PLAN 8 ENERGÍA INFINITA LTDA
www.plan-8.cl
contacto@plan-8.cl



ANEXO 01. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

PERMISO AMBIENTAL SECTORIAL 156

PARQUE HÍBRIDO EÓLICO, SOLAR Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA LAS QUINTAS (PHLQ)

Elaborado por PLAN 8

A	–					
Rev.	**Rev. Int.**	**Fecha**	**Emitido para**	**Emitido por**	**Revisado por**	**Aprobado por**

	Comuna de San Pedro y Comuna de Litueche Región Metropolitana Región de O'Higgins	
	PAS156-DOC-01	**Rev. A**

Contenidos

1. Introducción 4

2. Alcances y objetivos 5

3. Zona de estudio 5

3.1. Ubicación general 5
3.2. Identificación de los cauces 6

4. Datos 8

4.1. Estaciones fluviométricas 8
4.2. Estaciones pluviométricas 8
4.3. Modelo de elevación digital 10
4.4. Uso de suelo y clasificación 11

5. Metodología 12

5.1. Parámetros geomorfométricos 15
5.2. Análisis de frecuencia 15
5.3. Variabilidad espacial 17
5.4. Valores IDF 17
5.5. Método racional 18

6. Resultados 20

6.1. Parámetros geomorfométricos 20
6.2. Análisis de frecuencia 21
6.3. Método racional 22

7. Conclusiones y comentarios 23

8. Referencias 24

9. Apéndice 25

9.1. Tests de bondad de ajuste 25

Figuras

Figura 3-1: Ubicación y sectores del proyecto 6
Figura 3-2: Red de drenaje y cauces en estudio 8
Figura 4-1: Ubicación de estaciones pluviométricas 9
Figura 4-2: Representación del modelo de elevación digital (DEM) 10
Figura 4-3: Representación del modelo digital de terreno (MDT) 11
Figura 4-4: Uso de suelo y clasificación 12
Figura 5-1. Serie de datos (arriba) y comparación entre una serie POT (izquierda) y una serie AM (derecha). Modificado de (Chow et al., 1988) 16
Figura 6-1. Delimitación de las cuencas aportantes 21

Tablas

Tabla 3-1. Coordenadas representativas del proyecto 6
Tabla 2-1. Cuencas según BNA - Región Metropolitana 6
Tabla 2-2. Cuencas según BNA - Región de O'Higgins 7
Tabla 4-1. Información de las estaciones pluviométricas según DGA 9
Tabla 5-1. Coeficientes de duración estación Rapel 18
Tabla 6-1. Parámetros geomorfométricos de las cuencas 20
Tabla 6-2. Precipitación máxima diaria por estación para diferentes periodos de retorno [mm] 21
Tabla 6-9. Estimación del coeficiente de escorrentía para las OA 01, 02 y 03 22
Tabla 6-10: Estimación del coeficiente de escorrentía para las OA 04 y 05 22
Tabla 6-11. Amplificación del coeficiente de escorrentía en función del periodo de retorno 22
Tabla 6-12. Caudal máximo instantáneo con el Método racional [m^3/s] 23
Tabla 7-1. Caudales máximos instantáneos para diseño y verificación para las OA 01 y 02 [m^3/s] 23
Tabla 7-2. Caudales máximos instantáneos para diseño y verificación para las OA 03, 04 y 05 [m^3/s] 23
Tabla 9-1: Resultados tests de bondad de ajuste para estación “Fundo Las Dos Puertas” 25
Tabla 9-2: Resultados tests de bondad de ajuste para estación Litueche 25
Tabla 9-3: Resultados tests de bondad de ajuste para estación Rapel 25

1. Introducción

El Proyecto “Parque Híbrido Eólico, Solar y Almacenamiento de Energía Las Quintas” (o también PHLQ) consiste en la construcción y operación de un Parque de energías renovables, ubicado entre las comunas de San Pedro y Litueche, en las Metropolitana y O’Higgins, respectivamente.

El proyecto combina energía eólica y solar, con una potencia nominal de 190,25 MW aproximados. El parque eólico está compuesto por 16 aerogeneradores de 8 MW cada uno, sumando un total de 128 MW nominal. Por su parte, el parque fotovoltaico estará compuesto por 107.772 paneles fotovoltaicos, sumando un total de 77,6 MWp y 62,25 MW nominal.

Adicionalmente, se considera un sistema de almacenamiento de energía mediante baterías, llamado BESS (Battery Energy Storage System), permitiendo inyectar energía al sistema en horas donde no se cuente con radiación solar ni viento. Este sistema eléctrico se compone de módulos autocontenidos de baterías de Iones de Litio que se instalarán a un costado de la Subestación Elevadora.

La energía generada por el parque será conducida por líneas de media tensión (33 kV) hasta la subestación elevadora, construida al interior del parque, la que elevará la tensión de 33 kV a 220 kV para ser evacuada a través de una Línea de Alta Tensión de 3,78 km del Proyecto, hasta la Nueva Subestación Seccionadora Loica, conectándose al Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

Durante el desarrollo del estudio de inundación del proyecto, se identificaron 16 grupos de cauces en el área de influencia del proyecto, de los cuales 14 no poseen un nombre oficial, de acuerdo con la carta IGM 1:50000.

Para que el proyecto permita mantener el libre escurrimiento de las aguas en los cauces mencionados, se necesitan seis obras de atravieso, de las cuales dos corresponden a obras tipo badén y cuatro corresponden a obras tipo alcantarilla.

En el contexto de la evaluación ambiental del proyecto, se ha desarrollado el Permiso Ambiental Sectorial 156 (PAS 156) para dichas obras. Este permiso está formado por cuatro partes: (1) una Memoria general, con los contenidos que requiere el PAS de acuerdo con la normativa vigente y un resumen de todos los estudios, (2) un Análisis hidrológico, en el que se estiman caudales de crecida para dimensionar las obras, (3) Modelos hidráulicos, que utiliza los caudales de la hidrología para evaluar las características del flujo bajo

condición natural (sin proyecto) y con la obra proyectada (con proyecto), y (4) Planos tipo de las obras.

A continuación, se presenta el Análisis hidrológico de todas las obras proyectadas.

2. Alcances y objetivos

Se elaboró el Análisis hidrológico de las cuencas aportantes a las obras de atravieso proyectadas, como parte del Permiso Ambiental Sectorial 156. Se atenderán los requerimientos señalados en el reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (reglamento SEIA; Decreto 40, año 2013) y la Guía “Permiso para efectuar modificaciones de cauce” (SEA & DGA, 2014), llamada Guía PAS 156.

Se han desarrollado los contenidos hidrológicos necesarios para estimar caudales de diseño y verificación de las obras, con el objetivo de definir de forma adecuada sus dimensiones y recibir el pronunciamiento favorable del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y de la Dirección General de Aguas (DGA).

3. Zona de estudio

3.1. Ubicación general

El proyecto “Parque Híbrido Eólico, Solar y Almacenamiento de Energía Las Quintas (PHLQ)” se ubica entre las comunas de San Pedro (Región Metropolitana) y Litueche (Región de O’Higgins). En particular, el centro del proyecto se encuentra ubicado a aproximadamente 47 kilómetros al suroeste de la ciudad de Melipilla.

La Figura 3-1 muestra en cartografía la ubicación y delimitación del área del levantamiento ambiental del proyecto, la que considera zonas de paneles, aerogeneradores, red de media tensión, caminos interiores, botaderos, LAT, entre otros. Además, la Tabla 3-1 muestra las coordenadas representativas del proyecto.

