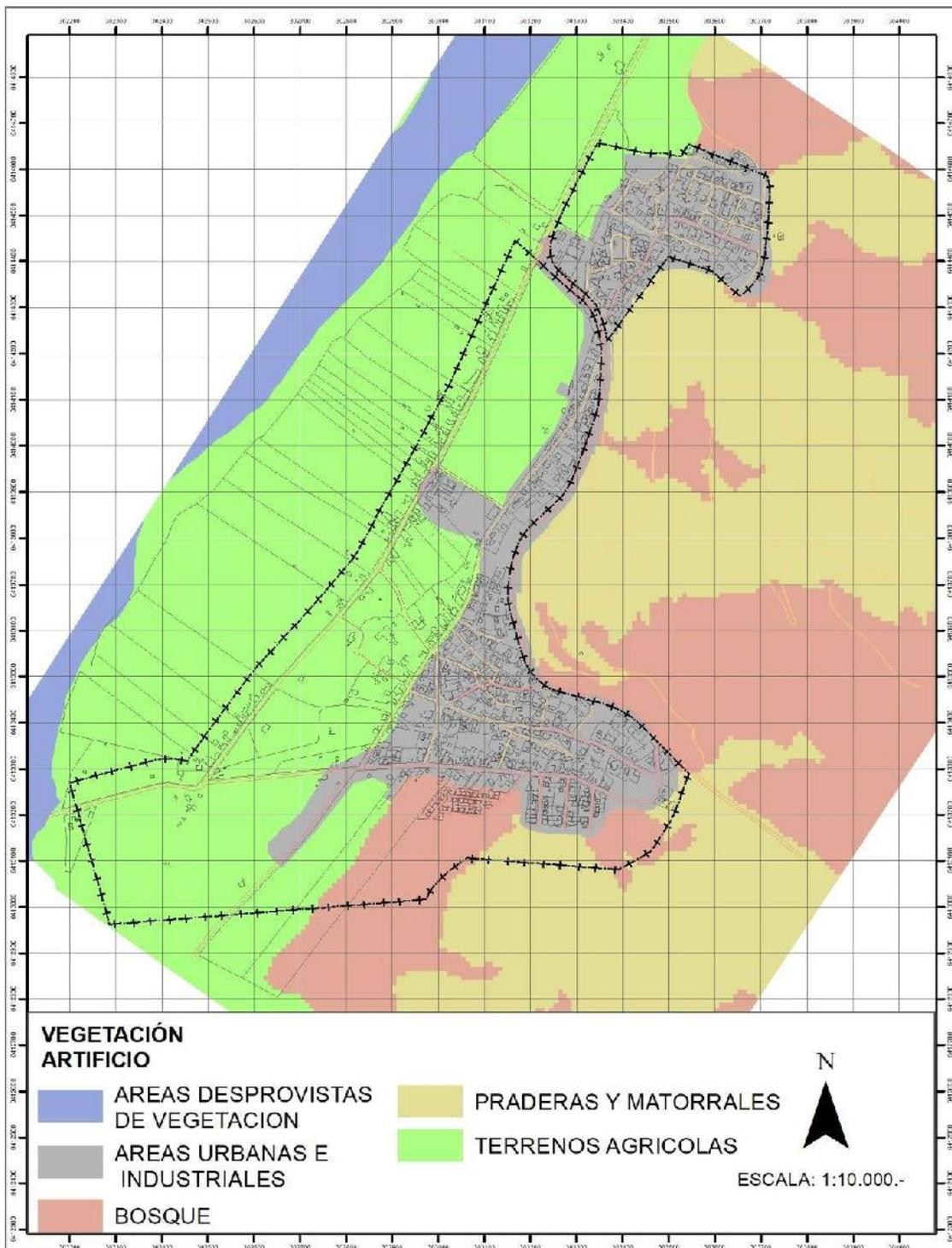
Fuente: Elaboración propia

Figura Nº 8a: Cubierta vegetal Cabildo y San José



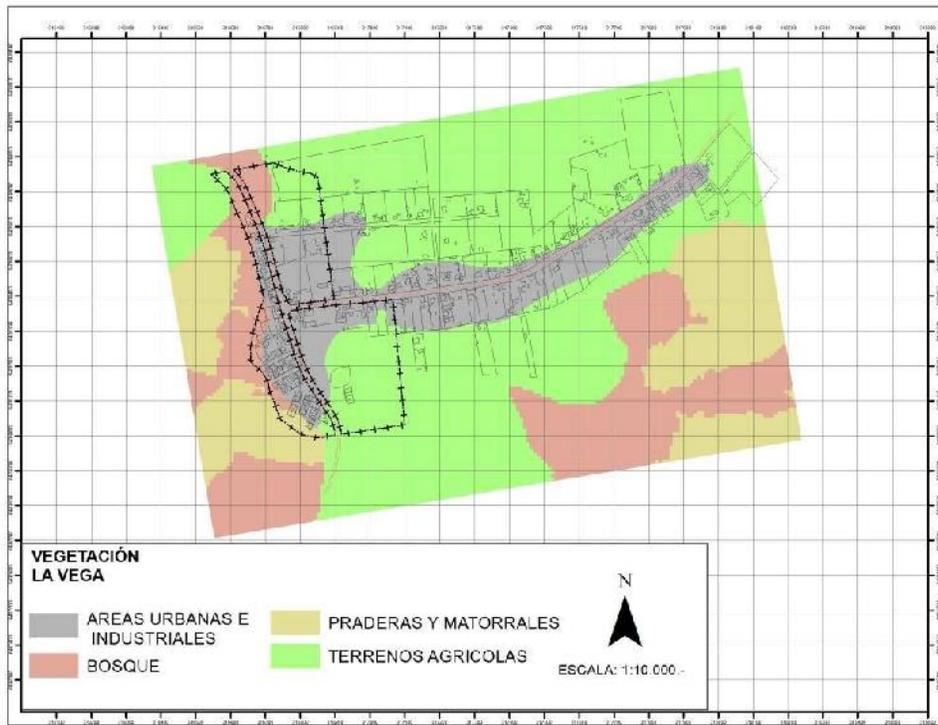
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 8b: Cubierta vegetal Artificio



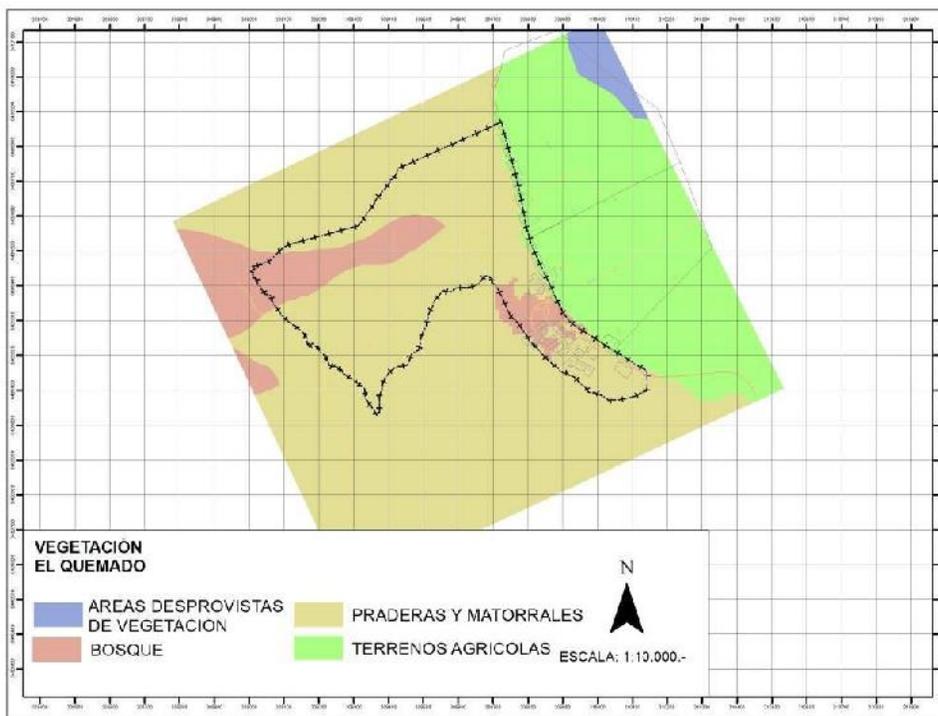
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 8c: Cubierta vegetal La Vega



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 8d: Cubierta vegetal El Quemado



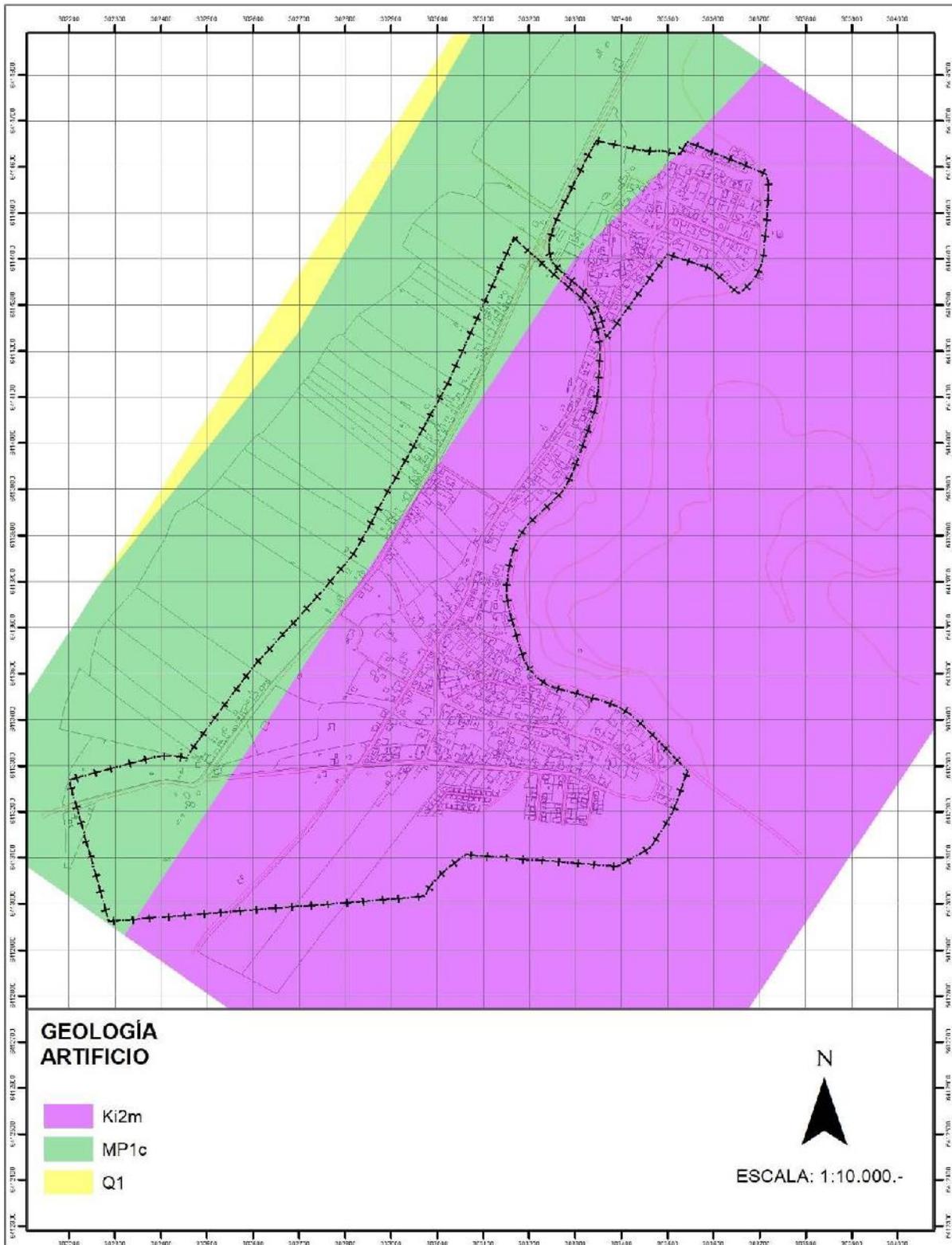
Fuente: Elaboración propia

Figura Nº 8a: Geología Cabildo San José



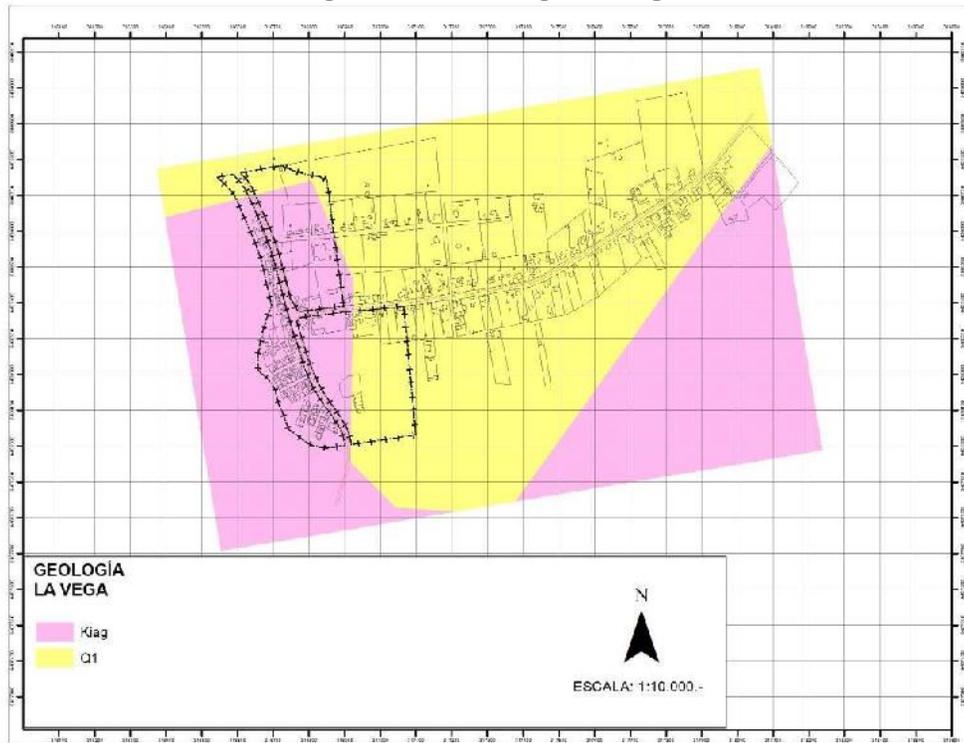
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 8a: Geología Artificial



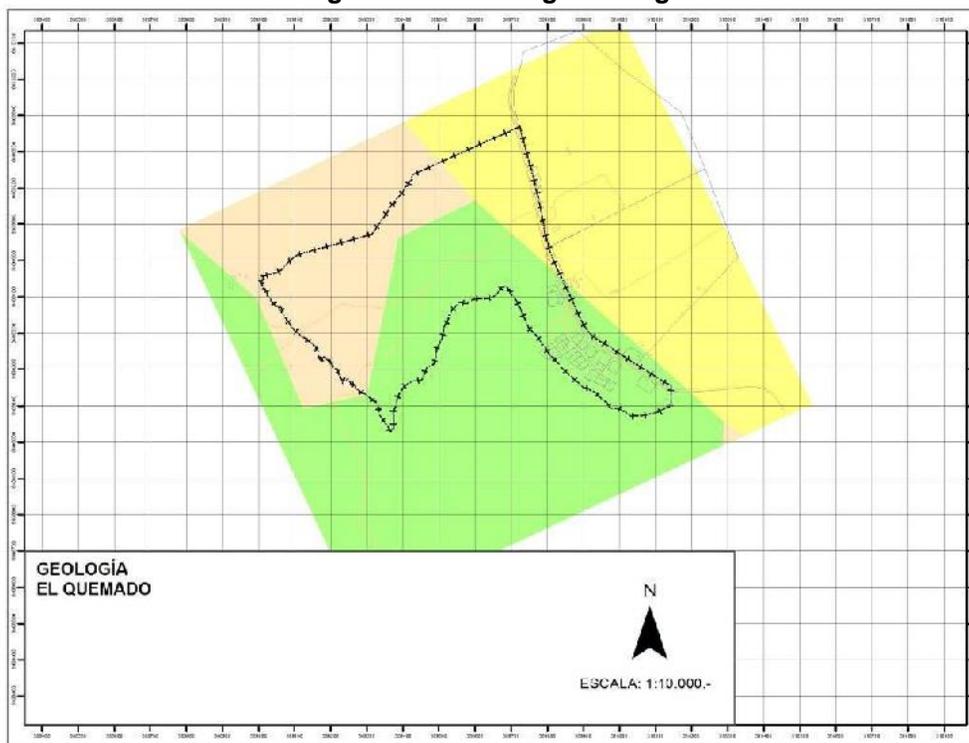
Fuente: Elaboración propia

Figura Nº 8c: Geología La Vega



Fuente: Elaboración propia

Figura Nº 8c: Geología La Vega



Fuente: Elaboración propia

En las siguientes tablas se resumen las variables y sus respectivos niveles de riesgos y ponderación de acuerdo con el modelo de remoción en masa.

Tabla N° 10: Valoración y ponderación de variable de pendientes

(PEND) PENDIENTES	NIVEL DE RIESGO	VALOR	PONDERADOR
0 - 8	NULO	0	0,4
8-23	BAJO	1	0,4
23 - 35	MODERADO	2	0,4
35 - 55	ALTO	3	0,4
> - 55	MUY ALTO	4	0,4

Fuente: Modificado de "Proposición metodológica para la evaluación y zonificación integrada de riesgos naturales mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfico" Luigi Brignardello, PUC 1997.

Tabla N° 11: Valoración y ponderación de variable de exposición de laderas

(EXP) EXPOSICIÓN	NIVEL DE RIESGO	VALOR	PONDERADOR
N - NE	MUY ALTO	4	0,1
NE - E	ALTO	3	0,1
E - SE	MODERADO	2	0,1
SE - S	BAJO	1	0,1
S - SW	MODERADO	2	0,1
SW - W	ALTO	3	0,1
W - NW	MUY ALTO	4	0,1
NW - N	MUY ALTO	4	0,1

Fuente: Modificado de "Proposición metodológica para la evaluación y zonificación integrada de riesgos naturales mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfico" Luigi Brignardello, PUC 1997.

Tabla N° 12: Valoración y ponderación de formaciones vegetales

(VEG) VEGETACION	NIVEL DE RIESGO	VALOR	PONDERADOR
AFLORAMIENTO ROCOSO	MUY ALTO	4	0,3
BOSQUES (NATIVO Y EXOTICO)	BAJO	1	0,3
MATORRAL	MODERADO	2	0,3
PRADERA	ALTO	3	0,3
RENOVAL	ALTO	3	0,3
TERRENO DE CULTIVO	ALTO	2	0,3
VEGA	MODERADO	2	0,3

Fuente: Modificado de "Proposición metodológica para la evaluación y zonificación integrada de riesgos naturales mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfico" Luigi Brignardello, PUC 1997.

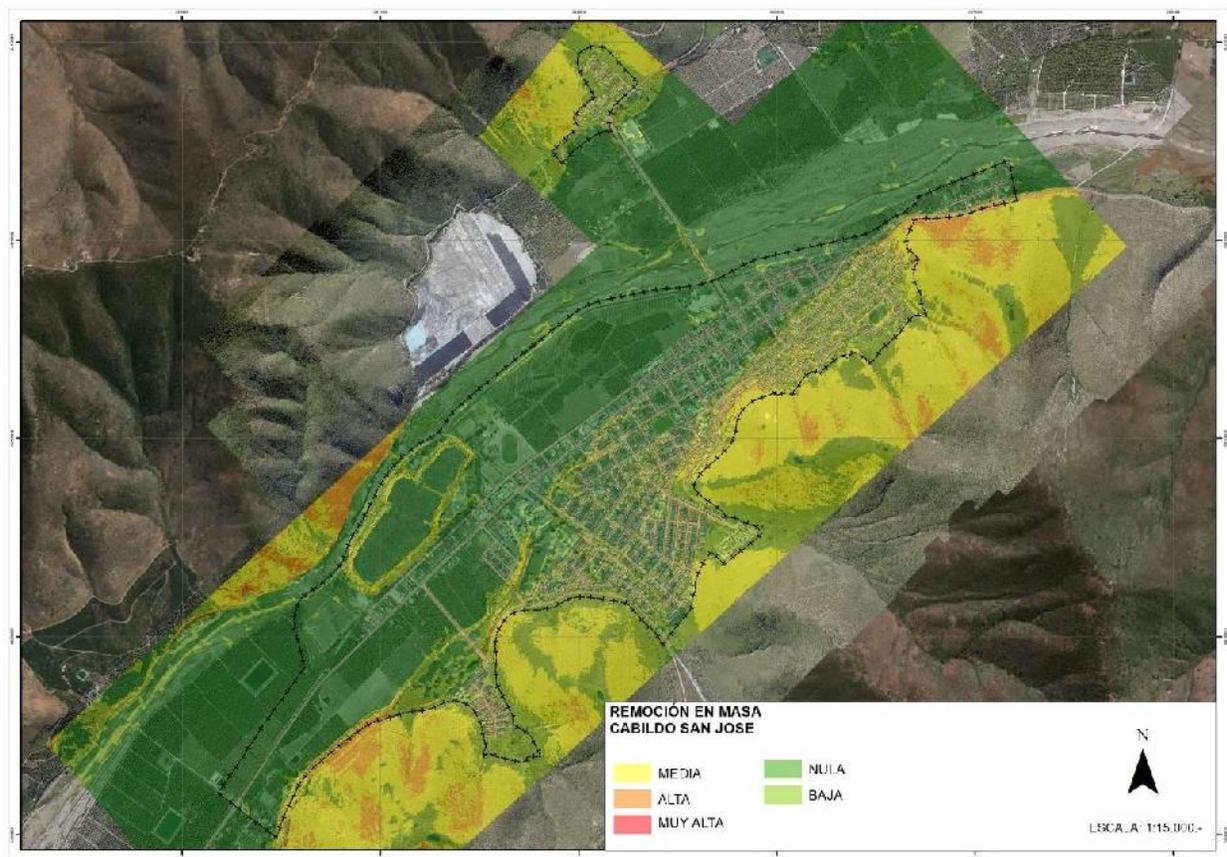
Tabla N° 13: Valoración y ponderación formaciones geológicas

(GEO) GEOLOGIA	NIVEL DE RIESGO	VALOR	PONDERADOR
DEP. NO CONSOLID., RELLENO	MUY ALTO	4	0,2
ROCAS METAMORFICAS Y SEDIM.	MODERADO	3	0,2
ROCAS PLUTONICAS E HIPABISALES	BAJO	2	0,2
ROCAS SEDIM.Y MIX. SEDITO-VOL.	MODERADO	3	0,2

Fuente: Modificado de "Proposición metodológica para la evaluación y zonificación integrada de riesgos naturales mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfico" Luigi Brignardello, PUC 1997.

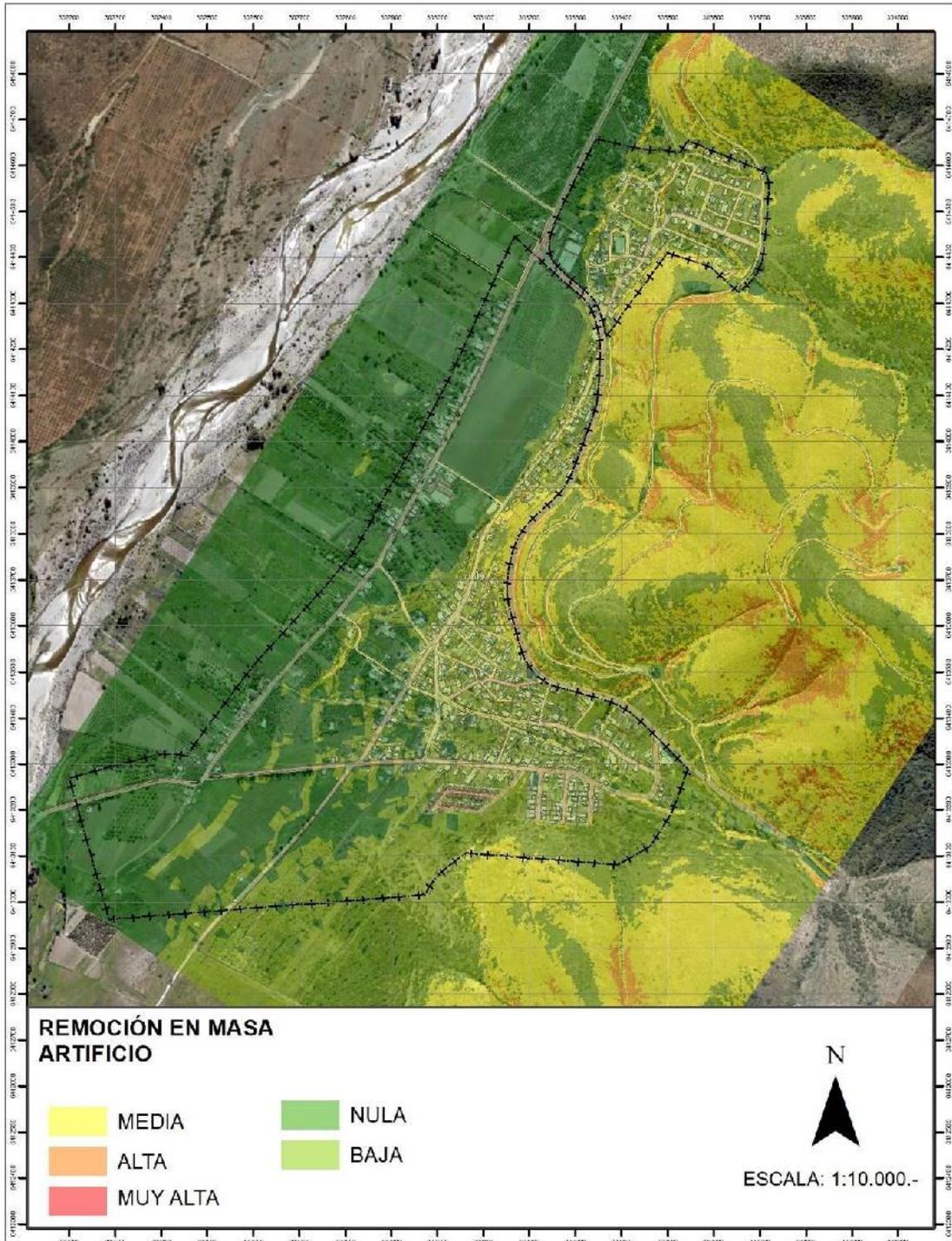
La siguiente figura, modelación de remoción en masa a escala local, corresponde al resultado de la modelación de las variables, valoraciones y ponderaciones precedentes. En esta modelación, dada su escala (1:5.000) no se clasifica los tipos de remoción en masa

Figura N° 10: Modelación remoción en masa Cabildo y San José



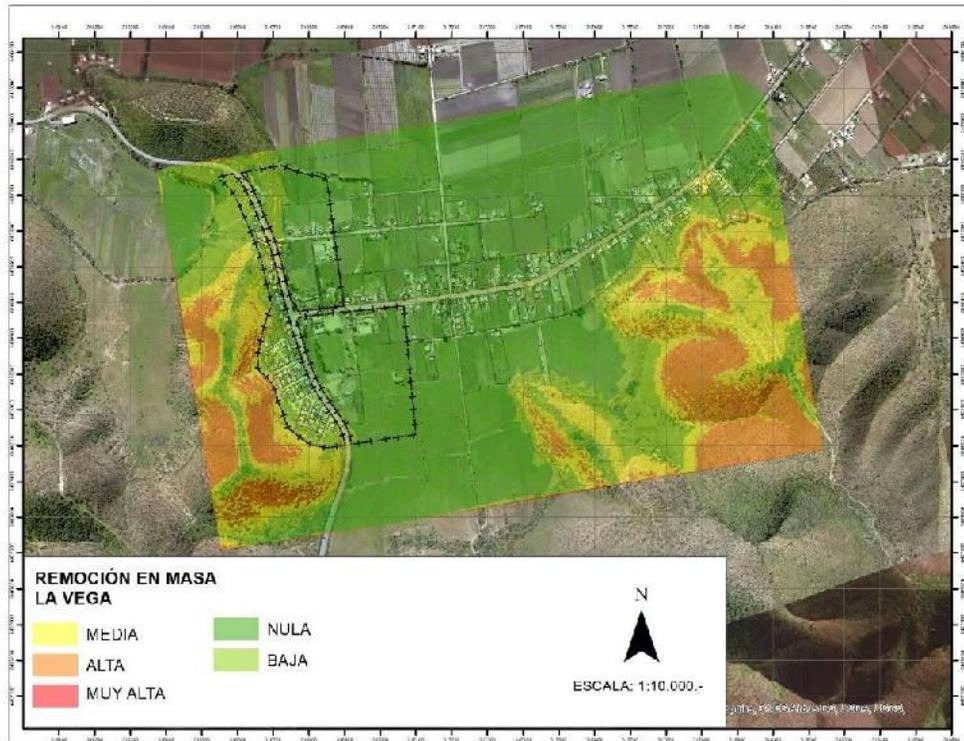
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 11: Modelación remoción en masa Sector de Artificio



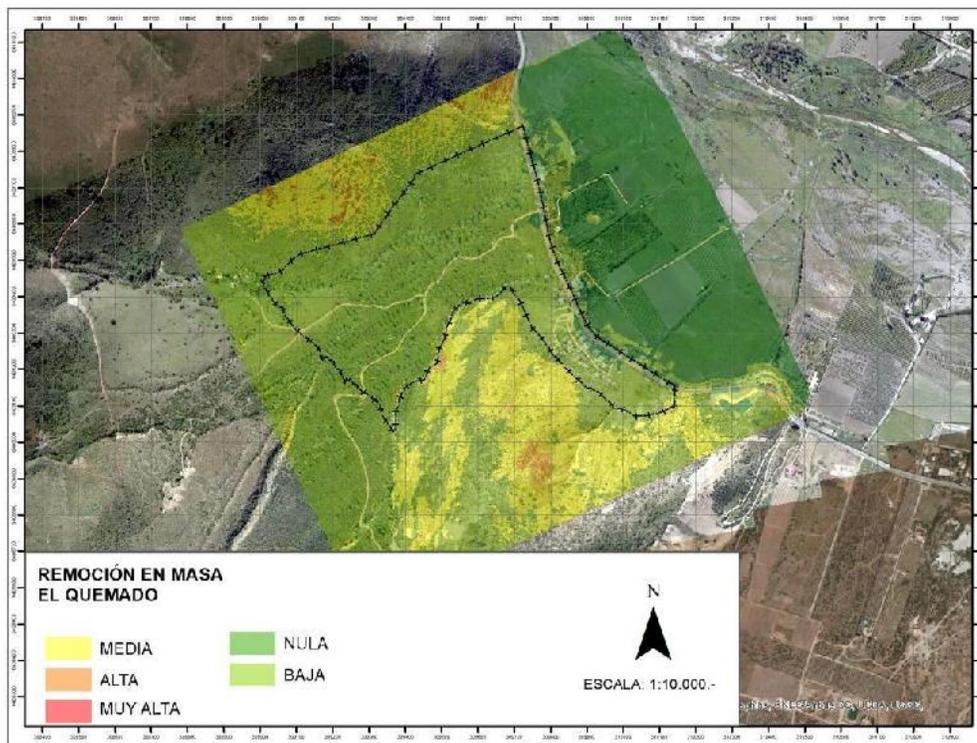
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 12: Modelación remoción en masa Sector La Vega



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 13: Modelación remoción en masa Sector el Quemado



Fuente: Elaboración propia

2.3 Área de riesgo por Actividad o Intervención Humana (Relaves, Faenas Mineras y Vertederos).

