



**ESTUDIO COSECHA DE AGUAS LLUVIAS EN
AREAS DE SECANO
REGIÓN DE COQUIMBO
Resumen Ejecutivo**

**Jorge Romero Navea
Ingeniero Agrónomo
Consultor en Proyectos de Riego Agrícola**

Noviembre, 2015

INDICE

1.	ANTECEDENTES.....	1
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Revisión bibliográfica internacional.....	3
2.2	Revisión bibliográfica nacional.....	3
3.	SELECCIÓN DE MICROCUENCAS.....	4
3.1	SELECCIÓN DE LAS MICROCUENCAS.....	4
1)	Primer criterio:.....	4
2)	Segundo criterio.....	5
3)	Tercer criterio (comunidades agrícolas).....	5
4)	Cuarto criterio (Validación en terreno y autorización de las comunidades agrícolas).....	5
3.2	RESULTADOS.....	5
4.	TOPOGRAFÍA.....	6
5.	PLANOS.....	6
6.	HIDROLOGIA.....	7
6.1	Estimación de caudales medios mensuales en las microcuencas seleccionadas.....	8
6.2	Análisis de Escorrentía Superficial.....	10
6.3	Escorrentía Superficial Mensual.....	12
6.4	Estimación de caudales de crecidas en las cuencas de interés.....	16
6.5	Análisis de Precipitaciones Máximas Anuales en 24 horas.....	16
6.6	Precipitaciones máximas anuales en las cuencas de interés.....	17
6.7	Análisis de Crecidas en las Cuencas de Interés.....	17
6.8	Método Hidrograma Unitario Sintético.....	18
6.9	Resultados.....	18
7.	ESTUDIO GEOELÉCTRICO.....	19

7.1	Metodología	19
7.2	Resultados	20
8.	CALCULOS HIDRÁULICOS	24
8.1	Consideraciones hidráulicas	25
8.2	Estudio de mecánica fluvial	27
9.	ANÁLISIS HIDROLÓGICO OPERACIONAL	28
10.	DISEÑO ESTRUCTURAL PRESAS DE GAVIONES.	34
10.1	Generalidades.	34
10.2	Cargas y sobrecargas verticales.....	34
10.3	Cargas dinámicas. Análisis sísmico.	34
10.4	Cálculo estabilidad de gaviones.	35
10.5	Verificación de tensiones en suelo.....	36
11.	TUBERÍA DE DRENAJE Y POZO LATERAL	39
12.	METODOLOGIA DE DISEÑO DE OBRAS DE INTERCEPCION DE FLUJO SUPERFICIAL	39
13.	PRESUPUESTO DE LAS OBRAS DISEÑADAS.....	39
14.	CONCLUSIONES.	40
15.	RECOMENDACIONES DE FINANCIAMIENTO FUTURO DE OBRAS DE COSECHA DE AGUAS LLUVIAS.....	40

ESTUDIO COSECHA DE AGUAS LLUVIAS EN AREAS DE SECANO

REGIÓN DE COQUIMBO

RESUMEN EJECUTIVO

1. ANTECEDENTES

El Gobierno Regional de Coquimbo, junto con la Corporación Regional de Desarrollo Productivo, han desarrollado el estudio: Cosecha de Aguas Lluvias en áreas de Secano de la Región de Coquimbo, buscando técnicas que permitan aminorar los efectos que causa esta condición de escasez hídrica en la región.

El objetivo del estudio es diseñar en una etapa de investigación, la cosecha de aguas lluvias en tres micro cuencas en el secano de la Región de Coquimbo.

El presente estudio, licitado por la Corporación Regional de Desarrollo Productivo de la Región de Coquimbo, no solo tiene el objetivo de diseñar las obras anteriormente indicadas, sino que además, establecer una metodología de diseño de este tipo de obras, que permitan posteriormente evaluar el costo de inversión en estas obras versus los volúmenes de agua que pueden acumularse superficial y subterráneamente con estas intercepciones de flujo de agua.

El estudio, si bien se denomina Cosecha de Aguas Lluvias, involucra el diseño de intercepción y acumulación de agua superficial e intercepción del flujo subterráneo desde la superficie del suelo hasta una profundidad de cinco (5) metros, que en otros términos, corresponde al diseño de embalses subterráneos o recargas de acuíferos naturales.

El estudio comprendió:

1. Revisión bibliográfica, tanto internacional como nacional, con el objeto de contar con antecedentes técnicos y prácticos que se han desarrollado en este aspecto.
2. Selección de microcuencas para identificar puntos de emplazamientos de obras de intercepción de flujo superficial y subterráneo del escurrimiento de aguas lluvias. Estudios geográficos y vegetación.
3. Topografías de los sectores de las microcuencas seleccionadas y donde se diseñaran los emplazamientos de las obras de intercepción del escurrimiento de las aguas lluvias.
4. Estudios geofísicos, para realizar una descripción geofísica del suelo para identificar sus estratos geofísicos y ubicar el estrato impermeable o roca fundamental.
5. Estudios hidrológicos, para determinar la esorrentía en los sectores seleccionados, calcular las crecidas, con un período de retorno de 1 en 200 años y calcular la socavación que produciría esta crecida en el cauce.
6. Estudios hidráulicos, para diseñar las obras como vertederos, que permitan evacuar sin inconvenientes la crecida con un período de retorno de 1 en 200 años.

7. Dimensionar las obras de Escurrimiento superficial y subterráneo.
8. Calcular estructuralmente las obras dimensionadas, para asegurar su estabilidad ante dichas crecidas y eventos sísmicos.
9. Determinar el presupuesto de construcción de las obras diseñadas
10. Realizar un video virtual que indique en forma simple, el funcionamiento teórico de cosecha de aguas lluvias tanto, en la intercepción y acumulación superficial del escurrimiento de aguas lluvias como, su intercepción subterránea y recarga de los acuíferos naturales.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

La revisión bibliográfica se clasificó en revisión de antecedentes internacionales y nacionales.

2.1 Revisión bibliográfica internacional

La revisión bibliográfica internacional, permitió conocer que el interés por captar y utilizar el escurrimiento de las aguas lluvias, hoy denominado, cosecha de aguas lluvias, es una técnica desarrollada ancestralmente por el hombre para el abastecimiento de agua para la bebida humana y para riego.

Según los investigadores Frasier, Bazza y Tayaa, existen restos arqueológicos de técnicas de cosecha de aguas lluvias desde hace 9.000 años de antigüedad.

Los romanos llegaron a ser maestros en cosecha de aguas lluvia y la construcción de recipientes (cisternas). En Estambul, Cesar Justiniano y Cesar Constantino, construyeron dos grandes cisternas que acumulan 50.000 y 80.000 m³ de agua.

En el continente americano, se han observado otras técnicas de captación de aguas lluvias, desarrolladas hace 500 años en el Suroeste de Estados Unidos, México, India y en África (Frasier, 1994; Bazza y Tayaa, 1994). Existen bastantes obras en América Latina desarrolladas para captar el escurrimiento de aguas lluvias. Estas se han desarrollado en el último siglo en México, Honduras, Perú, Bolivia, Brasil, Costa Rica y otros.

2.2 Revisión bibliográfica nacional.

La revisión bibliográfica nacional nos demuestra que en nuestro país se han desarrollado obras de captación de aguas lluvias en áreas agrícolas de secano, pero que han estado dirigidas especialmente a la conservación de suelos. Especialmente hace referencia a esto el “Compendio de prácticas convencionales del uso sostenible del recurso agua y suelos en zonas áridas y semiáridas, con énfasis en la III y IV Región de Chile” elaborado por INFOR y CORFO en 2011.

Señala este informe que estos trabajos lo han realizado personas que, en muchos casos, distan de ser los más idóneos para estas actividades, y o tienen evaluación cuantitativa de su efectividad.

En el país, se han desarrollado otras técnicas de cosecha de aguas lluvias. Que comprende la cosecha de aguas lluvias colectada en los techos de las casas.

3. SELECCIÓN DE MICROCUENCAS.

Conforme a lo establecido en los términos de referencia de la propuesta del estudio, debían seleccionarse tres microcuencas, que fuesen representativas del secano costero y del secano intermedio de la Provincia de Limarí y una microcuenca ubicada en la Comuna de Canela de la Provincia de Choapa.

3.1 SELECCIÓN DE LAS MICROCUENCAS.

Para estos efectos, se utilizó un software computacional de Modelo Digital de Elevación (MDE), adecuado para estos efectos, seleccionándose el modelo Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

Este modelo se calibró para tener una buena delimitación de microcuencas, para lo cual se sub-divide en cuatro etapas, siendo estas: Relleno de depresiones, cálculo de dirección de flujo, cálculo de acumulación de flujo y delimitación de microcuencas base.

Posteriormente se generó el mapa de microcuencas hidrográficas, a partir de la unión de la capa de acumulación de flujo (red de drenaje) y de la delimitación de microcuencas. Estas capas se caracterizaron por pendiente, mediante el método de Horn, para que seleccionase microcuencas con pendientes inferiores a 5%; pisos altitudinales y caracterización de las microcuencas consiste en la intersección de las diferentes coberturas de información primaria y secundaria con la cobertura de la delimitación de microcuencas. La caracterización abarcó los siguientes campos:

- Tipo de microcuenca
- Drenaje principal
- Agricultura
- Pendiente
- Clima
- Comunidad agrícola

Finalmente se realizó la etapa de selección, filtrando las microcuencas de manera dicotómica en base a los criterios definidos para este estudio. La microcuenca que cumple los requisitos del criterio establecido pasa a la siguiente etapa.

Los criterios de selección derivan de la información generada a partir de la etapa de caracterización, los cuales fueron:

1) Primer criterio:

Este criterio se basó en la localización de las microcuencas, tomando en consideración tres atributos diferentes:

- **Tipo:** La microcuenca debe ser de tipo captación, excluyendo a las cuencas intermedias y costeras. Se aplica este criterio debido a que se busca intervenir una zona de inicio de cauce.
- **Hidrografía:** En esta etapa se descartan las microcuencas que están en un río o estero, debido a que no se pretende intervenir áreas con derechos de aprovechamiento, siendo las cuencas con quebradas o quebradas intermitentes las que continúan con el proceso de selección.
- **Agricultura:** Este criterio descarta microcuencas que presenten agricultura convencional, se seleccionan las zonas donde hay agricultura no convencional (de secano) o zonas no agrícolas en favor del objetivo social de este estudio.

2) Segundo criterio (pendiente de la microcuenca)

Se analizaron las áreas que abarcan la sumatoria de las pendientes ligeras a moderadas (categorías 0-2%, 2-5% y 5-9%) en cada piso altitudinal. Para ello se debe extraer la información de superficie de la intersección de ambas coberturas.

3) Tercer criterio (comunidades agrícolas)

Seleccionar las microcuencas, cuya extensión se encuentre exclusivamente bajo el área de una comunidad agrícola.