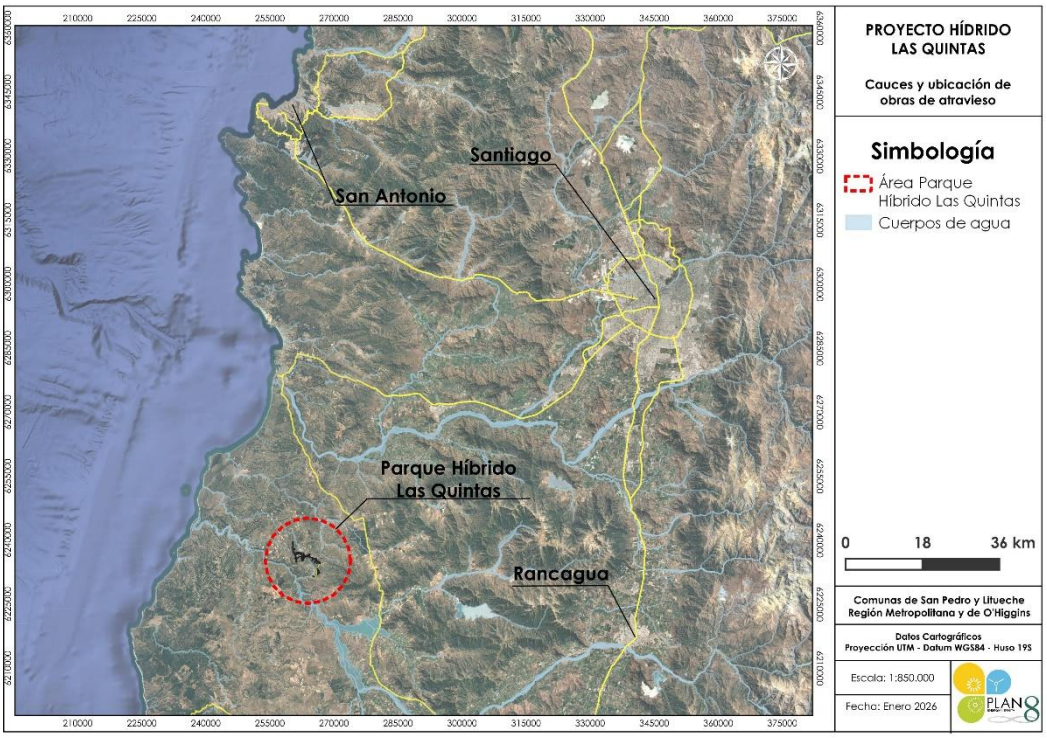


Figura 3-1: Ubicación y sectores del proyecto

Tabla 3-1. Coordenadas representativas del proyecto

Sector	Este [m]	Norte [m]	CRS (*)
Parque Híbrido Eólico, Solar y Almacenamiento de Energía Las Quintas (PHLQ)	263935.23	6236226.27	UTM WGS84 H19 S

(*) Coordinate reference system

3.2. Identificación de los cauces

De acuerdo con la delimitación oficial de la Dirección General de Aguas (DGA) y su Banco Nacional de Aguas (BNA), los cauces y las obras proyectadas se ubican entre la Cuenca Estero Yali (Región Metropolitana) y Cuenca Río Rapel (Región de O'Higgins), además de las subcuencas mostradas en la Tabla 3-2 32.

Tabla 3-2 32. Cuencas según BNA - Región Metropolitana

División	Nombre	Código
Cuenca	Costeras entre Maipo y Rapel	58

Subcuenca	Estero Yali	580
Subsubcuenca	Estero Yali	5800

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3-3-2. Cuencas según BNA - Región de O'Higgins

División	Nombre	Código
Cuenca	Río Rapel	60
Subcuenca	Río Rapel	605
Subsubcuenca	Embalse Central Rapel Entre Brazo Estero Alhué y Muro Central Rapel	6054
Subsubcuenca	Río Rapel Entre Muro Embalse Central Rapel y Bajo Estero Corneche	6055

Fuente: Elaboración Propia

La red de drenaje del proyecto se encuentra compuesta principalmente por quebradas bien definidas que son aportantes al Río Rapel, las cuales no poseen nombre oficial y no poseen riesgo de desbordes importantes ante eventos de crecida.

La red de drenaje se generó mediante herramientas GIS, a partir del Modelo Digital de Terreno (MDT) proveniente del levantamiento topográfico del proyecto, la cual se complementó con la red de drenaje del Modelo de Elevación Digital (DEM, en inglés), en formato ráster, del producto ALOS PALSAR RTC (ASF DAAC, 2011).

Es importante mencionar que la red de drenaje generada es una representación del camino que recorre una gota de agua al seguir la mayor pendiente sobre la superficie de terreno. Esta red se obtuvo a partir de herramientas geoespaciales utilizando la información georreferenciada de elevación de terreno proveniente del MDT y del DEM.

Siendo así, la red de drenaje solamente un resultado geoespacial relacionado con el camino de mayor pendiente en un modelo de elevación digital. Por lo tanto, no necesariamente representará la ubicación de un cauce y, a lo más, solo será un indicador de su posible existencia, lo que deberá contrastarse con cartografía oficial, imágenes satelitales e información levantada en terreno.

En la Figura 3-2 se presenta la red de drenaje del proyecto, incluyendo los cauces que serán intervenidos y son objeto de este permiso. Los cauces en la zona que no poseen un nombre oficial en la red hidrográfica fueron nombrados en la etapa de Estudio de inundación con un código único correlativo a los grupos de cauces estudiados.