Los riesgos antrópicos de la Intercomuna están asociados principalmente a presencia de un número considerable de Infraestructuras producto de la actividad minera, estos depósitos se pueden encontrar en “estado activo” o “No activo”. En la comuna de Cabildo, de acuerdo con el estudio Empresas y faenas mineras 2016 – 2017, SERNAGEOMIN

Tabla N° 14: Empresas y faenas mineras 2016 – 2017, SERNAGEOMIN

RECURSO PRINCIPAL	Nº	%
CARBONATOS DE CALCIO	2	1%
COBRE	307	97%
MOLIBDENO	1	0%
ORO	5	2%
SILICEOS	1	0%
TOTAL	316	100%

Fuente: Empresas y faenas mineras 2016 – 2017, SERNAGEOMIN

De acuerdo con este catastro existen 316 faenas mineras, de las cuales 231 se encuentran activos y 85 en estado Inactivo. Cabe consignar además que es posible encontrar faenas mineras subterráneas abandonadas, como antiguos piques o chimeneas de ventilación no documentados actualmente, en las cercanías del área urbana de Cabildo. Este hecho presenta especial importancia por motivo que estos piques abandonados pueden presentar grandes dimensiones subterráneas, que sumado a la posible interacción de calizas y acumulación de agua podrían aumentar el tamaño de estos, poniendo en riesgos las construcciones que se puedan generar sobre ellos.

Figura N° 14: Empresas y faenas mineras 2016 – 2017, SERNAGEOMIN

2.3.1 Antecedentes históricos de colapsos de tranques de relaves

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, en medios de circulación local y nacional y de bibliografía especializada se documentaron los siguientes incidentes en la comuna y áreas aledañas. En ellos se observa como una constate la falla de la pared del tranque por licuefacción durante un sismo.

Tabla N° 15: Antecedentes históricos de fallas en relaves

Fecha	Ubicación	Tipo de Incidente	Material Liberado	Impactos
3. Oct 2003	Cerro Negro, Cabido. Chile ¹	Falla de la Pared del tranque. Licuefacción durante un sismo	50.000 Ton.	Los desechos viajaron 20 km aguas abajo del río la ligua
3, Mar. 1985	Veta de Agua No.1, Nogales. Chile	Falla de la Pared del tranque. Licuefacción durante un sismo	280.000 m3	Los desechos se derramaron 5 km hacia abajo
3, Mar. 1985	Cerro negro No.4, Cabildo, Chile	Falla de la Pared del tranque. Licuefacción durante un sismo	500,000 m3	Los desechos se derramaron 8 km hacia abajo
28, Mar. 1965	Cerro negro No.3, Cabildo. Chile	Falla de la Pared del tranque. Licuefacción durante un sismo	85.000 m3	Los desechos se derramaron 5 km aguas abajo
28, Mar. 1965	El Cobre, tranque nuevo, Nogales. Chile	Falla de la Pared del tranque. Licuefacción durante un sismo	350.000 m3	Los desechos se derramaron 12 km aguas abajo, destruyendo el poblado del Cobre, murieron más de 200 personas
28, Mar. 1965	El Cobre, tranque viejo, Nogales. Chile	Falla de la Pared del tranque. Licuefacción durante un sismo	1,9 millones de m3	
28, Mar. 1965	La Patagua tranque nuevo, La Ligua. Chile	Falla de la Pared del tranque. Licuefacción durante un sismo	35.000 m3	Los desechos se derramaron 5 km hacia abajo
28, Mar. 1965	Los Maquis, Cabildo. Chile	Falla de la pared del tranque. Licuefacción durante un sismo	21.000 m3	Los desechos fluyeron 5 km aguas abajo.

Fuente: Informe de la comisión investigadora sobre la situación en que se encuentran los depósitos de relaves mineros existentes en el país. Congreso Nacional, diciembre de 2010

En general los impactos se han documentado con una longitud sobre los 5 km aguas abajo de los respectivos tranques, llegando incluso a los 20 km de derrame en el sector de Cerro Negro, en la comuna de Cabildo.

En el caso de las localidades en estudio, existen tres sectores asociados a relaves, de los cuales los dos más próximos al área urbana se encuentran inactivos y un tercero que se encuentra activo se localiza en la ribera norte del río La Ligua (fuera del límite urbano).

¹ El Mercurio de Valparaíso

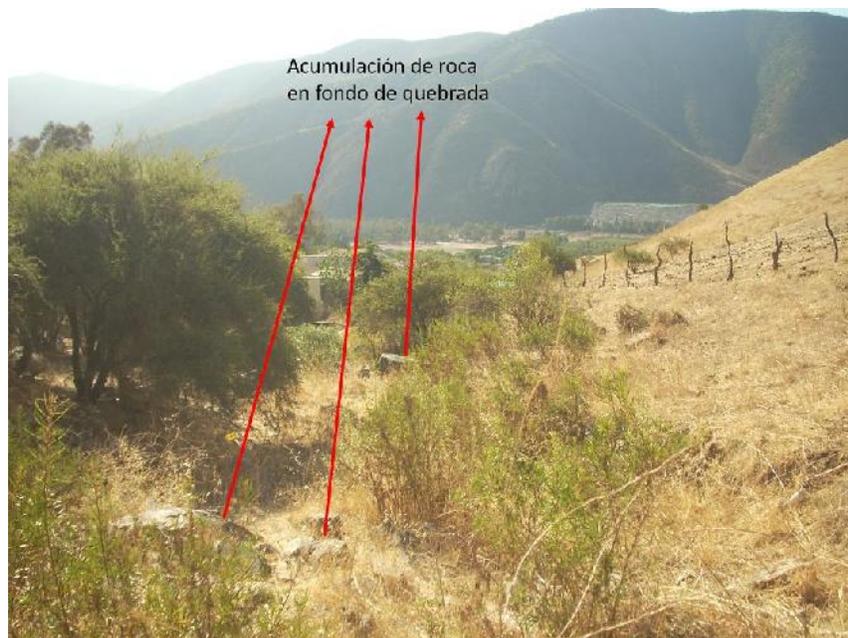
2.4 Conclusiones

- Características climáticas destaca el Clima semiárido de lluvia invernal, localizado en la sección baja del valle, se corresponde con las áreas de suelos cultivables de la comuna (clase I, II y III), siendo el sector de mejor habitabilidad en la comuna desde el punto de vista climático, en este clima se localiza la totalidad de los asentamientos en estudio. Otro atributo de este clima corresponde a la baja estadística de heladas en laderas que permiten el cultivo de paltos entre otros.
- Las restricciones del medio físico de la comuna de Cabildo, desde la perspectiva de los riesgos naturales, tienen relación con las precipitaciones, si bien en gran parte de la comuna son escasas durante el año, estas pueden presentarse con concentración de milímetros en 24 que pueden causar riegos de inundación o flujos de remociones en masa, en los últimos 20 años se han registrado promedio 4 registros sobre 60 mm por estación.
- Largos periodos de tiempo con bajas precipitaciones (sequias) han disminuido la cubierta vegetal natural, situación que ha favorecido el aumento de la erosión y preparación de material de suelo disponible a ser deslizado ladera a baja con precipitaciones de alta intensidad, que si bien no son una contante anual, cuando esta suceden arrastran el material acumulado. Hauser (1993) señala que pendientes mayores a 25° en las cabeceras de las hoyas hidrográficas serían favorables para el desarrollo de flujos o aluviones, mientras que Sauret (1987) en Sepúlveda (1998) señala que aluviones podrían generarse en pendientes menores (que no sobrepasen los 15°).
- Existencia de piques y minas subterráneas no activas y/o irregulares en laderas cercanas al área urbana de las localidades en estudio que constituyen un riesgo a la instalación de viviendas en cercanía, por no contarse con información de la dirección de los piques que pueden provocar socavamientos, hundimientos o proceso de licuefacción que pueden poner en riesgo a la construcción y sus ocupantes
- De acuerdo a lo recorrido en terreno se pudo evidenciar en Cabildo y en mejor estado en Artificio ,la construcción de medidas de mitigación de remoción en masa e inundaciones, estas obras estan compuesta por muros de contención de hormigón armado de alturas entre 1 y 2 mts con las respectivas obras de drenaje y juntas de dilatación, además se pudo observar la canalización de quebradas intermitentes como se aprecia en las siguientes fotografías.



La pavimentación, muro de contención y obra de drenaje, son de gran importancia en la contención de la ladera. Estas obras se deberían analizar antes de la llegada de residentes de manera de evitar la exposición a los riesgos.

Las áreas de riesgo por remoción en masa en la localidad de Cabildo, cuya vertiente corresponde principalmente a laderas de exposición norte, con pendientes sobre 20°, cubierta vegetal principalmente estacional y una condición de suelo de baja profundidad con regueros o pequeñas quebradas intermitentes que hacen arrastre de suelo acumulado y rocas como se aprecia en las siguientes fotografías



3. ESTUDIO DE ÁREAS DE RIESGO POR ZONAS INUNDABLES

En este acápite se presenta el estudio de las áreas de riesgo por zonas inundables, es decir, las áreas de restricción asociadas a zonas inundables o potencialmente inundables, para ser incorporadas en el PRC de Cabildo.

Para lo anterior, la metodología de trabajo corresponde a la realización de las siguientes actividades:

Revisión de antecedentes: corresponde a la recopilación de todos los antecedentes hidrológicos existentes, así como la estadística hidrológica de las estaciones hidrométricas cercanas a la zona, de las precipitaciones máximas en 24, 48 y 72 hrs., y los caudales instantáneos máximos anuales. Adicionalmente, contempla la revisión de información disponible en estudios realizados en la zona que aporten información relacionada con la determinación de eventos máximos, proveniente de organismos públicos, centros de estudio, tesis, etc.

Visita a terreno: corresponde a la realización de una visita a la zona de estudio para visualizar en terreno las características de la morfología de las cuencas, las coberturas, los tipos de suelo, y la revisión e identificación de las quebradas que atraviesan las zonas en estudio, y sus principales características respecto a rugosidades, tipo de lecho, granulometría, entre otros.

Estudio de crecidas: contempla la caracterización de la morfología de las cuencas aportantes al área de estudio, para lo cual se trazan los límites de las cuencas, la red de drenaje y los parámetros morfológicos, necesarios para aplicar metodologías de relaciones de precipitación escorrentía. Para la preparación de la hidrología, se analizan las estadísticas extremas de la pluviometría y fluvimetría asociadas a los ríos La Ligua y Petorca y a las quebradas que podrían incidir en las zonas de estudio. En función de las características de los datos recopilados se define si éstos deben ser rellenados y la metodología a utilizar. Posteriormente, se preparan tablas, gráficos y figuras que representen cada uno de los parámetros. A partir del análisis estadístico se definen los caudales de crecida para períodos de retorno $T = 10, 25, 50$ y 100 años en los puntos característicos de cada zona de estudio.

Estudio Hidráulico: en base a los cursos de agua identificados y el estudio de crecidas, se realiza el cálculo de las alturas de escurrimiento en las áreas incluidas en el PRC, identificando así las áreas de inundación de los cauces para distintos periodos de retorno. Al respecto, es importante señalar que el periodo de retorno $T = 100$ años considera el área más desfavorable, y, por lo tanto, será utilizada para definir el área de riesgo.

3.1 Estudio de Crecidas y Modelación Hidráulica

3.1.1 Metodología

Para la elaboración del marco climático, se caracteriza el clima en base a antecedentes bibliográficos y, adicionalmente, se estiman valores de precipitación y temperatura media en estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio.

Para la elaboración de la línea de base de hidrología, se realiza una revisión de antecedentes hidrometeorológicos, una delimitación de las cuencas presentes en el área de estudio y una caracterización de las cuencas y definición de caudales de crecida.

Revisión de antecedentes

Se realiza una revisión de antecedentes que aporten información relacionada a la hidrología de la zona y fundamentalmente a la determinación de eventos máximos. Esta revisión incluye la estadística hidrológica de las estaciones hidrométricas cercanas a la zona, considerando datos fluviométricos y meteorológicos.

Delimitación de cuencas

Se trazan los límites de las cuencas y la red de drenaje y se definen parámetros morfológicos de las cuencas asociadas a quebradas a caracterizar, utilizando información SIG imágenes satelitales y modelos de elevación digital.

Caracterización de quebradas, esteros y ríos, y definición de caudales de crecida

Se realiza una caracterización de las quebradas, ríos y esteros identificados informando acerca de trazados, tipos de lecho y pendientes.

Para determinar los caudales de crecida se diferencia, según si se cuente con antecedentes fluviométricos o únicamente con antecedentes pluviométricos.

En el caso de las cuencas con control fluviométrico se analizan los registros obtenidos de estaciones fluviométricas ubicadas en el área de estudio y su representatividad. En caso de contar con registros completos y de una extensión apropiada (30 años) se realiza un análisis de frecuencia para obtener los caudales asociados a distintos periodos de retorno. Conocido dicho caudal es posible determinar los caudales de las cuencas aledañas utilizando el método de transposición de caudales, utilizando las áreas y las precipitaciones de las cuencas.

Por otra parte, en el caso de cuencas sin control fluviométrico o para realizar una comparación en el caso de las cuencas con control fluviométrico, se analizan las precipitaciones máximas anuales en 24 horas, con el objeto de estimar los caudales mediante métodos de precipitación escorrentía. Para lo anterior, se estimarán los caudales

a partir de las relaciones de precipitación escorrentía válidas en la zona. Según las condiciones de aplicabilidad, se estimarán los caudales según Fórmula Racional, Verni King y DGA-AC, definidos en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en cuencas sin información fluviométrica (DGA, 1995), o se utilizará en cambio la Fórmula Racional de acuerdo a lo establecido en el libro de Ven Te Chow de Hidrología Aplicada según el cual:

$$Q = \frac{c \cdot i \cdot A}{3,6}$$

Dónde:

Q : Caudal [m³/s]

c : Coeficiente de escorrentía

i : Intensidad de la lluvia asociada al tiempo de concentración de la cuenca [mm/hr]

A : Área de la cuenca [km²]

Esta publicación entrega valores para el coeficiente de escorrentía, según se muestra en la Tabla N° 16.

Tabla N° 16: Coeficientes de Eschorrentía para ser Usados en el Método Racional

Características de la superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas no desarrolladas							
Área de cultivos							
Plano, 0-2%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,57
Promedio, 2-7%	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51	0,60
Pendiente superior a 7%	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61
Pastizales							
Plano, 0-2%	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Promedio, 2-7%	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Pendiente superior a 7%	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Bosques							
Plano, 0-2%	0,22	0,25	0,28	0,32	0,35	0,39	0,48
Promedio, 2-7%	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,56
Pendiente superior a 7%	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58

Fuente: Hidrología Aplicada (Ven Te Chow, 1996).

Por otra parte, el Manual de Carreteras, Volumen 3 (2016), entrega una metodología de cálculo del coeficiente de escorrentía, según se presenta en la Tabla N° 17.

Tabla N° 17: Coeficientes de Escorrentía para T = 10 Años

Factor	Extremo	Alto	Normal	Bajo
Relieve	0,28 – 0,35: Escarpado con pendientes mayores que 30 %	0,20 – 0,28: Montañoso con pendientes entre 10 y 30 %	0,14 – 0,20: Con cerros y pendientes entre 5 y 10 %	0,08 – 0,14: Relativamente plano con pendientes menores al 5 %
Infiltración	0,12 – 0,16: Suelo rocoso, o arcilloso con capacidad de infiltración despreciable	0,08 – 0,12: Suelos arcillosos o limosos con baja capacidad de infiltración, mal drenados	0,06 – 0,08: Normales, bien drenados, textura mediana, limos arenosos, suelos arenosos	0,04 – 0,06: Suelos profundos de arena u otros suelos bien drenados con alta capacidad de infiltración
Cobertura Vegetal	0,12 – 0,16: Cobertura escasa, terreno sin vegetación o escasa cobertura	0,08 – 0,12: Poca vegetación, terrenos cultivados o naturales, menos del 20 % del área con buena cobertura vegetal	0,06 – 0,08: Regular a buena; 50 % del área con praderas o bosques, no más del 50 % cultivado	0,04 – 0,06: Buena a excelente, 90 % del área con praderas, bosques o cobertura equivalente
Almacenamiento Superficial	0,10 – 0,12: Despreciable, pocas depressiones superficiales, sin zonas húmedas	0,08 – 0,12: Baja, sistema de cauces superficiales pequeños bien definidos, sin zonas húmedas	0,06 – 0,08: Normal; posibilidad de almacenamiento buena, zonas húmedas, pantanos, lagunas y lagos	0,04 – 0,06: Capacidad alta, sistema hidrográfico poco definido, buenas planicies de inundación o gran cantidad de zonas húmedas, lagunas o pantanos

Fuente: Manual de Carreteras, Volumen 3 (2016).

Para obtener las precipitaciones o caudales, asociados a distintos periodos de retorno, se realiza un análisis de frecuencia de los datos recopilados, los cuales habrán sido previamente rellenados, según corresponda, a partir de análisis de correlación con estadísticas de estaciones vecinas. Los análisis de frecuencia (tanto de precipitaciones como de caudales) se realizan ajustando las distribuciones Normal, Gumbel, Pearson, Log-Normal y Log-Pearson, y considerando 6 periodos de retorno: 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. La bondad del ajuste se determina en base a un Test Chi-Cuadrado (χ^2), agrupando los datos en 5 intervalos. La distribución de mejor ajuste es la que tras aprobar el test χ^2 , tenga mejor ajuste gráfico.

Para determinar la intensidad asociada a una duración t , conocida la intensidad para 24 horas, se utiliza el método de Grunsky:

$$i_t^T = i_{24}^T \cdot \sqrt{\frac{24}{t}}$$

Dónde:

i_t^T : Intensidad de período de retorno T, asociada a una duración de t horas [mm/hr]

i_{24}^T : Intensidad de período de retorno T, asociada a una duración de 24 horas [mm/hr]

t : Duración [hr]

Para estimar el tiempo de concentración, dadas las condiciones de las cuencas, se utilizan las fórmulas de California, Giandotti y Norma Española. Luego se adopta un valor en horas considerando los resultados válidos.

Fórmula de California

$$t_c = 0,95 \cdot \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385}$$

Dónde:

t_c : Tiempo de Concentración [hr]

L : Longitud del Cauce Principal [km]

H : Desnivel máximo [m]

Fórmula de Giandotti

$$t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5 \cdot L}{0,8 \cdot \sqrt{h}}$$

Dónde:

t_c : Tiempo de Concentración [hr]

S : Área de la Cuenca [km²]

L : Longitud del Cauce Principal [m]

h : Altura media de la cuenca sobre el punto de interés [m]

Fórmula de Normas Españolas

$$t_c = \frac{18 \cdot L^{0,76}}{S^{0,19}}$$

Dónde:

t_c : Tiempo de Concentración [hr]

L : Longitud del Cauce Principal [km]

S : Pendiente [m/m]

En las metodologías definidas en el “Manual de Cálculo y Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica” (DGA, 1995), se plantea básicamente la aplicación de tres fórmulas empíricas para el cálculo de crecidas en cuencas pluviales a partir de la información pluviométrica y las características morfológicas de cada cuenca, en que se aplican parámetros relativos a cada región. Estos métodos son DGA-AC, Verni y King modificado y la Fórmula Racional.

El método DGA-AC para crecidas pluviales, corresponde a un análisis regional de crecidas de origen pluvial, basado en series de máximos anuales generadas a partir de información de caudales medios diarios máximos e instantáneos máximos del período pluvial, de 234 estaciones de control fluviométrico. Este método, que abarca estaciones desde la III a la IX Región, es válido para cuencas pluviales o pluvionivales sin información fluviométrica y con áreas comprendidas entre 20 y 10.000 [km²]. Su uso está restringido a períodos de retorno inferiores a 100 años.

El método consiste básicamente en determinar una curva de frecuencias para el caudal instantáneo máximo de la cuenca. Para la determinación de los caudales medios diarios de período de retorno de 10 años, se plantea la siguiente relación, correspondiente a las regiones V, RM y VI:

$$Q_{10} = 5,42 \cdot 10^{-8} \cdot A^{0,915} \cdot (P_{24}^{10})^{3,432}$$

Dónde Q_{10} se expresa en [m³/s], A es el área pluvial de la cuenca en [km²] y P es la precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años expresada en [mm].

El método Verni y King modificado relaciona el caudal instantáneo máximo de una crecida con la precipitación diaria máxima y el área pluvial a través de una relación de potencias. La ecuación tiene la siguiente forma:

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

Q se expresa en [m³/s], A_p es el área pluvial de la cuenca en [km²], P_{24} es la precipitación diaria máxima asociada al período de retorno T expresada en [mm] y C(T) es un coeficiente empírico de período de retorno T años.

La expresión para la determinación del caudal máximo instantáneo de período de retorno T para la Fórmula Racional es la siguiente.

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6}$$

Dónde Q es el caudal instantáneo máximo de período de retorno T, expresado en [m³/s], C es un coeficiente empírico asociado al período de retorno T, i es la intensidad media de lluvia asociada al período de retorno T y a una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca pluvial, expresada en [mm/hr] y A es el área pluvial expresada en [km²]. Los coeficientes C, de acuerdo a lo definido en el Manual, son los mismos que aquellos definidos para el método de Verni y King modificado.

El método de transposición de caudales según áreas, puede ser utilizado en el caso de dos cuencas de características fisiográficas y de cobertura vegetal similar, con precipitaciones análogas. En este caso el caudal de la cuenca transpuesta quedaría definido como:

$$Q_2 = \frac{Q_1}{A_1} \cdot A_2$$

En el caso que las precipitaciones medias sean diferentes, la relación anterior se puede modificar por un coeficiente que pondere los diferentes valores de lluvia en las cuencas.

$$Q_2 = \frac{Q_1}{A_1} \cdot A_2 \cdot \frac{Pp_2}{Pp_1}$$

Modelación hidráulica y definición de áreas de inundación

Por otra parte el software HEC-RAS permite la modelación 1D para representar el escurrimiento en quebradas y ríos, con el objetivo de determinar las zonas de inundación para distintos períodos de retorno.

La rugosidad de las superficies se caracteriza mediante el coeficiente de Manning, parámetro que representa la resistencia que ejerce la superficie al escurrimiento del agua, y que se relaciona con el caudal, la pendiente y geometría del cauce según la siguiente ecuación:

$$\frac{Q \cdot n}{\sqrt{i}} = A \cdot R_h^{\frac{2}{3}}$$

Dónde:

Q : Caudal [m^3/s]

n : Coeficiente de Manning [$s/m^{1/3}$]

i : Pendiente del cauce [m/m]

A : Área de la sección transversal de escurrimiento [m^2]

R_h : Radio hidráulico [m]

Entre los factores que afectan el coeficiente de Manning se encuentran la rugosidad superficial (el tamaño y la forma de los granos), la presencia de vegetación, las irregularidades, el alineamiento, el tamaño y la forma del canal, la sedimentación y la socavación, las obstrucciones, el cambio estacional, etc.

Existen dos metodologías para determinar el valor del coeficiente de Manning: mediante la aplicación de fórmulas o mediante la revisión bibliográfica de cauces cuya rugosidad ha sido estudiada y que presentan características similares a los cauces que se desean estudiar. Con motivo de este trabajo se estimaron los coeficientes de rugosidad mediante la revisión del documento del USGS "Roughness Characteristics of Natural Channels" (RCNC, 1967) y a través del método de Cowan.

Cowan (1956) desarrolló un procedimiento para estimar el valor del coeficiente de Manning, el cual queda definido por la siguiente ecuación:

$$n = m \cdot (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$$

Dónde:

n : Coeficiente de Manning

n_0 : Valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados

n_1 : Corrección por efecto de las rugosidades superficiales

n_2 : Corrección por la variación de forma y tamaño de la sección transversal

n_3 : Corrección debido a las obstrucciones

n_4 : Corrección por presencia de vegetación

m : Consideración del efecto de los meandros

Cada uno de estos parámetros se determina según la comparación de las características del cauce vistas en terreno versus los valores propuestos por Cowan (ver Tabla N° 18).

Tabla N° 18: Valores para el cálculo del coeficiente de Manning mediante método de Cowan

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n_0	0,020
	Corte en roca		0,025
	Grava fina		0,024
	Grava gruesa		0,028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0,000
	Menor		0,005
	Moderado		0,010
	Severo		0,020
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n_2	0,000
	Ocasionalmente alternante		0,005
	Frecuentemente alternante		0,010-0,015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n_3	0,000
	Menor		0,010-0,015
	Apreciable		0,020-0,030
	Severo		0,040-0,060
Vegetación	Baja	n_4	0,005-0,010
	Medía		0,010-0,025
	Alta		0,025-0,050
	Muy alta		0,050-0,100
Grado de los efectos por meandros	Menor	m	1,000
	Apreciable		1,150
	Severo		1,300

Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow (1996)

3.1.2 Marco Climático

Según la Dirección Meteorológica de Chile (2001), en la Región de Valparaíso predomina un clima templado. Como parte de la caracterización general del área, se revisó la información de precipitación y temperatura de las estaciones Artificio (código BNA 05120003-9), Chacrilla (código BNA 05220006-7), La Viña (código BNA 05210002-K) y Alicahue Hacienda (código BNA 05200006-8), en las comunas de Petorca y Cabildo. Artificio tiene registros desde septiembre de 1972, Chacrilla y La Viña desde diciembre de 1978, y Alicahue Hacienda desde mayo de 1962. Todas cuentan con estadísticas de precipitaciones, y sólo Alicahue Hacienda cuenta con estadísticas de temperatura.

Se ha realizado un análisis de las estadísticas de las estaciones durante los últimos 30

años (1986 – 2015), destacando que la precipitación media mensual en todas las estaciones está entre 200 y 300 mm. En todos los casos la precipitación máxima se alcanza en el mes de junio, con aproximadamente el 27 % de las precipitaciones totales anuales, y el mínimo en los meses de enero y febrero, con aproximadamente el 0.1 % de las precipitaciones totales anuales (Tabla N° 19).

Tabla N° 19: Precipitaciones Medias Mensuales Registradas en las Estaciones Artificio, Chacrilla, La Viña y Alicahue

Estación	Precipitación Media Mensual (mm)												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Artificio	0,3	0,0	3,9	6,6	38,8	70,8	59,7	49,2	14,4	8,5	2,2	0,3	254,7
Chacrilla	0,3	0,0	3,2	8,0	39,6	71,9	57,3	52,9	13,6	9,2	2,4	0,6	258,8
La Viña	0,4	0,8	3,0	9,1	34,1	64,1	52,7	46,2	14,4	7,6	2,9	0,9	236,1
Alicahue Hacienda	1,0	0,3	4,0	12,5	39,1	64,6	54,1	52,2	18,8	8,7	3,4	0,3	258,9

Fuente: Elaboración propia a partir del Banco Nacional de Aguas (DGA).

En cuanto a la temperatura, el registro en la estación Alicahue Hacienda tiene un valor medio mensual máximo de 19.5 °C en enero y un valor medio mensual mínimo de 10.4 °C en julio (Tabla N° 20).

Tabla N° 20: Temperaturas Medias Mensuales Registradas en la Estación Alicahue

Estación	Temperatura Media Mensual (°C)											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Alicahue Hacienda	19,5	19,3	18,3	15,7	13,2	11,5	10,4	11,2	12,4	14,4	16,5	18,4

Fuente: Elaboración propia a partir del Banco Nacional de Aguas (DGA).

3.1.3 Marco Hidrológico

Revisión de Antecedentes

Con el objetivo de caracterizar las precipitaciones y caudales en la zona se recopilaron los antecedentes hidrometeorológicos, obtenidos de la base de datos de la DGA. Se analizaron 6 estaciones fluviométricas y 18 estaciones pluviométricas. Si bien existen otras estaciones en la zona, no se consideraron de interés al encontrarse suspendidas durante un largo periodo de tiempo. Las características de las estaciones fluviométricas se incluyen en la Tabla N° 21, y en la Tabla N° 22 las de las estaciones meteorológicas, mientras que su distribución espacial se muestra en la Figura N° 15.

Tabla N° 21: Estaciones Fluviométricas

Estación	Código BNA	Nombre	UTM Norte	UTM Este	Altitud [msnm]	Vigencia	Año Inicio
FL1	05200001-7	Río Alicahue en Colliguay	6.421.899	336.651	780	Vigente	nov-63
FL2	05221002-K	Río Ligua en Quinquimo	6.408.235	283.370	18	Vigente	may-79
FP1	05101001-9	Río Pedernal en Tejada	6.450.175	334.246	1.080	Vigente	dic-62
FP2	05100001-3	Río Sobrante en Piñadero	6.432.931	338.476	1.300	Vigente	ago-28
FP3	05110002-6	Río Petorca en Peñón o Hierro Viejo	6.427.121	312.426	450	Vigente	may-79
FP4	05120001-2	Río Petorca en Longotoma o Puente FF	6.414.837	276.648	126	Vigente	may-79

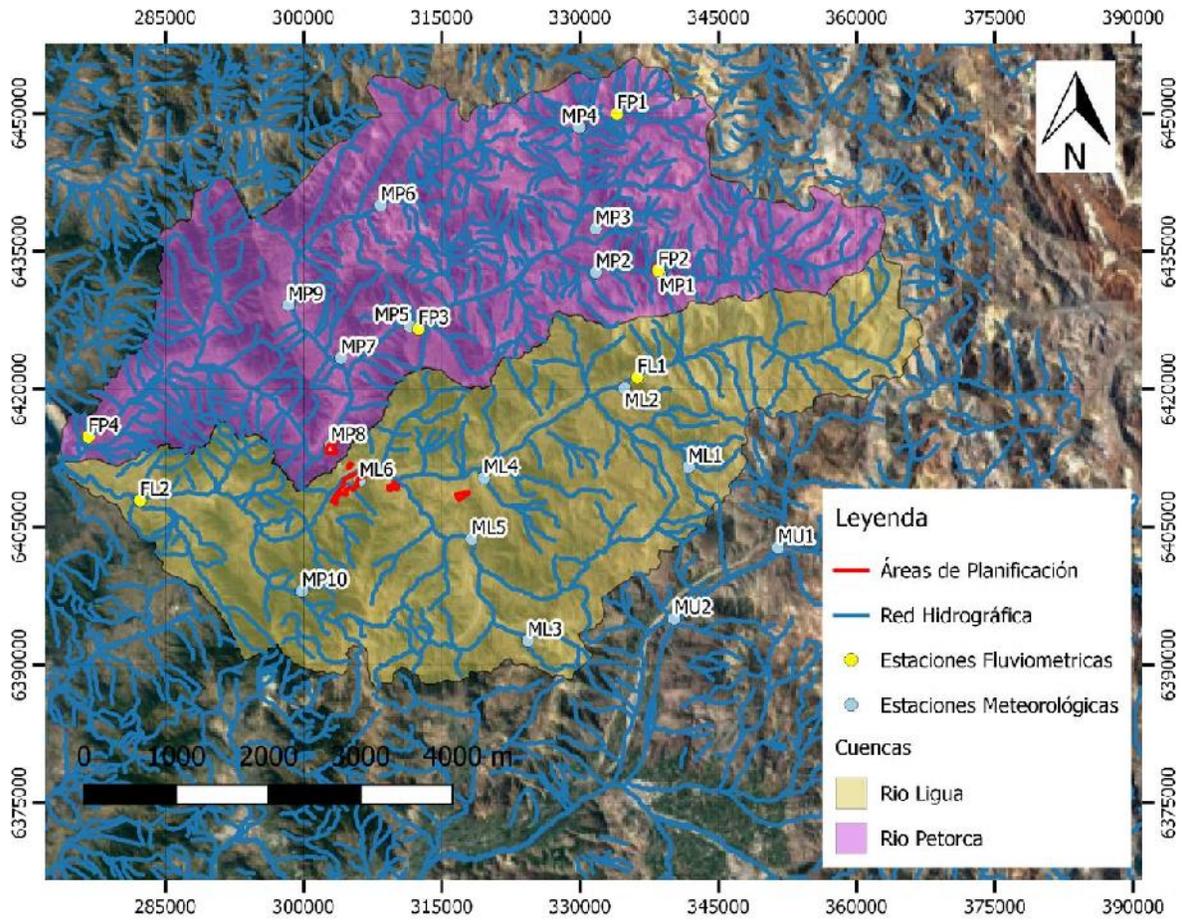
Fuente: Elaboración propia a partir del Banco Nacional de Aguas (DGA).