4) Cuarto criterio (Validación en terreno y autorización de las comunidades agrícolas)

Finalmente, se visitaron las microcuencas seleccionadas para validar la información generada a partir de la metodología antes señalada. Para ello, se generó un set de cartografía con todas las capas utilizadas más la información detallada de cada microcuenca para realizar un recorrido en terreno e interactuar con los actores sociales de cada una de las áreas de estudio. De las directivas de las Comunidades Agrícolas, se requirió por parte de los integrantes de la Comunidades Agrícolas involucradas, su autorización para utilizar parte de sus terrenos para desarrollar el estudio de Cosecha de Aguas Lluvias.

3.2 RESULTADOS.

Los resultados de la aplicación del Modelo Digital de Elevación, con los criterios establecidos fueron los siguientes:

RESULTADOS DE SELECCIÓN DE MICROCUENCAS

SECTOR	Microcuencas identificadas	Selección al aplicar los criterios definidos				Microcuenca elegida
		1 ^{er} Criterio	2 ^{do} Criterio	3 ^{er} Criterio	4 ^{to} Criterio	
Secano Costero (Prov. Limarí)	68	28	24	4	1	La Isla - Peña Blanca
Secano Intermedio (Prov. Limarí)	89	25	18	7	1	La Moralina - Manquehua
Secano Intermedio (Prov. Choapa)	112	47	12	5	1	Los Rulos - Canaela Alta

Además de la selección de las microcuencas, se realizó una caracterización del secano costero y del secano intermedio de la Provincia de Limarí y del secano intermedio de la Provincia de Choapa. Caracterizaciones sociodemográficas, ambientales, productivas y de las Comunidades agrícolas existentes en las Comunas de Ovalle, Combarbalá y Canela.

Se identificaron las localidades y ubicación geográfica en coordenadas UTM WGS 84 de los Comités de Agua Potable Rural (APR), existentes en las Comunas donde se seleccionaron las microcuencas, que corresponden a las Comunas de Ovalle, Combarbalá y Canela.

En la Provincia de Limarí, Comuna de Ovalle se identificaron 53 APR, más el APR particular de la Comunidad Agrícola de Peña Blanca. En la Comuna de Combarbalá, de la misma provincia, se identificaron 24 APR y en la Comuna de Canela de la Provincia de Choapa se identificaron 10 APR.

4. TOPOGRAFÍA.

La topografía, es uno de los antecedentes base del proyecto, conjuntamente con los antecedentes hidrológico y estudios geofísicos.

El desarrollo de la topografía, fue realizado con una estación total, Marca Nikon, Modelo DTM 332.

La georreferenciación, se efectuó con un GPS marca Garmin, en coordenadas UTM WGS 84, uso 19.

Se materializaron en terreno dos Puntos de Referencia (PR) en cada topografía desarrollada para las microcuencas seleccionadas y se efectuó una monografía de cada punto de referencia.

5. PLANOS.

Los planos, productos de la topografía, desarrollados en la primera etapa fueron:

- Plano de planta en escala 1:1.000; perfil longitudinal del eje de la quebrada, en escala vertical 1:250 y Horizontal 1:500. Perfiles longitudinales de los puntos de emplazamiento de las barreras, en escala vertical 1:250 y Horizontal 1:500.
- Plano de perfiles transversales cada 20 metros de la quebrada, en escala vertical 1:250 y Horizontal 1:500.

Posteriormente se complementaron con los planos de diseño de las obras y perfiles para calcular el movimiento de tierra para la instalación de la lámina HDPE y la capacidad de acumulación de cada obra:

6. HIDROLOGIA

El análisis hidrológico desarrollado corresponde a la estimación de los caudales medios mensuales y caudales máximos instantáneos de crecidas para 3 microcuencas de régimen de escorrentía intermitente, ubicadas en las comunas de Canela, Combarbalá y Ovalle, de la Región de Coquimbo, y que son denominadas Los Rulos, La Moralina y Peñablanca, respectivamente.

Los caudales medios mensuales fueron estimados para un período estadístico de 35 años en su condición natural, mientras que los caudales de crecida se determinarán para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años.

Las cuencas de estudio forman parte de las hoyas hidrográficas de los ríos Choapa (Los Rulos) y Limarí (La Moralina y Peñablanca). Estos sectores presentan un clima semi-árido templado (con estación seca prolongada) con temperaturas elevadas durante el día, aunque éstas descienden bastante durante las noches dada la amplitud térmica diaria de la región (que es del orden de los 18° a 20°). Por su parte, las precipitaciones son de régimen frontal y se presentan mayoritariamente en invierno, donde precipita más del 80% del total anual. Lo anterior permite considerar un régimen de caudales primordialmente pluvial.

Para llevar a cabo el estudio hidrológico e hidráulico de las cuencas de interés, se recopiló un conjunto de series estadísticas, correspondientes a información pluviométrica registrada históricamente en las estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio y que son operadas por la Dirección General de Aguas (DGA), información cartográfica y antecedentes geomorfológicos de las cuencas de interés.

Las cuencas de las 3 quebradas de estudio no cuentan con estaciones fluviométricas que permitan tener registros de los caudales de éstas y además corresponden a quebradas de escorrentía intermitente de régimen netamente pluvial, por lo que se determinaron las escorrentías y cálculo de crecidas con información estadística de precipitaciones diarias, mensuales y máximas en 24 horas registradas en las estaciones pluviométricas "Combarbalá",

“Embalse Cogotí” y “Peña Blanca”, las cuales forman parte de la red hidrometeorológica que controla la DGA.

Estaciones Pluviométricas DGA Utilizadas

NOMBRE ESTACIÓN	COD BNA	COORDENADAS UTM-WGS84		ALTITUD [msnm]	PERÍODO DE REGISTRO
		ESTE [m]	NORTE [m]		
Combarbalá	04532006-5	309,108	6,549,054	870	1977-2014
Embalse Cogotí	04535001-0	300,687	6,567,289	740	1961-2014
Peña Blanca	04610001-8	256,033	6,578,313	360	1989-2014

Fuente: Dirección General de Aguas

Características geomorfológicas principales de las cuencas de interés

SECTOR	ÁREA [km ²]	COORD. UTM-WGS84		Z _{MIN} [msnm]	Z _{MEDIA} [msnm]	Z _{MAX} [msnm]	i _{CUENCA} [%]	L _{CP} [km]	t _c [hr]
		ESTE [m]	NORTE [m]						
Los Rulos	11.96	286,395	6,543,228	886	1008	1546	8.69	5.59	0.6
La Moralina	37.27	294,424	6,574,094	635	707	1375	4.43	9.52	1.5
Peña Blanca	0.19	256,924	6,578,903	358	442	640	3.23	4.30	0.8

Fuente: Elaboración Propia Romero e Hijo Ingeniería

Donde:

Z _{MIN, MEDIA, MAX} :	Valores de cota mínima, media y máxima, respectivamente, de la cuenca de interés.
i _{CUENCA} :	Pendiente media de la cuenca
L _{CP} :	Longitud del cauce principal
t _c :	Tiempo de concentración de la cuenca

6.1 Estimación de caudales medios mensuales en las microcuencas seleccionadas

La metodología desarrollada para el análisis de escorrentía mensual fue la siguiente:

- i. Se determinaron las precipitaciones anuales para la zona de estudio con las series estadísticas de precipitación diaria de las estaciones pluviométricas presentadas en la tabla anterior y aquellas que presentaban información incompleta, se rellenaron mediante correlación de precipitaciones anuales entre las estaciones utilizadas y posterior prorrateo mensual.
- ii. Se utilizó la fórmula de Peñuelas y el Método de la Curva Número para determinar la escorrentía directa y para calibrar el valor de la Curva Número, respectivamente.
- iii. Se determinaron las precipitaciones efectivas diarias de escorrentía aplicando el método de la Curva Número a la serie de precipitaciones diarias de la estación pluviométrica utilizada.

- iv. Se distribuyó el valor de escorrentía superficial total anual determinado con la fórmula de Peñuelas, según los valores de precipitaciones efectivas diarias, determinando la escorrentía mensual del sector de análisis.
- v. Se determinaron los valores de caudales medios mensuales de las cuencas de interés, con las áreas de cada cuenca y con las series de escorrentía mensual.
- vi. Con los caudales medios mensuales se determinaron las Curvas de Variación Estacional de cada cuenca de interés, para probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 90%.

Precipitaciones Totales Anuales [mm] Sectores de Interés

TEMPORADA	LOS RULOS	LA MORALINA	PEÑA BLANCA
1979 - 1980	45.00	34.30	32.28
1980 - 1981	334.50	282.80	266.11
1981 - 1982	176.50	119.30	112.26
1982 - 1983	382.00	186.10	175.12
1983 - 1984	299.50	257.50	242.31
1984 - 1985	382.50	370.80	348.92
1985 - 1986	63.30	53.30	50.16
1986 - 1987	132.00	82.40	77.54
1987 - 1988	608.20	483.00	454.50
1988 - 1989	43.40	28.90	27.19
1989 - 1990	156.80	116.60	109.72
1990 - 1991	65.80	49.50	66.92
1991 - 1992	362.80	275.10	271.10
1992 - 1993	339.50	332.50	211.00
1993 - 1994	118.90	147.00	94.16
1994 - 1995	83.00	54.30	66.54
1995 - 1996	59.50	55.70	73.00
1996 - 1997	116.50	55.70	103.50
1997 - 1998	599.80	537.40	536.50
1998 - 1999	26.70	20.40	19.20
1999 - 2000	152.40	124.50	132.44
2000 - 2001	324.90	259.50	266.00
2001 - 2002	261.80	224.90	288.00
2002 - 2003	436.50	367.10	335.20
2003 - 2004	109.70	119.00	104.00
2004 - 2005	190.20	184.90	164.20
2005 - 2006	111.40	95.00	80.00
2006 - 2007	132.40	119.70	103.60
2007 - 2008	75.40	56.90	30.60
2008 - 2009	202.70	161.20	99.50
2009 - 2010	118.20	116.00	132.80
2010 - 2011	183.60	159.50	85.90
2011 - 2012	252.10	244.10	285.00
2012 - 2013	58.87	49.67	87.50
2013 - 2014	89.00	106.00	97.50

6.2 Análisis de Escorrentía Superficial

Para el análisis de la escorrentía superficial, se aplicó la fórmula de Peñuelas. Esta fórmula establece una relación para el déficit de escorrentía como función de la precipitación y fue establecida para la zona central de Chile por el ingeniero A. Quintana, basándose en las mediciones realizadas en el Lago Peñuelas.