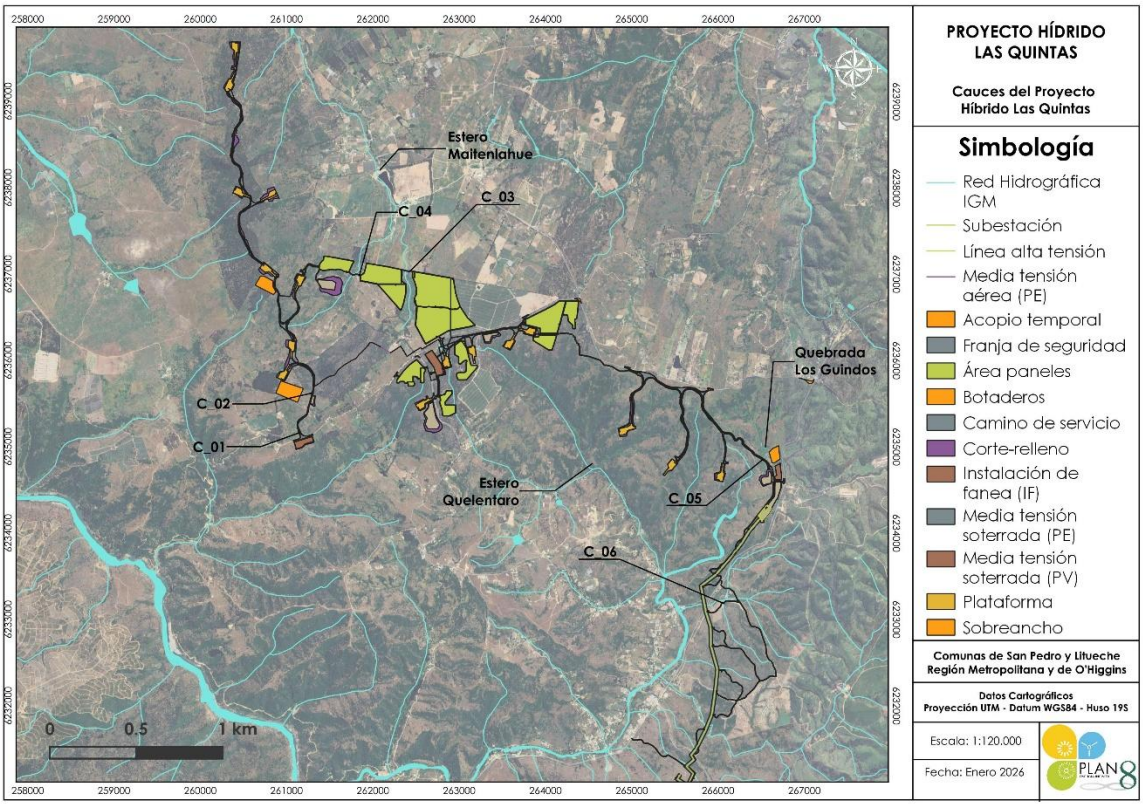


Figura 3-2: Red de drenaje y cauces en estudio

4. Datos

4.1. Estaciones fluviométricas

Las estaciones fluviométricas más cercanas son “Estero Alhue En Quilamuta” (código BNA 06043001-2), con una cuenca aportante de unos 802 km^2, y “Rio Maipo En Cabimbao” (código BNA 04726001-9), con una cuenca de 14915 km^2, aproximadamente.

Tomando en cuenta el gran tamaño de estas cuencas en comparación a las de los cauces de interés, se descartó su uso para la estimación de caudales influyentes en el área del proyecto.

4.2. Estaciones pluviométricas

Se escogieron 3 estaciones pluviométricas (Estación Litueche, Estación Fundo Las Dos Puertas y Estación Rapel) en un radio de 25 km alrededor del proyecto y 1 estación a una

distancia de 36 km para el uso en el relleno de datos. La ubicación de las estaciones y su información general se presenta a continuación:

Tabla 4-1. Información de las estaciones pluviométricas según DGA

Nombre estación	Código BNA	Coordenadas (*)		Fecha	
		Este [m]	Norte [m]	Inicio	Fin
Litueche	6055003	6221536	248245	1979-01-01	2019-09-30
Rapel	6056003	6240222	247305	1940-07-01	2019-09-30
Fundo Las Dos Puertas	5800002	6250021	253643	1990-06-01	2019-08-31
Fundo Los Guindos	5747001	6247706	293453	1989-07-01	2019-12-31

(*) UTM WGS84 H 19 S

Si bien la información entregada por la DGA indica que todas las estaciones seleccionadas cuentan con datos al menos desde el año 1979, se selecciona el rango desde el 1990 hasta el 2019, dado que corresponde al periodo con mayor cantidad de información.

La Figura 4-1 muestra la ubicación de las estaciones pluviométricas seleccionadas.

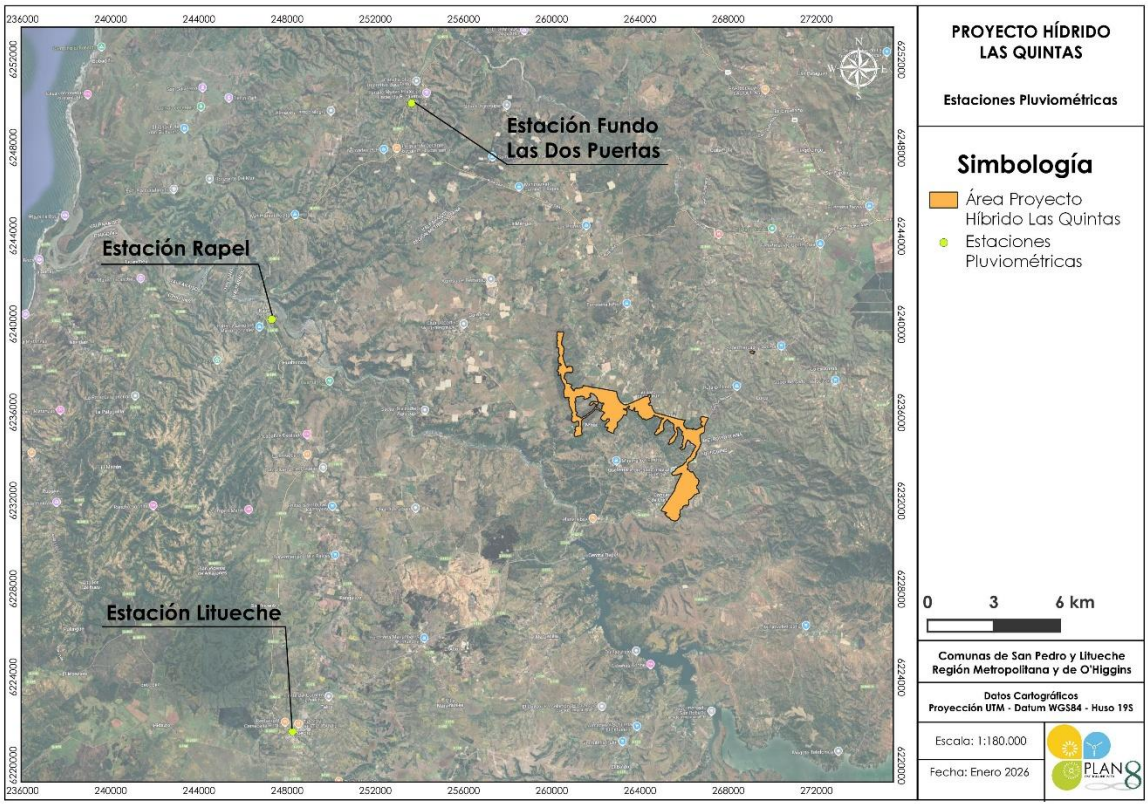


Figura 4-1: Ubicación de estaciones pluviométricas

4.3. Modelo de elevación digital

Se utilizaron dos fuentes de información de elevación de terreno: (i) un Modelo de Elevación Digital (DEM, en inglés), en formato ráster, del producto ALOS PALSAR RTC (ASF DAAC, 2011), cuya resolución espacial es de 12.5 m, y (ii) un Modelo Digital de Terreno (MDT), también en formato ráster, cuya topografía es propiedad de PLAN 8 ENERGÍA INFINITA LTDA y presenta una resolución es de 0.5 m.

La representación del DEM y el MDT se muestra a continuación:

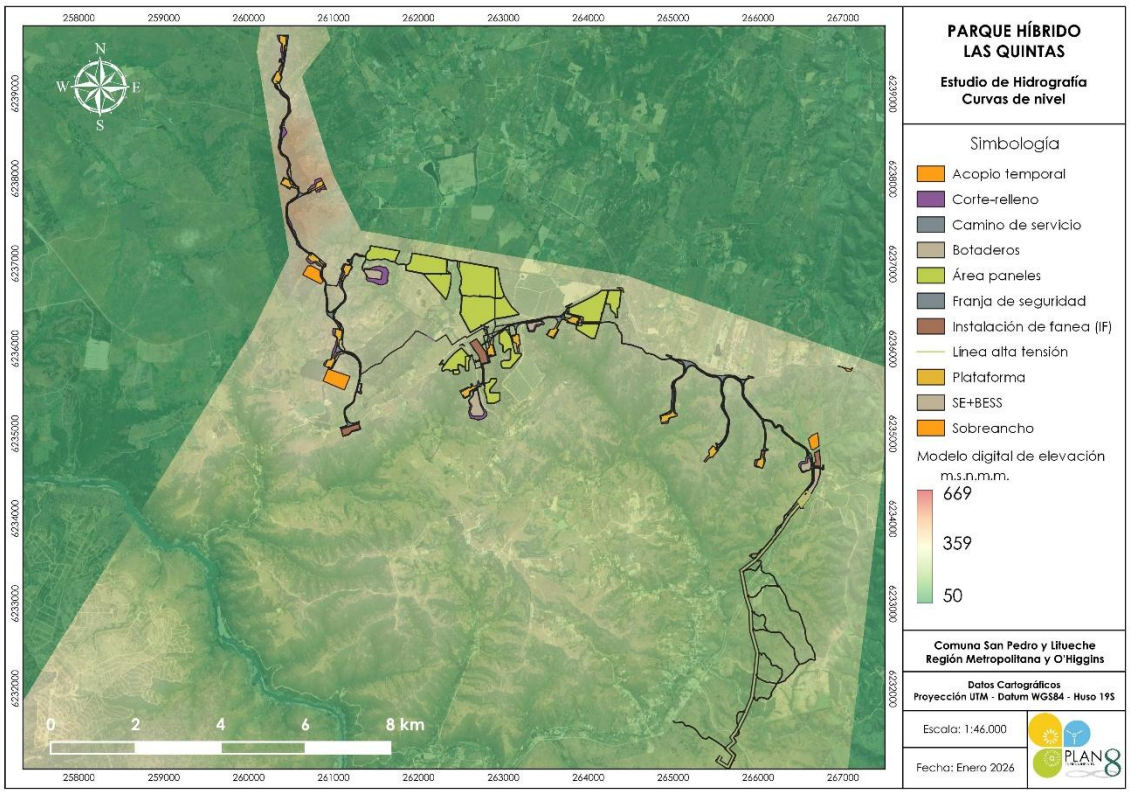


Figura 4-2: Representación del modelo de elevación digital (DEM)

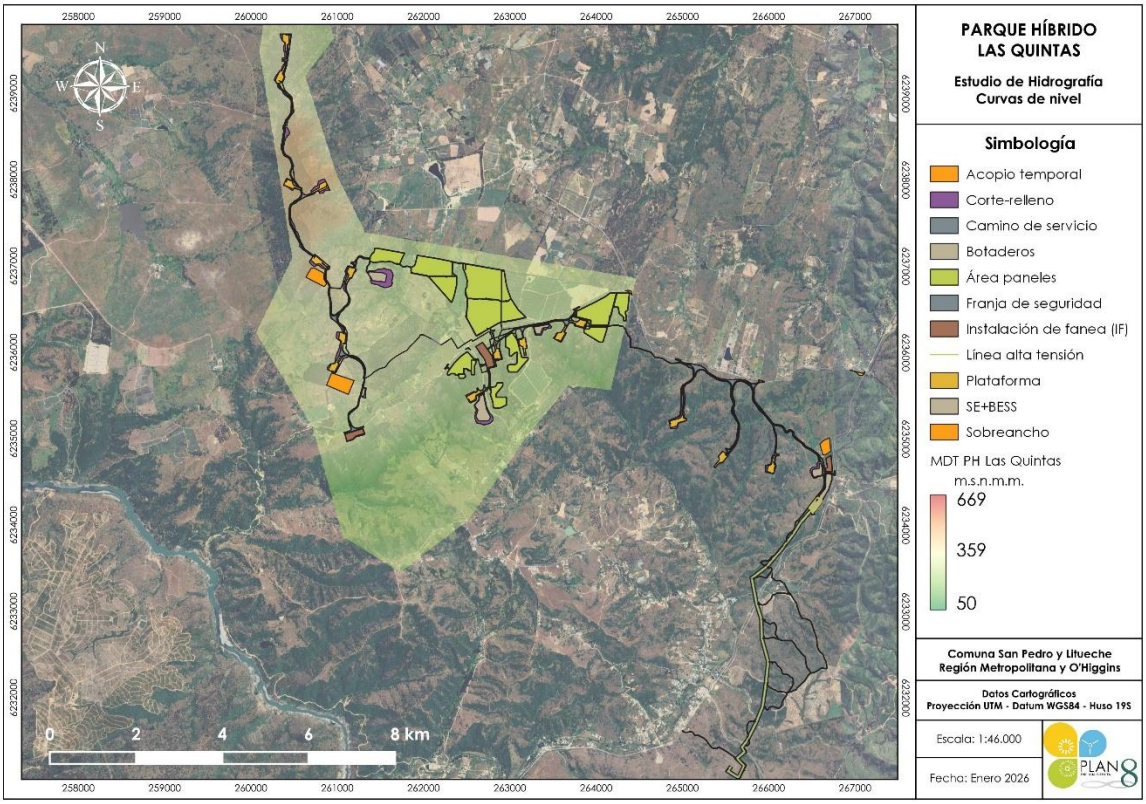


Figura 4-3: Representación del modelo digital de terreno (MDT)

En todos los casos se delimitó las cuencas utilizando el MDT, ya que sus áreas aportantes son pequeñas y están contenidas completamente por este ráster.

4.4. Uso de suelo y clasificación

La información del uso y cobertura de suelo (LULC, en inglés) se obtuvo a partir de un archivo en formato ráster del producto “Sentinel-2 land cover time series 2017-2021” (Karra, y otros, 2021), cuya resolución espacial es de 10 m y se extiende por sobre toda el área de estudio. La representación del uso de suelo se muestra en la siguiente figura:

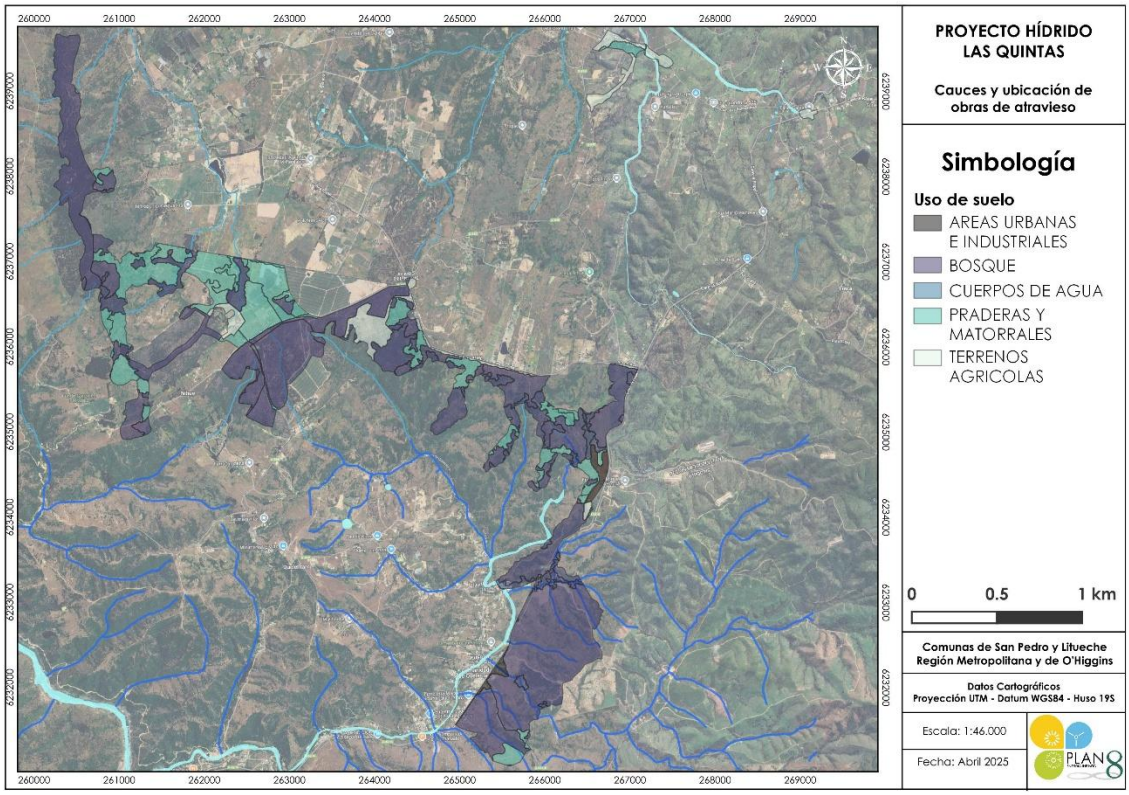


Figura 4-4: Uso de suelo y clasificación

5. Metodología

No existen estaciones fluviométricas representativas de la zona de estudio, por lo tanto, se estimaron los caudales máximos mediante métodos indirectos del tipo precipitación-escorrentía.