Tabla N° 22: Estaciones Meteorológicas

Estación	Código BNA	Nombre	UTM Norte	UTM Este	Altitud (msnm)	Vigencia	Año Inicio
ML1	05200007-6	La Mostaza	6.411.542	341.744	1.200	Vigente	dic-78
ML2	05200006-8	Alicahue Hacienda	6.420.056	334.836	750	Vigente	may-62
ML3	05211003-3	Mina Cerro Negro	6.392.644	324.332	650	Vigente	dic-78
ML4	05210002-K	La Viña	6.410.337	319.580	370	Vigente	dic-78
ML5	05211004-1	Las Puertas	6.403.720	318.263	350	Vigente	dic-78
ML6	05220006-7	Chacrilla	6.410.023	306.049	290	Vigente	dic-78
MP1	05100005-6	El Trapiche	6.432.563	338.665	1.180	Vigente	ene-62
MP2	05100006-4	El Sobrante Hacienda	6.432.727	331.696	810	Vigente	dic-43
MP3	05101006-K	Chalaco Hacienda	6.437.440	331.671	880	Vigente	abr-62
MP4	05101005-1	Pedernal Hacienda	6.448.500	329.914	1.100	Vigente	ene-62
MP5	05110003-4	Hierro Viejo	6.426.886	311.457	440	Vigente	jul-78
MP6	05111002-1	Frutillar Alto	6.440.015	308.356	780	Vigente	sep-72
MP7	05111004-8	El Salvador	6.423.387	304.039	340	Vigente	sep-72
MP8	05120003-9	Artificio	6.413.875	302.916	250	Vigente	sep-72
MP9	05111001-3	Palquico	6.429.160	298.323	450	Vigente	oct-72
MP10	05220007-5	Las Pataguas	6.398.068	299.807	350	Vigente	dic-78
MU1	05414004-5	Resguardo Los Patos	6.402.788	351.463	1.220	Vigente	jul-40
MU2	05414005-3	El Tártaro	6.395.067	340.203	950	Vigente	jun-90

Fuente: Elaboración propia a partir del Banco Nacional de Aguas (DGA).

Figura N° 15: Estaciones Fluviométricas y Meteorológicas en la Zona de Estudio



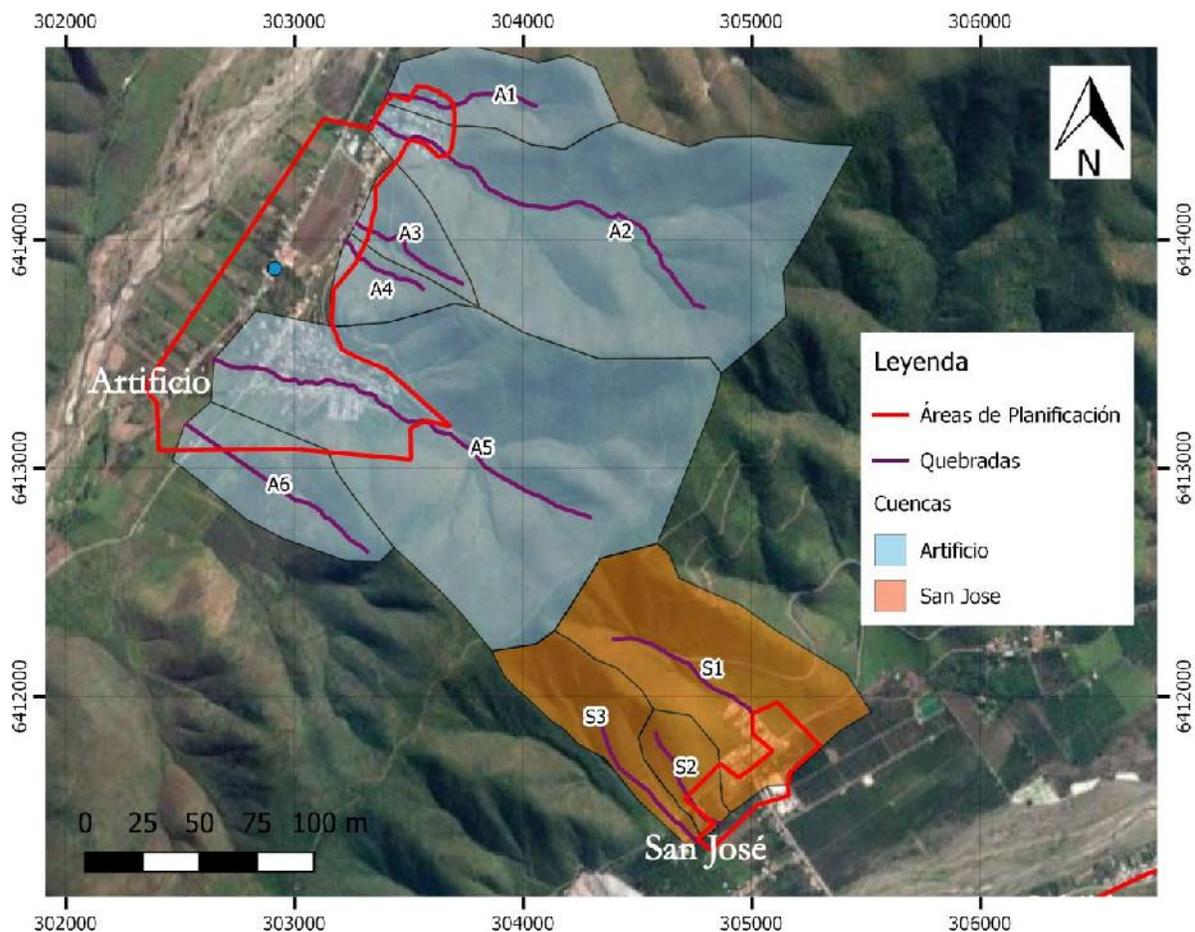
Fuente: Elaboración propia a partir del Banco Nacional de Aguas (DGA).

Finalmente, se presenta un detalle de los registros de estaciones fluviométricas (Tabla N° 23) y meteorológicas (Tabla N° 24), de acuerdo a la cantidad de meses con información completa, en el periodo analizado.

Delimitación y Caracterización de Cuencas

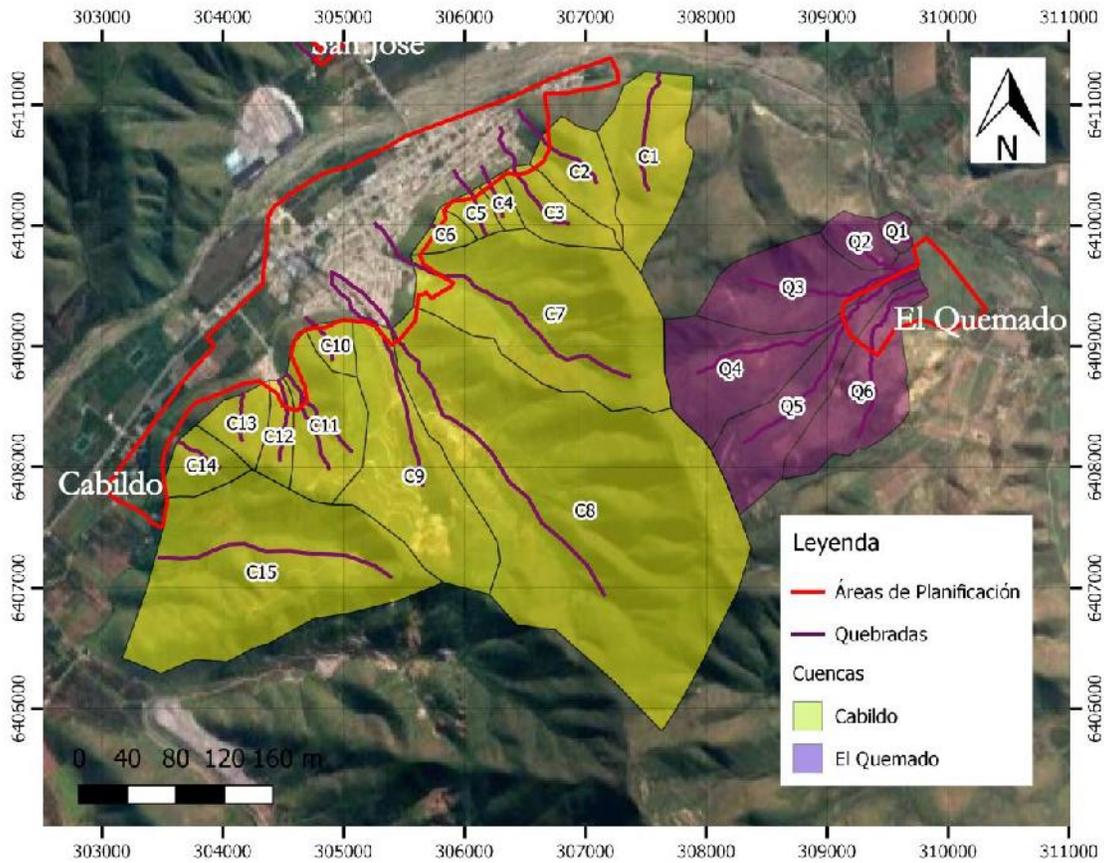
De acuerdo a la extensión del área de estudio, a la presencia de ríos, esteros y quebradas, a la presencia de construcciones y posibles zonas de expansión se han determinado las cuencas a estudiar para cada localidad. Desde la Figura N° 16 a la Figura N° 19 se presentan las ubicaciones de las cuencas, mientras que los detalles se incluyen en la Tabla N° 25.

Figura N° 16: Delimitación de Cuencas Artificio y San José



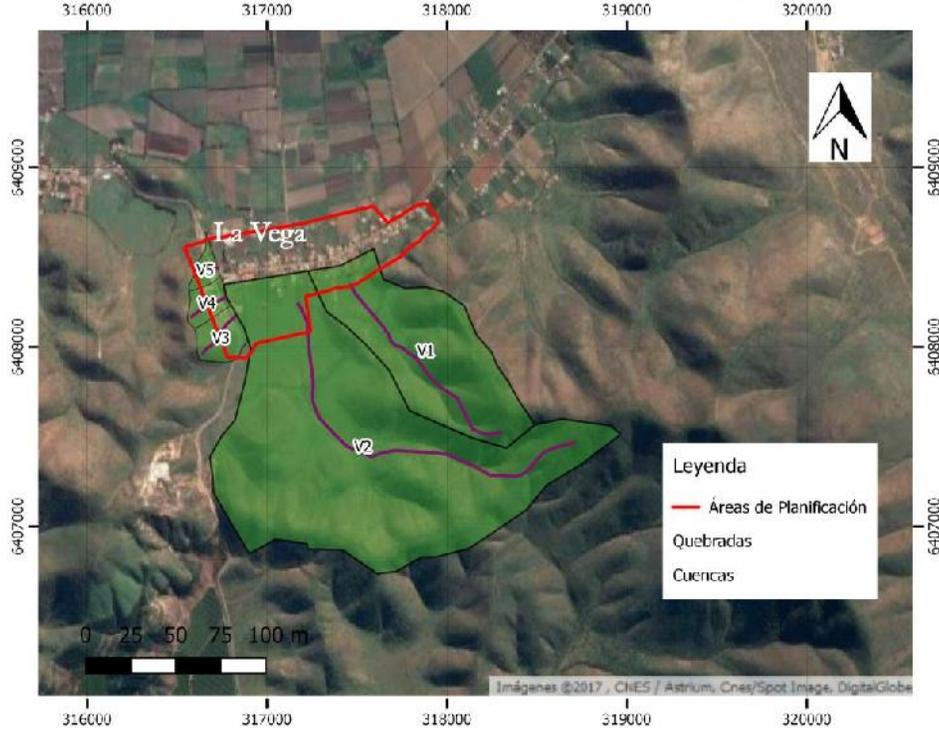
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 17: Delimitación de Cuencas Cabildo y El Quemado



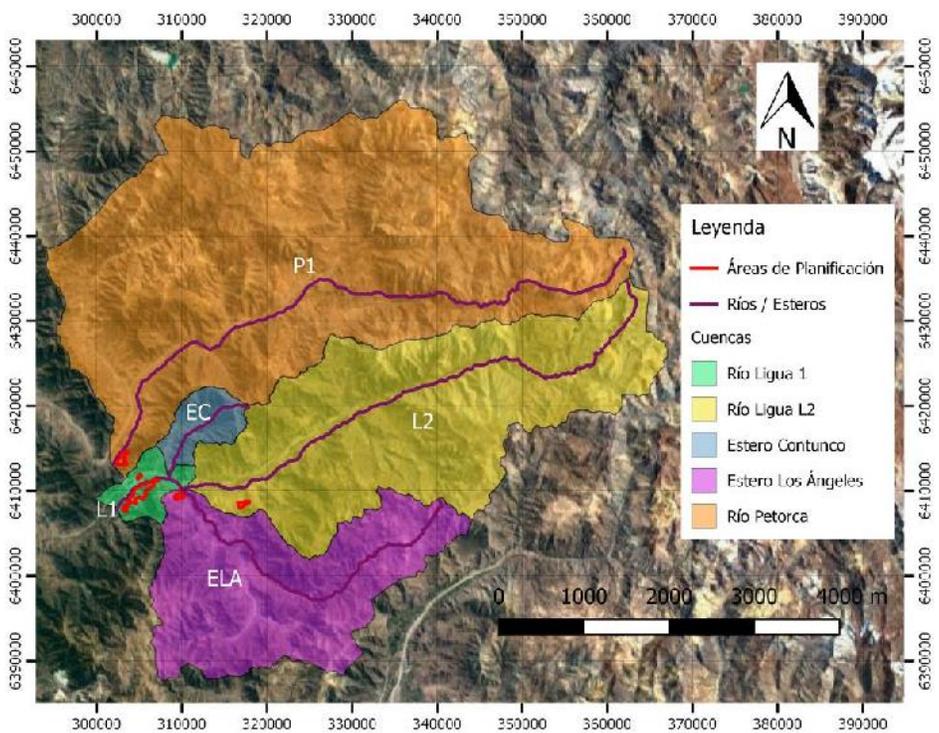
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 18: Delimitación de Cuencas La Vega



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 19: Delimitación de Cuencas Ríos y Esteros



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 25: Características Ríos / Esteros / Quebradas

Cuenca	Río / Estero / Quebrada	Zona	Área [km ²]	L [m]	Desnivel [m]	Altura media [msnm]
A1	Quebrada A1	Artificio	0,31	694,05	276	367
A2	Quebrada A2	Artificio	1,51	1.814,78	550	500
A3	Quebrada A3	Artificio	0,15	585,96	230	321
A4	Quebrada A4	Artificio	0,13	419,15	197	317
A5	Quebrada A5	Artificio	1,91	1.884,30	480	432
A6	Quebrada A6	Artificio	0,34	971,93	265	302
S1	Quebrada S1	San José	0,72	711,15	444	382
S2	Quebrada S2	San José	0,13	515,81	217	318
S3	Quebrada S3	San José	0,27	729,05	431	465
C1	Quebrada C1	Cabildo	0,84	1.018,95	609	436
C2	Quebrada C2	Cabildo	0,40	623,23	498	426
C3	Quebrada C3	Cabildo	0,33	703,63	494	434
C4	Quebrada C4	Cabildo	0,09	314,66	198	346
C5	Quebrada C5	Cabildo	0,11	377,79	189	325
C6	Quebrada C6	Cabildo	0,11	168,49	186	308
C7	Quebrada C7	Cabildo	2,07	2.142,38	617	528
C8	Quebrada C8	Cabildo	5,14	2.893,37	871	662
C9	Quebrada C9	Cabildo	1,33	1.403,18	534	473
C10	Quebrada C10	Cabildo	0,13	335,76	190	278
C11	Quebrada C11	Cabildo	0,67	660,46	319	349
C12	Quebrada C12	Cabildo	0,19	680,98	285	354
C13	Quebrada C13	Cabildo	0,24	397,59	300	340
C14	Quebrada C14	Cabildo	0,26	414,25	293	336
C15	Quebrada C15	Cabildo	2,53	1.995,36	546	385
Q1	Quebrada Q1	El Quemado	0,07	264,81	117	291
Q2	Quebrada Q2	El Quemado	0,20	639,56	264	406
Q3	Quebrada Q3	El Quemado	0,83	1.490,29	495	455
Q4	Quebrada Q4	El Quemado	0,86	1.362,59	628	664
Q5	Quebrada Q5	El Quemado	0,78	2.152,87	815	627
Q6	Quebrada Q6	El Quemado	0,77	1.554,51	509	453
V1	Quebrada V1	La Vega	0,60	1.240,38	299	417
V2	Quebrada V2	La Vega	1,86	2.248,13	385	423
V3	Quebrada V3	La Vega	0,06	283,29	68	356
V4	Quebrada V4	La Vega	0,04	219,98	42	341
V5	Quebrada V5	La Vega	0,02	104,46	30	333
P1	Río Petorca	Artificio	1.542,81	82.883,36	3.441	1.543
L1	Río Ligua	Cabildo	924,74	80.552,06	3.833	1.539
L2	Río Ligua	El Quemado	873,53	70.496,82	3.758	1.606
ELA	Estero Los Ángeles	El Quemado / Cabildo	525,42	47.660,73	2.130	1.056
EC	Estero Contunco	Cabildo	59,76	14.496,69	1.538	846

Fuente: Elaboración propia.

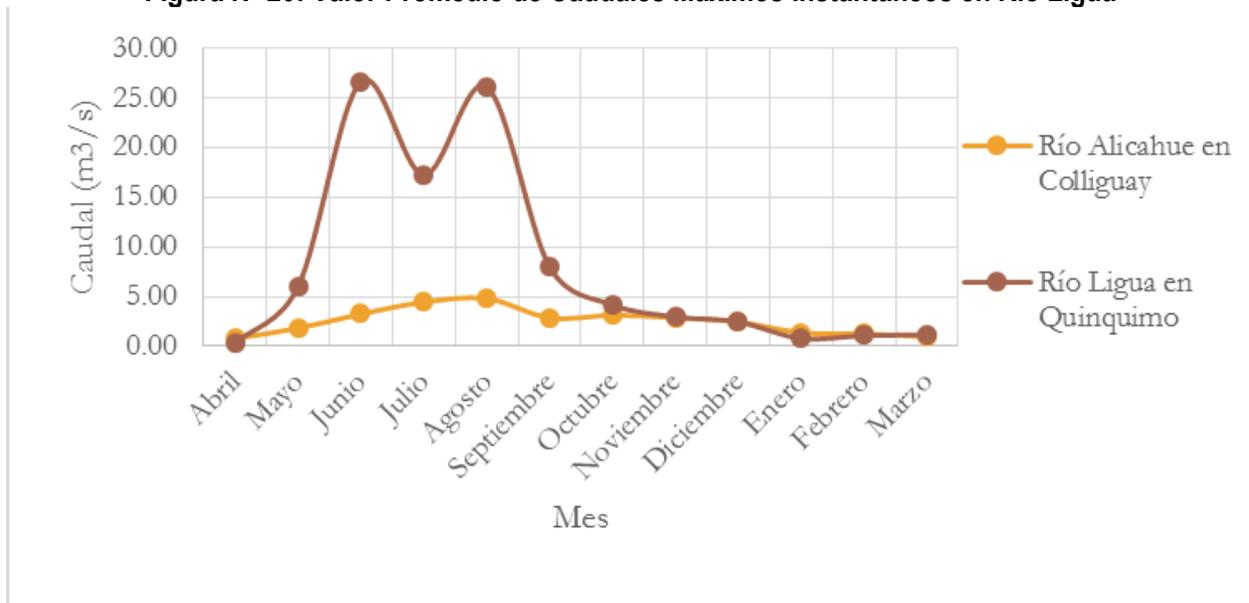
Cabe destacar que las quebradas de Cabildo y Artificio mostradas en las figuras precedentes incluyen referencialmente los canales construidos para evacuar las aguas lluvias, sin embargo, en la longitud mostrada en la tabla sólo se considera la longitud de la quebrada, para su utilización en la determinación de los caudales de crecida.

Determinación de Caudales de Crecidas

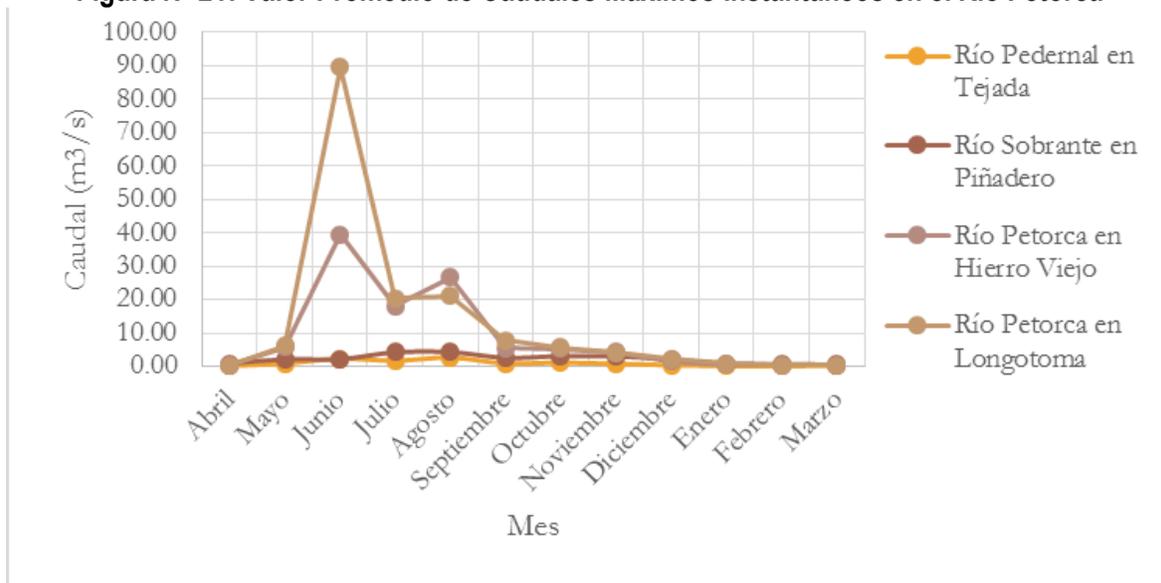
De acuerdo a los antecedentes fluviométricos analizados, se cuenta con 2 estaciones fluviométricas ubicadas en la cuenca del río Ligua, y 4 en la cuenca del río Petorca.

Un análisis del promedio de los caudales máximos instantáneos a nivel mensual, entre los años 1986 y 2015, en las estaciones Río Alicahue en Colliguay y Río Ligua en Quinquimo, asociadas a la cuenca del río Ligua (Figura N° 20), y en las estaciones Río Pedernal en Tejada, Río Sobrante en Piñadero, Río Petorca en Hierro Viejo y Río Petorca en Longotoma (Figura N° 21), asociadas a la cuenca del río Petorca, permiten observar una concentración de los mayores caudales máximos entre los meses de junio y agosto. Al respecto, es importante mencionar que para realizar la estimación de caudales se considerará que el área aportante es 100 % pluvial, ya que corresponde al caso más desfavorable. A mayor abundamiento, respecto de la línea de nieves, según lo señalado en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuenas Sin Información Fluviométrica (DGA, 1995), se encuentra ubicada aproximadamente sobre los 2.000 m s.n.m. según la latitud de la cuenca, que en este caso se encuentran entre 32 ° y 32,5 °, lo que se asocia a una altura de nieves de 2.080 y 2.010 m s.n.m. respectivamente. Con el objeto de contar con un valor de referencia, en la cuenca del río Petorca aproximadamente el 25 % de la cuenca se encuentra sobre 2.080 m s.n.m, y en la cuenca del río La Ligua el 15 % de la cuenca se encuentra sobre 2.010 m s.n.m.

Figura N° 20: Valor Promedio de Caudales Máximos Instantáneos en Río Ligua



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Figura N° 21: Valor Promedio de Caudales Máximos Instantáneos en el Río Petorca

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

A partir de la estadística de caudales de las estaciones fluviométricas, se analizaron los caudales instantáneos máximos anuales de las 6 estaciones seleccionadas preliminarmente. Cada una de las estaciones fue rellenada para completar un registro de 30 años, de acuerdo a análisis de correlación desarrollados, y se les realizó un análisis de frecuencia, a fin de determinar el caudal instantáneo máximo anual para distintos periodos de retorno. Los registros de las estaciones, así como los datos rellenados se incluyen en la Tabla N° 26. Cabe destacar que no fue posible rellenar todos los datos faltantes debido a coeficientes de correlación bajos entre algunas estaciones, quedando la mayoría de los datos faltantes rellenados, y con estadística suficiente para hacer el análisis de frecuencia.

Tabla N° 26: Caudales Máximos Anuales [m³/s]

Año	Río Alicahue en Colliguay	Río Ligua en Quinquimo	Río Pedernal en Tejada	Río Sobrante en Piñadero	Río Petorca en Peñón o Hierro Viejo	Río Petorca en Longotoma o Puente FF
1986	19,20	99,36	5,53	4,79	15,90	84,44
1987	60,61	25,74	4,39	53,25	32,32	29,80
1988	8,60	7,35	4,88	6,30	51,38	10,10
1989	11,58	25,68	1,39	2,61	12,16	13,88
1990	0,68	0,48	0,82	0,70	0,39	
1991	6,63	31,74	10,13	8,64	59,80	54,90
1992	5,44	65,80	3,37	3,72	43,86	129,00
1993	11,80	14,98	9,78	17,00	45,01	19,86
1994	0,79	19,61	0,73	0,69	0,75	1,72
1995	0,89	1,00	0,41	0,64	0,26	1,27
1996	0,43	0,04	0,23	0,46	32,88	0,03
1997	14,92	138,20	29,08	25,44	502,36	1.800,00
1998	5,22	7,15	0,83	7,05	4,20	3,68
1999	6,15	21,22	1,49	5,14	5,62	
2000	5,63	24,80	3,10	5,67	45,52	88,90
2001	10,46	296,84	19,62	16,82	210,79	187,51
2002	9,08	315,35	12,86	20,71	440,49	190,55
2003	3,40	19,43	1,56	2,34	5,78	26,11
2004	1,56	12,09	1,04	2,55	16,16	59,39
2005	15,97	11,51	16,53	14,97	69,61	37,46
2006	13,68	11,80	3,23	21,52	31,65	19,08
2007		0,23	3,19		6,66	0,82
2008	7,89	259,10	10,22	2,83	64,37	121,79
2009	2,83	5,94	0,79	2,28	3,48	0,67
2010	0,91	0,91	0,81	1,63	0,16	0,00
2011	1,22	19,27	1,15	1,51	2,27	
2012	0,53	0,00	0,32	2,59	0,00	0,01
2013	0,57	0,00	0,11	0,42	0,00	0,00
2014	0,27	0,27	0,23	0,37	0,00	0,00
2015	6,05	6,05	17,41	4,16	21,33	0,01

Nota: Los datos con fondo en color corresponden a datos rellenados.

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA

En la Tabla N° 27 se incluyen los caudales asociados a distintos periodos de retorno. En el Anexo 6.1 se adjunta además el análisis gráfico del análisis de frecuencia, de acuerdo a la distribución seleccionada por estación.

Tabla N° 27: Caudales Máximos Anuales

Periodo de Retorno (años)	Caudales Máximos Anuales [m ³ /s]					
	Río Alicahue en Colliguay	Río Ligua en Quinquimo	Río Pedernal en Tejada	Río Sobrante en Piñadero	Río Petorca en Peñón o Hierro Viejo	Río Petorca en Longotoma o Puente FF
2	3,7	6,0	4,4	3,7	6,0	6,4
5	11,9	81,6	11,7	11,5	94,8	104,7
10	21,9	319,4	16,6	20,8	402,1	349,1
20	36,3	984,9	21,2	33,8	1.325,7	833,2
50	63,9	3.497,3	27,2	58,5	5.074,2	1.956,7
100	93,1	8.138,7	31,8	84,2	12.413,8	3.226,1

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA

Posteriormente, mediante transposición de caudales, considerando las áreas y precipitaciones de las cuencas, se estimó el caudal de los ríos Ligua y Petorca en los puntos de interés, a saber, río Petorca en Artificio y río Ligua en Cabildo y El Quemado, entregando los siguientes resultados:

Tabla N° 28: Caudales Máximos Anuales

Periodo de Retorno (años)	Caudales Máximos Anuales [m ³ /s]		
	Río Petorca en Artificio (P1)	Río Ligua en Cabildo (L1+ELA+EC)	Río Ligua en El Quemado (L2)
2	5,2	5,0	2,9
5	84,8	68,4	39,6
10	282,7	267,9	155,0
20	674,9	826,0	477,9
50	1.584,9	2.933,2	1.696,9
100	2.613,1	6.826,0	3.949,0

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA.