Luego, con los valores de precipitación total anual presentados en el cuadro anterior, se obtuvieron los valores de escorrentía superficial total anual para las cuencas en estudio. Estos resultados son:

Escorrentía Superficial Total Anual [mm] Sectores de Interés

TEMPORADA	LOS RULOS	LA MORALINA	PEÑA BLANCA
1979 - 1980	1.01	0.59	0.52
1980 - 1981	55.95	39.99	35.41
1981 - 1982	15.58	7.12	6.30
1982 - 1983	72.96	17.32	15.33
1983 - 1984	44.85	33.15	29.36
1984 - 1985	73.15	68.75	60.87
1985 - 1986	2.00	1.42	1.26
1986 - 1987	8.71	3.39	3.01
1987 - 1988	184.95	116.64	103.29
1988 - 1989	0.94	0.42	0.37
1989 - 1990	12.29	6.80	6.02
1990 - 1991	2.16	1.23	2.24
1991 - 1992	65.81	37.84	36.75
1992 - 1993	57.63	55.28	22.26
1993 - 1994	7.07	10.80	4.43
1994 - 1995	3.44	1.47	2.21
1995 - 1996	1.77	1.55	2.66
1996 - 1997	6.79	1.55	5.36
1997 - 1998	179.88	144.40	143.92
1998 - 1999	0.36	0.21	0.18
1999 - 2000	11.61	7.75	8.77
2000 - 2001	52.78	33.67	35.38
2001 - 2002	34.27	25.29	41.47
2002 - 2003	95.27	67.38	56.18
2003 - 2004	6.02	7.08	5.41
2004 - 2005	18.09	17.09	13.48
2005 - 2006	6.20	4.51	3.20
2006 - 2007	8.76	7.16	5.37
2007 - 2008	2.84	1.62	0.47
2008 - 2009	20.54	12.99	4.95
2009 - 2010	6.99	6.73	8.82
2010 - 2011	16.85	12.72	3.69
2011 - 2012	31.78	29.79	40.61
2012 - 2013	1.73	1.23	3.83
2013 - 2014	3.96	5.62	4.75

Para la determinación de la escorrentía superficial (precipitación efectiva) asociada a eventos de lluvia en las cuencas en estudio, se utilizó el método de la Curva Número, que permite estimar las precipitaciones de escorrentía directa como función de las características morfológicas y de uso de suelo de las cuencas.

Luego, considerando los valores de escorrentía superficial total anual determinados mediante la fórmula de Peñuelas, se buscó el valor de Curva Número, mediante sucesivas iteraciones, que permitieran obtener el mismo valor de escorrentía, con el uso de las expresiones de este método.

Realizando este procedimiento se obtuvieron los valores de Curva Número $CN = 72.4$, 72.5 y 71.7 , para los sectores Los Rulos, La Moralina y Peñablanca, respectivamente, los que fueron utilizados para la determinación de la escorrentía superficial mensual (caudales medios mensuales) en los puntos de interés.

6.3 Escorrentía Superficial Mensual

Una vez obtenida la escorrentía superficial total anual de cada cuenca de estudio y calibrado el valor de la Curva Número, se obtuvo el valor de la precipitación efectiva mensual que escurre superficialmente en los sectores de interés.

Con estos valores, se obtuvieron finalmente los caudales medios mensuales de escurrimiento superficial para cada una de las microcuencas analizadas, presentados en las Tablas 3.3 a 3.5.

Caudales Medios Mensuales (l/s). Microcuenca Los Rulos

TEMPORADA	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
1979 - 1980	0	0	0	4.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0.38
1980 - 1981	200	0	0	37.02	0.57	19.29	0	0	0	0	0	0	21.41
1981 - 1982	0	67.69	0	0.11	0	1.81	0	0	0	0	0	0	5.8
1982 - 1983	0	21.86	18.71	150.91	134.9	0	0	0	0	0	0	0	27.2
1983 - 1984	0	2.41	0	197.84	0	0	0	0	0	0	0	0	16.69
1984 - 1985	0	0	0	326.63	0	0	0	0	0	0	0	0	27.22
1985 - 1986	0	0	0	8.95	0	0	0	0	0	0	0	0	0.75
1986 - 1987	0	38.89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.24
1987 - 1988	0	3.1	2.9	683.01	136.91	0	0	0	0	0	0	0	68.83
1988 - 1989	0	0	4.32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.36
1989 - 1990	0	0.27	0	33.68	20.94	0	0	0	0	0	0	0	4.57
1990 - 1991	0	0	0	9.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8
1991 - 1992	0	23.36	279.32	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17	25.24
1992 - 1993	0	5.9	60.59	0	192.77	0	0	0	0	0	0	0	21.61
1993 - 1994	28.13	0	0	4.03	0.29	0	0	0	0	0	0	0	2.7
1994 - 1995	0	0	5.3	10.25	0	0	0	0	0	0	0	0	1.3
1995 - 1996	0	0	0	6.8	1.1	0.02	0	0	0	0	0	0	0.66
1996 - 1997	0	0	0	30.3	0	0	0	0	0	0	0	0	2.53
1997 - 1998	0	0	320.14	0	483.68	0	9.67	0	0	0	0	0	67.79
1998 - 1999	0	0.03	1.62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.14
1999 - 2000	0	7.75	1.73	0	23.74	17.19	2.06	0	0	0	0	0	4.37
2000 - 2001	0	0	192.78	0	0	50.73	0	0	0	0	0	0	20.29
2001 - 2002	0	0	0	153.02	0	0	0	0	0	0	0	0	12.75
2002 - 2003	0	75.76	250.38	84.02	23.29	0	0	0	0	0	0	0	36.12
2003 - 2004	0	26.62	0.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.24
2004 - 2005	0	0	0	12.98	67.77	0	0	0	0	0	0	0	6.73
2005 - 2006	0	15.04	0	0	12.65	0	0	0	0	0	0	0	2.31
2006 - 2007	0	0	38.06	2.28	0	0	0	0	0	0	0	0	3.36
2007 - 2008	0	0	13.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.09
2008 - 2009	0	1.54	35.15	2.9	53.27	0	0	0	0	0	0	0	7.74
2009 - 2010	0	0	19.87	0	11.97	0	0	0	0	0	0	0	2.65
2010 - 2011	0	29.56	39.67	5.21	0	0	0	2.16	0	0	0	0	6.38
2011 - 2012	0	0	146.63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.22
2012 - 2013	0	0	0.23	0	7.49	0	0	0	0	0	0	0	0.64
2013 - 2014	0	17.69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.47
PROMEDIO	6.52	9.64	40.88	50.4	33.47	2.54	0.34	0.06	0	0	0	0	11.99
MÍNIMO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.14
MÁXIMO	200	75.76	320.14	683.01	483.68	50.73	9.67	2.16	0	0	0	0.17	68.83
DESV. EST.	34	18.66	86.14	130.68	90.45	9.42	1.66	0.36	0	0	0	0.03	17.09

Caudales Medios Mensuales (l/s). Microcuenca La Moralina

TEMPORADA	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
1979 - 1980	0	0	0	8.03	0	0.12	0	0	0	0	0	0	0.68
1980 - 1981	461.35	0	0	96.35	0	14.06	0	0	0	0	0	0	47.65
1981 - 1982	0	99.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.25
1982 - 1983	0	5.34	0.82	126.74	108.07	0	0	0	0	0	0	0	20.08
1983 - 1984	0	0	0	461.27	0	0	0	0	0	0	0	0	38.44
1984 - 1985	0	0	0	956.66	0	0	0	0	0	0	0	0	79.72
1985 - 1986	0	0	0	19.73	0	0	0	0	0	0	0	0	1.64
1986 - 1987	0	47.23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.94
1987 - 1988	0	0	0	1544.6	78.5	0	0	0	0	0	0	0	135.26
1988 - 1989	0	0	6.04	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.5
1989 - 1990	0	0	0	34.95	59.66	0	0	0	0	0	0	0	7.88
1990 - 1991	0	0	0.32	16.76	0	0	0	0	0	0	0	0	1.42
1991 - 1992	0	0	544.16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45.35
1992 - 1993	0	3.71	391.83	0	386.31	0	0	0	0	0	0	0	65.15
1993 - 1994	0	150.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.53
1994 - 1995	0	0	21.19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.77
1995 - 1996	0	0	0	21.55	0	0	0	0	0	0	0	0	1.8
1996 - 1997	0	0	0	21.55	0	0	0	0	0	0	0	0	1.8
1997 - 1998	0	0	595.96	0	1411.4	0	21.22	0	0	0	0	0	169.04
1998 - 1999	0	0.01	2.98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25
1999 - 2000	0	1.59	2.38	0	18.5	81.75	6.32	0	0	0	0	0	9.21
2000 - 2001	0	0	346.71	0	0	137.44	0	0	0	0	0	0	40.35
2001 - 2002	0	0	0	351.89	0	0	0	0	0	0	0	0	29.32
2002 - 2003	0	115.41	542.68	246.86	50.19	0	0	0	0	0	0	0	79.6
2003 - 2004	0	98.35	0.15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.21
2004 - 2005	1.44	0	0	18.06	218.41	0	0	0	0	0	0	0	19.83
2005 - 2006	0	52.8	0	0	6.5	3.57	0	0	0	0	0	0	5.24
2006 - 2007	0	0	80.25	22.01	0	0	0	0	0	0	0	0	8.52
2007 - 2008	0	0	22.63	0	0.69	0	0	0	0	0	0	0	1.94
2008 - 2009	0	0	128.22	7.12	49.55	0	0	0	0	0	0	0	15.41
2009 - 2010	0	0	93.57	0	3.03	0	0	0	0	0	0	0	8.05
2010 - 2011	0	4.69	168.13	9.67	0	0	0	0	0	0	0	0	15.21
2011 - 2012	0	0	428.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35.69
2012 - 2013	0	0	2.79	0	14.4	0	0	0	0	0	0	0	1.43
2013 - 2014	0	78.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.51
PROMEDIO	13.22	18.76	96.55	113.25	68.72	6.77	0.79	0	0	0	0	0	26.5
MÍNIMO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25
MÁXIMO	461.35	150.33	595.96	1544.6	1411.4	137.44	21.22	0	0	0	0	0	169.04
DESV. EST.	77.98	39.95	182.92	310.54	245.58	26.67	3.71	0	0	0	0	0	38.63