En este caso, se acotó una cuenca para el área del proyecto, ver figura 5-1, por medio de diferentes herramientas digitales como QGIS, Google Earth, Modelos Digitales de Elevación (DEM) y Modelo Digital del Terreno (MDT).

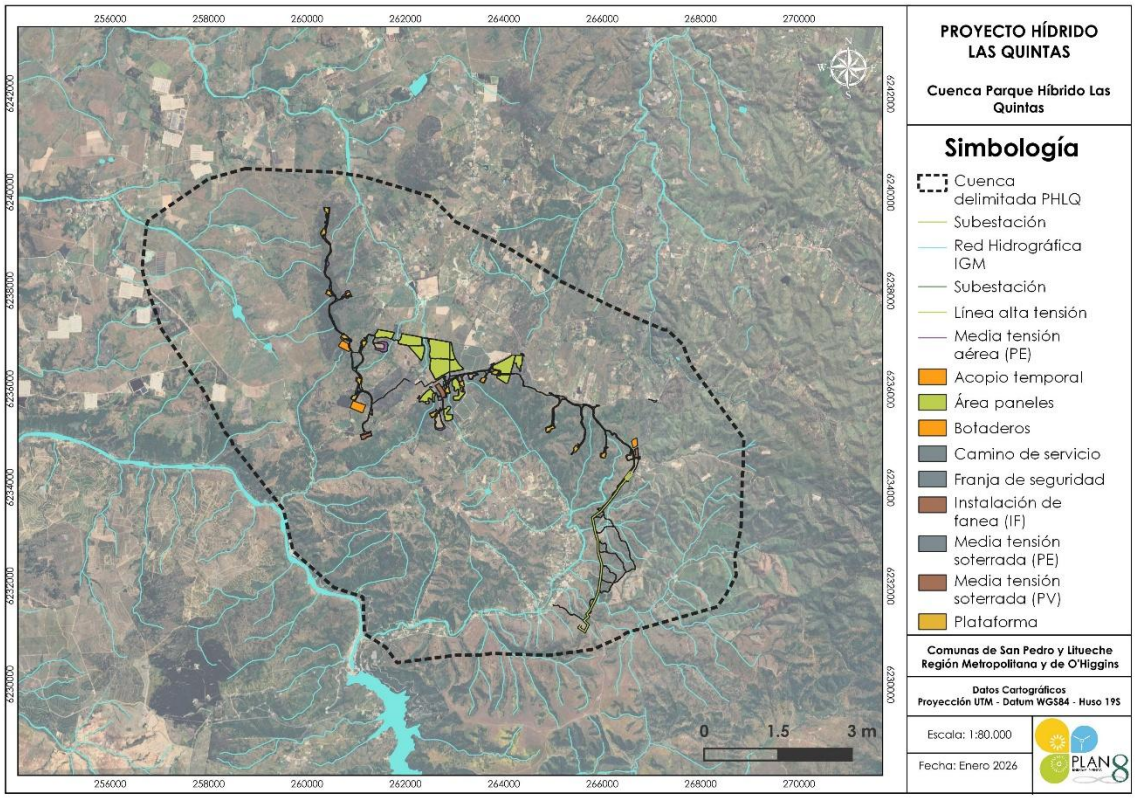


Figura 5-1: Delimitación cuenca a utilizar

Se han identificado 6 cauces que requieren algún tipo de adecuación para permitir el libre flujo, de los cuales no todos poseen nombres según la DGA ni la BNA. Para poder clasificarlos de forma correcta, éstos se detallan en la figura 5-2.

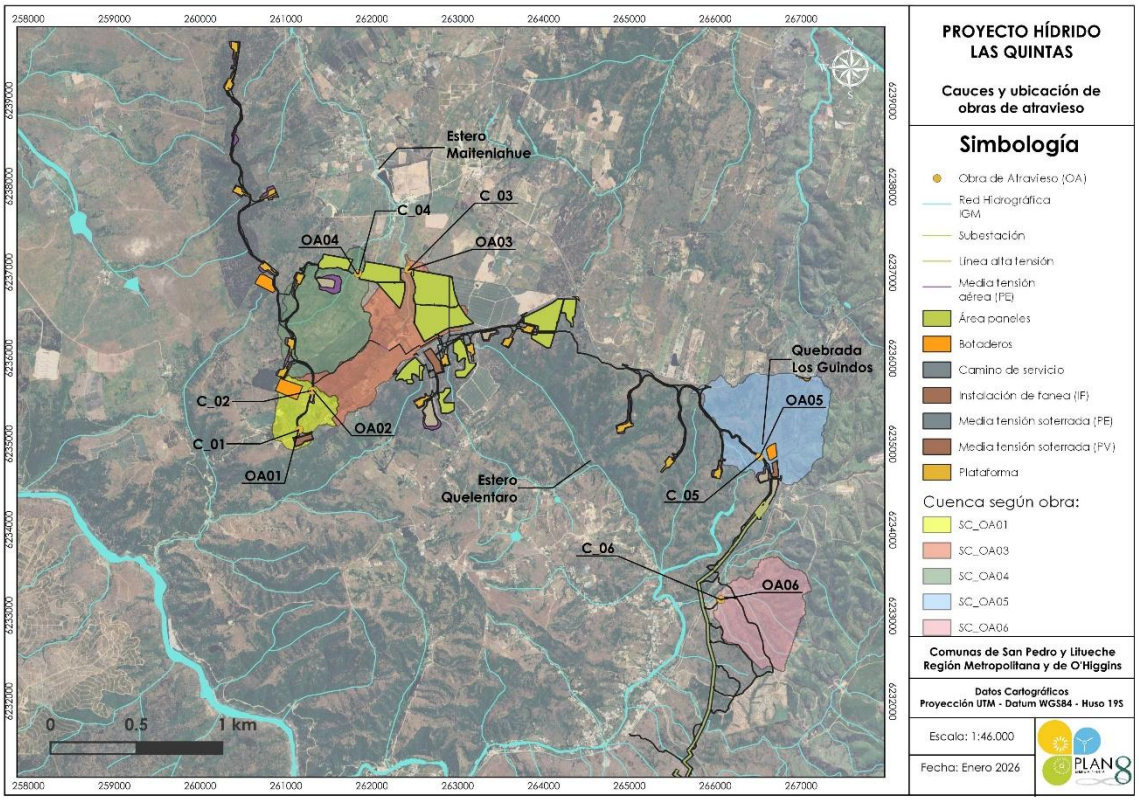


Figura 5-2: Delimitación cuencas por cauces a analizar

Para cada uno de los álveos se asigna una cuenca aportante, en las que solo se puede utilizar el método racional, debido a que no poseen el tamaño suficiente para la aplicación de otras técnicas. Lo anterior es respaldado por el “Manual de cálculo de crecidas” de la DGA (1995), donde los métodos convencionales son válidos para cuencas con superficie mayor a 20 km^2, o en la “Guía metodológica para proyectos de modificación de cauce” (DGA, 2016), donde se recomienda el método racional para cuencas menores a 20 km^2.

