

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



MEJORAS EN LA INFRAESTRUCTURA
DE UN EMBALSE EN NINHUE

MIGUEL EDUARDO BUSTOS SEPÚLVEDA

PROYECTO DE TÍTULO
PRESENTADO A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA

CHILLÁN - CHILE

2025

**MEJORAS EN LA INFRAESTRUCTURA
DE UN EMBALSE EN NINHUE**

Aprobado por:

Ana María Aguilar Bazignan
Ingeniero Constructor
Profesor Asistente

Profesor Guía

José Luis Arumí Ribera
Ingeniero Civil, Ph.D.
Profesor Titular

Profesor Co-Guía

Nicole Uslar Valle
Ingeniera Civil Agrícola, Ph.D.
Evaluador Externo

Profesora Co-Guía

Juan Antonio Cañumir Veas
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.
Profesor Asociado

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniera Agrónoma, Ph.D.
Profesor Asociado

Decana

INDICE DE MATERIAS

En el texto	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS	5
2.1. Objetivo general	5
2.2. Objetivos específicos.....	5
3. ANTECEDENTES GENERALES	6
3.1. Área de Estudio	6
3.2. Situación Actual.....	7
3.3. Impacto Socioeconómico y Ambiental.....	8
4. METODOLOGIA.....	9
4.1. Definición de la Cuenca Aportante	9
4.2. Recolección y Análisis de Datos	10
4.3. Precipitación Máxima	16
4.4. Caudal Máximo (Q _{máx}).....	17
4.5. Diseño de Mejoras.....	20
5. RESULTADOS	41
5.1. Análisis Estadístico.....	41
5.2. Validación de Distribuciones	42
5.3. Precipitación Máxima y Caudal Máximo.....	44
5.4. Diseño de Mejoras.....	45
6. CONCLUSIÓN.....	57
7. LITERATURA CITADA	60

INDICE DE TABLAS

En el texto	Página
Tabla 1. Clasificación de los embalses por tamaño en Chile	3
Tabla 2. Precipitaciones máximas en 24 horas de los últimos 30 años registrados por la estación meteorológica San Agustín de Puñal	10
Tabla 3. Distribución ordenada de precipitaciones máximas diarias	14
Tabla 4. Valores críticos d_{crit} para el test K-S para diferentes tamaños de muestra y niveles de significancia	16
Tabla 5. Coeficiente de escorrentía para distintas regiones de Chile	19
Tabla 6. Coeficientes de Manning para distintas alternativas de revestimiento del vertedero	33
Tabla 7. Taludes y Diámetro para las distintas alternativas de revestimiento del vertedero	39
Tabla 8. Estadísticos descriptivos de las precipitaciones máximas diarias y de los logaritmos naturales y decimales	41
Tabla 9. Probabilidades de excedencia para distintas distribuciones estadísticas de precipitaciones máximas	43
Tabla 10. Diferencias entre cada probabilidad observada y la probabilidad teórica para la validación de distribuciones mediante el test K-S...	44
Tabla 11. Diferencias máximas entre cada probabilidad observada y la probabilidad teórica para la validación de distribuciones	44
Tabla 12. Precipitación máxima estimada, tiempo de concentración, coeficiente de escorrentía, intensidad de precipitación, área de la cuenca y caudal máximo para diferentes períodos de retorno	45
Tabla 13. Capacidad hidráulica del canal de descarga en el Tramo 1 para cada alternativa de revestimiento.....	47
Tabla 14. Capacidad hidráulica del canal de descarga en el Tramo 2 para cada alternativa de revestimiento.....	48
Tabla 15. Velocidad de flujo para distintas alternativas de revestimiento en el canal de descarga para el Tramo 1	50
Tabla 16. Velocidad de flujo para distintas alternativas de revestimiento en el canal de descarga para el Tramo 2	51
Tabla 17. Superficie total y volumen para diferentes materiales de revestimiento en el Tramo 1 del canal de descarga	53