Cabe destacar que para el cálculo de transposición de caudales no se consideraron las estaciones Río Alicahue en Colliguay, Río Pedernal en Tejada y Río Sobrante en Piñadero, por encontrarse más cercanas a las cabeceras de las cuencas, y por tanto, ser menos representativas para el análisis. En el caso del río Petorca, no se consideró la estación Río Petorca en Peñón o Hierro Viejo, dado que sólo se ajustó una distribución cuyos valores de caudal para períodos de retornos mayores se observaban sobreestimados, por lo que se utilizó Río Petorca en Longotoma o Puente FF, a pesar de que para períodos de retorno mayores los valores se observan sobreestimados. Para el caso del río Ligua se utilizó Río Ligua en Quinquimo, a pesar de que sólo se ajustó una distribución cuyos valores de caudal para períodos de retornos mayores se observaban sobreestimados.

Por otra parte, se analizaron las precipitaciones máximas anuales en 24 horas, de las 18 estaciones seleccionadas preliminarmente, con el objeto de estimar los caudales en las cuencas sin control fluviométrico y para comparar los valores de caudales en las cuencas con control fluviométrico. Cada una de las estaciones fue rellenada para completar un

registro de 30 años, de acuerdo a análisis de correlación desarrollados y comprobando luego mediante curvas dobles acumuladas. Posteriormente se les realizó un análisis de frecuencia, a fin de determinar la precipitación máxima en 24 horas para distintos periodos de retorno. Los registros de las estaciones, así como los datos rellenados se incluyen en las Tabla N° 29, Tabla N° 30, Tabla N° 31 y Tabla N° 32.

Tabla N° 29: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (5 estaciones)

Año	La Mostaza	Alicahue Hacienda	Mina Cerro Negro	La Viña	Las Puertas
1986	76,4	65,0	126,0	86,3	101,0
1987	99,3	81,5	94,0	82,0	79,6
1988	24,7	22,0	15,4	18,5	10,5
1989	50,1	36,5	46,5	41,6	43,0
1990	36,8	36,5	29,0	25,2	24,2
1991	68,1	50,0	55,0	41,3	37,0
1992	56,5	57,0	52,0	48,9	62,5
1993	52,5	43,0	32,0	45,6	45,3
1994	38,0	22,5	27,5	42,5	29,0
1995	37,9	35,0	28,8	35,6	38,5
1996	33,8	40,0	44,0	40,4	35,3
1997	48,0	91,0	73,0	50,0	68,0
1998	15,0	20,0	9,0	20,2	8,0
1999	41,5	53,0	52,0	54,0	49,0
2000	59,5	65,5	60,0	78,0	55,0
2001	87,0	50,0	91,0	73,0	78,0
2002	90,0	73,0	100,0	84,5	95,0
2003	58,0	43,0	54,0	37,0	44,0
2004	58,3	54,0	53,5	47,0	42,0
2005	34,5	31,0	38,0	25,0	24,0
2006	58,0	36,5	65,5	55,0	60,0
2007	68,0	62,5	65,0	59,0	70,4
2008	81,0	53,0	55,0	49,5	51,0
2009	51,0	45,0	40,0	39,3	35,0
2010	37,0	34,0	38,0	24,5	24,0
2011	39,0	31,3	31,0	22,5	27,5
2012	31,0	28,0	74,0	50,0	69,0
2013	27,0	20,3	47,5	27,5	31,0
2014	35,0	32,0	39,0	30,7	30,0
2015	50,0	47,0	87,5	54,5	70,5

Nota: Los datos con fondo en color corresponden a datos rellenados.

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA.

Tabla N° 30: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (5 estaciones)

Año	Chacrilla	El Trapiche	El Sobrante Hacienda	Chalaco Hacienda	Pedernal Hacienda
1986	92,0	37,0	31,0	36,0	50,0
1987	77,2	80,0	61,5	61,0	100,1
1988	18,1	28,0	17,5	19,5	25,7
1989	40,5	35,0	27,4	41,0	39,3
1990	21,5	26,5	25,9	22,0	21,0
1991	41,0	53,0	35,0	35,4	49,8
1992	62,5	45,0	50,2	49,0	53,9
1993	54,2	40,5	31,0	32,0	45,0
1994	16,0	28,0	20,5	21,5	29,6
1995	45,5	32,0	27,0	27,0	20,0
1996	37,1	36,5	48,0	63,0	50,0
1997	57,3	85,0	36,2	48,0	81,5
1998	11,1	18,0	14,0	17,0	15,6
1999	38,6	40,0	28,1	40,0	49,6
2000	81,9	62,0	46,6	76,0	104,0
2001	76,3	70,0	46,1	40,0	123,0
2002	125,3	120,0	76,7	79,0	97,6
2003	45,5	41,6	30,2	58,0	59,0
2004	47,0	40,0	45,0	54,0	71,1
2005	28,4	25,0	20,6	28,0	42,6
2006	68,3	43,7	45,1	41,1	43,5
2007	64,2	50,3	52,2	43,5	66,8
2008	59,3	40,0	44,3	31,5	67,0
2009	40,0	54,9	53,8	39,0	39,3
2010	26,2	38,0	31,0	35,0	29,0
2011	34,2	34,0	29,5	40,0	57,5
2012	40,0	12,8	12,5	15,0	21,0
2013	35,2	19,5	18,9	25,0	33,0
2014	38,2	16,0	30,2	32,0	39,0
2015	60,5	53,5	47,0	60,5	95,5

Nota: Los datos con fondo en color corresponden a datos rellenados.

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA.

Tabla N° 31: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (5 estaciones)

Año	Hierro Viejo	Frutillar Alto	El Salvador	Artificio	Palquico
1986	60,5	72,4	84,8	112,8	50,0
1987	70,5	102,0	76,2	94,7	91,0
1988	17,5	27,0	17,5	17,8	26,0
1989	25,1	41,0	42,5	42,6	45,0
1990	12,0	21,5	26,2	17,4	22,1
1991	30,0	45,0	32,7	36,2	36,0
1992	45,5	72,5	49,5	49,6	55,0
1993	40,6	40,0	45,1	51,6	37,0
1994	29,5	29,4	24,5	55,4	35,0
1995	31,0	38,0	41,2	39,6	43,0
1996	52,5	91,0	43,2	35,4	49,0
1997	42,5	52,0	66,6	55,2	66,0
1998	4,0	8,0	10,3	9,5	8,0
1999	50,5	43,5	35,2	41,4	46,0
2000	50,0	94,0	54,2	74,2	68,0
2001	69,1	85,0	54,6	62,2	74,0
2002	151,3	88,0	102,3	114,4	134,0
2003	38,0	63,2	54,4	46,4	52,0
2004	42,0	69,5	43,3	43,0	54,0
2005	19,0	24,0	26,5	30,0	24,0
2006	46,0	49,0	64,2	54,0	50,0
2007	41,0	50,0	52,2	56,5	33,0
2008	49,0	58,0	50,1	60,6	37,0
2009	36,0	43,5	42,5	44,4	37,0
2010	23,0	32,5	36,2	34,6	39,0
2011	22,0	40,0	26,5	36,0	32,5
2012	18,5	25,5	34,2	39,0	31,0
2013	19,0	30,2	25,2	33,0	28,0
2014	27,5	35,0	27,5	34,5	34,0
2015	49,8	24,0	76,8	76,0	96,0

Nota: Los datos con fondo en color corresponden a datos rellenados.

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA.

Tabla N° 32: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (3 estaciones)

Año	Las Pataguas	Resguardo Los Patos	El Tártaro
1986	102,3	83,0	70,5
1987	92,3	97,5	67,4
1988	26,3	19,0	22,3
1989	48,6	43,5	38,7
1990	19,0	34,0	20,5
1991	63,1	50,0	43,0
1992	64,3	52,0	50,5
1993	49,0	50,0	28,5
1994	68,0	45,5	37,3
1995	62,0	22,0	30,0
1996	36,5	19,5	26,0
1997	72,1	60,0	47,0
1998	24,5	19,3	9,0
1999	38,1	60,0	50,0
2000	76,5	66,0	60,0
2001	61,2	92,0	67,0
2002	133,5	78,5	76,0
2003	61,3	50,0	50,0
2004	51,2	49,0	55,0
2005	44,5	38,0	30,0
2006	68,5	66,0	38,0
2007	67,3	50,0	64,0
2008	55,0	52,0	51,0
2009	47,0	35,0	36,0
2010	26,3	28,0	30,0
2011	35,0	42,0	31,0
2012	27,0	30,0	42,0
2013	38,5	30,0	33,0
2014	19,0	29,0	28,0
2015	85,0	24,0	60,0

Nota: Los datos con fondo en color corresponden a datos rellenados.

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA.

En las Tabla N° 33, Tabla N° 34, Tabla N° 35 y Tabla N° 36, se incluyen las precipitaciones asociadas a distintos periodos de retorno. En el Anexo 6.2 se adjunta además el análisis gráfico del análisis de frecuencia, de acuerdo a la distribución seleccionada por estación.

Tabla N° 33: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (5 estaciones)

Periodo de Retorno (años)	Precipitaciones Máximas en 24 horas [mm]				
	La Mostaza	Alicahue Hacienda	Mina Cerro Negro	La Viña	Las Puertas
2	48,2	42,5	50,0	43,3	44,2
5	69,2	60,8	76,9	63,0	68,2
10	83,2	73,0	94,6	76,0	84,0
20	96,5	84,6	111,7	88,6	99,2
50	113,8	99,7	133,8	104,7	118,9
100	126,8	111,0	150,3	116,9	133,6

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA.

Tabla N° 34: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (5 estaciones)

Periodo de Retorno (años)	Precipitaciones Máximas en 24 horas [mm]				
	Chacrilla	El Trapiche	El Sobrante Hacienda	Chalaco Hacienda	Pedernal Hacienda
2	45,6	40,0	33,8	37,7	49,6
5	70,8	63,1	49,0	54,6	78,2
10	87,5	78,4	59,1	65,8	97,2
20	103,5	93,0	68,8	76,5	115,3
50	124,3	112,0	81,3	90,4	138,8
100	139,8	126,2	90,7	100,8	156,4

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA.

Tabla N° 35: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (5 estaciones)

Periodo de Retorno (años)	Precipitaciones Máximas en 24 horas [mm]				
	Hierro Viejo	Frutillar Alto	El Salvador	Artificio	Palquico
2	36,3	46,0	42,3	46,1	43,8
5	63,4	71,1	63,6	71,3	69,6
10	81,3	87,7	77,7	88,0	86,7
20	98,5	103,7	91,2	104,0	103,1
50	120,8	124,4	108,8	124,7	124,3
100	137,5	139,8	121,9	140,3	140,2

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA.

Tabla N° 36: Precipitaciones Máximas en 24 Horas (3 estaciones)

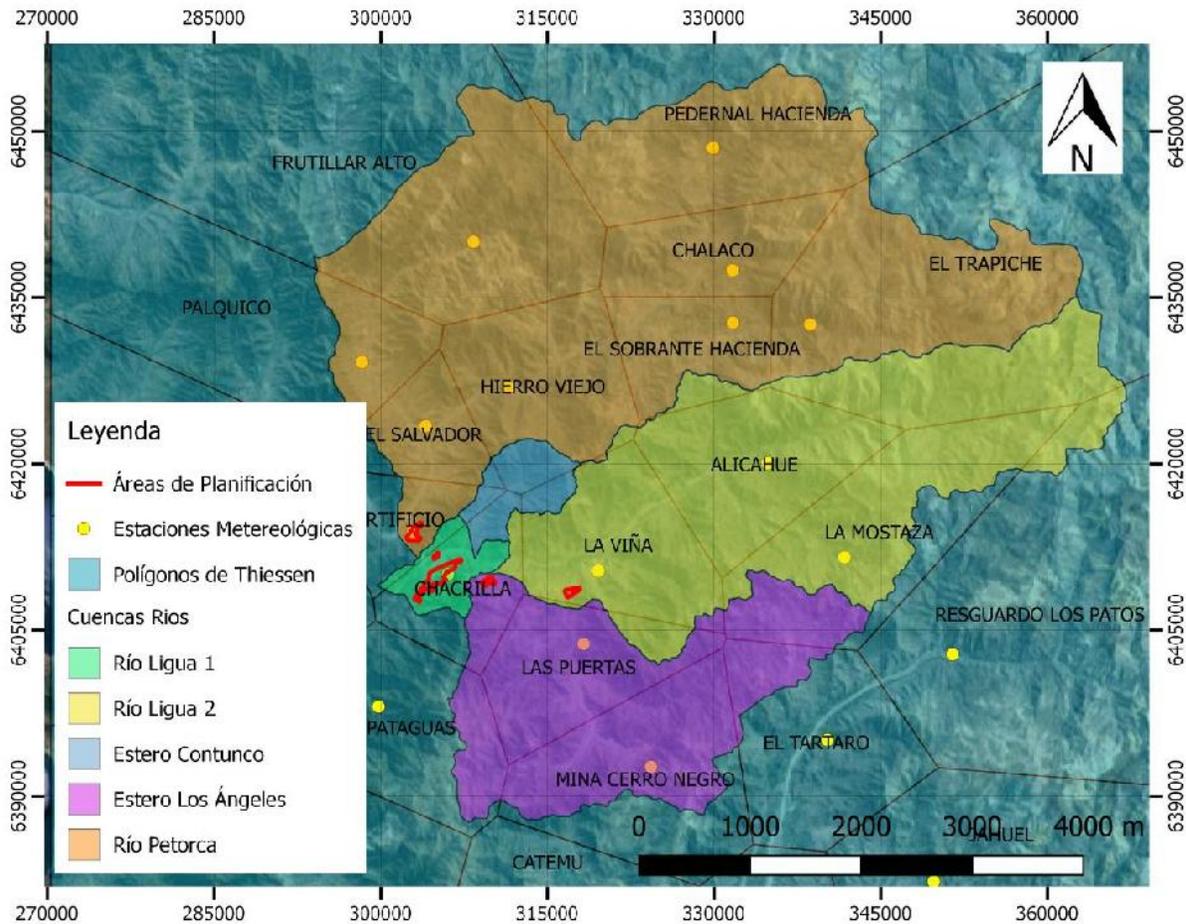
Periodo de Retorno (años)	Precipitaciones Máximas en 24 horas [mm]		
	Las Pataguas	Resguardo Los Patos	El Tártaro
2	51,4	43,8	42,5
5	78,0	65,6	56,9
10	95,6	80,0	64,8
20	112,6	93,8	71,5
50	134,5	111,7	79,2
100	150,9	125,1	84,4

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA.

Para el caso de cuencas asociadas a ríos o esteros, se estimaron los caudales según Fórmula Racional, Verni King y DGA-AC, definidos en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluiométrica (DGA, 1995).

Para estimar los caudales de crecida en las distintas cuencas se utilizaron las precipitaciones calculadas asociadas a los distintos periodos de retorno y duración 24 horas, utilizando el método de Thiessen para estimar la precipitación media de una superficie (Figura N° 22). Además, se calculó el tiempo de concentración para cada cuenca, utilizando los distintos métodos indicados en la metodología y los resultados se indican en la Tabla N° 37.

Figura N° 22: Polígonos de Thiessen



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 37: Determinación del Tiempo de Concentración

Cuenca	Tiempo de concentración [hr]			
	California	Giandotti	Norma Española	Adoptado
P1	6,79	9,66	10,48	8,98
L1	6,30	8,14	10,26	8,23
L2	5,45	7,54	9,25	7,41
ELA	4,31	7,09	6,89	6,10
EC	1,24	2,61	2,77	2,21

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando la Fórmula de Grunsky, así como el tiempo de concentración, las áreas de los polígonos de Thiessen y las precipitaciones, se estimó la intensidad de precipitaciones en cada cuenca, según se detalla en la Tabla N° 38.

Tabla N° 38: Cálculo Intensidad de Precipitaciones en las Cuencas

Cuenca	i (T=2 años) (mm/hr)	i (T=5 años) (mm/hr)	i (T=10 años) (mm/hr)	i (T=20 años) (mm/hr)	i (T=50 años) (mm/hr)	i (T=100 años) (mm/hr)
P1	2,8	4,4	5,5	6,6	8,0	9,1
L1	3,3	4,7	5,6	6,4	7,6	8,4
L2	3,3	4,8	5,8	6,8	8,1	9,0
ELA	3,9	5,9	7,2	8,5	10,1	11,3
EC	5,5	8,8	11,1	13,5	16,7	19,2

Fuente: Elaboración propia.

A partir de metodología descrita en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995), se estimaron los caudales asociados a las distintas cuencas. Los caudales determinados se incluyen en las Tabla N° 39, Tabla N° 40 y Tabla N° 41, dependiendo del método utilizado.

Tabla N° 39: Caudales Máximos para cada Cuenca, Estimados a Partir del Método Racional

Cuenca	Q (T=2 años) (m³/s)	Q (T=5 años) (m³/s)	Q (T=10 años) (m³/s)	Q (T=20 años) (m³/s)	Q (T=50 años) (m³/s)	Q (T=100 años) (m³/s)
P1	37,1	128,0	189,8	260,4	379,4	496,4
L1	25,7	80,4	114,3	151,9	214,1	274,2
L2	24,0	78,3	113,0	151,8	216,1	278,3
ELA	17,3	57,9	84,3	113,8	162,6	209,7
EC	2,8	9,8	14,7	20,6	30,6	40,6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 40: Caudales Máximos para cada Cuenca, Estimados a Partir del Método DGA-AC

Cuenca	Q (T=2 años) (m³/s)	Q (T=5 años) (m³/s)	Q (T=10 años) (m³/s)	Q (T=20 años) (m³/s)	Q (T=50 años) (m³/s)	Q (T=100 años) (m³/s)
P1	130,1	203,7	282,9	438,4	715,6	992,9
L1	71,8	103,2	125,9	176,3	256,8	329,9
L2	66,5	95,6	116,6	163,3	237,9	305,6
ELA	62,2	97,3	135,2	209,5	341,9	474,4
EC	3,0	8,6	15,0	25,1	44,8	65,8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 41: Caudales Máximos para cada Cuenca, Estimados a Partir del Método Verni y King Modificado

Cuenca	Q (T=2 años) (m³/s)	Q (T=5 años) (m³/s)	Q (T=10 años) (m³/s)	Q (T=20 años) (m³/s)	Q (T=50 años) (m³/s)	Q (T=100 años) (m³/s)
P1	44,59	171,23	267,53	382,89	584,56	788,37
L1	32,27	109,56	162,48	223,63	327,65	430,40
L2	28,37	101,32	153,19	213,64	316,94	419,30
ELA	20,13	74,26	113,36	158,99	236,89	314,02
EC	2,43	9,53	15,19	22,18	34,75	47,79

Fuente: Elaboración propia.

Dadas las recomendaciones de la DGA en su manual, se adoptan los caudales estimados a partir del método DGA-AC, cuyos resultados corresponden al caso más desfavorable en comparación con los estimados a partir de la fórmula de Verni y King Modificada y la Fórmula Racional.

Al comparar estos valores con los estimados a partir de la información fluviométrica, se verifica que los órdenes de magnitud para caudales de 10 años de periodo de retorno son similares, observándose que los caudales se encuentran sobreestimados para periodos de retorno mayores, y subestimados para periodos de retorno menores.

Para el caso de cuencas asociadas a quebradas, se estimaron los caudales según Fórmula Racional, de acuerdo a lo establecido en el libro de Ven Te Chow de Hidrología Aplicada, debido al tamaño de las cuencas asociadas. Esta resolución se tomó dado que los métodos propuestos en el Manual DGA para Cuencas sin Control Fluviométrico están desarrollados para cuencas con área mayor a 20 km², lo cual no corresponde a las quebradas aquí estudiadas.

Para estimar los caudales de crecida en las distintas cuencas se utilizan las precipitaciones calculadas asociadas a 10 años de periodo de retorno y duración 24 horas.

Se calculó el tiempo de concentración para cada cuenca, cuyos resultados se indican en la Tabla N° 42.

Tabla N° 42: Determinación del Tiempo de Concentración

Cuenca	Tiempo de concentración [hr]			
	California	Giandotti	Norma Española	Adoptado
A1	0,07	0,36	0,28	0,24
A2	0,17	0,59	0,57	0,44
A3	0,06	0,33	0,24	0,21
A4	0,05	0,29	0,18	0,17
A5	0,18	0,73	0,59	0,50
A6	0,11	0,55	0,39	0,35
S1	0,06	0,42	0,27	0,25
S2	0,06	0,27	0,22	0,18
S3	0,06	0,26	0,27	0,20
C1	0,08	0,45	0,35	0,30
C2	0,05	0,33	0,24	0,21
C3	0,06	0,31	0,26	0,21
C4	0,03	0,21	0,15	0,13
C5	0,04	0,26	0,17	0,16
C6	0,02	0,22	0,09	0,11
C7	0,19	0,67	0,64	0,50
C8	0,24	0,82	0,80	0,62
C9	0,13	0,54	0,47	0,38
C10	0,04	0,27	0,16	0,16
C11	0,06	0,43	0,26	0,25
C12	0,07	0,28	0,27	0,20
C13	0,04	0,25	0,17	0,15
C14	0,04	0,27	0,17	0,16
C15	0,19	0,82	0,62	0,54
Q1	0,03	0,25	0,13	0,14
Q2	0,07	0,30	0,25	0,21
Q3	0,14	0,51	0,50	0,38
Q4	0,11	0,41	0,44	0,32
Q5	0,17	0,43	0,63	0,41
Q6	0,14	0,51	0,53	0,39
V1	0,14	0,63	0,46	0,41
V2	0,24	1,07	0,74	0,68
V3	0,04	0,31	0,15	0,17
V4	0,04	0,31	0,13	0,16
V5	0,02	0,25	0,13	0,13

Fuente: Elaboración propia.

Luego, se estimó el coeficiente de escorrentía a partir de la información del Manual de Carreteras Volumen 3 (2016), el cual coincide con el orden de magnitud de los valores establecidos por Ven Te Chow, para zonas de pendientes medias a altas. Utilizando la Fórmula de Grunsky, así como el tiempo de concentración y las precipitaciones, se estima la intensidad de precipitaciones en cada cuenca, con lo que se estimaron los caudales asociados a lluvias de 10 años de periodo de retorno.

Para estimar los caudales asociados a otros periodos de retorno, se utilizaron los Coeficientes de Frecuencia establecidos por la DGA, según zonas homogéneas (Tabla N° 43). Los caudales determinados se incluyen en la Tabla N° 44.

Tabla N° 43: Coeficientes de Frecuencia según Zonas Homogéneas

Zona	Nombre	Duración	Coeficiente de Duración	Coeficientes de Frecuencia				
				T = 2 años	T = 5 años	T = 20 años	T = 50 años	T = 100 años
V.1	Río Petorca	1 día	1,000	0,553	0,816	1,184	1,431	1,625
V.2	Río La Ligua	1 día	1,000	0,628	0,865	1,116	1,248	1,337

Fuente: Manual DGA.

Tabla N° 44: Estimación de Caudales (Quebradas) mediante Método Racional

Cuenca	Intensidad (mm/hr)	C (Manual de Carreteras)	Q (T=2 años) (m ³ /s)	Q (T=5 años) (m ³ /s)	Q (T=10 años) (m ³ /s)	Q (T=20 años) (m ³ /s)	Q (T=50 años) (m ³ /s)	Q (T=100 años) (m ³ /s)
A1	36,8	0,50	0,9	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6
A2	27,0	0,50	3,1	4,6	5,7	6,7	8,1	9,2
A3	39,3	0,42	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1
A4	43,1	0,50	0,4	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3
A5	25,3	0,50	3,7	5,5	6,7	8,0	9,6	10,9
A6	30,4	0,42	0,7	1,0	1,2	1,4	1,7	1,9
S1	35,7	0,50	2,0	2,9	3,6	4,2	5,1	5,8
S2	41,9	0,50	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1	1,2
S3	39,9	0,50	0,8	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4
C1	32,8	0,50	2,1	3,1	3,8	4,6	5,5	6,2
C2	39,4	0,50	1,2	1,8	2,2	2,6	3,1	3,5
C3	38,8	0,50	1,0	1,4	1,8	2,1	2,5	2,9
C4	49,4	0,50	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
C5	45,3	0,50	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1
C6	53,7	0,50	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,3
C7	25,3	0,50	4,0	5,9	7,3	8,6	10,4	11,8
C8	22,7	0,50	9,0	13,2	16,2	19,2	23,2	26,3
C9	29,0	0,50	3,0	4,4	5,3	6,3	7,7	8,7
C10	45,2	0,50	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4
C11	35,6	0,50	1,8	2,7	3,3	3,9	4,7	5,4
C12	39,6	0,50	0,6	0,9	1,0	1,2	1,5	1,7
C13	45,5	0,50	0,8	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5
C14	44,6	0,50	0,9	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6
C15	24,3	0,50	4,7	7,0	8,5	10,1	12,2	13,9
Q1	48,4	0,50	0,2	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7
Q2	39,3	0,50	0,6	0,9	1,1	1,3	1,5	1,8
Q3	28,9	0,50	1,8	2,7	3,3	4,0	4,8	5,4
Q4	31,6	0,50	2,1	3,1	3,8	4,5	5,4	6,1
Q5	27,8	0,50	1,7	2,4	3,0	3,6	4,3	4,9
Q6	28,5	0,42	1,4	2,1	2,6	3,0	3,7	4,2
V1	24,4	0,42	0,9	1,4	1,7	2,0	2,4	2,8
V2	18,8	0,42	2,2	3,3	4,1	4,8	5,8	6,6
V3	37,8	0,42	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5
V4	38,9	0,42	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
V5	42,5	0,42	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que se compararon los valores obtenidos utilizando la metodología del Método Racional con el del Hidrograma Unitario Sintético (HUS), observándose que los valores del Método Racional son mayores que los estimados por el HUS, pero dentro del mismo orden de magnitud.

3.1.4 Modelación Hidráulica

A continuación se presentan la topografía, condiciones de borde, coeficientes de Manning y resultados de la modelación hidráulica. Se destaca que la modelación fue realizada considerando las condiciones actuales de cobertura del suelo, por lo que es necesario mantener las dichas condiciones y evitar utilizar las riberas como depósitos de basura.

a. Topografía

Para la construcción del Plan Regulador de Cabildo, que involucra las localidades de Artificio, San José, Cabildo, El Quemado y La Vega, se necesita generar un modelo planimétrico y altimétrico digital. En noviembre de 2016 se solicita la ejecución de un vuelo aerofotogramétrico a FOTOSIG E.I.R.L. Dicho modelo es generado con curvas de nivel cada 2 metros (escala 1:2000).

Dado que es necesario realizar un estudio de riesgo de inundación y debido a la escala del vuelo fotogramétrico la cual no permite detallar claramente el cauce de los ríos es necesario realizar un levantamiento topográfico de mayor definición en los cauces. Este es encargado a EVOLVENTE INGENIERÍA y entrega mejor definición en estos sectores para el estudio hidráulico.

Además se realizó un catastro de canales existentes en las zonas de estudio, considerando las necesidades en el estudio hidráulico.

b. Condiciones de borde

En todos los modelos se impuso como condición de borde altura normal tanto aguas arriba como aguas abajo del escurrimiento. En la Tabla N° 45 se presentan las pendientes utilizadas en cada caso.

Tabla N° 45: Condiciones de borde de modelos hidráulicos

Modelo	Pendiente aguas arriba [m/m]	Pendiente aguas abajo [m/m]
V1	0,117	0,080
Q1	0,360	0,170
Q2y3	0,550	0,120
	0,280	
Q4	0,370	0,100
Q5	0,300	0,08
S2	0,540	0,100
S3	0,138	0,182
A1	0,172	0,122
A2	0,568	0,105
A3	0,794	0,305
A4	0,873	0,254
A5	0,066	0,051
A6	0,055	0,566
C1	0,178	0,151
C2	0,390	0,148
C3	0,210	0,260
C4	0,560	0,193
C5	0,787	0,265
C6	0,626	0,585
C7	0,174	0,052
C8	0,229	0,120
C9	0,165	0,068
C10	0,592	0,059
C11	0,145	0,182
	0,202	
C12	0,913	0,167
C13	0,637	0,244
C14	0,641	0,188
L1	0,011	0,007
L2	0,009	0,004
P1	0,008	0,031

Fuente: Elaboración propia.

c. Coeficientes de Manning

Una vez ya definidas las condiciones de borde, resta determinar los coeficientes de rugosidad de Manning, según se señala a continuación:

Sector La Vega

En la Figura N° 23 se presenta la comparación de fotografías del sector La Vega con una del arroyo Beaver (RCNC, 1967) cuyo coeficiente de Manning calculado es 0,043. Mientras que en la Tabla N° 46 se presenta la estimación del mismo coeficiente mediante

el método de Cowan para el lecho y las riberas de la quebrada. Dado que la determinación mediante este método se realiza a través de rangos rotulados, se calculó un valor máximo y mínimo.

Figura N° 23: Izquierda vista del Arroyo Beaver (RCNC, 1967). Derecha fotografías sector La Vega (26-09-2016)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 46: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Sector La Vega

Parámetro	Lecho		Ribera	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
n0	0,020	0,020	0,020	0,020
n1	0,000	0,005	0,000	0,005
n2	0,000	0,000	0,000	0,000
n3	0,000	0,015	0,010	0,015
n4	0,005	0,010	0,010	0,025
m	1	1	1	1
n	0,025	0,050	0,0400	0,0650
n promedio	0,0375		0,0525	

Fuente: Elaboración propia.

De este modo se tienen dos coeficientes de rugosidad. Por motivos de seguridad, es decir maximizando la elevación de la inundación, se utilizará $n=0,043$ para el lecho y $n=0,0525$ para las riberas.

Sector El Quemado

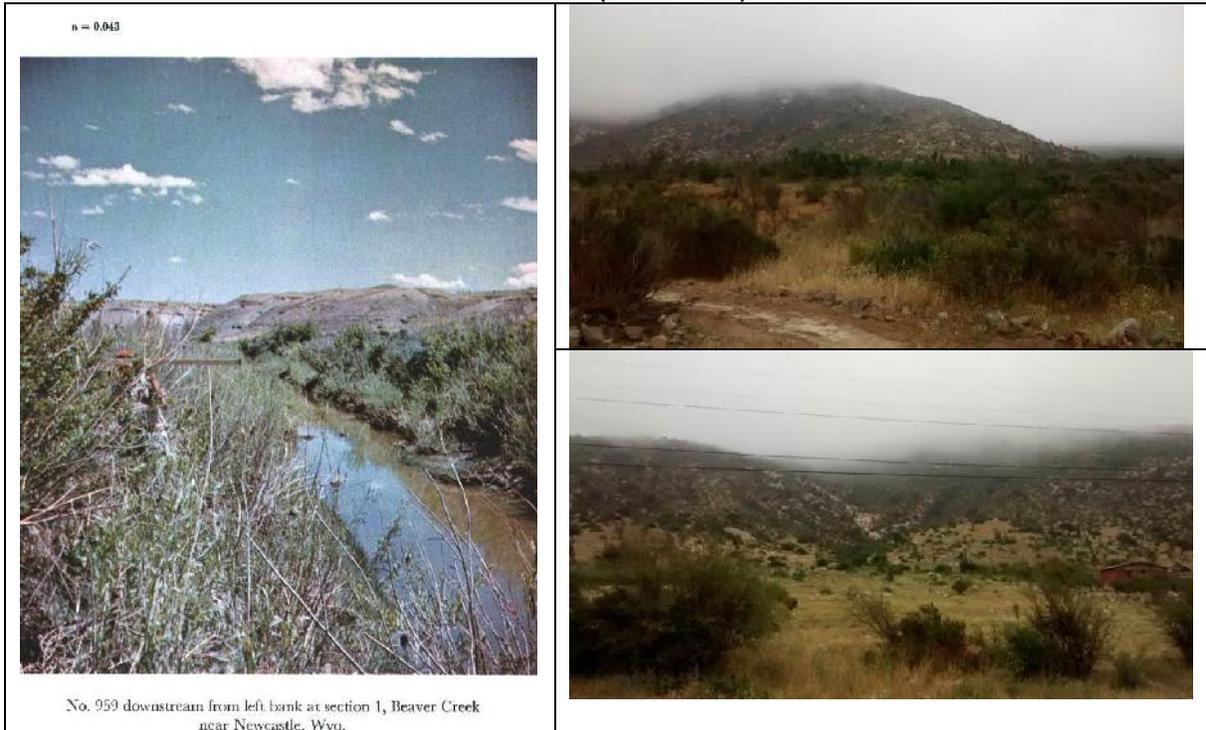
Realizando la misma metodología antes presentada, en la Tabla N° 47 se presentan los coeficientes estimados por el método de Cowan tanto para el lecho como para las riberas de las quebradas del sector. En la Figura N° 24 se presenta la comparación de fotografías del sector El Quemado con una del mismo arroyo Beaver ($n=0,043$).