Caudales Medios Mensuales (l/s). Microcuenca La Isla

TEMPORADA	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
1979 - 1980	0	0	0	0.89	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0.07
1980 - 1981	51.27	0	0	10.2	0	1.3	0	0	0	0	0	0	5.23
1981 - 1982	0	10.87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.91
1982 - 1983	0	0.5	0.05	13.95	11.94	0	0	0	0	0	0	0	2.2
1983 - 1984	0	0	0	50.64	0	0	0	0	0	0	0	0	4.22
1984 - 1985	0	0	0	105	0	0	0	0	0	0	0	0	8.75
1985 - 1986	0	0	0	2.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18
1986 - 1987	0	5.18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.43
1987 - 1988	0	0	0	170.55	7.61	0	0	0	0	0	0	0	14.85
1988 - 1989	0	0	0.66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05
1989 - 1990	0	0	0	1.16	9.23	0	0	0	0	0	0	0	0.87
1990 - 1991	0	0	0	3.86	0	0	0	0	0	0	0	0	0.32
1991 - 1992	0	15.16	47.96	0	0	0	0	0	0	0	0	1.82	5.41
1992 - 1993	0	0	25.6	0	13.63	0	0	0	0	0	0	0	3.27
1993 - 1994	0	0	0	1.33	6.31	0	0	0	0	0	0	0	0.64
1994 - 1995	0	0	3.94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33
1995 - 1996	0	0	0	4.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0.38
1996 - 1997	0	0	0	9.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0.77
1997 - 1998	0	0	81.37	0	169.5	0	0	0	0	0	0	0	20.91
1998 - 1999	0	0	0.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03
1999 - 2000	0	0.41	4.51	0.27	5.78	4.16	0.27	0	0	0	0	0	1.28
2000 - 2001	0	0	36.5	0	0	26.56	0	0	0	0	0	0	5.26
2001 - 2002	0	5.98	0	65.38	0.18	0	0	0	0	0	0	0	5.96
2002 - 2003	0	6.9	58.86	30.19	2.86	0	0	0	0	0	0	0	8.23
2003 - 2004	0	9.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.78
2004 - 2005	0	0	0	5.77	17.48	0	0	0	0	0	0	0	1.94
2005 - 2006	0	3.55	0	0	1.96	0	0	0	0	0	0	0	0.46
2006 - 2007	0	0	8.98	0.57	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8
2007 - 2008	0	0	0	0	0.81	0	0	0	0	0	0	0	0.07
2008 - 2009	0	0	0	0	8.54	0	0	0	0	0	0	0	0.71
2009 - 2010	0	0	6.72	0	8.7	0	0	0	0	0	0	0	1.29
2010 - 2011	0	3.94	2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.54
2011 - 2012	0	0	72.38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.03
2012 - 2013	0	0	0	0	6.61	0	0	0	0	0	0	0	0.55
2013 - 2014	0	8.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.68
PROMEDIO	1.46	2	10.01	13.59	7.75	0.92	0.01	0	0	0	0	0.05	2.98
MÍNIMO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03
MÁXIMO	51.27	15.16	81.37	170.55	169.5	26.56	0.27	0	0	0	0	1.82	20.91
DESV. EST.	8.67	3.84	21.88	35.09	28.54	4.52	0.05	0	0	0	0	0.31	4.52

Finalmente se obtuvieron las curvas de variación estacional para cada una de las cuencas en estudio y se desarrollaron para probabilidades de excedencia de 10, 50 y 90%.

6.4 Estimación de caudales de crecidas en las cuencas de interés

El análisis comprende una estimación de la precipitación máxima en 24 horas para las cuencas de estudio. Se ha considerado que las precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones pluviométricas “Combarbalá”, “Embalse Cogotí” y “Peñablanca”, son representativas para los sectores Los Rulos, La Moralina y Peñablanca, respectivamente, dada la escasa variación altimétrica entre las cuencas de estudio y las estaciones de medición.

En el sector de análisis no existen registros estadísticos de caudales que permitan estimar los regímenes de escorrentía superficial en las quebradas de estudio, por lo que se definió utilizar una metodología indirecta de Precipitación – Escorrentía para el análisis.

Luego, el procedimiento para determinar los caudales de crecida para los distintos períodos de retorno considerados, supone los siguientes pasos:

- i. Se establecieron las estaciones pluviométricas Combarbalá, Cogotí Embalse y Peñablanca como las más representativas para el análisis de precipitaciones máximas anuales en el sector de estudio. Tales estaciones son operadas por la DGA y presentan buen registro de datos estadísticos.
- ii. Se realizó un análisis de frecuencias a las series estadísticas de las estaciones pluviométricas seleccionadas, obteniendo las precipitaciones máximas anuales para los períodos de retorno $T = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200$ años, para una duración de tormenta de 24 horas.
- iii. Finalmente, para determinar los caudales máximos de crecidas en los sectores de interés, se utiliza el método del Hidrograma Unitario Sintético tipo Linsley, aplicando las distribuciones de precipitación propuestas por Espíldora y Echavarría y usando el método de la Curva Número explicado en el capítulo 6. El análisis de las crecidas se lleva a cabo buscando maximizar caudal peak asociado a la duración y períodos de retorno de la tormenta.

6.5 Análisis de Precipitaciones Máximas Anuales en 24 horas

Para desarrollar los análisis de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas para los distintos períodos de retorno considerados, se dispone de las mediciones realizadas en las estaciones pluviométricas “Combarbalá”, “Embalse Cogotí” y “Peña Blanca”.

Para la estación pluviométrica “Peña Blanca”, se extendieron los registros de precipitaciones máximas anuales de duración 24 horas entre las temporadas 1979/80 a 1988/89. Estos valores fueron determinados mediante correlación con la estación pluviométrica

“Embalse Cogotí” para todos los eventos comunes (precipitaciones máximas que ocurrieron el mismo día). La correlación realizada se presenta en el anexo del Tomo II del presente Informe.

A las series estadísticas de precipitaciones máximas anuales de las estaciones pluviométricas antes mencionadas, se les realizó un análisis de frecuencias para distintas funciones de densidad de probabilidad, como Normal, Gumbel, Pearson, Log-Pearson y Log-Normal. Además, se realizó el test chi – cuadrado con un nivel de significancia del 95% para examinar la bondad del ajuste de la serie a cada distribución de probabilidad.

Los resultados del análisis de frecuencias desarrollado, sumado a la inspección gráfica de los mismos, definieron la mejor distribución de ajuste para cada duración de tormenta en estudio. Los análisis de frecuencias desarrollados, se encuentran en el Anexo II del presente Informe.

6.6 Precipitaciones máximas anuales en las cuencas de interés

Del análisis de frecuencias detallado en el estudio se obtiene que el mejor ajuste de las funciones densidad de probabilidad correspondió al modelo Log-Pearson, para todos los casos estudiados. La Tabla 6.1 muestra los resultados de precipitaciones máximas anuales en 24 hr para los distintos períodos de retorno considerados en el área de interés.

Tabla 6.1. Precipitaciones Máximas en 24hr [mm] Sectores de Interés

T [años]	P exc [%]	Pp máx. 24h [mm]		
		LOS RULOS	LA MORALINA	PEÑA BLANCA
2	50	42.6	37.3	40.2
5	20	71.9	65.6	68.3
10	10	92.7	85.9	88.8
20	5	113.3	106.1	109.5
50	2	140.5	132.8	137.6
100	1	161.2	153.0	159.6
200	0.5	182.1	173.4	182.1
MEJOR AJUSTE		Log Pearson	Log Pearson	Log Pearson

Fuente: Elaboración Propia Romero e Hijo Ingeniería

6.7 Análisis de Crecidas en las Cuencas de Interés

Para el cálculo de la crecida pluvial asociada a los sectores de estudio, se utilizó el método del Hidrograma Unitario Sintético tipo Linsley, metodología explicada en el

“Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Fluviométrica”, perteneciente a DGA.

En este caso, se utilizaron las distribuciones de precipitación propuestas por Espíldora y Echavarría en su publicación “Criterios para la Caracterización y Selección de Lluvias de Diseño”, presentado en el IV Coloquio Nacional de Ingeniería Hidráulica, en 1979.

El análisis desarrollado considera el Método de La Curva Número.

6.8 Método Hidrograma Unitario Sintético

La metodología de cálculo utilizada para la aplicación del método del Hidrograma Unitario Sintético corresponde a la establecida por el “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Fluviométrica” de la Dirección General de Aguas del MOP, la que basándose en el método de Linsley y corrigiendo las relaciones básicas originalmente propuestas por Benítez y Arteaga en 1985, al ampliar la base de datos de dichos autores a un total de 61 estaciones fluviométricas ubicadas entre las Regiones III y X, determina nuevas relaciones según sea la zona del país de que se trate, para cuencas de superficies entre 10 y 4.500 km².

6.9 Resultados

Los resultados del análisis hidrológico de crecidas desarrollado, para una duración de tormenta de 24 horas y para períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años, fueron los siguientes:

Tabla 6.2. Caudales Instantáneos Máximos de Crecidas [m³/s] Sectores de Interés

T [años]	SECTOR		
	LOS RULOS	LA MORALINA	PEÑA BLANCA
2	2.6	4.3	0.8
5	8.1	17.2	2.7
10	12.5	28.2	4.4
20	17.2	39.9	6.1
50	23.6	56.2	8.6
100	28.5	68.6	10.6
200	33.5	81.4	12.7

Nota: Se han destacado en color amarillo, los caudales máximos instantáneos para un período de retorno de 1:200 años para cada sector, que corresponden a los caudales a considerar para el dimensionamiento de las obras y los cálculos estructurales.

7. ESTUDIO GEOELÉCTRICO

Se efectuó un estudio geofísico en las tres microcuencas seleccionadas para el Estudio Cosecha de Aguas Lluvias en Áreas de Secano, Región de Coquimbo.

Los estudios fueron enfocados a la obtención de un modelo lito estratigráfico de cada sector hasta una profundidad de investigación de al menos 15 metros y a la identificación de posibles acuíferos, para lo cual se ejecutaron medidas geofísicas de resistividad eléctrica en la modalidad de Sondajes Eléctricos Verticales (SEV), que es la técnica clásica y más precisa para definir la estratificación del terreno en términos de la resistividad eléctrica. Este último parámetro asociado a las distintas formaciones y su saturación con agua.

Se realizaron un total de 61 SEV distribuidos en nueve perfiles geoelectrónicos, tres por cada sector. Se ejecutaron en el sector Peña Blanca 21 SEV, en el sector Los Rulos 20 SEV y en el sector La Moralina 20 SEV. Con estos datos se interpretaron los perfiles estableciendo un modelo geoelectrónico de cada sector.

Los resultados de los estudios indican la detección de capas con resistividades eléctricas asociadas a material medianamente saturado en los sectores Peña Blanca y La Moralina, lo que sugiere la presencia de posibles acuíferos en profundidad.

7.1 Metodología

El método geoelectrónico empleado durante el estudio, consistió en la realización de Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) en modalidad Schlumberger.

Este método tiene como objetivo investigar la distribución vertical de resistividades eléctricas bajo el punto central del dispositivo usado.

Las resistividades aparentes obtenidas durante el desarrollo del estudio se llevan en coordenadas bilogarítmicas a un gráfico contra la apertura de los electrodos transmisores $AB/2$. La curva obtenida, constituye el dato de terreno que luego se usa en la interpretación de los S.E.V.

Esto último se logra a través de un software computacional especialmente desarrollado para este tipo de trabajo y de sistemas numéricos sofisticados que implica iterar las numerosas soluciones posibles.

7.2 Resultados

La interpretación de cada uno de los SEV, cuyas curvas se encuentran en el anexo de este informe, se efectúa en forma computacional utilizando un software especialmente desarrollado para tal efecto.

La descripción cualitativa de los estratos geoelectricos detectados se realizó a partir del supuesto de que por estar todo los perfiles geoelectricos localizados de forma transversal a las cuencas de quebradas, los sedimentos allí acumulados son de origen aluvial y/o fluvial.