Tabla 18. Superficie total y volumen para diferentes materiales de revestimiento en el Tramo 2 del canal de descarga	53
Tabla 19. Presupuesto detallado para el revestimiento con hormigón en los Tramos 1 y 2 del canal de descarga	54
Tabla 20. Presupuesto detallado para el revestimiento con geomembrana en los Tramos 1 y 2 del canal de descarga	54
Tabla 21. Presupuesto detallado para el revestimiento con gaviones en los Tramos 1 y 2 del canal de descarga	54
Tabla 22. Presupuesto detallado para el uso de Tuberías TDP en los Tramos 1 y 2 del canal de descarga	55

INDICE DE FIGURAS

En el texto	Página
Figura 1. Ubicación embalse Las Garzas	6
Figura 2. Estado actual embalse Las Garzas	8
Figura 3. Cuenca aportante	9
Figura 4. Cuenca aportante y cauce principal del embalse	18
Figura 5. Vertedero rectangular	22
Figura 6. Vertedero triangular	22
Figura 7. Coeficientes de descarga para vertederos triangulares	23
Figura 8. Vertedero trapezoidal	24
Figura 9. Canal revestido de hormigón	25
Figura 10. Canal revestido con geomembrana	28
Figura 11. Canal con gaviones	29
Figura 12. Canal de tuberías TDP	32
Figura 13. Canal de descarga del embalse Las Garzas	37
Figura 14. Captura de pantalla de la interfaz de HCanales para sección no circular	49
Figura 15. Captura de pantalla de la interfaz de HCanales para sección circular	50
Figura 16. Esquema de la propuesta de diseño para el Tramo 1 del canal de descarga	56
Figura 17. Esquema de la propuesta de diseño para el Tramo 2 del canal de descarga	56

INDICE DE ECUACIONES

En el texto	Página
Ecuación 1. Media Aritmética	11
Ecuación 2. Desviación Estándar	11
Ecuación 3. Coeficiente de Asimetría	12
Ecuación 4. Distribución de Weibull	13
Ecuación 5. Fórmula para Microsoft Excel Distribución Log Normal	14
Ecuación 6. Fórmula para Microsoft Excel Distribución Log Pearson	15
Ecuación 7. Fórmula para Microsoft Excel Distribución Gumbel	15
Ecuación 8. Diferencia Máxima de Probabilidades	15
Ecuación 9. Probabilidad de Excedencia	16
Ecuación 10. Precipitación Máxima usando Log Normal	16
Ecuación 11. Precipitación Máxima usando Log Pearson	17
Ecuación 12. Precipitación Máxima usando Gumbel	17
Ecuación 13. Tiempo de Concentración	17
Ecuación 14. Intensidad de Precipitación	19
Ecuación 15. Fórmula Racional	19
Ecuación 16. Caudal de Descarga en Vertederos Rectangulares	21
Ecuación 17. Carga sobre el Vertedero Rectangular	21
Ecuación 18. Caudal de Descarga en Vertederos Triangulares	22
Ecuación 19. Carga sobre el Vertedero Triangular	22
Ecuación 20. Caudal de Descarga en Vertederos Trapezoidales	23
Ecuación 21. Carga sobre el Vertedero Trapezoidal	23
Ecuación 22. Pendiente del Terreno	33
Ecuación 23. Área Transversal en Secciones Trapezoidales	34
Ecuación 24. Área Transversal en Tuberías	34
Ecuación 25. Perímetro Mojado en Secciones Trapezoidales	35
Ecuación 26. Perímetro Mojado en Tuberías	35
Ecuación 27. Radio Hidráulico	35
Ecuación 28. Ecuación de Manning	36
Ecuación 29. Profundidad del Canal	39

Ecuación 30. Longitud Inclined de los Taludes	39
Ecuación 31. Superficie Total del Canal de Descarga	40
Ecuación 32. Volumen del Canal de Descarga	40
Ecuación 33. Superficie Interior de la Tuberías	40
Ecuación 34. Volumen de las Tuberías	40

MEJORAS EN LA INFRAESTRUCTURA

DE UN EMBALSE EN NINHUE

IMPROVEMENTS IN THE INFRASTRUCTURE OF A RESERVOIR IN NINHUE

Palabras Claves: Embalses, Gestión del Agua, Revestimiento de Canales.