Tabla N° 47: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Sector El Quemado

Parámetro	Lecho		Ribera	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
n0	0,020	0,020	0,020	0,020
n1	0,000	0,005	0,000	0,005
n2	0,000	0,000	0,000	0,000
n3	0,000	0,015	0,010	0,015
n4	0,005	0,010	0,010	0,025
m	1	1	1	1
n	0,0250	0,0500	0,0400	0,0650
n promedio	0,0375		0,0525	

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 24: Izquierda vista del Arroyo Beaver (RCNC, 1967). Derecha fotografías sector El Quemado (26-09-2016)



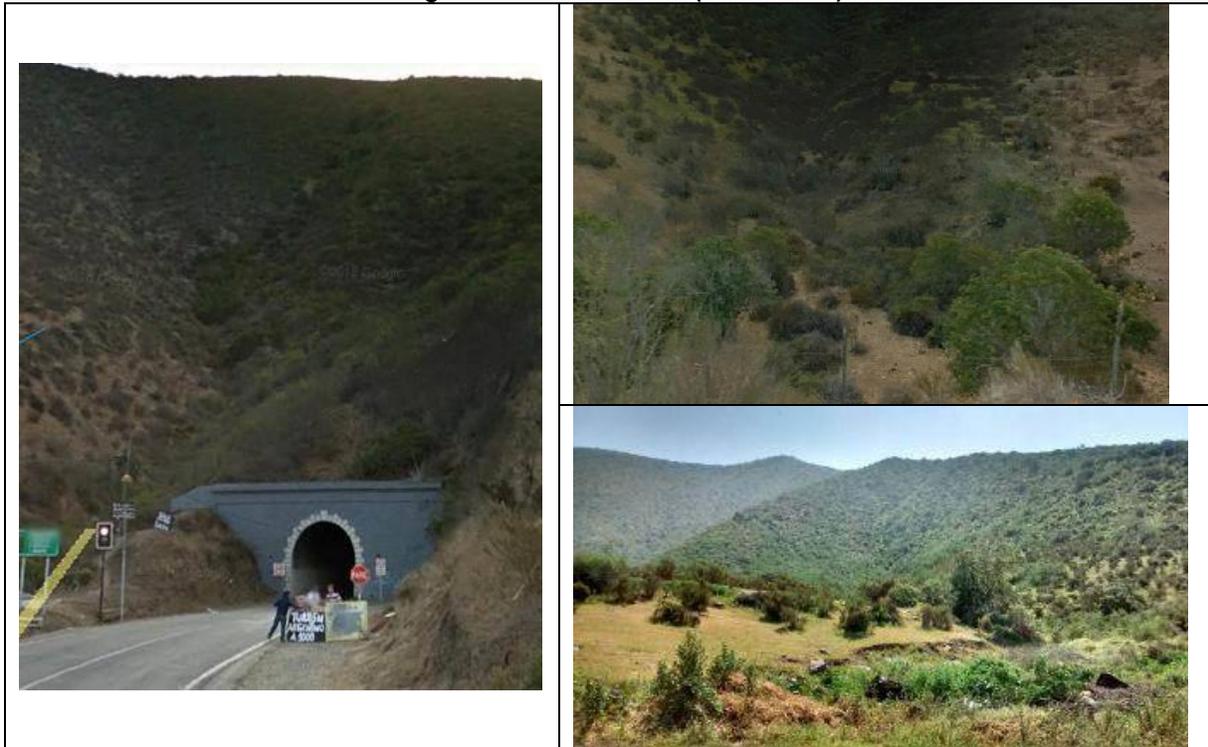
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se adopta un coeficiente de Manning $n=0,043$ para el lecho y $n=0,0525$ para las riberas.

Sector San José

En la Tabla N° 48 se presenta la estimación del coeficiente de Manning mediante el método de Cowan para el sector San José. Cabe destacar que en este caso el coeficiente para la ribera es menor que el del lecho dada la presencia de mayor vegetación en este. El coeficiente de este sector no se cuantifica mediante la metodología de RCNC (1967), debido a la ausencia en este de morfologías similares a las del sector estudiado. En la Figura N° 25 se presentan fotografías del sector San José.

Figura N° 25: Izquierda y derecha arriba vista de sector San José (Google Earth). Derecha abajo fotografías mismo sector (26-09-2016)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 48: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Sector San José

Parámetro	Lecho		Ribera	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
n0	0,020	0,020	0,020	0,020
n1	0,001	0,005	0,001	0,005
n2	0,001	0,005	0,001	0,005
n3	0,000	0,004	0,000	0,004
n4	0,025	0,050	0,010	0,025
m	1	1	1	1
n	0,0470	0,0840	0,0320	0,0590
n promedio	0,0655		0,0455	

Fuente: Elaboración propia.

Sector Cabildo

En la Tabla N° 49 se presentan los coeficientes estimados por el método de Cowan tanto para el lecho como para las riberas de las quebradas. En la Figura N° 26 se presentan fotografías del Sector Cabildo.

Finalmente se opta por un $n=0,085$ para el lecho y $n=0,090$ para la ribera. Por su parte los canales adoptan un coeficiente de manning $n=0,014$ equivalente al coeficiente máximo (entre mínimo, medio y máximo) de hormigón de alcantarilla con curvas, conexiones y parcialmente obstruida definido según el Volumen 3 del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (2006).

Tabla N° 49: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Sector Cabildo

Parámetro	Lecho		Ribera	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
n0	0,020	0,020	0,020	0,020
n1	0,000	0,005	0,005	0,010
n2	0,000	0,005	0,005	0,010
n3	0,000	0,005	0,005	0,010
n4	0,025	0,050	0,020	0,040
m	1	1	1	1
n	0,045	0,085	0,055	0,090

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 26: Izquierda canal en Sector Cabildo (13-03-2017). Derecha lecho aguas arriba canal en Sector Cabildo (Google Earth).



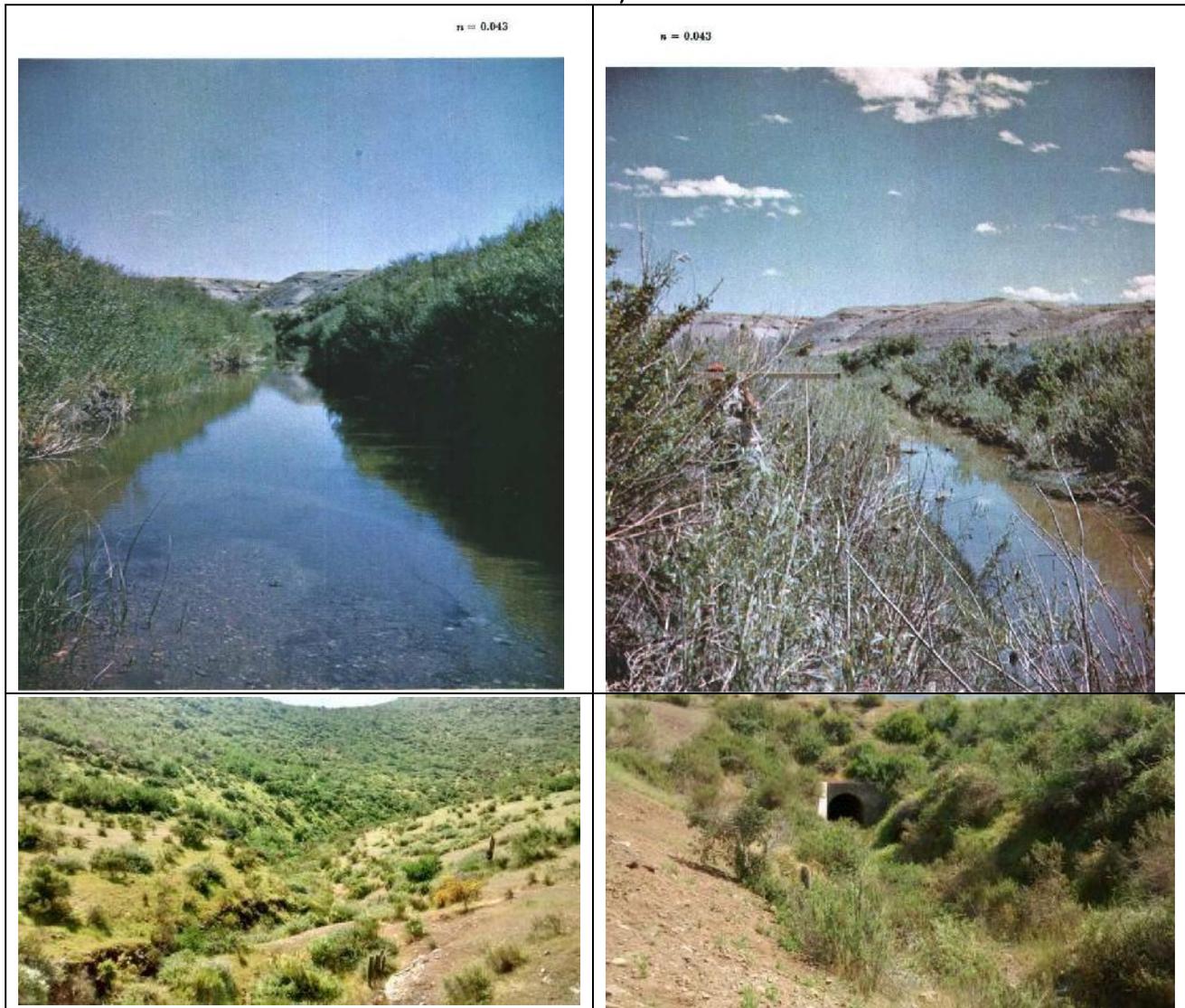
Fuente: Elaboración propia.

Sector Artificio

En la Tabla N° 50 se presentan los coeficientes estimados por el método de Cowan tanto para el lecho como para las riberas de las quebradas. En la Figura N° 27 se presentan fotografías del Sector Artificio comparadas con el Arroyo Beaver.

Finalmente se opta por un $n=0,108$ para el lecho y $n=0,100$ para la ribera. Por su parte los canales adoptan el mismo coeficiente de manning determinado para el Sector Cabildo, $n=0,014$.

Figura Nº 27: Arriba vistas del Arroyo Beaver (RCNC, 1967). Abajo fotografías sector Artificio (26-09-2016)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 50: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Sector Artificio

Parámetro	Lecho		Ribera	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
n0	0,020	0,020	0,020	0,020
n1	0,005	0,010	0,001	0,005
n2	0,002	0,005	0000	0000
n3	0,000	0,004	0,000	0,004
n4	0,050	0,100	0,050	0,1
m	1	1	1	1
n	0,077	0,139	0,071	0,129
n promedio	0,108		0,100	

Fuente: Elaboración propia.

Río Petorca en Artificio

En la Tabla N° 51 se presentan los coeficientes estimados por el método de Cowan tanto para el lecho como para las riberas del río. En la Figura N° 28 se presenta la comparación de fotografías del Río Petorca en Artificio con una del Río Middle Fork Flathead (n=0,041).

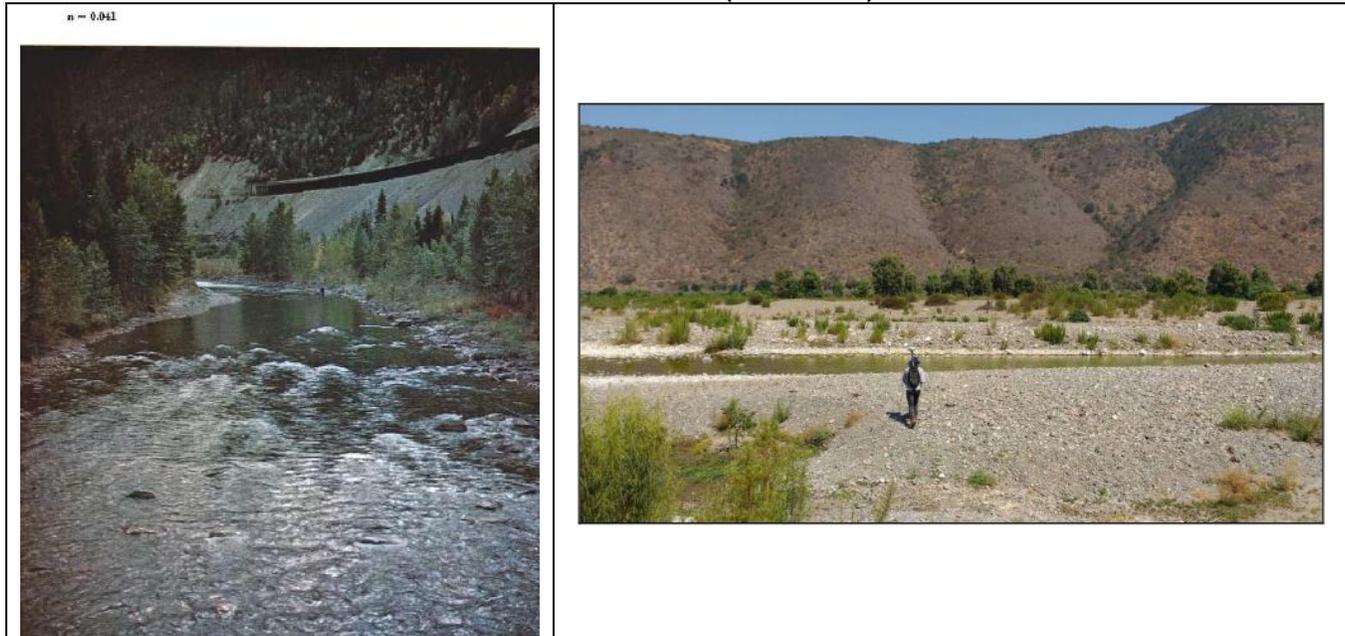
Finalmente se opta por un n=0,044 para el lecho y n=0,059 para la ribera.

Tabla N° 51: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Río Petorca en Artificio

Parámetro	Lecho		Ribera	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
n0	0,024	0,028	0,024	0,028
n1	0,000	0,001	0,000	0,001
n2	0,000	0,001	0,000	0,001
n3	0,000	0,004	0,000	0,004
n4	0,002	0,01	0,01	0,025
m	1	1	1	1
n	0,026	0,044	0,034	0,059

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 28: Izquierda vista del Río Middle Fork Flathead; (RCNC, 1967). Derecha fotografía Río Petorca en Artificio (13-03-2017)



Fuente: Elaboración propia.

Río Ligua en Cabildo

En la Tabla N° 52 se presentan los coeficientes estimados por el método de Cowan tanto para el lecho como para las riberas del río. En la Figura N° 29 se presenta la comparación de fotografías del Río Ligua en Cabildo con una del Río Middle Fork Flathead ($n=0,041$).

Finalmente se opta por un $n=0,044$ para el lecho y $n=0,084$ para la ribera.

Tabla N° 52: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Río Ligua en Cabildo

Parámetro	Lecho		Ribera	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
n0	0,024	0,028	0,024	0,028
n1	0,000	0,001	0,000	0,001
n2	0,000	0,001	0,000	0,001
n3	0,000	0,004	0,000	0,004
n4	0,002	0,01	0,025	0,050
m	1	1	1	1
n	0,026	0,044	0,049	0,084

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 29: Izquierda vista del Río Middle Fork Flathead; (RCNC, 1967). Derecha fotografías Río Ligua en Cabildo (13-03-2017)



Fuente: Elaboración propia.

Río Ligua en El Quemado

En la Tabla N° 53 se presentan los coeficientes estimados por el método de Cowan tanto para el lecho como para las riberas del río. En la Figura N° 30 se presenta la comparación de fotografías del Río Ligua en El Quemado con una del Río Middle Fork Flathead (n=0,041).

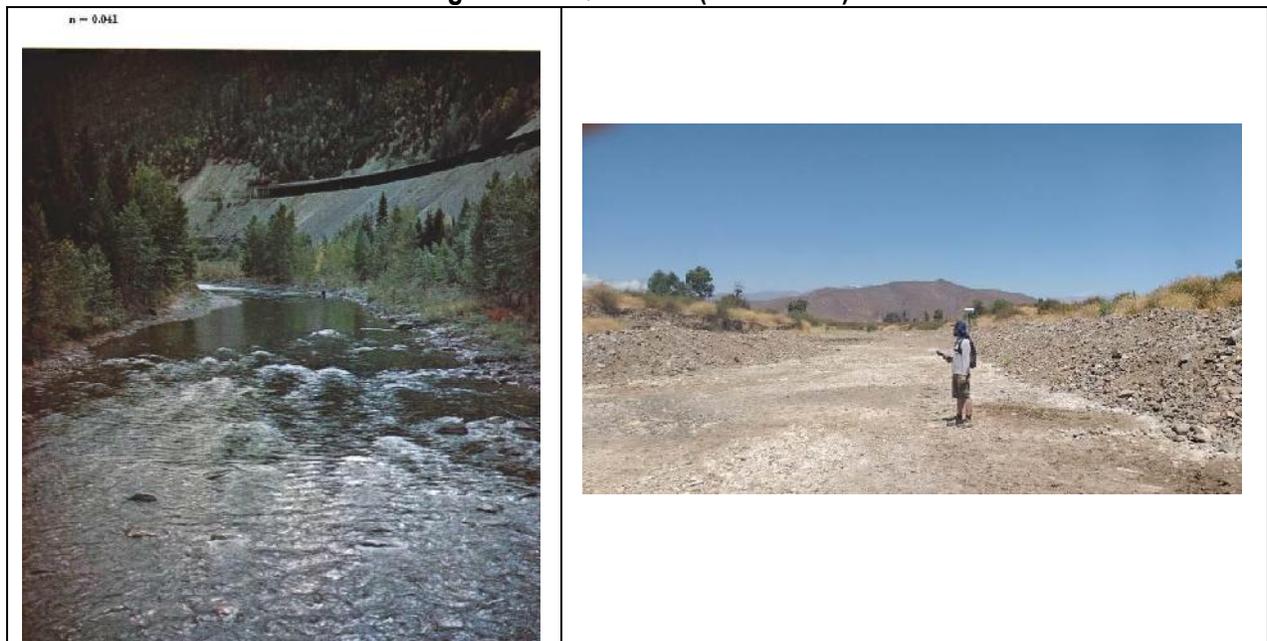
Finalmente se opta por un n=0,044 para el lecho y n=0,059 para la ribera.

Tabla N° 53: Estimación de coeficiente de Manning mediante método Cowan – Río Ligua en El Quemado

Parámetro	Lecho		Ribera	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
n0	0,024	0,028	0,024	0,028
n1	0,000	0,001	0,000	0,001
n2	0,000	0,001	0,000	0,001
n3	0,000	0,004	0,000	0,004
n4	0,002	0,01	0,01	0,025
m	1	1	1	1
n	0,026	0,044	0,034	0,059

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 30: Izquierda vista del Río Middle Fork Flathead; (RCNC, 1967). Derecha fotografía Río Ligua en El Quemado (13-03-2017)



Fuente: Elaboración propia.

d. Resultados

Río Petorca en Artificio

La modelación del Río Petorca en Artificio indica que el régimen corresponde a río hasta el puente, ubicado entre los perfiles 3 y 4 (desde abajo), en dicho punto se genera crisis y se tiene régimen de torrente hacia aguas abajo. El ancho de inundación varía entre 117 y 444 metros para el caso de un período de retorno de 100 años y entre 71 y 274 para el caso

de 2 años de período de retorno. El ancho máximo de inundación para el río Petorca en Artificio en el escenario T=100 se presenta en la Tabla N° 54.

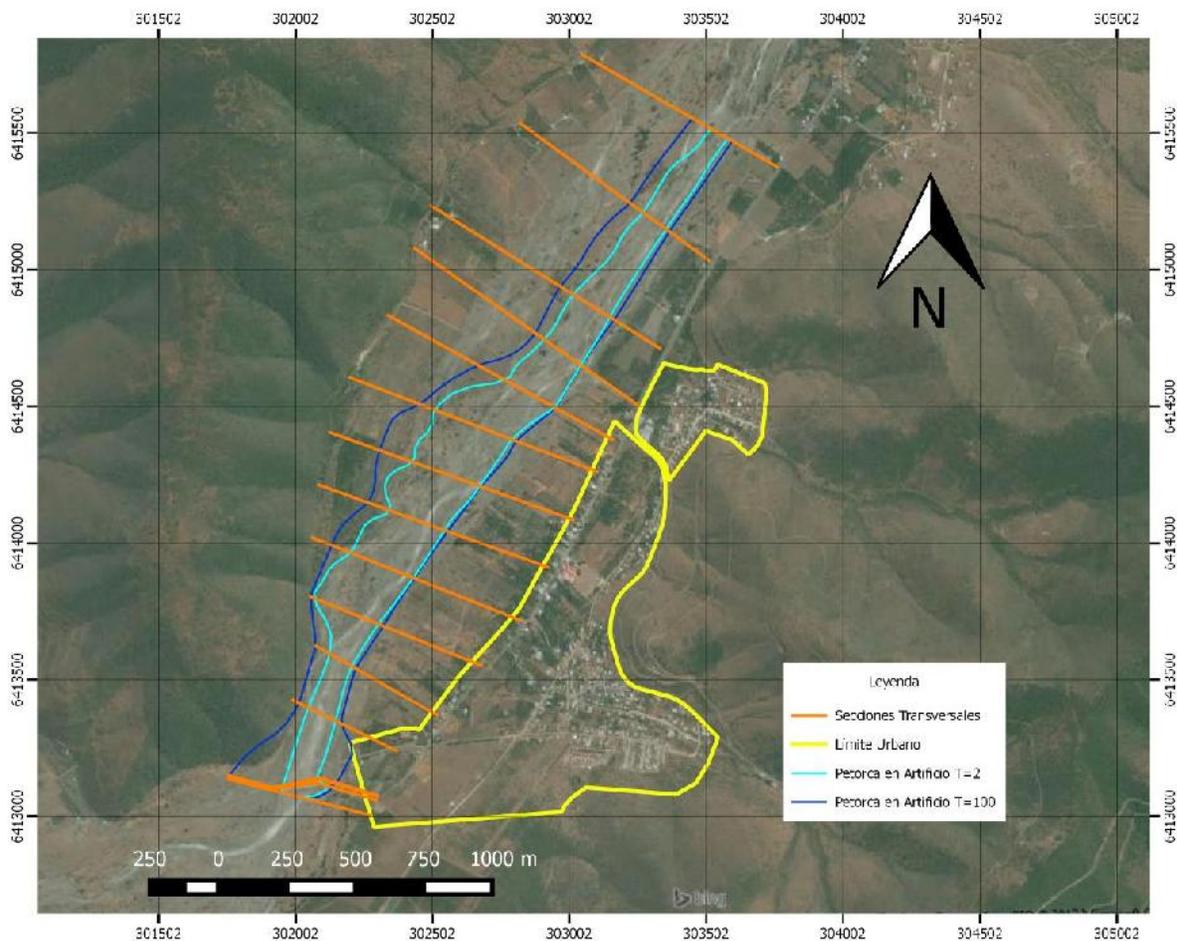
Tabla N° 54: Ancho máximo de inundación – Río Petorca en Artificio

Río	Ancho máximo [m]
P1	444

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 31 se presentan los resultados de la modelación para T=2 y T=100.

Figura N° 31: Resultados modelación Río Petorca en Artificio



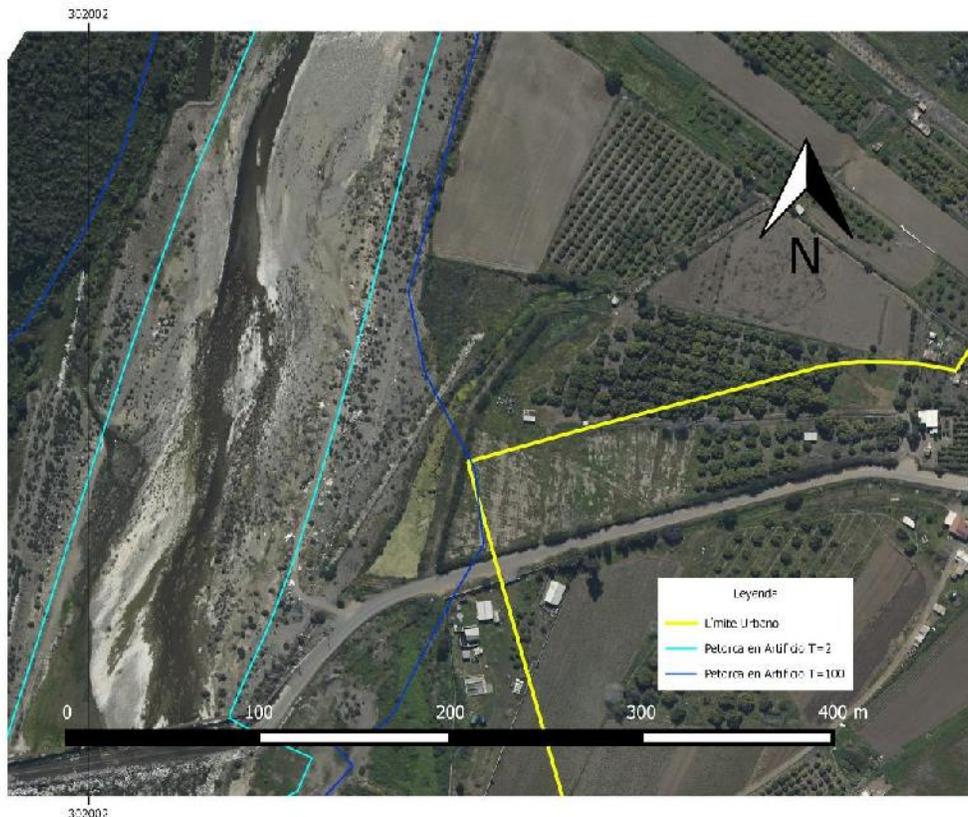
Fuente: Elaboración propia.

Según se puede observar, el área de inundación no afecta el límite urbano para un periodo de retorno de 100 años. Al respecto, es importante mencionar que según se señaló en taller con la comunidad por motivo de la Evaluación Ambiental Estratégica

(EAE), hubo inundaciones antiguamente en Artificio. Al respecto, y según lo conversado posteriormente con personas de la comunidad, dicha inundación sucedió en los años 1971 y 1987. En particular, según lo señalado, el año 1987 el agua llegó hasta la carretera por un pasaje cercano a los pozos del agua potable rural, pero posterior a ese evento se hizo una defensa sin enrocado. Por otra parte, y según consta en PRC vigente de Cabildo, el evento de dicho año se originó dadas condiciones extremas, ya que las temperaturas fueron más altas de lo normal, produciéndose lluvias en áreas que se encontraban con nieve, lo que ocasionó el derretimiento de ella y un aumento importante de la escorrentía, por sobre lo normal generado por un evento de igual magnitud de precipitaciones.

Sin perjuicio de lo anterior, al nor-poniente del límite urbano propuesto se puede observar que el área de inundación bordea dicho límite, según se muestra en la Figura N° 32, donde se presenta una ampliación de dicha zona.

Figura N° 32: Ampliación vista resultados modelación Río Petorca en Artificio



Fuente: Elaboración propia.

Río Ligua en Cabildo

La modelación del Río Ligua en Cabildo indica que el régimen corresponde principalmente a río, salvo en el perfil inmediatamente aguas abajo del puente existente, el cual genera

crisis y régimen de torrente. El ancho de inundación varía entre 74 y 495 metros para el caso de un período de retorno de 100 años y entre 48 y 170 para el caso de 2 años de período de retorno. El ancho máximo de inundación para el río Ligua en Cabildo en el escenario T=100 se presenta en la Tabla N° 55.

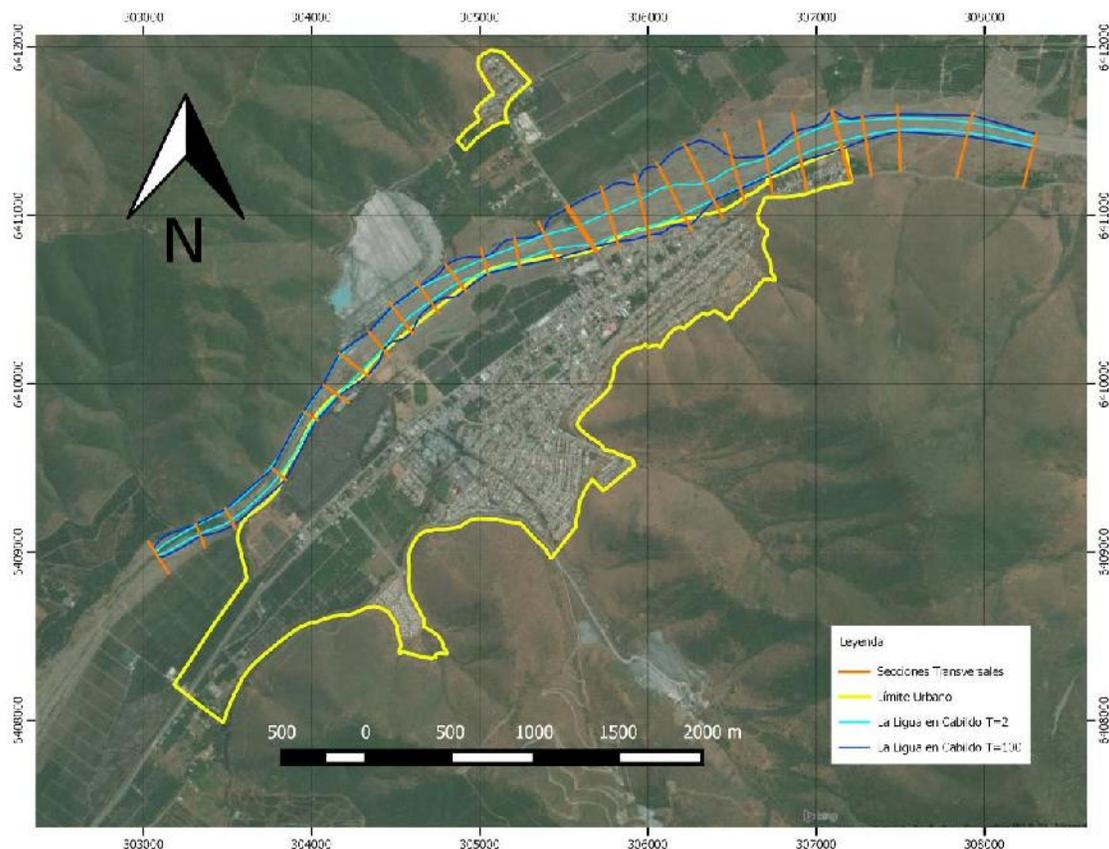
Tabla N° 55: Ancho máximo de inundación – Río Ligua en Cabildo

Río	Ancho máximo [m]
L1	495

Fuente: Elaboración propia.