7.2.1 Sector Peña Blanca.

Sector ubicado más al Oeste, a 27 Kms al suroeste de la localidad de Punitaqui. Aquí se ejecutaron 21 SEV distribuidos en tres perfiles geoelectricos de siete SEV cada uno y separados unos 70 metros como promedio.

MICROCUEENCA LA ISLA - COMUNIDAD AGRICOLA PEÑABLANCA

ESTRATO (m)	TIPO DE MATERIAL	CARACTERISTICAS
0 - 9	Rellenos fluviales y/o aluviales del tipo arenas, gravas, arcillas y bolones dispersos o aislados	Estos estratos no poseen una continuidad horizontal y pueden acumular agua en forma estacional
10 - 35 a 40	Arenas arcillosas saturadas	
bajo 35	Probablemente, rocas descompuestas	

La descripción cualitativa de los estudios geofísicos realizados indican que se pueden identificar tres estratos geoelectricos en el suelo de la microcuenca La Isla de la Comunidad Agrícola de Peñablanca.

El primer estrato (0 a 9 m de profundidad), es el que presenta condiciones adecuadas para la acumulación de aguas subterráneas y que tendría mejores conductividades hidráulicas.

El segundo estrato (10 a 38 m de profundidad), si bien no es impermeable, presenta arenas arcillosas saturadas, por lo tanto, es posible deducir que la conductividad hidráulica de este estrato es baja, comportándose como un estrato impermeable.

El tercer estrato, ubicado en promedio bajo los 38 metros de profundidad, corresponde probablemente a rocas descompuestas.

El estudio geofísico se ha realizado después de varios años de bajas precipitaciones en el sector y al detectar bajo los 9 metros de profundidad arcillas saturadas, significa que la conductividad hidráulica de este estrato es muy baja. Presentando estas características este estrato, es recomendable poner una lámina impermeable desde la superficie del suelo hasta 5 metros de profundidad, con ello tendríamos 4 metros de suelo bajo la lámina, que se comportarían como un estrato semipermeable, de baja conductividad hidráulica que permitiría generar una recarga de agua que puede escurrir subterráneamente bajo los 5 metros de profundidad.

Es importante señalar que tomar la determinación de impermeabilizar hasta 5 metros de profundidad, se debe a dos consideraciones, una técnica, que es la anteriormente señalada y otra económica, que es el alto costo de movimiento de tierra que se tendría al excavar un terreno arcilloso saturado.

7.2.2 Sector Los Rulos.

Sector ubicado más al Sur, a 23 Kms al suroeste de la ciudad de Combarbalá. Aquí se ejecutaron 20 SEV distribuidos en tres perfiles geoelectricos, dos de siete SEV y uno de seis, separados unos 70 metros como promedio.

MICROCUEENCA LOS RULOS - COMUNIDAD AGRICOLA CANELA ALTA

ESTRATO (m)	TIPO DE MATERIAL	CARACTERISTICAS
0 - 10	Probablemente asociado a rellenos fluviales y/o aluviales del tipo arenas, gravas y bolones dispersos o aislados.	Estos estratos no poseen una continuidad horizontal y pueden acumular agua en forma estacional
10 - 30	Asociados a gravas muy secas con presencia de bolones	Este estrato aparece disperso y con espesores menores que 7 metros, integrado parcialmente al primer estrato.
Espesor variable (25 a 50)	Aluviales secos del tipo gravas con presencia de bolones	Este estrato puede acumular agua temporalmente.
50 y mas	Probablemente este asociado al basamento rocoso	Si corresponde al basamento rocoso, presentaría características impermeables

Los estudios geofísicos indican que se pueden identificar cuatro estratos geoelectricos en el suelo de la microcuenca Los Rulos de la Comunidad Agrícola de Canela Alta.

El primer estrato (0 a 10 m de profundidad), es el que presenta condiciones adecuadas para la acumulación de aguas subterráneas y que tendría mejores conductividades hidráulicas, está compuesto de rellenos fluviales y/o aluviales del tipo arenas, gravas y bolones dispersos.

El segundo estrato (10 a 30 m de profundidad), probablemente asociado a bolones secos, es decir, que al momento de realizar los sondajes eléctricos verticales no se detectó humedad en esta estrato.

El tercer estrato, ubicado en promedio entre 25 a 50 metros de profundidad, corresponde probablemente a sedimentos fluviales y/o aluviales del tipo gravas y bolones secos.

El cuarto estrato, ubicado en promedio bajo 50 metros de profundidad, correspondería al basamento rocoso.

De acuerdo a la interpretación geofísica realizada, no sería recomendable poner una lámina impermeable hasta el basamento rocoso, ya que a partir del segundo estrato hasta el basamento rocoso, se han detectado la presencia de bolones dispersos que elevarían los costos de movimiento de tierra y tal vez sería preferible que la impermeabilización sea adecuada realizarla solo en los 5 primeros metros de profundidad y crear una condición de recarga forzada de la napa a partir de los 5 metros de profundidad.

7.2.3 Sector La Moralina.

Sector ubicado más al Este, a 17 Kms al sureste de la localidad de Punitaqui. Aquí se ejecutaron 20 SEV distribuidos en tres perfiles geoelectrónicos, dos de siete SEV y uno de seis, separados unos 160 metros como promedio.

MICROCUENCA LA MORALINA - COMUNIDAD AGRICOLA MANQUEHUA

ESTRATO (m)	TIPO DE MATERIAL	CARACTERISTICAS
0 - 5 (en eje quebrada)	Probablemente asociado a rellenos fluviales y/o aluviales del tipo arenas, gravas y bolones dispersos o aislados	Estos estratos no poseen una continuidad horizontal y pueden acumular agua en forma estacional
5 - 30	Asociados a gravas muy secas con presencia de bolones	Este estrato puede acumular agua en forma estacional, pero en menor cantidad por la presencia de bolones
30 - 50	Asociado a arenas saturadas, con menor humedad hacia el Oeste	El espesor del estrato es variable y tendría actualmente agua acumulada
50 y mas	Probablemente este asociado al basamento rocoso	

La descripción cualitativa de los estratos geoelectricos señala que se pueden identificar cuatro estratos en el suelo de la microcuenca La Moralina de la Comunidad Agrícola de Manquehua. Para efectos del estudio, se han considerado las profundidades del estrato en el eje de la quebrada.

El primer estrato (0 a 5 m de profundidad), es el que presenta condiciones adecuadas para la acumulación de aguas subterráneas y que tendría mejores conductividades hidráulicas, está compuesto de rellenos fluviales y/o aluviales del tipo arenas, gravas y bolones dispersos.

El segundo estrato (5 a 30 m de profundidad), probablemente asociado a bolones secos, es decir, que al momento de realizar los sondeos eléctricos verticales no se detectó humedad en esta estrato.

El tercer estrato, ubicado en promedio entre 30 a 50 metros de profundidad, corresponde probablemente a sedimentos asociados a arenas saturadas. Es probable que esta presencia de agua se deba a un solevantamiento del basamento rocoso entre el perfil 2 al 3, ya que en el perfil 3, solo se detectaron arenas no saturadas.

El cuarto estrato, ubicado en promedio bajo 50 metros de profundidad, correspondería al basamento rocoso.

De acuerdo a la interpretación geofísica realizada, sería recomendable poner una lámina impermeable hasta unos 5 metros de profundidad, a pesar de la presencia de bolones dispersos, considerando que la profundidad del primer estrato es baja y que en el tercer estrato tendríamos arenas saturadas.

8. CALCULOS HIDRÁULICOS

El análisis hidráulico desarrollado en el estudio, incluye los sectores de emplazamiento de los muros de intercepción superficial de aguas lluvias proyectados en los cauces de interés, considerando tramos que varían entre los 480 y 1,048 m de longitud, aproximadamente, según los antecedentes topo – batimétricos descritos en el punto **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** El análisis se efectúa tanto para la condición natural del cauce como para la situación con proyecto.

Para determinar los niveles de inundación para el período de retorno de diseño ($T= 200$ años), se desarrolló un modelo hidráulico mediante el software Hec-Ras, en su versión 4.1.0, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del United Army Corps of Engineering de Estados Unidos. Este programa permite resolver el cálculo del eje hidráulico utilizando un modelo numérico de flujo unidimensional para estimar las alturas de agua, velocidades y demás parámetros hidráulicos de interés, en las diferentes secciones transversales ingresadas por el usuario.

Por su parte, el diseño de las obras de intercepción (correspondientes a gaviones) debe responder a dos consideraciones importantes:

- i. El objetivo principal es que las estructuras sirvan como interceptores de la escorrentía superficial, de manera que permitan acumular aguas lluvias y favorecer la infiltración, razón por la cual su diseño debe asegurar la obstrucción total del cauce en los sectores de emplazamiento.
- ii. A su vez, las obras deben funcionar como vertederos, capaces de evacuar la crecida de diseño de período de retorno $T=200$ años. En estos casos, el diseño tipo adoptado corresponde a vertederos de cresta ancha y horizontal.

Las demás características y condiciones utilizadas en el desarrollo del modelo son:

- Los caudales de crecidas, para un período de retorno de 1:200 años, determinados en el capítulo de hidrología.
- Coeficientes de rugosidad, para lo cual se utilizó el coeficiente de rugosidad de Manning, determinado a base del método de Cowan y caracterizando el sedimento según la ecuación de Strickler.
- Los regímenes de escurrimiento en las microcuencas, que son considerados subcríticos a lo largo de todo el trazado de simulación en las quebradas de interés, con singularidades aisladas en las que se obtienen alturas críticas.
- Los análisis de las condiciones de borde adopta altura normal en los perfiles de más aguas abajo, calculadas a base de las pendientes de los tramos estudiados, con la finalidad de representar la condición de régimen de río en los tramos de simulación.

- Perfiles transversales, distanciados cada 20 metros, de los cauces de las microcuencas. Se utilizaron un total de 54 perfiles transversales para el sector La Moralina, 30 perfiles transversales para el sector Los Rulos y 27 perfiles transversales en el sector La Isla, abarcando longitudes de 1,048 m, 580 m y 480 m, respectivamente.

Se realizaron análisis hidráulicos sin proyecto, es decir, escurrimiento en condiciones naturales y con proyecto, es decir, incluyendo las obras de intercepción del escurrimiento del flujo superficial en cada una de las microcuencas. Para la condición con proyecto, se consideraron las características técnicas de las obras proyectadas, consistentes en muros interceptores de gaviones de malla metálica, de forma rectangular, rellenos de material granular y de altura variable según el cauce de estudio. Estos muros presentan una elevada resistencia, son flexibles y soportan movimientos diferenciales sin pérdida de eficiencia. Además, su construcción es simple y económica y su uso ha presentado excelentes resultados en la contención de suelos y obras fluviales.