Tabla 5-1: Área cuencas en el PH Las Quintas

Nombre Cuenca	Área [km^2]
Río Rapel	14.177
Estero Yali	2.727

El análisis está enfocado en las cuencas aportantes a las obras de atravieso proyectadas, estimando los caudales máximos instantáneos con periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 150 y 200 años, pero enfocándose en los caudales de diseño y verificación de cada obra.

La metodología empleada para la estimación de los caudales se presenta a continuación.

5.1. Parámetros geomorfométricos

Las cuencas se delimitaron mediante el programa QGIS, utilizando los MDT y DEM mencionados antes, cuya resolución espacial es de 0.5 y 12.5 m, respectivamente.

Con estos modelos digitales de elevación se determinaron los principales parámetros morfométricos de las cuencas, tales como su superficie, longitud del cauce principal, cota máxima y mínima y pendiente media.

Además, en el caso del método racional se debe estimar el tiempo de concentración de las cuencas. Para ello, se utilizaron las expresiones de California Division of Highways and Public Works, Kirpich, Norma Española y Giandotti.

$$t_{c1} = 0.95 \cdot \left[\frac{L^3}{H}\right]^{0.385} \quad (1)$$

$$t_{c2} = 0.000325 * \frac{(L * 1000)^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (2)$$

$$t_{c3} = 0.3 * \left(\frac{L^{0.76}}{S^{0.19}}\right) \quad (3)$$

$$t_{c4} = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H}} \quad (4)$$

Donde:

t_{cx}	:	tiempo de concentración según (1) California Division of Highways and Public Works; (2) Kirpich; (3) Normas Españolas; (4) Giandotti	[minutos]
L	:	longitud del cauce principal	[km]
S	:	pendiente media de la cuenca	[m/m]
A	:	área de la cuenca	[km^2]
H	:	desnivel medio de la cuenca	[m]

Las expresiones de Normas Españolas, California Culverts Practice y Giandotti utilizan unidades de [km], [m/m] y [km^2].

5.2. Análisis de frecuencia

Se utilizó un enfoque de duración parcial (Chow, Maidment, & Mays, 1988; Maidment, 1993), también llamado de máximos sobre umbral (peaks over threshold o POT, en inglés). Su principal diferencia con una serie de máximos anuales (AM, en inglés) radica en que una serie POT no ignora el segundo o tercer valor más alto de un mismo año (que podría ser mayor al máximo de otro año). Este enfoque representa de forma más acertada la definición teórica de periodo de retorno. La Figura 5-3 muestra un ejemplo con la diferencia entre ambas series:

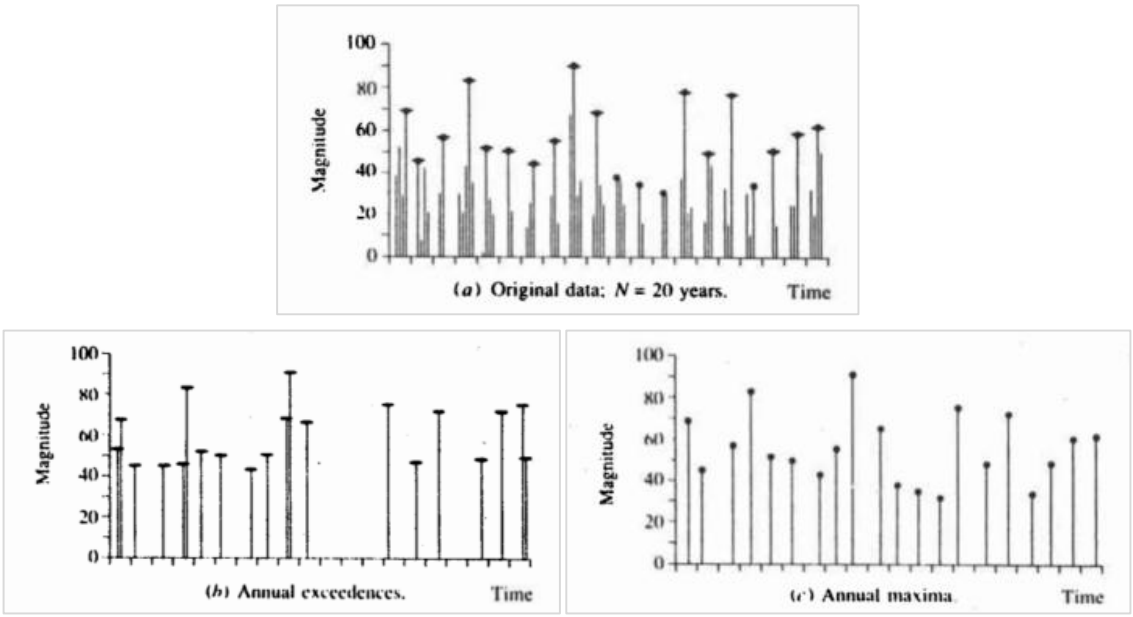


Figura 5-3. Serie de datos (arriba) y comparación entre una serie POT (izquierda) y una serie AM (derecha). Modificado de (Chow et al., 1988)

Para las tres estaciones ya mencionadas se seleccionó un periodo de 30 años de datos, comprendidos entre 1990 a 2019. Por otra parte, para la selección de los máximos, se definió un criterio de independencia o periodo seco entre tormentas de 24 horas, con el objetivo de no mezclar eventos que pudieran ser dependientes entre sí.

En función de lo anterior se generaron series POT de 30 máximos para cada estación. A cada una de estas series se ajustó las siguientes distribuciones de probabilidad:

- Generalizada de Valores Extremos
- Log-Normal
- Normal

Se evaluó la bondad de ajuste de cada distribución comparando los estadísticos de Kolmogórov-Smirnov (KS) y Chi Cuadrado (chi2). Luego, se seleccionó la distribución con mejor ajuste, como aquella con el estadístico de valor más bajo. Con la distribución escogida se calculó la precipitación máxima diaria para periodos de retorno entre 2 y 200 años.

5.3. Variabilidad espacial

Se interpolaron espacialmente los resultados del análisis de frecuencia de las tres estaciones pluviométricas mediante un método de interpolación IDW (inverse distance weighting - ponderación por distancia inversa), utilizando una vez más el programa QGIS. Como resultado de esta interpolación se obtuvo un ráster de precipitación máxima diaria para cada uno de los periodos de retorno.

Aunque existen métodos de interpolación que pueden ser más adecuados para trabajar con datos de precipitación (como el kriging o el co-kriging), se optó por la interpolación IDW porque su aplicación es más simple y en general entrega un resultado un poco más conservador (valores de precipitación levemente mayores).

A diferencia de los cálculos de parámetros geomorfométricos, donde se entrega un valor para cada cuenca, en este caso se obtuvo valores únicos de precipitación para el grupo de cuencas completo, ya que la variación de la precipitación dentro de un mismo grupo era mínima. De esta forma, se unificaron las cuencas en zonas según grupos de cuencas y se calculó la media espacial de cada ráster de precipitación sobre dicha área.