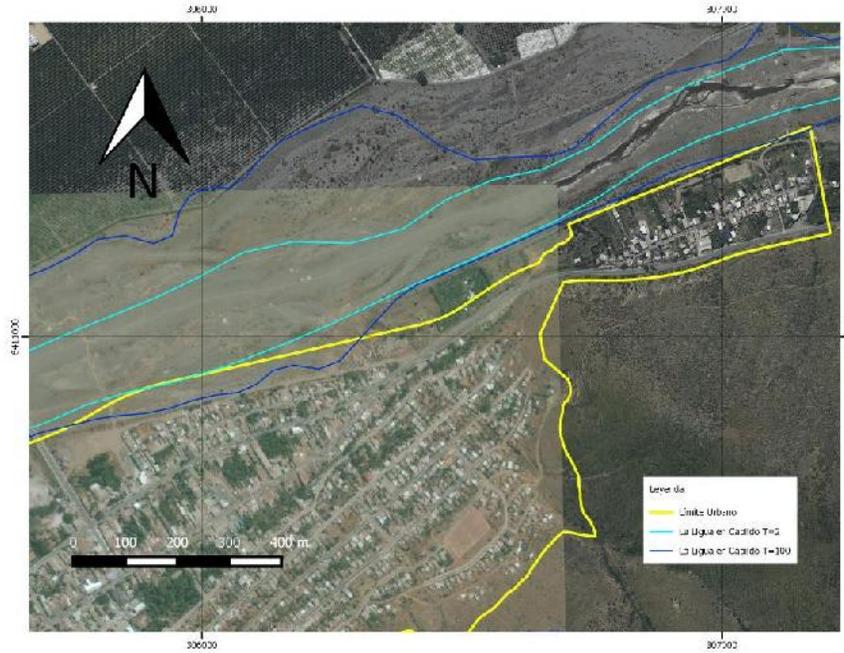
En la Figura N° 33 se presentan los resultados de la modelación para T=2 y T=100. En la Figura N° 34, Figura N° 35 y Figura N° 36 se presenta una ampliación de las zonas en las cuales el área de inundación afecta someramente el límite urbano, a lo largo del río Ligua. Al respecto, es importante mencionar que dichas áreas no se encuentran construidas, respetándose el lecho del río.

Figura N° 33: Resultados modelación Río Ligua en Cabildo



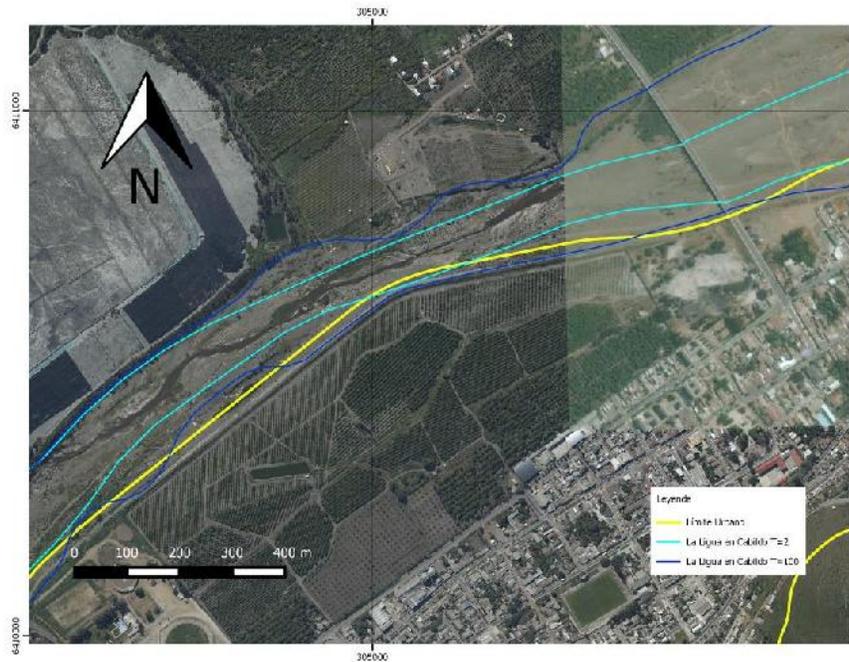
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 34: Ampliación vista resultados modelación Río Ligua en Cabildo 1



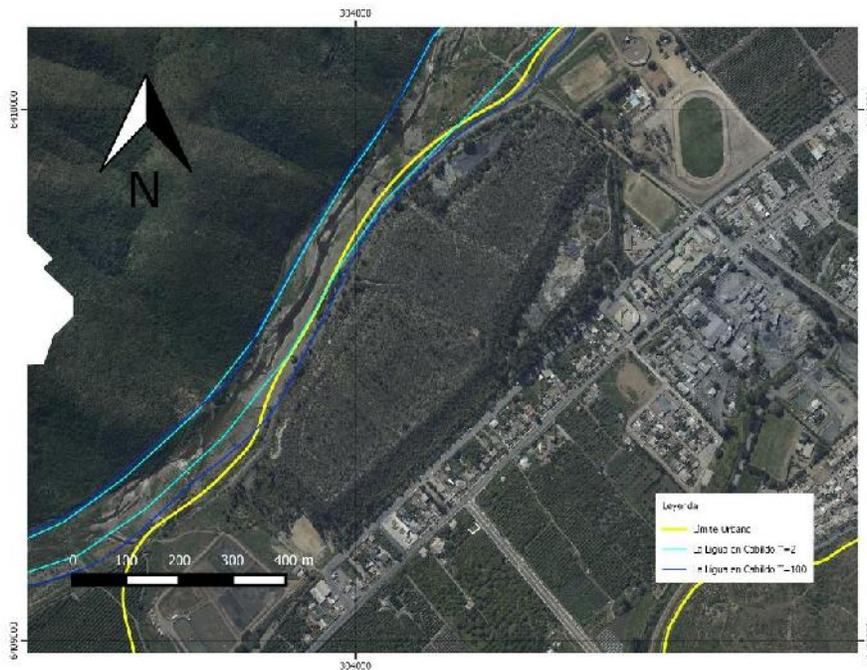
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 35: Ampliación vista resultados modelación Río Ligua en Cabildo 2



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 36: Ampliación vista resultados modelación Río Ligua en Cabildo 3



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, se puede señalar que los problemas de inundación a los que se hace alusión en el PRC vigente de Cabildo en la zona nororiente de la ciudad se solucionan con la defensa fluvial realizada en dicha zona, lo que es consistente con la modelación realizada.

Es importante mencionar que el área de inundación para periodo de retorno de 100 años se encuentra cercana al tranque de relaves de la Minera Las Cenizas. De acuerdo al levantamiento topográfico existe una diferencia de cotas, sin embargo y pese a que esta área no está considerada dentro del PRC se debe tener presente dicha situación.

Río Ligua en El Quemado

La modelación del Río Ligua en El Quemado indica que el régimen corresponde principalmente a río. En ciertos perfiles, dependiendo del caudal, se genera crisis, en consecuencia altura de torrente, pero inmediatamente vuelve la altura de río. El ancho de inundación varía entre 173 y 261 metros para el caso de un período de retorno de 100 años y entre 21 y 176 para el caso de 2 años de período de retorno. El ancho máximo de inundación para el río Ligua en El Quemado en el escenario T=100 se presenta en la Tabla N° 56.

Tabla N° 56: Ancho máximo de inundación – Río Ligua en El Quemado

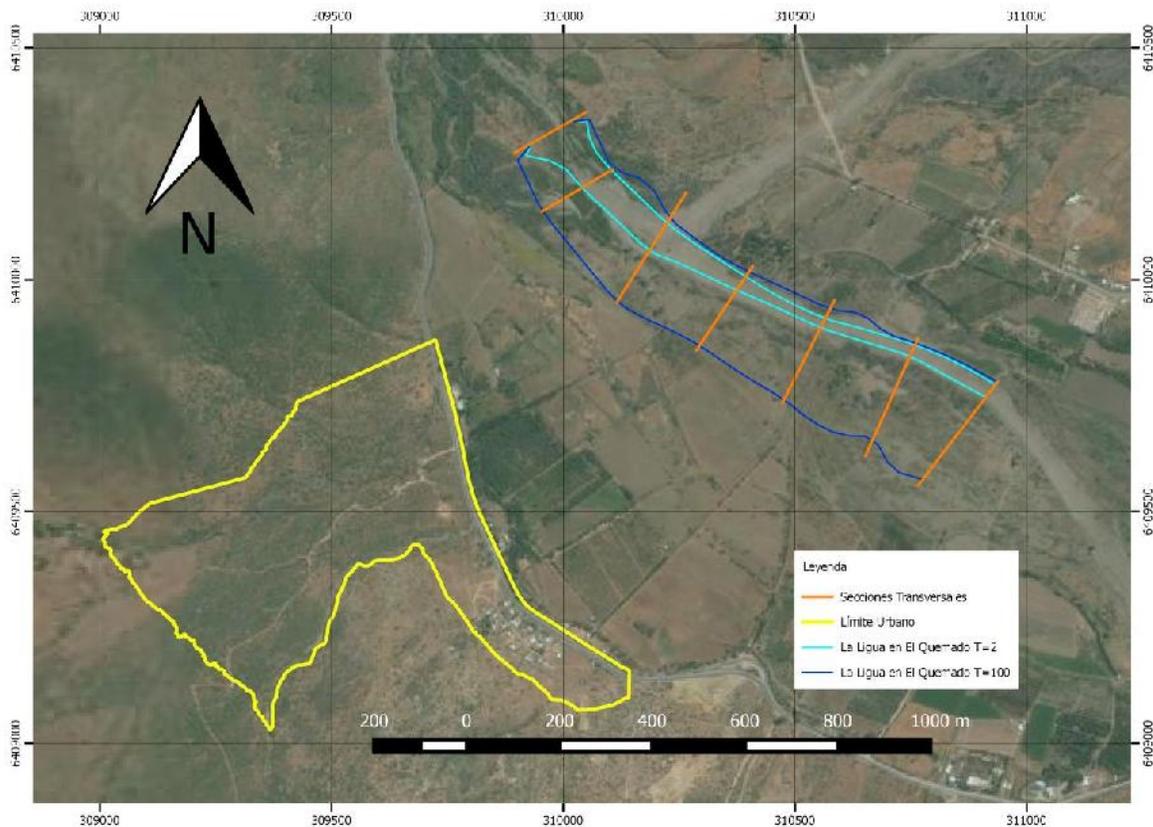
Río	Ancho máximo [m]
L2	261

Fuente: Elaboración propia.

Se debe destacar que los tres perfiles finales, comenzando desde aguas abajo, se desbordan en la modelación. De todas formas la elevación a la que llega el pelo de agua (222,74 msnm para T=100 años) es menor a la de la menor curva de nivel en el límite urbano (238 msnm), por lo tanto esta no se ve afectada.

En la Figura N° 37 se presentan los resultados de la modelación para T=2 y T=100.

Figura N° 37: Resultados modelación Río Ligua en El Quemado



Fuente: Elaboración propia.

Quebradas Sector El Quemado

La modelación de las quebradas del sector El Quemado indica que el régimen corresponde siempre a torrente. El área de inundación está bien definida en todos los

casos. El ancho máximo de inundación para cada Quebrada en el escenario T=100 se presenta en la Tabla N° 57.

Es importante señalar que se presenta el ancho máximo de las quebradas Q2 y Q3 juntas toda vez que ambas quebradas se unen dentro del límite urbano. Por otra parte, el modelo de la quebrada Q5 considera el aporte de la quebrada Q4 toda vez que ambas quebradas se unen dentro del límite urbano.

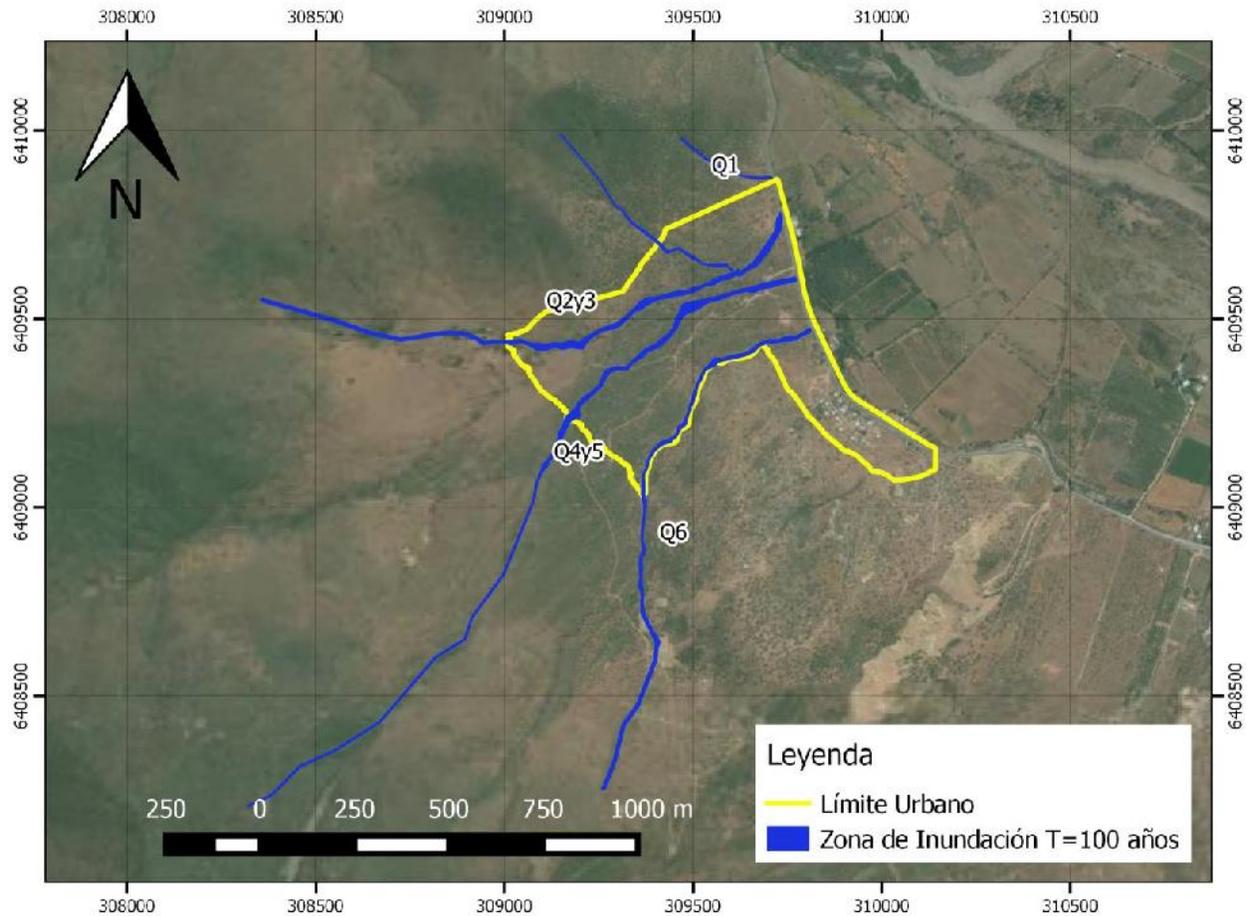
Tabla N° 57: Ancho máximo de inundación - Quebradas Sector El Quemado

Quebrada	Ancho máximo [m]
Q1	2,94
Q2+3	8,17
Q4+5	27,0
Q6	12,34

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 38 se presentan los resultados de la modelación para T=100.

Figura N° 38: Resultados modelación quebradas en sector El Quemado T=100



Fuente: Elaboración propia.

Quebradas Sector San José

La modelación de las quebradas del sector El San José indica que el régimen corresponde siempre a torrente a excepción del perfil de más aguas abajo de la quebrada S3 para caudales de períodos de retorno sobre 50 años. El área de inundación está bien definida en los dos casos, tal como se presenta en la Figura N° 39. El ancho máximo de inundación en el escenario T=100 corresponde a 16 m y 35 m para las quebradas S2 y S3 respectivamente. El ancho máximo de inundación para cada Quebrada en el escenario T=100 se presenta en la Tabla N° 58.

Cabe destacar que no se realizó modelación hidráulica de la quebrada S1 puesto que a partir de las curvas de nivel levantadas y la ortofoto asociada no se pudo observar una zona de escurrimiento preferente. Adicionalmente, según lo observado en la visita a terreno, no se reconoció infraestructura específica para la evacuación de las aguas provenientes de la quebrada. Por otra parte, las curvas de nivel no entregan el nivel de detalle necesario para realizar un modelo en 2 dimensiones. Sin perjuicio de lo anterior, y

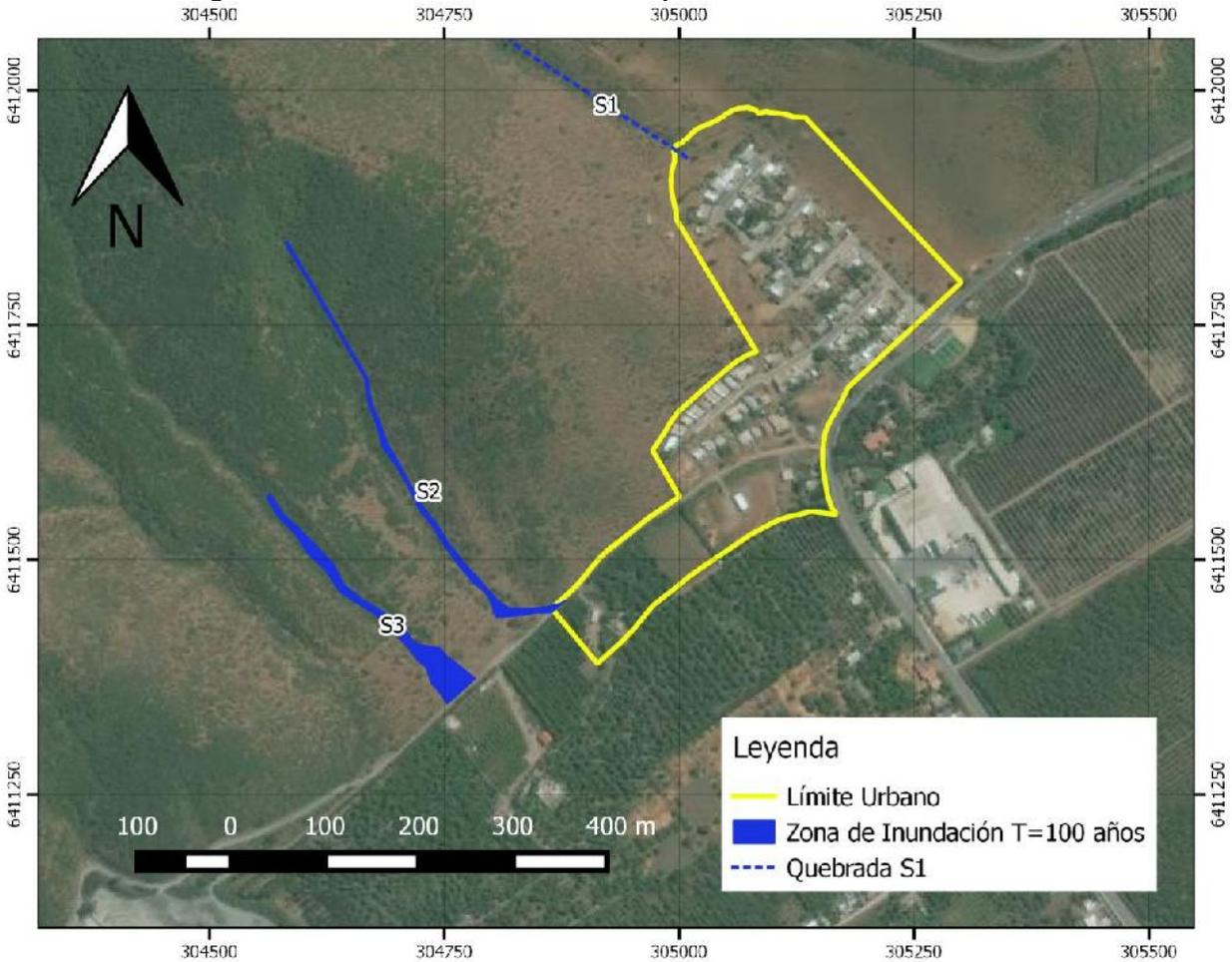
con el objeto de analizar si la quebrada S1 genera un área de riesgo por zonas inundables, se realizó una estimación de la altura de escurrimiento a partir de la fórmula de Manning, considerando la crecida de 100 años de periodo de retorno ($Q = 5,8 \text{ m}^3/\text{s}$). Resultado de lo anterior, en el caso más desfavorable en que el agua escurra únicamente concentrada por la calle principal de la localidad (cuyo ancho aproximado es de 8,5 m), utilizando $n = 0,014$, se obtienen alturas de agua de 0,1 m, dadas las fuertes pendientes de la zona (17%). Por este motivo, se considera una zona de riesgo bajo, toda vez que la altura de la vereda se considera de aproximadamente 0,2 m.

Tabla N° 58: Ancho máximo de inundación - Quebradas Sector San José

Quebrada	Ancho máximo [m]
S2	16
S3	35

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 39: Resultados modelación quebradas en sector San José

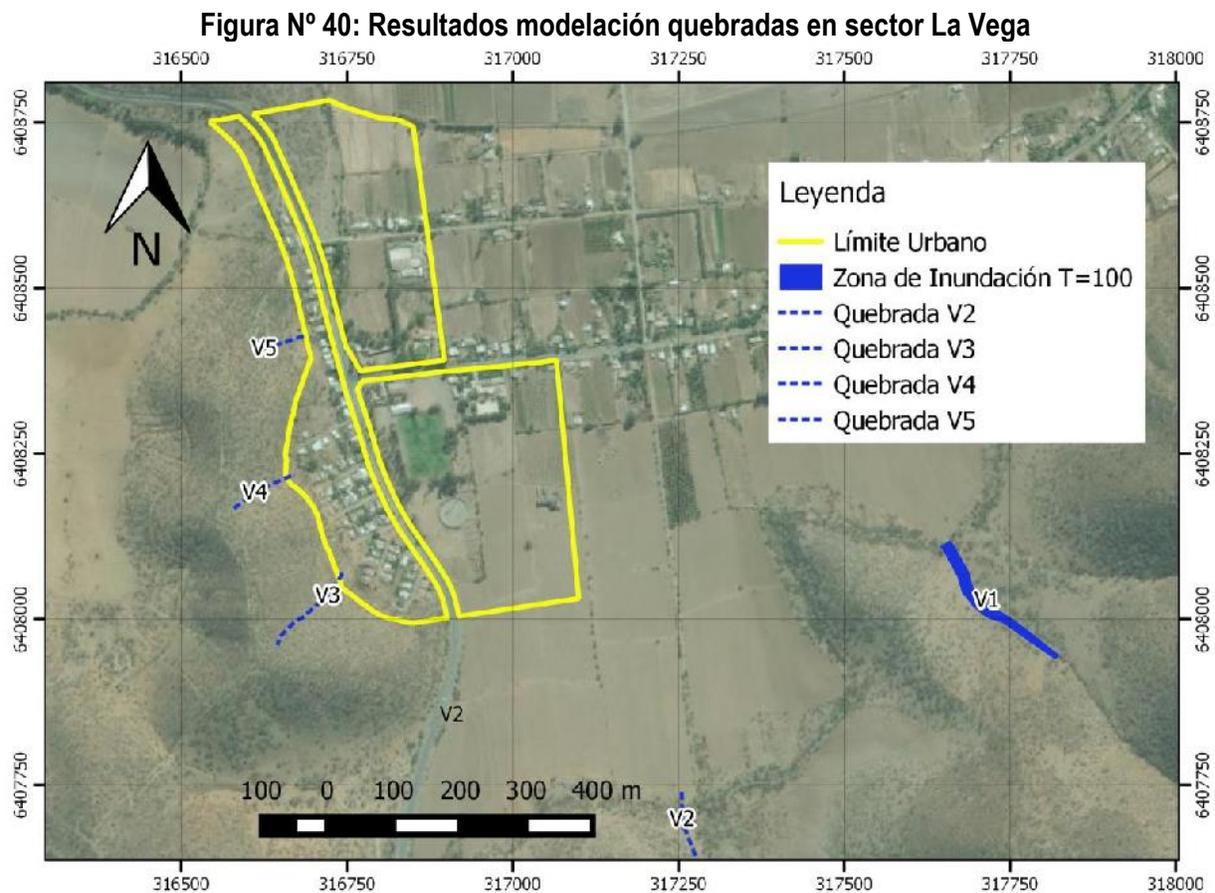


Fuente: Elaboración propia.

Quebradas Sector La Vega

La modelación de las quebradas del sector La Vega indica que el régimen corresponde siempre a torrente. El área de inundación está bien definida, tal como se presenta en la Figura N° 40. El ancho máximo de inundación en el escenario T=100 corresponde a 50,41 m para la quebrada V1.

Cabe destacar que se realizó la modelación hidráulica de la quebrada V1, sin embargo, dada la topografía plana en la zona después del cerro, ésta no posee un cauce definido. Dicha situación se ve extremada para la quebrada V2, motivo por el cual no se realizó dicha modelación. Al respecto, es importante mencionar que las quebradas V1 y V2 desembocan en zonas planas correspondientes a terrenos sin construir, motivo por el cual se estima que el flujo se abre por la superficie, disminuyendo así su altura, sin influir en el área contenida por el límite urbano. Por lo anterior, se considera que el riesgo de inundación es bajo. Por otra parte, respecto de las quebradas V3, V4 y V5, no se realizaron sus respectivas modelaciones toda vez que sus caudales son muy inferiores a 1 m³/s, siendo así despreciables sus inconvenientes, considerándose así que no existen zonas de riesgo.



Fuente: Elaboración propia.

Quebradas Sector Cabildo

La modelación de las quebradas del sector Cabildo indica que el régimen varía de quebrada a quebrada. El área de inundación está bien definida para todos los casos salvo el de la quebrada C8 tal como se ve en la Figura N° 41. El ancho máximo de inundación para cada quebrada en el escenario T=100 se presenta en la Tabla N° 59.

Se debe destacar que no se pudo realizar la totalidad de la topografía de los canales asociados a las quebradas C8 y C9, que pasan por la propiedad del grupo minero Las Cenizas, dado que se negó el acceso. Debido lo anterior, en ese tramo se supuso que la sección transversal se mantiene.

En la Figura N° 42 se presenta un acercamiento a la modelación de la quebrada C8 para períodos de retorno de 2, 10 y 100 años. Se aprecia que en el caso de T=2 años el canal se desborda a la altura de la cancha de fútbol presente en el lugar, mientras que en el caso de T=10 y T=100 años, el canal se desborda a la altura en la cual este entra a la propiedad del grupo minero Las Cenizas. Este desborde se explica en una disminución de la pendiente del terreno, lo que disminuye la capacidad del canal, provocando un posible flujo por las calles del sector. Adicionalmente, de acuerdo a conversaciones mantenidas con la autoridad municipal se construyeron hace aproximadamente 15 años obras de atraveso para la quebrada C8 en la calle Humeres, justo en la salida de la quebrada desde el terreno del grupo minero. Esta construcción se realizó probablemente con posterioridad a la gran lluvia del 2002 (superiores a 120 mm en 24 horas). Según lo señalado, previo a contar con dichas obras se tenían graves problemas de anegamiento en la calle Humeres, llegando incluso a prohibirse el paso de vehículos. Sin embargo, desde esa fecha solo se han registrado eventos de precipitación de máximo 70 mm en 24 horas (T=5 años) por lo que no se ha podido comprobar la funcionalidad de las nuevas obras para caudales mayores. Con todos estos antecedentes, en conjunto con los resultados de la modelación e independiente de las obras de atraveso construidas, considerando únicamente que la capacidad de la canalización se ve sobrepasada, se hace necesario definir el sector como zona de riesgo de inundación.

En el caso de la quebrada C4, esta tiene su desembocadura en la calle, sin embargo el caudal máximo instantáneo asociado para una crecida de 100 años es de 1 m³/s, por lo cual no debiese causar mayor inconveniente.

La modelación del canal correspondiente a la quebrada C7 se realizó hasta el lugar donde se conoce la topografía. Luego de este punto, el canal continúa como un canal subterráneo hasta un terreno agrícola. Por otra parte, la zona donde comienza el canal revestido no pudo ser levantada en terreno toda vez que pertenece a propiedad privada, y se negó su acceso. Al modelar ese tramo como terreno natural, se entregaba como resultado un área de inundación que se intersectaba con las casas de la zona. Para corroborar dicha situación, se supuso que el canal tiene las mismas características de la zona levantada inmediatamente aguas abajo. Con el objeto de analizar si la quebrada C7 en este tramo genera un área de riesgo real por zonas inundables, se realizó una estimación de la altura de escurrimiento a partir de la fórmula de Manning, considerando el

caso más desfavorable ($Q = 11,8 \text{ m}^3/\text{s}$ para $T = 100$ años). Resultado de lo anterior, considerando un ancho del canal de 3 m, y utilizando $n = 0,014$, se obtienen alturas de agua de 0,38 m, lo cual sería menor a la altura del canal de 1,1 m. Por este motivo, se considera que no es una zona de riesgo.

Respecto de las quebradas C11 y C12, los resultados de la modelación consideraron el área de inundación según lo estimado en función de la topografía. Sin embargo, luego de conversar con un funcionario de la Municipalidad, se notó que en esta situación no consideró que en la construcción de la población asociada se construyó una tubería para evacuar el agua de cada quebrada. Para considerar dicha situación, se puso en contacto con la empresa constructora, quienes amablemente nos entregaron el plano de construcción de dichas obras, considerándose 2 tuberías de 800 mm de diámetro de cemento comprimido. Para analizar dicha situación, se realizó una estimación del funcionamiento de las tuberías a partir de la fórmula de Manning, considerando el caso más desfavorable ($Q = 4,4 \text{ m}^3/\text{s}$ para $T = 100$ años, considerando el área proporcional que ingresaría a la tubería, para C11, y $Q = 1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ para $T = 100$ años para C12). Resultado de lo anterior, utilizando $n = 0,014$, se obtiene como resultado que las tuberías son suficientes para evacuar las aguas. Por este motivo, se considera que el riesgo en la zona es bajo.