8.1 Consideraciones hidráulicas

Tal como se mencionó, los gaviones de contención proyectados, además de estar asociados a la retención de volúmenes de esorrentía que favorezcan su infiltración en el suelo, deben cumplir con un diseño eficiente tal que permitan evacuar las crecidas de diseño (T= 200 años).

Utilizando el sistema métrico, el caudal unitario sobre el umbral (o cresta) del vertedero queda determinado por la siguiente ecuación¹:

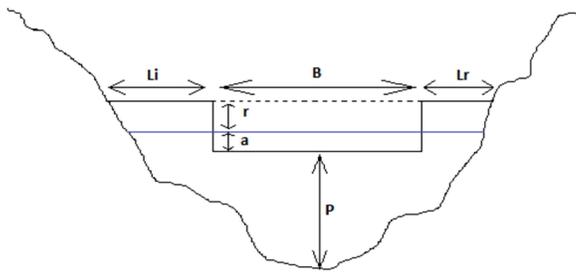
$$q = 1.704 * (H1 - P)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Dónde: q : Caudal unitario sobre el vertedero (m³/s/m)
 H1 : Bernoulli aguas arriba del vertedero (m)
 P : Altura del vertedero (m)

Sin embargo, la Ec. 4 es válida en condiciones ideales y sin considerar las pérdidas de carga que se producen en el escurrimiento sobre el umbral. Para considerar estos efectos, la Ec. 4 debe incluir el coeficiente de gasto C_Q, coeficiente determinado especialmente para estas obras.

Efectuados los cálculos hidráulicos para la condición con proyecto, el dimensionamiento de las respectivas obras fue el siguiente:

¹ Mery, Horacio, "Hidráulica Aplicada al Diseño de Obras", 1971, Parte II.



LA ISLA						
PARÁMETRO	LONGITUD [m]					
	M1	Z1	M2	Z2	M3	Z3
Li	6.15	397.37	6.91	396.30	50.50	394.47
B	15	-	7	-	20	-
Lr	16.83	397.37	6.14	396.30	23.30	394.47
r	0.5	397.37	0.5	396.30	0.5	394.47
a	0.40	396.87	0.65	395.80	0.33	393.97
P	1	396.47	1	395.15	1	393.64
ZMIN	-	395.47	-	394.15	-	392.64

LOS RULOS						
PARÁMETRO	LONGITUD [m]					
	M1	Z1	M2	Z2	M3	Z3
Li	13.22	876.61	8.24	874.41	14.85	871.42
B	25	-	20	-	20	-
Lr	21.53	876.61	19.43	874.41	21.13	871.42
r	0.5	876.61	0.5	874.41	0.5	871.42
a	0.93	876.11	1.08	873.91	1.08	870.92
P	2	875.18	2	872.83	2	869.84
ZMIN	-	873.18	-	870.83	-	867.84

LA MORALINA						
PARÁMETRO	LONGITUD [m]					
	M1	Z1	M2	Z2	M3	Z3
Li	6.38	655.85	7.80	652.99	6.84	646.92
B	25	-	23	-	20	-
Lr	7.48	655.85	9.97	652.99	7.09	646.92
r	0.5	655.85	0.5	652.99	0.5	646.92
a	1.64	655.35	1.72	652.49	1.89	646.42
P	3	653.71	3	650.77	3	644.53
ZMIN	-	650.71	-	647.77	-	641.53

8.2 Estudio de mecánica fluvial

En este capítulo se determinaron las socavaciones que ocurren en los lechos de los cauces de estudio producto del emplazamiento de los gaviones y sus obras anexas. El análisis se desarrolla para las crecidas de diseño de período de retorno $T= 200$ años, y se utilizan las metodologías de socavación propuestas por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) en su Manual de Carreteras, Volumen 3, capítulo 3.707.4.

El análisis de mecánica fluvial se desarrolla para disminuir la erosión retrógrada y desestabilización del lecho en torno a los gaviones proyectados, permitiendo definir las cotas mínimas de instalación y la longitud de las sábanas de protección aguas abajo de los gaviones, mediante análisis de socavación al pie de barreras vertedoras.

La mecánica de suelos desarrollada para este estudio, indica que los cauces de interés corresponden a suelos areno arcillosos y gravo arcillosos, según el sistema USCS, con granulometrías homogéneas y de plasticidad media a media alta, según los resultados de los análisis de suelos realizados de muestras tomadas en calicatas en las respectivas microcuencas.

Con la información obtenida de la determinación de las socavaciones y el resalto generado para evacuar la crecida máxima, se dimensionó la sabana de protección a instalar al pie de las obras de intercepción de los escurrimientos de flujo superficial, siendo estos los siguientes:

Longitudes recomendadas sábanas de protección

SECTOR	Ld [m]		
	Gavión 1	Gavión 2	Gavión 3
La Moralina	5.50	6.00	6.50
Los Rulos	3.50	3.50	3.50
La Isla	1.50	2.50	1.50

Fuente: Elaboración Propia Romero e Hijo Ingeniería

9. ANALISIS HIDROLÓGICO OPERACIONAL

Si bien la capacidad de acumulación de aguas de las obras de intercepción de aguas lluvias diseñadas para las microcuencas de La Isla, en Peña Blanca; Los Rulos, en Canela Alta y La Moralina, en Manquehua, son los que se señalan en el cuadro siguiente, es muy probable que ésta no sea la capacidad real de captación y acumulación tanto, superficial como subterráneamente.

Las razones señaladas para afirmar lo anteriormente indicado, se basan en el hecho que la lámina de polietileno de alta densidad (HDPE), a instalar en cada una de las intercepciones superficiales como complemento a estas obras, para interceptar el flujo subterráneo, solo tendrá una profundidad de intercepción de 5 metros.

Considerando que la roca fundamental, en las tres microcuencas, se encuentra a una profundidad superior a los 30 metros, el flujo subterráneo del agua, se realizaría bajo la lámina de polietileno de alta densidad (5 metros de profundidad), permitiendo con ello la acción de recargar la napa o acuífero natural existente en las microcuencas, infiltrándose por lo tanto, el agua superficial retenida en cada lluvia.

Las capacidades de acumulación de agua determinadas por las obras diseñadas, es la siguiente:

COMUNIDAD	MICROCUENCA	OBRAS	CAPACIDAD	
			PARCIAL (m3)	TOTAL (m3)
PEÑABLANCA	LA ISLA	BARRERA N° 1	999.00	1,736.00
		BARRERA N° 2	88.00	
		BARRERA N° 3	649.00	
MANQUEHUA	LA MORALINA	BARRERA N° 1	3,928.00	13,414.00
		BARRERA N° 2	5,618.00	
		BARRERA N° 3	3,868.00	
CANELA ALTA	LOS RULOS	BARRERA N° 1	1,703.00	4,432.00
		BARRERA N° 2	1,348.00	
		BARRERA N° 3	1,381.00	

Usando los caudales de escorrentía determinados en el capítulo de hidrología, para un período de 35 años (temp 1979-1980 a 2013-2014), se determinaron los volúmenes mensuales que se generan teóricamente, y estableciendo la hipótesis que el agua acumulada en cada escorrentía, generada por la lluvia, se infiltra antes de la ocurrencia de la próxima precipitación, efectuó una simple simulación hidrológica operacional de estas obras para determinar los volúmenes anuales que se habrían acumulado en el período de 35 años simulado y que pasarían a recargar los acuíferos naturales.

Los volúmenes anuales acumulados por las obras diseñadas en cada microcuenca, obtenidos a través de la simulación, son los siguientes:

MICROCUECA LA ISLA
RESUMEN CAPTACION ANUAL DE AGUA SEGÚN SIMULACION COMPUTACIONAL
(m³/año)

Temp	N° Retenciones de escorrentía	Total (m ³)	Temp	N° Retenciones de escorrentía	Total (m ³)
1979 - 1980	1	1,018	1997 - 1998	2	3,472
1980 - 1981	3	4,924	1998 - 1999	1	363
1981 - 1982	1	1,736	1999 - 2000	6	6,332
1982 - 1983	4	4,113	2000 - 2001	2	3,472
1983 - 1984	1	1,736	2001 - 2002	3	3,686
1984 - 1985	1	1,736	2002 - 2003	4	6,944
1985 - 1986	1	1,736	2003 - 2004	1	1,736
1986 - 1987	1	1,736	2004 - 2005	2	3,472
1987 - 1988	2	3,472	2005 - 2006	2	3,472
1988 - 1989	1	726	2006 - 2007	2	2,406
1989 - 1990	2	3,075	2007 - 2008	1	937
1990 - 1991	1	1,736	2008 - 2009	1	1,736
1991 - 1992	3	5,208	2009 - 2010	2	3,472
1992 - 1993	2	3,472	2010 - 2011	2	3,472
1993 - 1994	2	3,263	2011 - 2012	1	1,736
1994 - 1995	1	1,736	2012 - 2013	1	1,736
1995 - 1996	1	1,736	2013 - 2014	1	1,736
1996 - 1997	1	1,736			

MICROCUENCA LA MORALINA
RESUMEN CAPTACION ANUAL DE AGUA SEGÚN SIMULACION COMPUTACIONAL

(m3/año)

Temp	N° Retenciones de escorrentía	Total (m3)
1979 - 1980	1	13,414
1980 - 1981	3	40,242
1981 - 1982	1	13,414
1982 - 1983	4	42,367
1983 - 1984	1	13,414
1984 - 1985	1	13,414
1985 - 1986	1	13,414
1986 - 1987	1	13,414
1987 - 1988	2	26,828
1988 - 1989	1	13,414
1989 - 1990	2	26,828
1990 - 1991	1	13,414
1991 - 1992	1	13,414
1992 - 1993	3	36,765
1993 - 1994	1	13,414
1994 - 1995	1	13,414
1995 - 1996	1	13,414
1996 - 1997	1	13,414

Temp	N° Retenciones de escorrentía	Total (m3)
1997 - 1998	3	40,242
1998 - 1999	1	7,724
1999 - 2000	5	50,670
2000 - 2001	2	26,828
2001 - 2002	1	13,414
2002 - 2003	4	53,656
2003 - 2004	1	13,414
2004 - 2005	4	30,560
2005 - 2006	3	36,081
2006 - 2007	2	26,828
2007 - 2008	2	15,262
2008 - 2009	3	40,242
2009 - 2010	2	21,530
2010 - 2011	3	39,390
2011 - 2012	1	13,414
2012 - 2013	2	20,646
2013 - 2014	1	13,414

MICROCUENCA LOS RULOS
RESUMEN CAPTACION ANUAL DE AGUA SEGÚN SIMULACION COMPUTACIONAL

(m3/año)

Temp	N° Retenciones de escorrentía	Total (m3)
1979 - 1980	1	4,432
1980 - 1981	4	14,823
1981 - 1982	3	9,159
1982 - 1983	4	17,728
1983 - 1984	2	8,864
1984 - 1985	1	4,432
1985 - 1986	1	4,432
1986 - 1987	1	4,432
1987 - 1988	4	17,728
1988 - 1989	1	4,432
1989 - 1990	3	9,587
1990 - 1991	1	4,432
1991 - 1992	2	9,319
1992 - 1993	3	13,296
1993 - 1994	3	9,641
1994 - 1995	2	8,864
1995 - 1996	3	7,430
1996 - 1997	1	4,432

Temp	N° Retenciones de escorrentía	Total (m3)
1997 - 1998	3	13,296
1998 - 1999	2	4,279
1999 - 2000	5	22,160
2000 - 2001	2	8,864
2001 - 2002	1	4,432
2002 - 2003	4	17,728
2003 - 2004	2	5,054
2004 - 2005	2	8,864
2005 - 2006	2	8,864
2006 - 2007	2	8,864
2007 - 2008	1	4,432
2008 - 2009	4	17,421
2009 - 2010	2	8,864
2010 - 2011	4	17,728
2011 - 2012	1	4,432
2012 - 2013	2	5,028
2013 - 2014	1	4,432

Teóricamente, la capacidad de acumulación de agua de cada una de las obras diseñadas, puede multiplicarse por cada evento lluvioso que se presente en el año, lo que hace muy efectivas estas obras.