5.4. Valores IDF

Los valores de intensidad-duración-frecuencia (IDF) se estimaron a partir de los coeficientes de duración y frecuencia presentes en la literatura, utilizando la siguiente expresión (MOP, 2020):

$$P_d^T = K \cdot CD_d \cdot CF^T \cdot P_D^{10} \qquad (4)$$

Donde:

P_d^T	:	precipitación con periodo de retorno T años y duración d horas	[mm]
K	:	coeficiente de ajuste entre la precipitación máxima diaria y la precipitación máxima en 24 horas continuas	[-]
CD_d	:	coeficiente de duración para d horas	[-]
CF^T	:	coeficiente de frecuencia para T años	[-]

P_D^{10} : precipitación diaria con periodo de retorno 10 años [mm]

En el caso del método racional, la duración de interés debe ser igual al tiempo de concentración de la cuenca. Dado que las cuencas son de menor tamaño, es probable que su tiempo de concentración será menor a una hora, en cuyo caso se utiliza además la expresión de Bell (MOP, 2020):

$$P_d^T = (0.54 \cdot d^{0.25} - 0.5) \cdot (0.21 \cdot \ln(T) + 0.52) \cdot P_1^{10} \quad (5)$$

Donde:

P_d^T : precipitación con periodo de retorno T años y duración d minutos [mm]

P_1^{10} : precipitación con periodo de retorno 10 años y duración 1 hora [mm]

Sin embargo, en este caso no se necesitan cálculos asociados a la frecuencia de la precipitación, ya que se cuenta con el análisis de frecuencia completo para diferentes periodos de retorno. Por lo tanto, las ecuaciones (4) y (5) se simplifican de la siguiente forma:

$$P_d^T = K \cdot CD_d \cdot P_D^T \quad (6)$$

$$P_d^T = (0.54 \cdot d^{0.25} - 0.5) \cdot P_1^T \quad (7)$$

Donde P_D^T es la precipitación diaria con periodo de retorno T años y P_1^T es la precipitación en 1 hora con periodo de retorno T años. En este caso, se utilizaron los coeficientes de duración de la estación Rapel entre 1 y 24 horas (MOP, 2020).

Tabla 5-2. Coeficientes de duración estación Rapel

Duración [horas]	CD_d [-]	Duración [horas]	CD_d [-]
1	0.147	10	0.640
2	0.233	12	0.709
4	0.337	14	0.787
6	0.465	18	0.907
8	0.558	24	1.00

Por último, la intensidad de precipitación i_d^T queda definida por:

$$i_d^T = P_d^T / d \quad (8)$$

donde d se mide en horas.

5.5. Método racional

Este método ha sido ampliamente utilizado en hidrología, siendo su principal característica la suposición de una proporcionalidad directa entre la escorrentía y el agua caída. El caudal máximo según el método racional queda definido por la expresión (MOP, 2020):

$$Q = \frac{C \cdot i_{t_c}^{T} \cdot A}{3.6} \qquad (9)$$

Donde:

Q	:	caudal máximo instantáneo	[m^3/s]
C	:	coeficiente de escorrentía adimensional	[-]
$i_{t_c}^{T}$	:	intensidad de precipitación con periodo de retorno T y duración igual al tiempo de concentración t_c	[mm/hora]
A	:	área pluvial de la cuenca	[km^2]

La intensidad asociada al tiempo de concentración se obtiene a partir de las ecuaciones (6), (7) y (8). Por otra parte, el coeficiente de escorrentía se calcula según el método propuesto en el Manual de Carreteras (MOP, 2020) que examina 4 factores que influyen en su magnitud (relieve, infiltración, vegetación y capacidad de almacenamiento), sumando las contribuciones de cada uno.

Se recomienda el uso del método racional en cuencas con una superficie menor a 20 km^2 (DGA, 2016).

6. Resultados

6.1. Parámetros geomorfométricos

Se delimitaron las cuencas aportantes a las obras de atravieso proyectadas. Los parámetros geomorfométricos de las cuencas son los siguientes:

Tabla 6-1. Parámetros geomorfométricos de las cuencas

Parámetro	Símbolo	Unidad	C_01	C_02	C_03	C_04	C_05	C_06
Área	A	km^2	0.39	0.06	0.01	0.11	0.18	0.1
Long. Cauce principal	L	km	1.35	0.737	0.252	0.856	0.475	0.297
Altura mínima	Hmín	m	270	298.07	425.15	279.18	264	239
Altura máxima	Hmáx	m	366	367.96	447.66	353.11	292	283
Pendiente media	S	m/m	0.07	0.09	0.09	0.09	0.06	0.14
Desnivel máximo	Δh	m	96	69.89	22.51	73.93	28	44.37
Centroide cauce	Lg	-	0.68	0.37	0.13	0.43	0.24	0.14
Altura media	H	m	318	333.015	436.405	316.145	278	261
Tiempo de concentración	Kirpich	horas	0.24	0.14	0.06	0.16	0.12	0.05
	Norma Española	horas	0.62	0.37	0.17	0.42	0.29	0.17
	Giandotti	horas	0.32	0.14	0.05	0.18	0.18	0.13
	tc promedio	horas	0.35	0.20	0.08	0.23	0.18	0.10

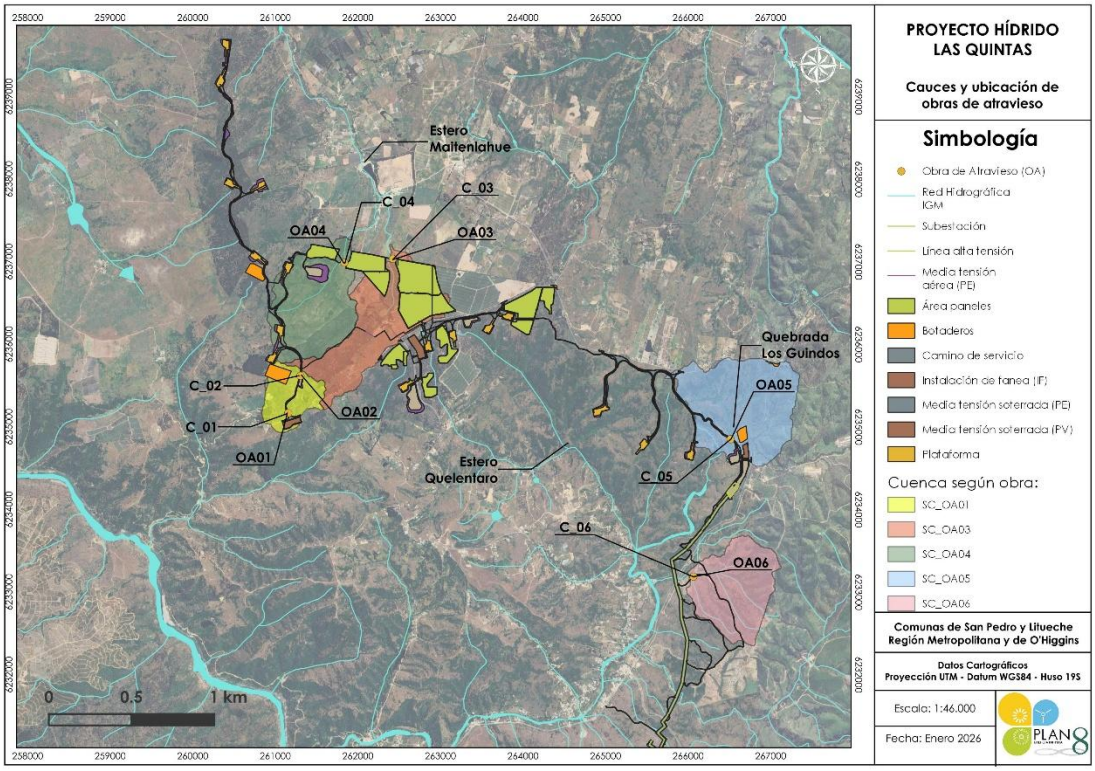


Figura 6-1. Delimitación de las cuencas aportantes

6.2. Análisis de frecuencia

Se ajustaron las distribuciones de probabilidad a las tres estaciones meteorológicas, obteniendo las siguientes precipitaciones máximas:

Tabla 6-2. Precipitación máxima diaria por estación para diferentes periodos de retorno [mm]

Nombre de la estación	Periodo de retorno "T "[años]							
	2	5	10	20	25	50	100	200
Litueche	50.89	66.97	77.62	87.83	91.07	101.05	110.95	120.82
Rapel	63.03	83.83	97.60	110.81	115.00	127.91	140.72	153.49
Fundo las dos puertas	82.18	115.90	138.23	159.65	166.44	187.37	208.14	228.84

A partir de la comparación de los estadísticos de los tests aplicados, se deduce que las estaciones “Litueche”, “Rapel” y “Fundo Las Dos Puertas” presentaron un mejor ajuste con la distribución Generalizada de Valores Extremos, mientras que para el test de Chi-Cuadrado, la estación “Fundo Las Dos Puertas” no se ajusta adecuadamente. Para más detalles, los valores de los estadísticos de cada test se presentan en la Sección 9.