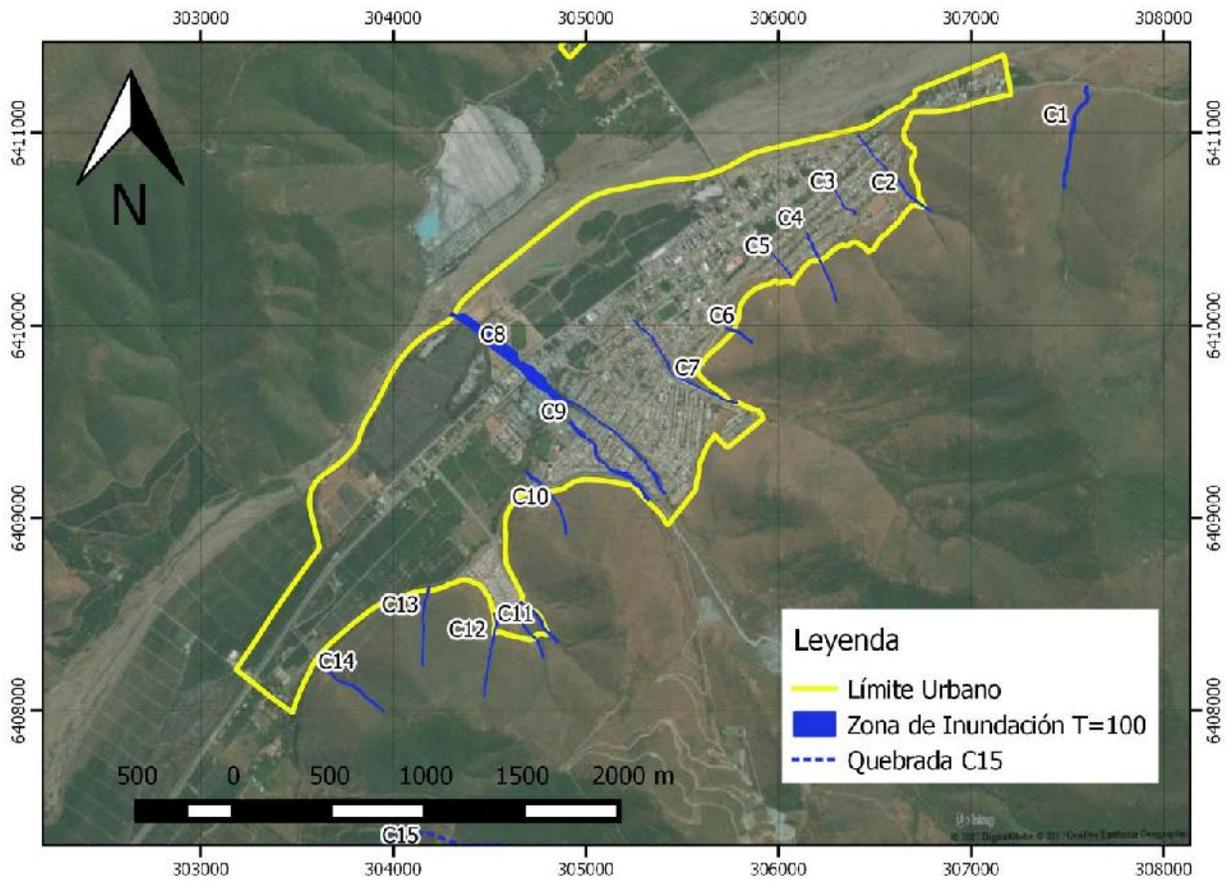
Cabe destacar que la quebrada 15 no se modeló toda vez que sus aguas desembocan fuera del límite urbano.

Tabla N° 59: Ancho máximo de inundación y régimen de escurrimiento- Quebradas Sector Cabildo

Quebrada	Canal Revestido	Ancho máximo [m]	Régimen	Comentarios	Desemboca
C1	No	21,22	Torrente		Terreno abierto
C2	Si	12,00 (40,00)	Torrente (Río)	(Últimos 2 perfiles)	Terreno abierto
C3	Si	10,29	Torrente		Canal de regadío
C4	No	7,61	Torrente		Calle
C5	Si	5,64 (21,01)	Torrente (Río)	(Último perfil)	Canal de regadío
C6	No	12,44	Torrente		Terreno abierto
C7	Si	18,09	Torrente (*)	* Un solo perfil presenta régimen de río para T=2	Terreno abierto
C8	Si	Desborde	Mixto	Si bien en su mayoría existe régimen de torrente, al desbordar de los límites del canal, el escurrimiento alterna entre río y torrente	Río
C9	Si	32,44	Mixto	El régimen de escurrimiento varía entre río y torrente en toda la quebrada, siendo río en los perfiles más aguas abajo	Canal de regadío
C10	No	12,51	Mixto	El último y antepenúltimo perfil corresponde a régimen de río, el penúltimo a torrente muy cerca de la crisis y todos los otros a torrente	Terreno abierto
C11	No	20,33	Mixto	Los primeros perfiles presentan régimen de torrente cercano a la crisis, mientras que los últimos presentan régimen de río	Calle aguas abajo área urbana vigente
C12	No	10,48	Torrente (*)	* Un solo perfil presenta régimen de río pero muy cercano a la crisis, volviendo a régimen de torrente en el siguiente perfil	Calle aguas abajo área urbana vigente
C13	No	9,33	Torrente		Terreno abierto
C14	No	10,46	Torrente		Terreno abierto

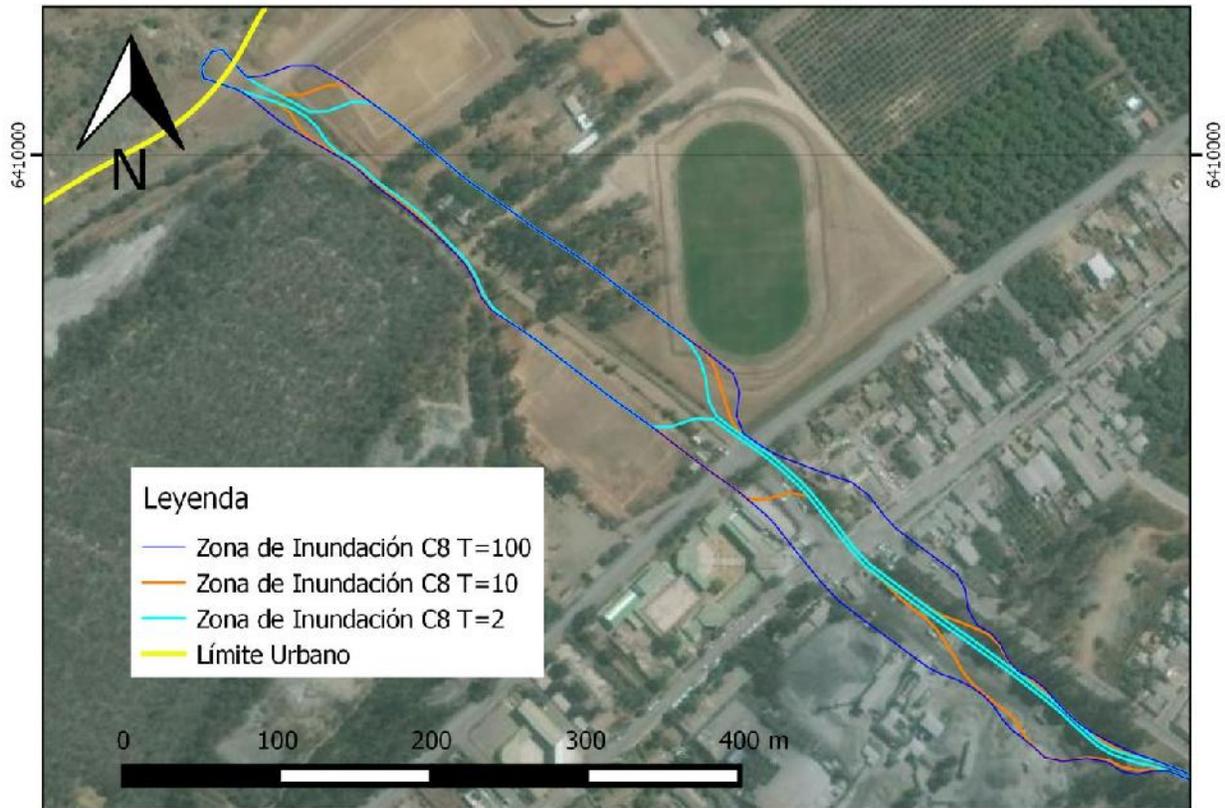
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 41: Resultados modelación quebradas en sector Cabildo



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 42: Ampliación resultados modelación quebrada C8 en sector Cabildo



Fuente: Elaboración propia.

Quebradas Sector Artificio

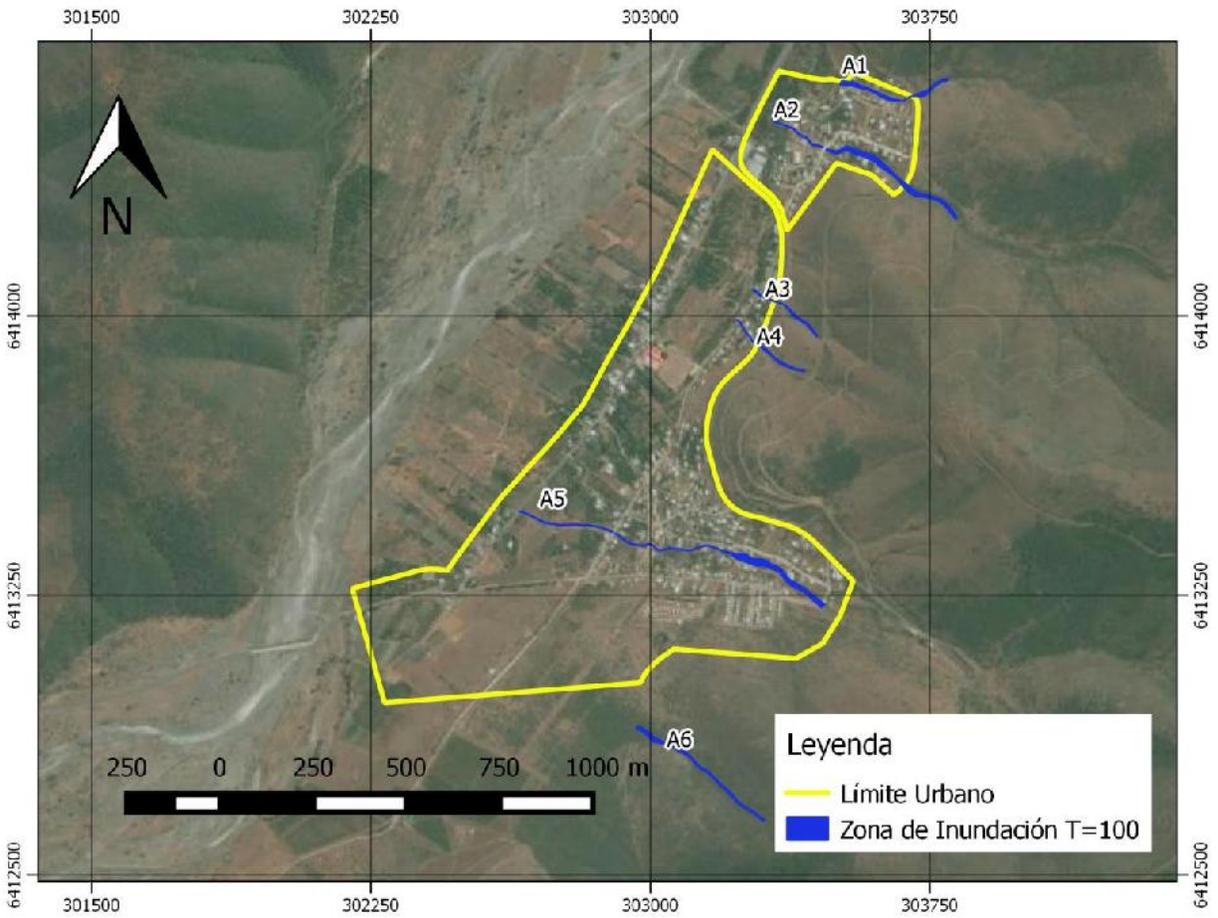
La modelación de las quebradas del sector Artificio indica que el régimen corresponde siempre a mixto. El área de inundación está bien definida tal como se ve en la Figura N° 43. El ancho máximo de inundación para cada quebrada en el escenario T=100 se presenta en la Tabla N° 60. Los canales desembocan a terrenos abiertos luego de pasar por el área urbana, salvo el correspondiente a la quebrada A2 que presuntamente desemboca en el canal de riego Donosino.

Tabla N° 60: Ancho máximo de inundación y régimen de escurrimiento- Quebradas Sector Artificio

Quebrada	Canal Revestido	Ancho máximo [m]	Régimen	Comentarios
A1	Si	13,75	Mixto	El escurrimiento es principalmente de torrente. En la parte media de la quebrada existe un tramo con escurrimiento de río
A2	Si	18,50	Mixto	El escurrimiento de río predomina en los perfiles aguas arriba, mientras que en los de aguas abajo predomina el de torrente
A3	Si	16,00	Mixto	El escurrimiento es una alternancia de régimen de río y torrente en toda la extensión de la quebrada
A4	Si	6,61	Mixto	El escurrimiento es principalmente de torrente. En la parte media de la quebrada existe un tramo con escurrimiento de río
A5	Si	22,24	Mixto	El escurrimiento de río predomina en los perfiles aguas arriba, mientras que en los de aguas abajo predomina el de torrente
A6	No	12,77	Mixto	El escurrimiento de torrente predomina en los perfiles de aguas arriba, mientras que desde la sección media hasta los perfiles de más aguas abajo existe una itinerancia entre río torrente y crisis.

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 43: Resultados modelación quebradas en sector Artificio



Fuente: Elaboración propia.

3.1.5 Listado de Proyectos Asociados

A continuación se presenta un listado de proyectos en el área de influencia, con injerencia en el estudio realizado en el presente acápite:

Proyectos existentes:

- Puente, río Ligua
- Defensas fluviales, ríos Ligua y Petorca
- Canales de recolección de aguas lluvias, Cabildo y Artificio
- Conservación riberas cauces naturales Región de Valparaíso Provincias de San Antonio, San Felipe, Quillota y Petorca (Ejecución 2013-2021)

Cabe destacar que los proyectos enumerados anteriormente se encuentran construidos, pero que no necesariamente se encuentran disponibles sus memorias de cálculo.

Proyectos futuros:

By pass Cabildo La Ligua - Cabildo

Cabe destacar que el “Estudio de Preinversión, Construcción By Pass a las Ciudades de La Ligua y Cabildo, Provincia de Petorca, Región de Valparaíso”, se encuentra actualmente en desarrollo por ICR Consultores Ltda., para la Dirección de Vialidad.

- Mejoramiento de la Conectividad de la zona Petorca - Cabildo V región (Prefactibilidad 2013-2015)

Construcción obras de regulación Valle de Petorca

Acorde al Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Valparaíso entre el 2012 y 2014 el MOP llevó a cabo el diseño de este proyecto con un presupuesto de 2.474.739 millones de pesos.

Construcción obras de regulación Valle La Ligua V Región

Acorde al Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Valparaíso entre el 2012 y 2013 el MOP llevó a cabo el diseño de este proyecto con un presupuesto de 74.131 millones de pesos y la entre 2012 y 2014 la factibilidad con un presupuesto de 1.439.700 millones de pesos.

Regadío Valle de La Ligua

Acorde al Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Valparaíso entre el 2014 y 2015 el MOP llevó a cabo el diseño de este proyecto con un

presupuesto de 1.331.000 millones de pesos.

Regadío Petorca. Embalse Las Palmas

Acorde al Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Valparaíso a partir del 2021 el MOP ejecutará este proyecto con un presupuesto de 22.000.000 millones de pesos.

Regadío Petorca. Embalse Pedernal

Acorde al Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Valparaíso entre 2016 y 2019 el MOP ejecutará este proyecto con un presupuesto de 62.800.000 millones de pesos.

Regadío Valle de La Ligua. Embalse La Chupalla

Acorde al Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Valparaíso a partir del 2019 el MOP ejecutará este proyecto con un presupuesto de 59.800.000 millones de pesos.

Regadío Valle de La Ligua. Embalse Los Ángeles

Acorde al Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 Región de Valparaíso entre 2016 y 2019 el MOP ejecutará este proyecto con un presupuesto de 67.706.000 millones de pesos.

Construcción Puente Santa Julia en Ruta E-325 (Dirección de Vialidad –MOP)

La construcción de este puente sobre el río Petorca mejorará la conectividad de localidades como Santa Julia con la ruta estructurante E-35.

3.1.6 Conclusiones

Para el caso de los ríos, se realizó el estudio de crecidas en el río Petorca en Artificio y río Ligua en Cabildo y El Quemado (antes y después de la confluencia del Estero Los Ángeles). En La Vega no se realizó dicho análisis dado que por su distancia al río Ligua no lo amerita. A pesar de que se estimaron los caudales a partir de la información proveniente de las estaciones fluviométricas, éstos resultados no se consideraron válidos dado el orden de magnitud de los caudales en función de la ubicación geográfica y el área aportante de la cuenca. Lo anterior puede ser producto de las diferencias en el ajuste de las curvas de distribución como de errores en la medición de los caudales. Para analizar en mayor detalle el problema sería necesario realizar un estudio específico. En función de esto, se optó por definir el caudal como el estimado a partir de las relaciones de precipitación escorrentía, cuyos resultados se entregan a continuación:

Tabla N° 61: Caudales Máximos Anuales Ríos y Estero

Periodo de Retorno (años)	Caudales Máximos Anuales (m ³ /s)			
	Río Petorca en Artificio	Río Ligua en Cabildo	Río Ligua en El Quemado (antes de la confluencia de Estero Los Ángeles)	Río Ligua en El Quemado (después de la confluencia de Estero Los Ángeles)
2	130,1	137,0	66,5	128,7
5	203,7	209,1	95,6	192,9
10	282,9	276,1	116,6	251,8
20	438,4	410,9	163,3	372,8
50	715,6	643,5	237,9	579,8
100	992,9	870,1	305,6	780,0

Fuente: Elaboración propia en base a datos DGA.

Para el caso de las quebradas, se estimaron los caudales según Fórmula Racional, a partir de las estadísticas de precipitaciones máximas anuales en 24 horas, de acuerdo a lo establecido en el libro de Ven Te Chow de Hidrología Aplicada, debido al tamaño de las cuencas asociadas. A continuación se entregan los resultados obtenidos:

Tabla N° 62: Estimación de Caudales (Quebradas) mediante Método Racional

Cuenca	Q (T=2 años) (m ³ /s)	Q (T=5 años) (m ³ /s)	Q (T=10 años) (m ³ /s)	Q (T=20 años) (m ³ /s)	Q (T=50 años) (m ³ /s)	Q (T=100 años) (m ³ /s)
A1	0,9	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6
A2	3,1	4,6	5,7	6,7	8,1	9,2
A3	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1
A4	0,4	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3
A5	3,7	5,5	6,7	8,0	9,6	10,9
A6	0,7	1,0	1,2	1,4	1,7	1,9
S1	2,0	2,9	3,6	4,2	5,1	5,8
S2	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1	1,2
S3	0,8	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4
C1	2,1	3,1	3,8	4,6	5,5	6,2
C2	1,2	1,8	2,2	2,6	3,1	3,5
C3	1,0	1,4	1,8	2,1	2,5	2,9
C4	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
C5	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1
C6	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,3
C7	4,0	5,9	7,3	8,6	10,4	11,8
C8	9,0	13,2	16,2	19,2	23,2	26,3
C9	3,0	4,4	5,3	6,3	7,7	8,7
C10	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4
C11	1,8	2,7	3,3	3,9	4,7	5,4
C12	0,6	0,9	1,0	1,2	1,5	1,7
C13	0,8	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5
C14	0,9	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6
C15	4,7	7,0	8,5	10,1	12,2	13,9
Q1	0,2	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7
Q2	0,6	0,9	1,1	1,3	1,5	1,8
Q3	1,8	2,7	3,3	4,0	4,8	5,4
Q4	2,1	3,1	3,8	4,5	5,4	6,1
Q5	1,7	2,4	3,0	3,6	4,3	4,9
Q6	1,4	2,1	2,6	3,0	3,7	4,2
V1	0,9	1,4	1,7	2,0	2,4	2,8
V2	2,2	3,3	4,1	4,8	5,8	6,6
V3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5
V4	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
V5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que se compararon los valores obtenidos utilizando la metodología del Método Racional con el del Hidrograma Unitario Sintético (HUS), observándose que los valores del Método Racional son mayores que los estimados por el HUS, pero dentro del mismo orden de magnitud.

Respecto a la modelación hidráulica, se aprecia, en general, que los tres tramos modelados para los dos ríos se encuentran bien definidos en lo que a límite urbano respecta. Sin perjuicio de lo anterior, respecto de Artificio, al nor-poniente del límite urbano propuesto se puede observar que el área de inundación del río Petorca bordea dicho límite.

Respecto al río Ligua en Cabildo, tal como se mostró en las Figura N° 34, Figura N° 35 y Figura N° 36, existen zonas en las cuales el área de inundación entra someramente al límite urbano, pero en lugares que no se encuentran poblados respetándose así el lecho del río. Por otra parte, es importante mencionar que el área de inundación para periodo de retorno de 100 años se encuentra cercana al tranque de relaves de la Minera Las Cenizas, si bien de acuerdo al levantamiento topográfico existe una diferencia de cotas, ésta área no está considerada dentro del PRC por lo que se debe tener presente dicha situación.

Sobre la modelación del río Ligua en El Quemado, si bien tres perfiles finales de la modelación se desbordan, la elevación a la que llega el pelo de agua (222,74 msnm para T=100 años) es menor a la de la menor curva de nivel en el límite urbano (238 msnm), por lo tanto esta no se ve afectada.

La modelación de todas las quebradas (a excepción de la quebrada C8 en Cabildo) tienen un área de inundación contenida y bien definida, en relación a las construcciones existentes.

La quebrada C8 en Cabildo (en la cual existe un canal revestido) tal como se presenta en la Figura N° 42 se desborda a la altura de la cancha de fútbol presente en el lugar a partir del período de retorno de 2 años. Si bien para este período de retorno, el desborde ocurre en una zona no edificada actualmente, para períodos de retorno mayores el desborde ocurre más hacia aguas arriba. En el caso de T=10 y T=100 años, el canal se desborda a la altura en la cual este entra a la propiedad del grupo minero Las Cenizas. Este desborde se explica en una disminución de la pendiente del terreno, lo que disminuye la capacidad del canal, provocando un posible flujo por las calles del sector. Adicionalmente, de acuerdo a conversaciones mantenidas con la autoridad municipal se construyeron hace aproximadamente 15 años obras de atraveso para la quebrada C8 en la calle Humeres, justo en la salida de la quebrada desde el terreno del grupo minero. Esta construcción se realizó probablemente con posterioridad a la gran lluvia del 2002 (superiores a 120 mm en 24 horas). Según lo señalado, previo a contar con dichas obras se tenían graves problemas de anegamiento en la calle Humeres, llegando incluso a prohibirse el paso de vehículos. Sin embargo, desde esa fecha solo se han registrado eventos de precipitación de máximo 70 mm en 24 horas (T=5 años) por lo que no se ha podido comprobar la funcionalidad de las nuevas obras para caudales mayores. Con todos estos antecedentes, en conjunto con los resultados de la modelación e independiente de las obras de atraveso construidas, considerando únicamente que la capacidad de la canalización se ve sobrepasada, se hace necesario definir el sector como zona de riesgo de inundación. Cabe destacar que la topografía tanto de la quebrada C8 como C9 en Cabildo no pudo realizarse en su totalidad debido a que estos pasan por la

propiedad del grupo minero Las Cenizas, quienes negaron el acceso. Por este motivo, en ese tramo se supuso que la sección transversal se mantiene constante.

La quebrada C4 en Cabildo tiene su desembocadura en la calle, sin embargo el caudal máximo instantáneo asociado para una crecida de 100 años es de 1 m³/s, por lo cual no debiese causar mayor inconveniente.

Se destaca que la modelación fue realizada considerando las condiciones actuales de cobertura del suelo, por lo que es necesario mantener dichas condiciones y evitar utilizar las riberas como depósitos de basura.

3.1.7 Restricciones

Las áreas de restricción corresponden a las áreas de inundación estimadas para un periodo de retorno de 100 años, según se presentan en las figuras asociadas a los resultados de la modelación hidráulica.

4. PLANOS ESTUDIO DE RIESGOS PRC CABILDO

5. BIBLIOGRAFIA

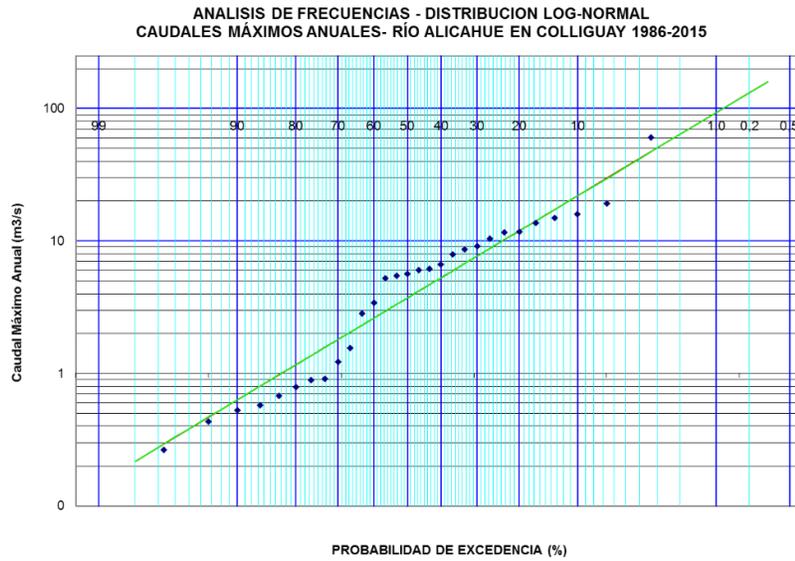
5.1 Listado de Fuentes Consultadas

- Sistema Nacional de Información de Agua (www.dga.cl).
- Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en cuencas sin información fluviométrica, DGA, 1995.
- Hidrología Aplicada, Ven Te Chow, 1996.
- Manual de Carreteras, Volumen 3, 2016.
- Dirección Meteorológica de Chile (www.meteochile.cl).
- Plan Regulador Comunal de Cabildo, 1997.
- Plan Intercomunal de Valparaíso Satélite Petorca Cabildo, 2006 y 2015.
- Estudio para el Fortalecimiento de la Planeación y priorización de Acciones de Infraestructura Hidráulica Región de Valparaíso, DOH, 2013.
- SERNAGEOMÍN, 2004. Geología para el ordenamiento territorial de la región de Valparaíso, Santiago de Chile: 50 pág.
- VICTOR QUINTANILLA, 1994. Determinación de procesos y áreas de riesgos en los Andes Centrales de Chile mediterráneo: casos de estudio: 12 pág.
- INTRAT, 1999. Estudio Plan Regulador Intercomunal de Petorca
- ARCADIS, 2007. Estudio Plan Regulador Intercomunal de Valparaíso satélite Petorca Cabildo
- Luigi Brignardello, PUC 1997. Proposición metodológica para la evaluación y zonificación integrada de riesgos naturales mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfico” 20 pág.
- DGA, 2013. Actualización de informe de evaluación de recursos hídricos superficiales de las cuencas del Río Petorca y Río Ligua Región de Valparaíso. 109 pág.
- ELEONORA MUÑOZ MORALES, 2013, Susceptibilidad de Remociones en Masa y de Respuesta Sísmica Asociada a Fallas Mayores en Zonas Urbanas. Estudio De Caso En Viña Del Mar, V Región. 177 pág.
- D.S. N°95 de 2001, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
- SERNAGEOMIN, 2010 Departamento de seguridad. Catastro de Depósitos de Relaves: Depósitos de Relaves Activos y No Activos.
- SERNAGEOMIN, 2007. Catastro de faenas mineras abandonadas o paralizadas y análisis preliminar de riesgos: 500 pág.