No obstante, los volúmenes de agua que teóricamente pueden acumular las obras diseñadas, la escorrentía determinada en los 35 años estudiados, es mayor a la capacidad de retención de las obras, generándose importantes excedentes anuales, que se presentan en los cuadros siguientes:

MICROCUENCA LA ISLA
RESUMEN EXCEDENTES ANUALES DE AGUA SEGÚN SIMULACION COMPUTACIONAL

(m3/año)

Temp	Total (m3)	Temp	Total (m3)
1979 - 1980	0	1997 - 1998	3,472
1980 - 1981	65,517	1998 - 1999	363
1981 - 1982	10,799	1999 - 2000	6,332
1982 - 1983	26,392	2000 - 2001	3,472
1983 - 1984	56,680	2001 - 2002	3,686
1984 - 1985	119,408	2002 - 2003	6,944
1985 - 1986	755	2003 - 2004	1,736
1986 - 1987	4,237	2004 - 2005	3,472
1987 - 1988	202,068	2005 - 2006	3,472
1988 - 1989	0	2006 - 2007	2,406
1989 - 1990	8,897	2007 - 2008	937
1990 - 1991	2,710	2008 - 2009	1,736
1991 - 1992	67,922	2009 - 2010	3,472
1992 - 1993	40,840	2010 - 2011	3,472
1993 - 1994	5,549	2011 - 2012	1,736
1994 - 1995	2,670	2012 - 2013	1,736
1995 - 1996	3,567	2013 - 2014	1,736
1996 - 1997	8,924		

MICROCUENCA LA MORALINA

RESUMEN EXCEDENTES ANUALES DE AGUA SEGÚN SIMULACION COMPUTACIONAL

(m3/año)

Temp	Total (m3)
1979 - 1980	8,094
1980 - 1981	1,450,085
1981 - 1982	251,774
1982 - 1983	602,976
1983 - 1984	1,222,052
1984 - 1985	2,548,904
1985 - 1986	39,431
1986 - 1987	113,087
1987 - 1988	4,320,376
1988 - 1989	2,242
1989 - 1990	226,575
1990 - 1991	31,476
1991 - 1992	1,397,049
1992 - 1993	2,023,488
1993 - 1994	389,230
1994 - 1995	41,510
1995 - 1996	44,306
1996 - 1997	44,306

Temp	Total (m3)
1997 - 1998	5,341,482
1998 - 1999	0
1999 - 2000	238,131
2000 - 2001	1,228,088
2001 - 2002	929,088
2002 - 2003	2,457,704
2003 - 2004	250,007
2004 - 2005	606,533
2005 - 2006	132,002
2006 - 2007	240,132
2007 - 2008	45,243
2008 - 2009	443,889
2009 - 2010	229,119
2010 - 2011	434,865
2011 - 2012	1,096,817
2012 - 2013	25,155
2013 - 2014	195,957

MICROCUENCA LA MORALINA
RESUMEN EXCEDENTES ANUALES DE AGUA SEGÚN SIMULACION COMPUTACIONAL
(m3/año)

Temp	Total (m3)
1979 - 1980	8,094
1980 - 1981	1,450,085
1981 - 1982	251,774
1982 - 1983	602,976
1983 - 1984	1,222,052
1984 - 1985	2,548,904
1985 - 1986	39,431
1986 - 1987	113,087
1987 - 1988	4,320,376
1988 - 1989	2,242
1989 - 1990	226,575
1990 - 1991	31,476
1991 - 1992	1,397,049
1992 - 1993	2,023,488
1993 - 1994	389,230
1994 - 1995	41,510
1995 - 1996	44,306
1996 - 1997	44,306

Temp	Total (m3)
1997 - 1998	5,341,482
1998 - 1999	0
1999 - 2000	238,131
2000 - 2001	1,228,088
2001 - 2002	929,088
2002 - 2003	2,457,704
2003 - 2004	250,007
2004 - 2005	606,533
2005 - 2006	132,002
2006 - 2007	240,132
2007 - 2008	45,243
2008 - 2009	443,889
2009 - 2010	229,119
2010 - 2011	434,865
2011 - 2012	1,096,817
2012 - 2013	25,155
2013 - 2014	195,957

Dependiendo de las condiciones topográficas de cada uno de los sectores, es posible que puedan diseñarse obras complementarias para captar parte de estos excedentes optimizando la cosecha de aguas lluvias para cada sector.

10. DISEÑO ESTRUCTURAL PRESAS DE GAVIONES.

10.1 Generalidades.

Las obras diseñadas, se sometieron a un cálculo estructural para dimensionar definitivamente cada una de ellas, considerando que deben resistir el empuje del agua y condiciones sísmicas altas, sismo grado 6,9 de la escala de Richter.

Las dimensiones de las presas han sido definidas por el estudio hidráulico, acorde a las características la zona y necesidades del proyecto, por lo que los diseños estructurales calculan la longitud de los gaviones para asegurar su estabilidad estática y sísmica, y cumplir con la geometría ya definida.

Los cálculos se ciñeron a las normas pertinentes del Instituto Nacional de Normalización y a los códigos siguientes.

- Norma NCH 1537 of. 79 Cargas permanentes y sobrecargas
- Norma NCH 433 of. 1996 m 2009. Diseño sísmico de edificios.

10.2 Cargas y sobrecargas verticales.

- Para los elementos gaviones se consideró una densidad de 2200 kg/m³., con un porcentaje de vacíos del 20%.
- La densidad del agua fue considerada con sedimentos = 1200 kg/m³
- No se consideraron sobrecargas adicionales.

10.3 Cargas dinámicas. Análisis sísmico.

Para calcular las fuerzas dinámicas en acción, se consideró un coeficiente sísmico para el muro y el agua de 0.25, el cual corresponde al coeficiente máximo considerando los parámetros definidos en la Norma para una estructura no común, R=3, suelo tipo C y zona sísmica 3.

$$C_{max} = \frac{0.9 S_{Ao}}{g}$$

Para cuantificar el esfuerzo sísmico producto del empuje del agua con la presa llena, se utilizó la fórmula de Westergaard, considerando parámetros conservadores, la cual se aplica en 2/5 de la altura de agua. El valor queda definido por:

$$F_{sism} = 0.583 C_{sism} H^2$$

Siendo H: altura de aguas

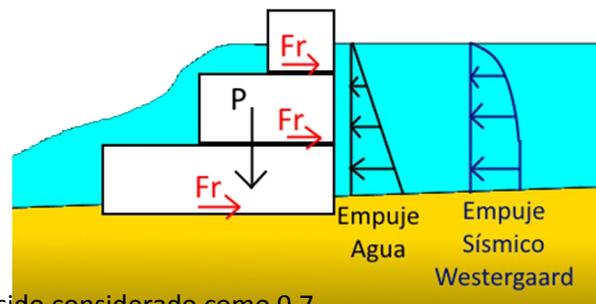
10.4 Cálculo estabilidad de gaviones.

Para el cálculo de estabilidad de los gaviones, se realizó una verificación al deslizamiento y volcamiento de cada uno de los niveles de gaviones que conforman la presa considerando el empuje del agua y la fuerza sísmica producto del peso propio y del agua. Las mismas verificaciones fueron realizadas para el vertedero de la obra. De esta forma, se asegura que las distintas partes de la presa sean estables frente a esfuerzos estáticos y sísmicos.

El esfuerzo resistente para los gaviones ha sido definido como:

$$Fr = \mu \times N$$

Siendo μ : Coeficiente de roce gavión – gavión
 N : Peso del gavión (por m lineal)



El coeficiente de roce ha sido considerado como 0.7

Independiente a ello, se ha indicado en planos que los gaviones deben ser cosidos en los distintos niveles, lo que aumenta su resistencia.

Los factores de seguridad admisible considerados son los siguientes:

Cuadro N° 1

FS DESLIZAMIENTO		FS VOLCAMIENTO	
ESTATICO	SISMICO	ESTATICO	SISMICO
min=1.5	min=1.2	min=2.0	min=1.5

10.5 Verificación de tensiones en suelo.

Se verificó que no se produjeran tracciones en las fundaciones y que la tensión máxima no fuera mayor a $\sigma_{adm} = 1 \text{ kg/cm}^2$, por tratarse de un suelo areno - arcilloso, según el estudio de mecánica de suelos. Para cargas sísmicas, se consideró un $\sigma_{adm} \text{ sísmico} = 1.3 \text{ kg/cm}^2$.