6.3. Método racional

En primer lugar, se estimó el coeficiente de escorrentía y se amplificó en función del periodo de retorno, obteniendo lo siguiente:

Tabla 6-3. Estimación del coeficiente de escorrentía para las OA 01, 02 y 03

Factor	OA 01		OA 02		OA 03	
	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor
Relieve	Bajo	0.11	Alto	0.15	Bajo	0.11
Infiltración	Normal	0.09	Bajo	0.09	Alto	0.10
Cobertura vegetal	Alto	0.10	Alto	0.10	Alto	0.08
Almacenamiento superficial	Alto	0.08	Alto	0.08	Alto	0.08
Suma		**0.38**		**0.42**		**0.37**

Tabla 6-4: Estimación del coeficiente de escorrentía para las OA 04, OA 05 y OA 06

Factor	OA 04		OA 05		OA 06	
	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor
Relieve	Bajo	0.11	Bajo	0.11	Bajo	0.11
Infiltración	Alto	0.10	Alto	0.10	Alto	0.10
Cobertura vegetal	Normal	0.07	Normal	0.07	Normal	0.07
Almacenamiento superficial	Alto	0.08	Alto	0.08	Alto	0.08
Suma		**0.36**		**0.36**		**0.36**

Tabla 6-5. Amplificación del coeficiente de escorrentía en función del periodo de retorno

T [años]	Factor de amplificación	OA 01	OA 02	OA 03	OA 04	OA 05	OA 06
2	1.00	0.39	0.43	0.47	0.48	0.43	0.40
5	1.00	0.39	0.43	0.47	0.48	0.43	0.40
10	1.00	0.39	0.43	0.47	0.48	0.47	0.40
25	1.10	0.43	0.47	0.52	0.53	0.52	0.44
50	1.20	0.47	0.52	0.56	0.58	0.52	0.48
100	1.25	0.49	0.54	0.59	0.60	0.50	0.50
150	1.25	0.49	0.54	0.59	0.60	0.50	0.50
200	1.25	0.49	0.43	0.59	0.60	0.54	0.50

En resumen, los resultados para cada cuenca son:

Tabla 6-6. Caudal máximo instantáneo con el Método racional [m^3/s]

Periodo de retorno [años]	OA 01	OA 02	OA 03	OA 04	OA 05	OA 06
2	0.125	0.019	0.058	0.002	0.003	0.035
5	0.377	0.058	0.174	0.011	0.010	0.106
10	0.528	0.081	0.243	0.015	0.014	0.149
25	0.694	0.107	0.320	0.018	0.018	0.196
50	0.753	0.116	0.348	0.021	0.019	0.212
100	0.933	0.144	0.431	0.023	0.024	0.263
200	1.201	0.185	0.554	0.032	0.031	0.339

7. Conclusiones y comentarios

Se estimaron los caudales máximos instantáneos de las cuencas aportantes a cada obra y los periodos de retorno de 2 a 200 años. Los resultados permitirán evaluar el comportamiento hidráulico del cauce bajo condición natural (sin proyecto) y con la obra proyectada (con proyecto).

En las tablas siguiente se presentan los caudales de diseño y verificación de cada obra. En el caso de las alcantarillas esto corresponde a periodos de retorno de 50 y 100 años, respectivamente, mientras que en el caso de los badenes se utilizaron periodos de retorno de 100 y 200 años (DGA, 2016).

Tabla 7-1. Caudales máximos instantáneos para diseño y verificación para las OA 01 y 02 [m^3/s]

Periodo de retorno [años]	Condición	OA 01	OA 02
100	Diseño	0.933	0.144
200	Verificación	1.201	0.185

Tabla 7-2. Caudales máximos instantáneos para diseño y verificación para las OA 03, 04, 05 y 06 [m^3/s]

Periodo de retorno [años]	Condición	OA 03	OA 04	OA 05	OA 06
100	Diseño	0.431	0.023	0.024	0.263
200	Verificación	0.554	0.032	0.031	0.339

8. Referencias

ASF DAAC. (2011). ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res; Includes Material © JAXA/METI 2007. *ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res; Includes Material © JAXA/METI 2007*. doi:10.5067/Z97HFCNKR6VA

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology.* Singapore: McGraw-Hill.

DGA. (1995). *Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica.* Santiago: Dirección General de Aguas.

DGA. (2016). *Guías metodológicas para la presentación y revisión técnica de proyectos de modificación de cauces naturales y artificiales.* Santiago: Dirección General de Aguas.

Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J. C., Mathis, M., & Brumby, S. P. (2021). Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning. *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, (págs. 4704-4707). doi:10.1109/IGARSS47720.2021.9553499

Maidment, D. R. (1993). *Handbook of hydrology.* McGraw-Hill.

MOP. (2020). *Manual de Carreteras. Volumen 3. Instrucciones y criterios de diseño.* Ministerio de Obras Públicas.

NRCS. (2010). Chapter 15. Time of concentration. En *National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology.* Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture.

SEA, & DGA. (2014). *Permiso para efectuar modificaciones de cauce.* Servicio de Evaluación Ambiental.

SEA, DGA, & DOH. (2014). *Permiso obras de regularización o defensa de cauces naturales.* Servicio de Evaluación Ambiental.

9. Apéndice

9.1. Tests de bondad de ajuste

Para las estaciones “Fundo Las Dos Puertas”, “Litueche” y “Rapel”, se obtiene lo expuesto en la Tabla 9-31, Tabla 9-32 y la Tabla 9-3. En estos casos, se escoge la distribución Generalizada de Valores Extremos, debido a que presenta los menores valores para el estadístico del test de Kolmogorov-Smirnov y entrega precipitaciones mayores para periodos de retorno más altos (50, 100 y 200 años), por lo que se considera un escenario más conservador.

Tabla 9-1: Resultados tests de bondad de ajuste para estación “Fundo Las Dos Puertas”

Test de bondad	Normal	LogNormal	Gamma	Valores Extremos
KS	0.23	0.16	0.19	0.07
Chi2	7.81	7.81	7.81	7.81

Tabla 9-2: Resultados tests de bondad de ajuste para estación Litueche

Test de bondad	Normal	LogNormal	Gamma	Valores Extremos
KS	0.12	0.06	0.07	0.07
Chi2	7.81	7.81	7.81	7.81

Tabla 9-3: Resultados tests de bondad de ajuste para estación Rapel

Test de bondad	Normal	LogNormal	Gamma	Valores Extremos
KS	0.14	0.10	0.11	0.06
Chi2	7.81	7.81	7.81	7.81

PLAN 8
ENERGIA INFINITA

www.plan-8.cl

+56 9 3400 1439