6. ANEXOS

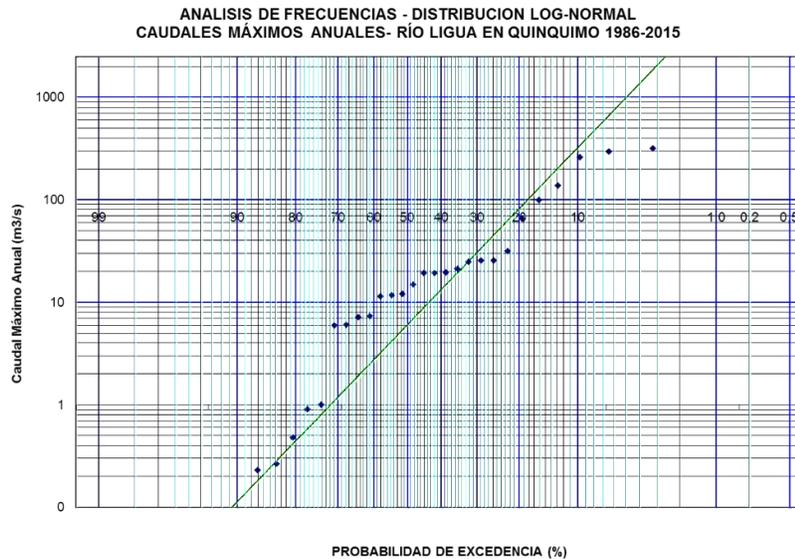
6.1 Gráficos de análisis de frecuencias de estaciones fluviométricas

Figura N° A 1: Análisis de Frecuencia Distribución Log Normal – Estación Río Alicahue en Colliguay



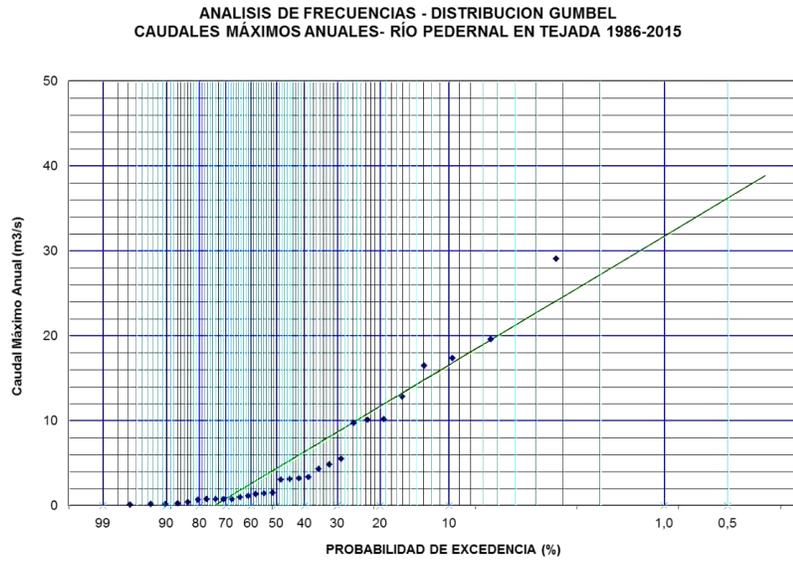
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° A 2: Análisis de Frecuencia Distribución Log Normal – Estación Río Ligua en Quinquimo



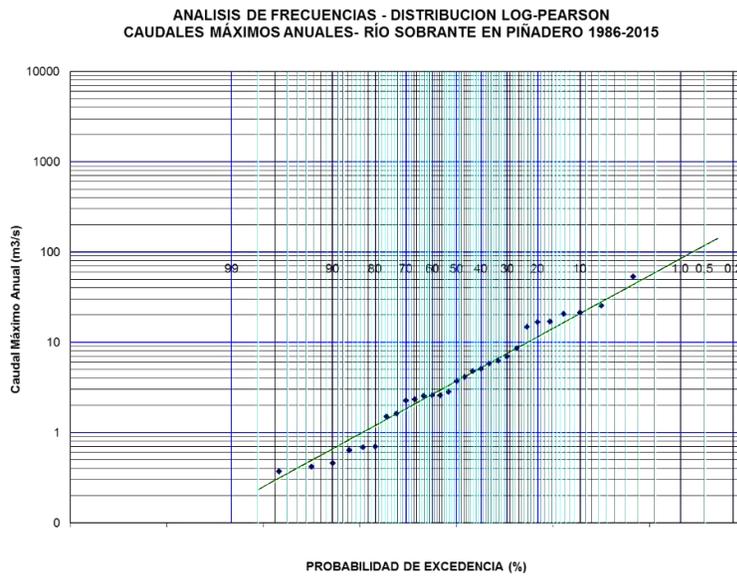
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° A 3: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación Río Pedernal en Tejada



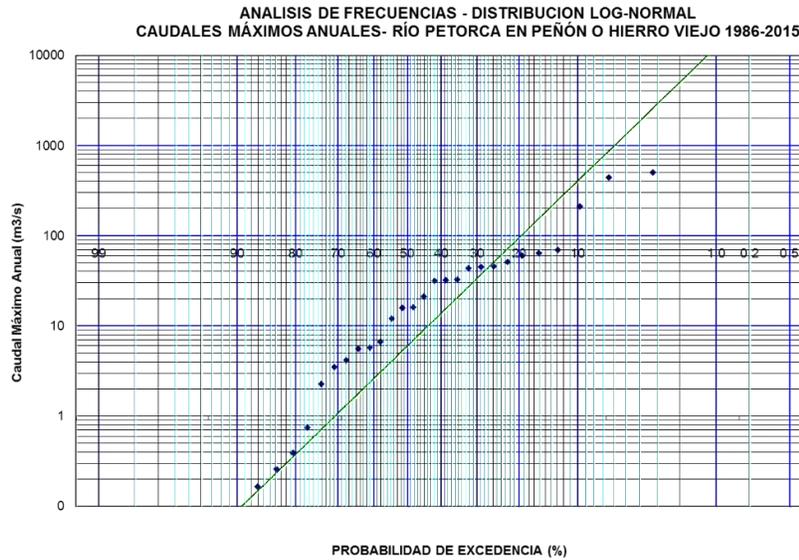
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° A 4: Análisis de Frecuencia Distribución Log Pearson – Estación Río Sobrante en Piñadero



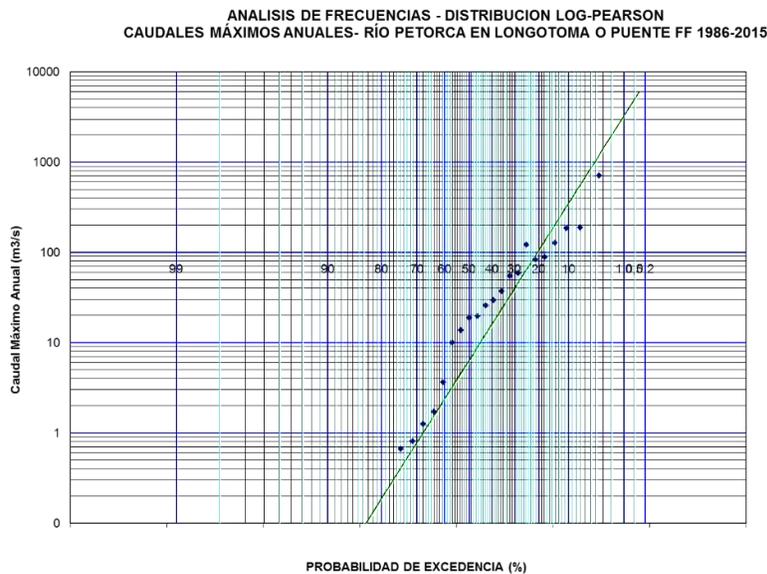
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° A 5: Análisis de Frecuencia Distribución Log Normal – Estación Río Petorca en Peñón o Hierro Viejo



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° A 6: Análisis de Frecuencia Distribución Log Pearson – Estación Río Petorca en Longotoma o Puente FF



Fuente: Elaboración propia.

6.2 Gráficos de análisis de frecuencias de estaciones pluviométricas

Figura N° A 7: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación La Mostaza

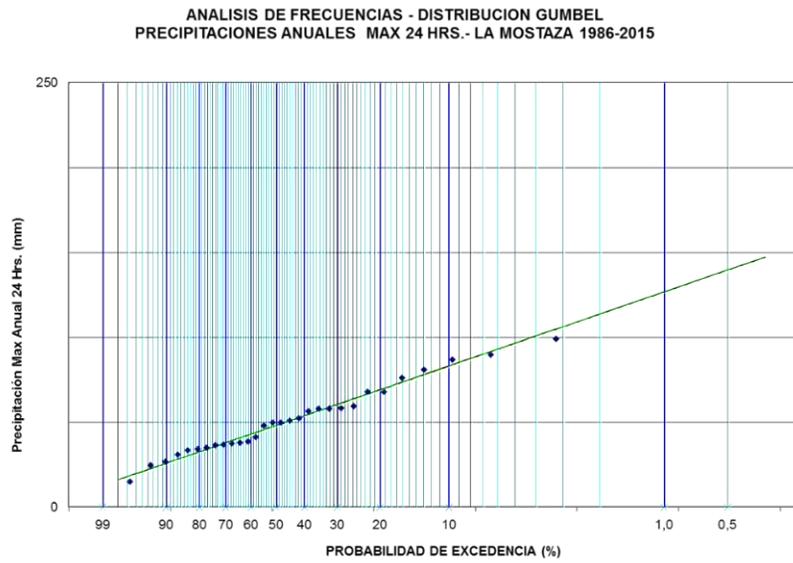


Figura N° A 8: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación Alicahue Hacienda

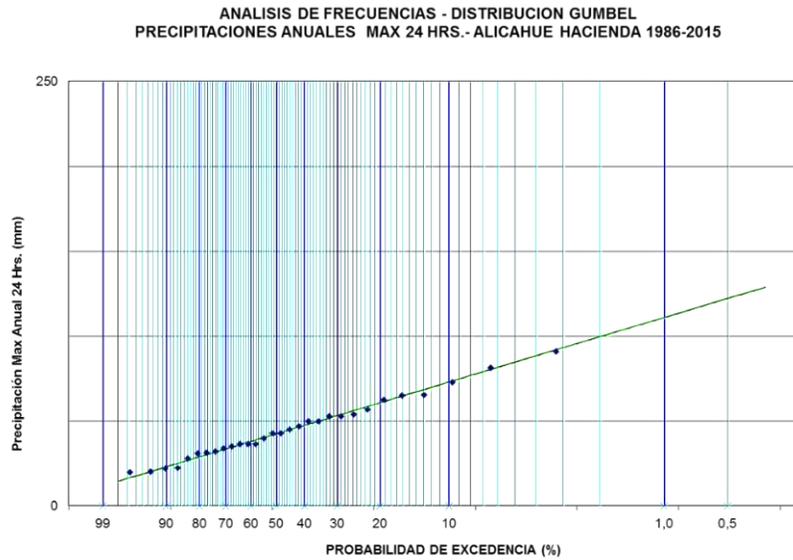


Figura N° A 9: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación Mina Cerro Negro

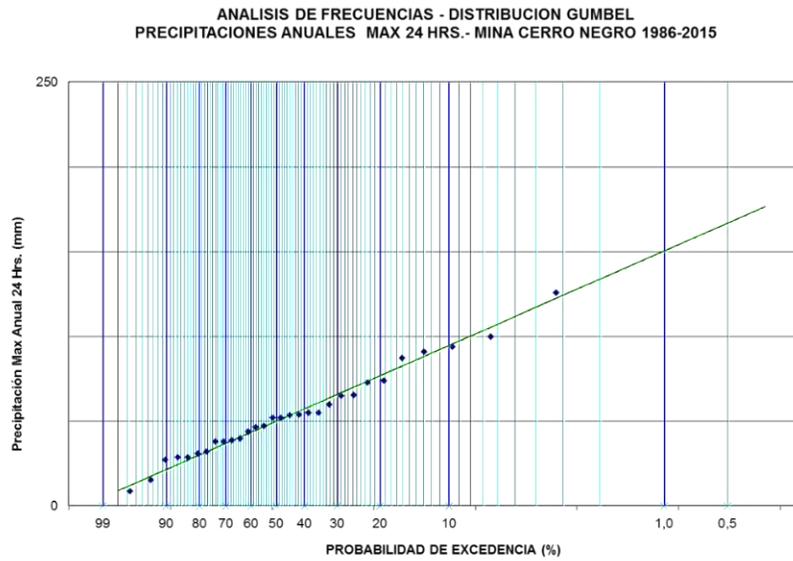


Figura N° A 10: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación La Viña

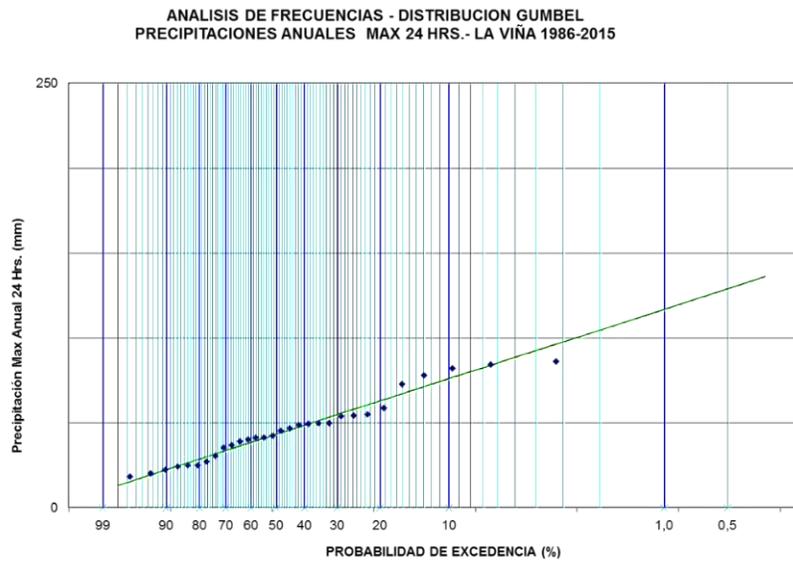


Figura N° A 11: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación Las Puertas

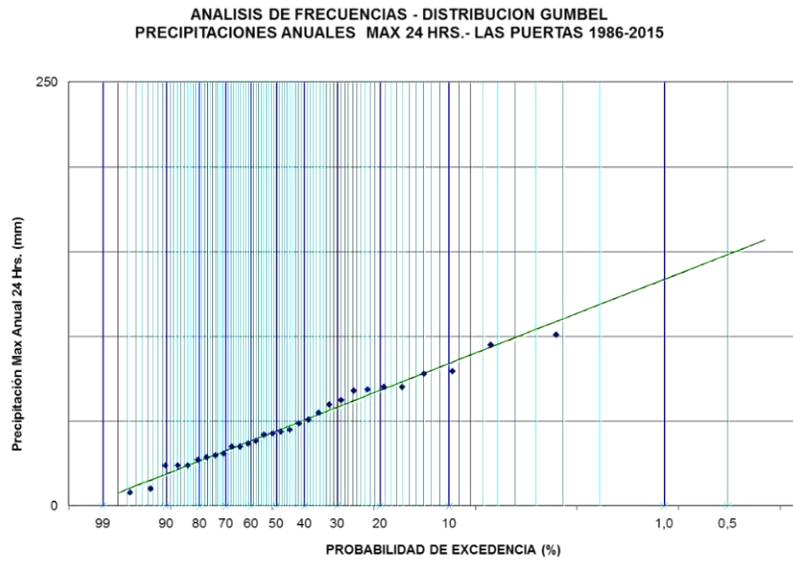


Figura N° A 12: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación Chacrilla

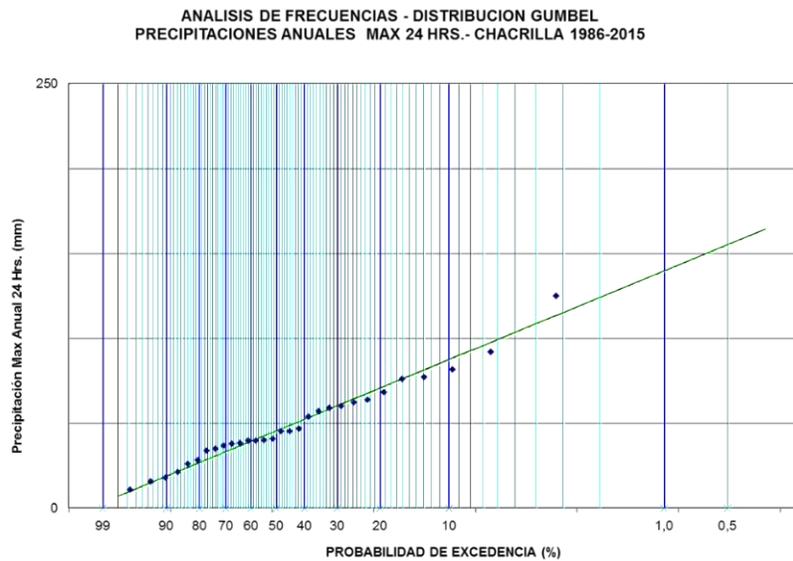


Figura N° A 13: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación El Trapiche

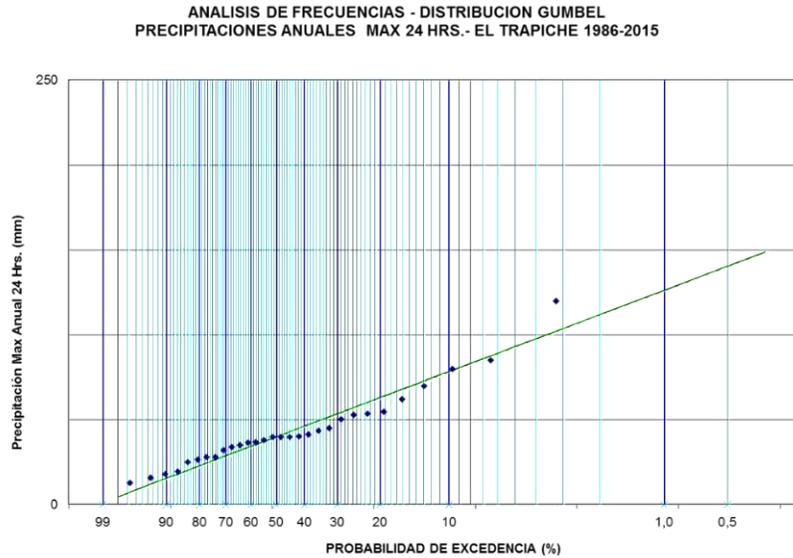


Figura N° A 14: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación El Sobrante Hacienda

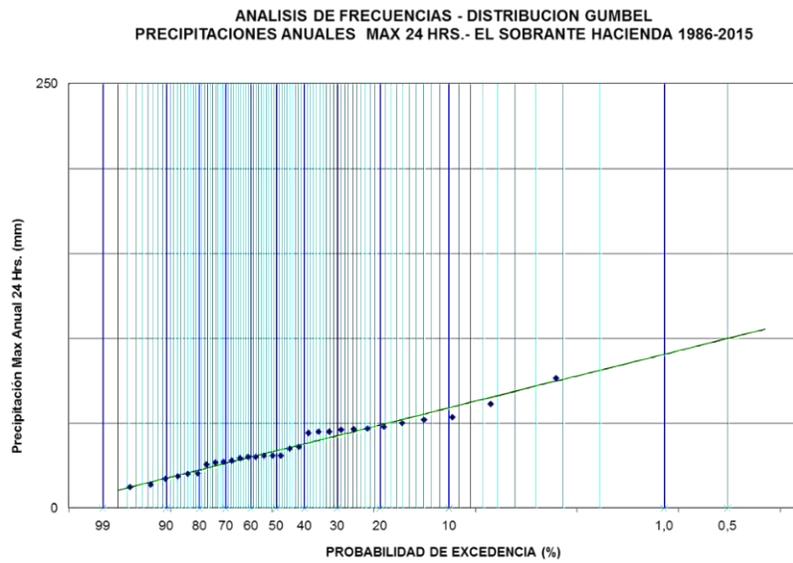


Figura N° A 15: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación Chalaco Hacienda

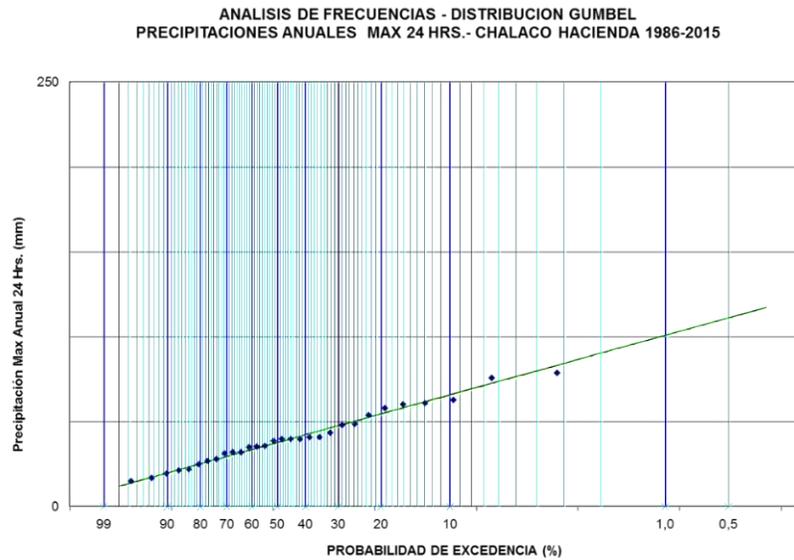


Figura N° A 16: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Pedernal Hacienda

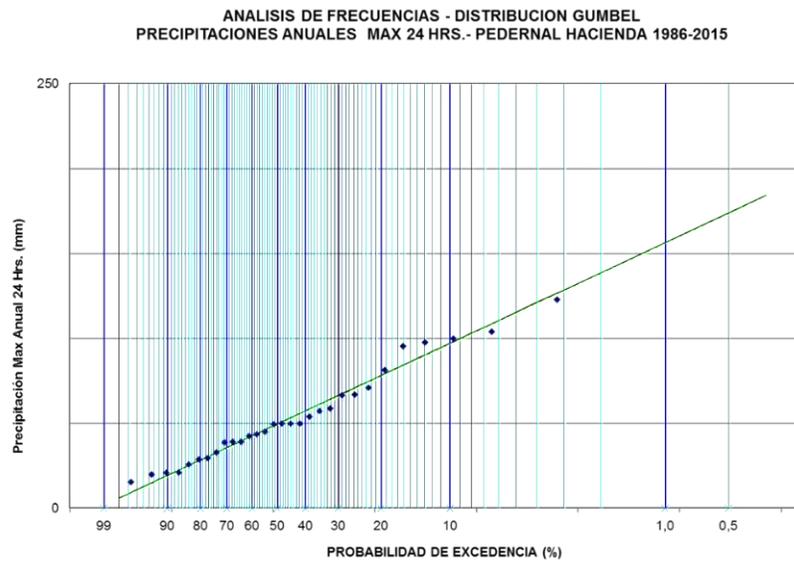


Figura N° A 17: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación Hierro Viejo

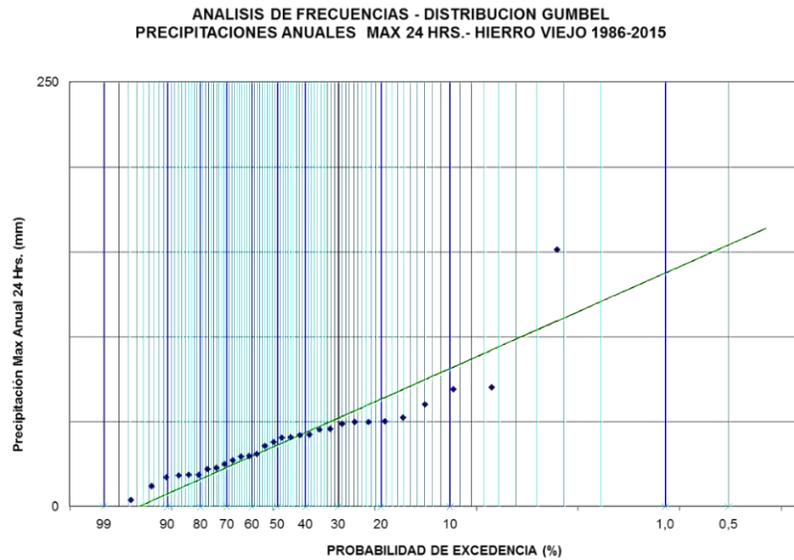


Figura N° A 18: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación Frutillar Alto

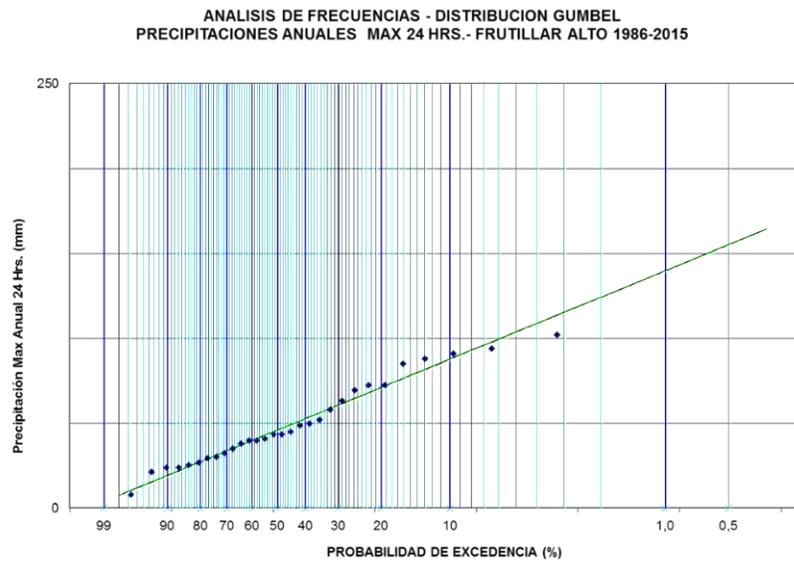


Figura N° A 19: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación El Salvador

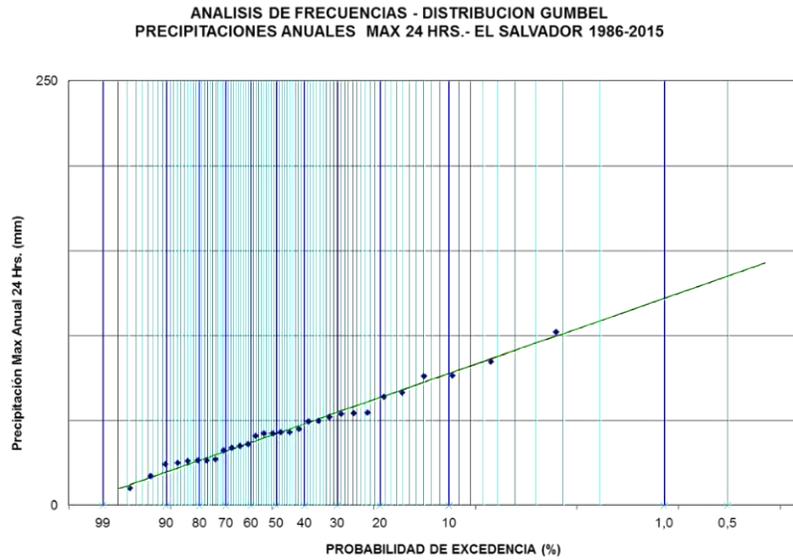


Figura N° A 20: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación Artificio

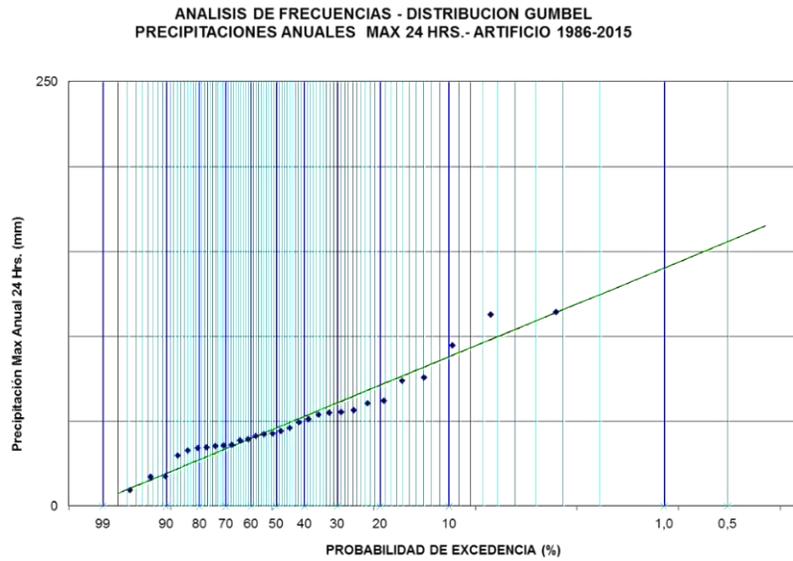


Figura N° A 21: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación Palquico

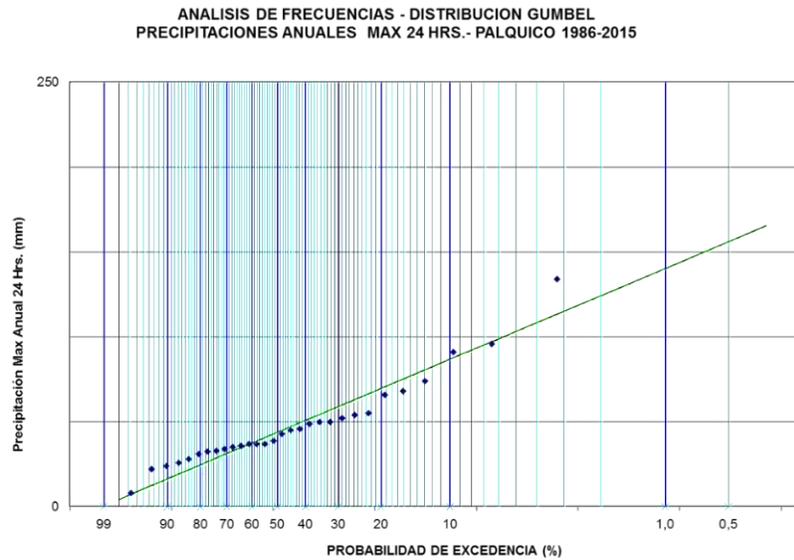


Figura N° A 22: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación Las Pataguas

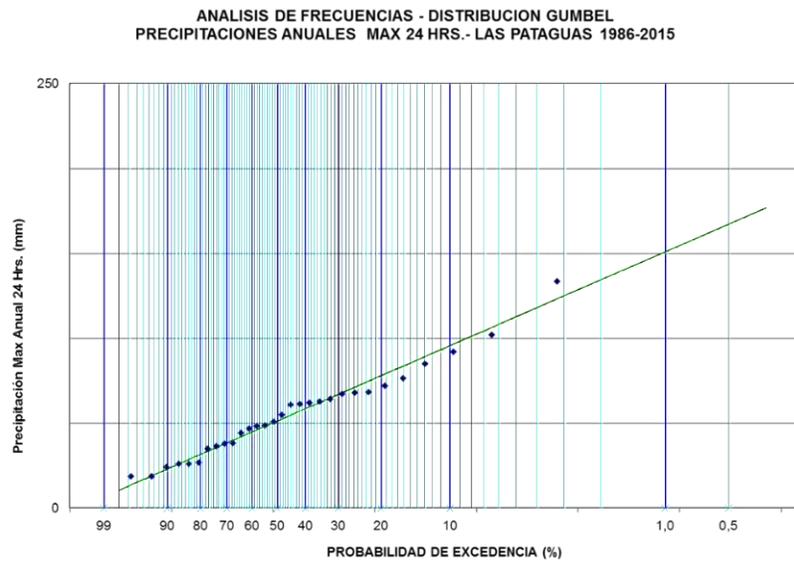


Figura N° A 23: Análisis de Frecuencia Distribución Gumbel – Estación Resguardo Los Patos

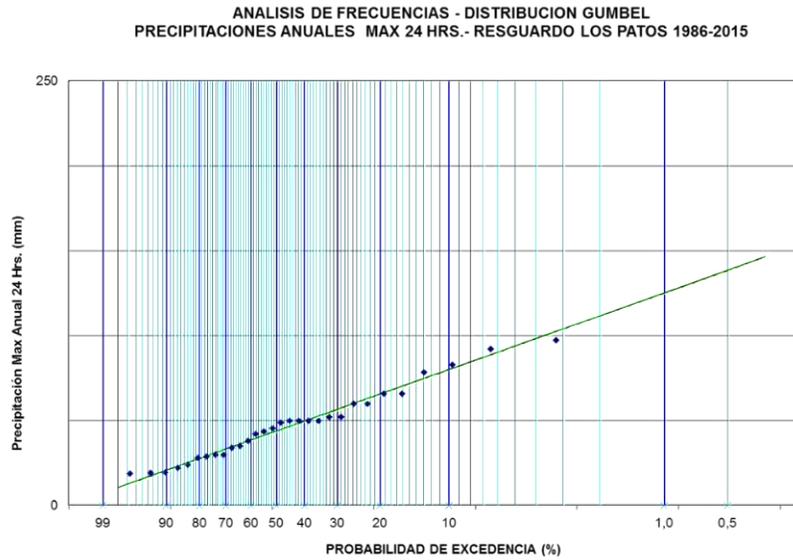


Figura N° A 24: Análisis de Frecuencia Distribución Pearson – Estación El Tártaro