Resultados

LA ISLA - MURO DE INTERCEPCIÓN DE GAVIONES N° 1

NIVEL	H [m]	B [m]	FS DESLIZAMIENTO		FS VOLCAMIENTO	
			ESTATICO MIN 1.5	SISMICO MIN 1.2	ESTATICO MIN 2.0	SISMICO MIN 2.6
NV1	1	1	12.8	2.7	68.8	3.9
N1	1	2	3.1	2.3	11.2	4.9
GENERAL VERTEDERO	1	2	2.67	2.2	8.2	6.2

LA ISLA - MURO DE INTERCEPCIÓN DE GAVIONES N° 2

NIVEL	H [m]	B [m]	FS DESLIZAMIENTO		FS VOLCAMIENTO	
			ESTATICO MIN 1.5	SISMICO MIN 1.2	ESTATICO MIN 2.0	SISMICO MIN 2.6
NV1	1	1	4.9	2.5	16.0	3.7
N1	1	2	2.3	2.2	6.9	4.5
GENERAL VERTEDERO	1	2	2.18	2.1	5.7	5.7

LA ISLA - MURO DE INTERCEPCIÓN DE GAVIONES N° 3

NIVEL	H [m]	B [m]	FS DESLIZAMIENTO		FS VOLCAMIENTO	
			ESTATICO MIN 1.5	SISMICO MIN 1.2	ESTATICO MIN 2.0	SISMICO MIN 2.6
NV1	1	1	18.9	2.7	122.4	4.0
N1	1	2	3.5	2.3	13.1	5.0
GENERAL VERTEDERO	1	2	2.84	2.3	9.2	6.4

**MICROCUCNA LOS RULOS - CANELA ALTA
MURO DE INTERCEPCION DE GAVIONES N° 1**

NIVEL	H [m]	B [m]	FS DESLIZAMIENTO		FS VOLCAMIENTO	
			ESTATICO MIN 1.5	SISMICO MIN 1.2	ESTATICO MIN 2.0	SISMICO MIN 1.5
NV2	0.5	1	-	2.8	-	8.0
NV1	1	1	3.6	2.4	8.2	2.4
N2	1	2	1.9	2.1	5.2	3.7
N1	1	3	1.6	1.9	4.3	4.1
GENERAL						
VERTEDERO	2	3	1.50	1.9	3.7	4.7

**MICROCUCNA LOS RULOS - CANELA ALTA
LOS RULOS - INTERCEPCIÓN DE GAVIONES MURO N° 2**

NIVEL	H [m]	B [m]	FS DESLIZAMIENTO		FS VOLCAMIENTO	
			ESTATICO MIN 1.5	SISMICO MIN 1.2	ESTATICO MIN 2.0	SISMICO MIN 1.5
NV2	0.5	1	-	2.8	-	8.0
NV1	1	1	2.6	2.2	5.2	2.3
N2	1	2	1.7	2.0	4.2	3.5
N1	1	4	1.6	2.0	5.8	5.9
GENERAL						
VERTEDERO	2	4	1.62	2.0	5.3	6.9

**MICROCUCNA LOS RULOS - CANELA ALTA
MURO DE INTERCEPCION DE GAVIONES N° 3**

NIVEL	H [m]	B [m]	FS DESLIZAMIENTO		FS VOLCAMIENTO	
			ESTATICO MIN 1.5	SISMICO MIN 1.2	ESTATICO MIN 2.0	SISMICO MIN 1.5
NV2	0.5	1	-	2.8	-	8.0
NV1	1	1	2.6	2.2	5.2	2.3
N2	1	2	1.7	2.0	4.2	3.5
N1	1	4	1.6	2.0	5.8	5.9
GENERAL						
VERTEDERO	2	4	1.62	2.0	5.3	6.9

MICROCUENCA LA MORALINA
MURO DE INTERCEPCION DE GAVIONES N° 1

NIVEL	H [m]	B [m]	FS DESLIZAMIENTO		FS VOLCAMIENTO	
			ESTATICO MIN 1.5	SISMICO MIN 1.2	ESTATICO MIN 2.0	SISMICO MIN 1.5
NV3	0.5	1	-	2.8	-	8.0
NV2	1	1	7.5	2.6	25.2	2.6
NV1	1	2	2.67	2.23	8.48	4.04
N3	1	3	1.91	2.07	5.86	4.43
N2	1	4	1.63	1.97	4.88	4.55
N1	1	6	1.57	1.96	5.79	6.00
GENERAL VERTEDERO	3	6	1.56	1.9	5.3	7.0

MICROCUENCA LA MORALINA
MURO DE INTERCEPCION DE GAVIONES N° 2

NIVEL	H [m]	B [m]	FS DESLIZAMIENTO		FS VOLCAMIENTO	
			ESTATICO MIN 1.5	SISMICO MIN 1.2	ESTATICO MIN 2.0	SISMICO MIN 1.5
NV3	0.5	1	-	2.8	-	8.0
NV2	1	1	5.9	2.5	17.7	2.6
NV1	1	2	2.43	2.19	7.35	3.95
N3	1	3	1.80	2.03	5.36	4.34
N2	1	4	1.56	1.95	4.57	4.47
N1	1	6	1.52	1.93	5.50	5.90
GENERAL VERTEDERO	3	6	1.52	1.9	5.1	6.9

MICROCUENCA LA MORALINA
MURO DE INTERCEPCION DE GAVIONES N° 3

NIVEL	H [m]	B [m]	FS DESLIZAMIENTO		FS VOLCAMIENTO	
			ESTATICO MIN 1.5	SISMICO MIN 1.2	ESTATICO MIN 2.0	SISMICO MIN 1.5
NV3	0.5	1	-	2.8	-	8.0
NV2	1	1	3.9	2.4	9.4	2.5
NV1	1	2	2.01	2.09	5.54	3.76
N3	1	3	1.60	1.96	4.47	4.14
N2	1	5	1.56	1.95	5.64	5.94
N1	1	6	1.50	1.93	5.06	5.65
GENERAL VERTEDERO	3	6	1.53	1.9	4.7	6.5

11. TUBERÍA DE DRENAJE Y POZO LATERAL

El diseño de las obras de intercepción del flujo de aguas lluvias, contempla como obra complementaria, la instalación de una tubería de drenaje a ubicarse al pie de la lámina HDPE, con el objeto de captar parte del agua que se infiltrará y conducirla a un costado de la quebrada hacia un pozo construido con tubería de HDPE, de baja presión, reforzada, que cumpla la doble función para extraer el agua o para medir la altura de agua de la napa.

Con este pozo lateral, se podrá medir la altura de agua en la napa y su descarga natural hacia acuíferos de cota más baja.

La tubería horizontal de drenaje se ha considerado que sea de tipo topdren de drenaflex, de 500 mm de diámetro. La tubería vertical, que servirá de pozo y piezómetro, se ha considerado que sea una tubería tipo ADS, corrugada de 500 mm.

12. METODOLOGIA DE DISEÑO DE OBRAS DE INTERCEPCION DE FLUJO SUPERFICIAL

El estudio incluye una proposición metodológica para el diseño de estas obras, resaltando los aspectos técnicos que se deben considerar para el diseño adecuado de las obras de intercepción del flujo superficial y subterráneo del escurrimiento de aguas lluvias.

13. PRESUPUESTO DE LAS OBRAS DISEÑADAS.

Los presupuestos de las obras a construir en las microcuencas seleccionadas en este estudio, se calcularon realizando análisis de precios unitarios y cotizaciones de los elementos a utilizar y la maquinaria, puesta en la plaza de Ovalle,

Los presupuestos, generales de las obras diseñadas son los siguientes:

RESUMEN COSTO CONSTRUCCION OBRAS COSECHA DE AGUAS LLUVIAS VALORES TOTALES (IVA incluido)

OBRA	PEÑABLANCA LA ISLA (\$)	CANELA ALTA LOS RULOS (\$)	MANQUEHUA LA MORALINA (\$)
MURO 1	35,303,598	73,919,262	75,692,892
MURO 2	34,718,499	66,533,778	77,253,812
MURO 3	75,665,976	52,849,546	46,207,717
TOTAL	145,688,073	193,302,586	199,154,421

14. CONCLUSIONES.

El presente estudio, se ha desarrollado con el objeto de diseñar obras de intercepción del flujo superficial y subterráneo del agua generado por las precipitaciones, teniendo como idea principal, retener pequeños volúmenes de agua, forzarlos a infiltrarse y generar la recarga de los acuíferos naturales (napas) o generar embalses subterráneos en zonas donde no hay buenas retenciones de agua.

Se ha utilizado una metodología de diseño que permite dimensionar las obras, calcular estructuralmente su estabilidad, determinar su capacidad de acumulación y cuantificar mediante análisis hidrológico operacional sus capacidades teóricas de acumulación de agua.

La estructura de las obras se definió en base a gaviones, los que se complementan con la aplicación de láminas de polietileno de alta densidad (HDPE), que al quedar protegidos contra los rayos ultravioletas de la luz solar, aseguran una vida útil superior a 15 años. La aplicación de la lámina HDPE, impermeabiliza la barrera de gaviones y se ha establecido continuar con su instalación en el interior del suelo, en el mismo sentido de la barrera de intercepción superficial, es decir, perpendicular al flujo de agua, hasta una profundidad de 5 metros. Este tipo de obra, permitirá interceptar el flujo superficial y subterráneo del agua hasta una profundidad de 5 metros, obligando con ello al recurso hídrico, infiltrarse y recargar artificialmente los acuíferos naturales.

De acuerdo a los cálculos desarrollados estas obras permitirán retener escurrimiento de aguas lluvias, generados por bajas precipitaciones, lo que hace que estas obras funcionen prácticamente todos los años y se genere una recarga permanente de los acuíferos, incluso en los períodos de muy baja precipitación. Para demostrar este, se han realizado simples simulaciones hidrológicas, haciendo funcionar teóricamente estas obras, por un período de 35 años, pudiendo demostrarse su funcionamiento constante y permanente en cada temporada agrícola.

Es importante destacar, que el diseño de estas obras tiene carácter de investigación aplicada, es decir, deben construirse y someterse a un período de evaluación para comprobar lo que teóricamente se ha concluido.

15. RECOMENDACIONES DE FINANCIAMIENTO FUTURO DE OBRAS DE COSECHA DE AGUAS LLUVIAS.

La necesidad de retener o cosechar las aguas lluvias en el sector seco de la Región de Coquimbo, o en otras regiones del país, es hoy un objetivo que deben tener en consideración los gobiernos de Chile.

La constante disminución de las precipitaciones, está generando una disminución de disponibilidad de agua no solo para las actividades económicas de la región, sino que también para el abastecimiento de agua potable para los habitantes del seco. Esto se ve

actualmente reflejado en el gasto que están realizando las Municipalidades Rurales en la contratación de camiones aljibes para abastecer de agua potable a las localidades rurales o casas individuales.

Si la evaluación de estas obras, que se han diseñado para captar o cosechar el escurrimiento de aguas lluvias, generadas por bajas precipitaciones y su posterior recarga de acuíferos, es positiva, recomendamos que sea una prioridad del estado chileno establecer una política de estado para la construcción de estas obras, para enfrentar el déficit de recurso hídrico que se está generando en la región.

Considerando este aspecto, recomendamos que el estado debe destinar parte de sus recursos económicos para la cosecha de aguas lluvias, ya sea construyendo este tipo de obras y/u obras complementarias que podrían estudiarse y diseñarse teniendo en consideración las características topográficas y de precipitación en cada zona.

Al igual como se estableció una política de estado, para optimizar la acumulación y aplicación del agua de riego, generando la Ley 18.450, de Fomento a la Inversión Privada en Riego y Drenaje, debiera crearse otro instrumento de fomento para cofinanciar la construcción de obras de cosecha de aguas lluvias, donde los propietarios de las zonas de secano, sean estos Privados o Comunidades Agrícolas, tengan acceso a una línea de bonificación, para enfrentar los problemas que está generando la constante disminución de las precipitaciones.

También podrían establecerse alianzas público-privado, entre las empresas mineras o industriales, establecidas en la región, donde éstas puedan colaborar en el cofinanciamiento de proyectos de diseño de obras para cosecha de aguas lluvias, cuyo futuro uso futuro puede ser compartido, tanto para el desarrollo minero como, para el abastecimiento de agua potable, principalmente.