RESUMEN

El presente estudio se centra en la mejora de la infraestructura del embalse Las Garzas, ubicado en la comuna de Ninhue, Ñuble, Chile. Dada la creciente variabilidad climática y la importancia de los embalses en la gestión del agua en el país, se evaluaron distintas alternativas de revestimiento del canal de descarga del embalse para optimizar su capacidad de manejo de caudales máximos y asegurar su durabilidad a largo plazo. Se utilizaron datos históricos de precipitación para calcular los caudales máximos, y se empleó el software HCanales para simular el flujo en el vertedero bajo distintas condiciones de revestimiento. Los resultados permitieron identificar la alternativa más adecuada desde el punto de vista técnico y económico, garantizando la estabilidad estructural del vertedero y minimizando el impacto ambiental.

IMPROVEMENTS IN THE INFRASTRUCTURE OF A RESERVOIR IN NINHUE

Keywords: Reservoirs, Water Management, Channel Lining.

SUMMARY

This study focuses on improving the infrastructure of the Las Garzas reservoir, located in the commune of Ninhue, Ñuble, Chile. Given the increasing climate variability and the importance of reservoirs in water management in the country, various lining alternatives for the reservoir's discharge channel were evaluated to optimize its capacity to handle maximum flows and ensure its long-term durability. Historical precipitation data were used to calculate maximum flows, and the HCanales software was employed to simulate the flow in the spillway under different lining conditions. The results identified the most suitable alternative from a technical and economic perspective, ensuring the structural stability of the spillway while minimizing environmental impact.

1. INTRODUCCIÓN

Chile es un país que experimenta una variabilidad climática significativa a lo largo de su territorio. Mientras que en el extremo norte del país predomina un clima árido, en el centro y sur se encuentran regiones con mayores precipitaciones. Esta variabilidad climática ha llevado a la construcción de embalses en diversas zonas para gestionar el recurso hídrico de manera más eficiente.

Los embalses son obras que sirven para acumular las aguas que escurren y así ser aprovechadas durante los períodos en que se origine un déficit o para aumentar la superficie regada. Las obras se pueden clasificar según su tamaño, estos pueden ser del tipo A, tipo B, tipo C y obras menores.

Tabla 1. Clasificación de los embalses por tamaño en Chile.

Tipo	Tamaño
Obras Menores	Menor a 50.000 m ³
A	Entre 50.000 m ³ y 1,5 Mm ³
B	Entre 1,5 Mm ³ y 60 Mm ³
C	Mayores a 60 Mm ³

Fuente: Arumí et al., 2020.

La mayor parte de embalses presentes en Chile pertenecen a obras menores, según datos de la DGA, casi el 50% de todos los embalses en Chile poseen un tamaño menor a 50.000 m³ por eso los embalses de temporada, también conocidos como embalses de regulación, desempeñan un papel crucial en el manejo y la gestión del agua en Chile (Arumí et al., 2010).

El embalse Las Garzas es un claro ejemplo de infraestructura estratégica para el almacenamiento y distribución de agua. Originalmente diseñado para satisfacer las necesidades de riego y el abastecimiento de agua para animales, este también ha adquirido relevancia ambiental al convertirse en un hábitat para diversas especies. Sin embargo, el embalse enfrenta desafíos relacionados con la erosión de sus estructuras y el riesgo de desbordamientos durante eventos hidrológicos extremos.

Este estudio se enfoca en evaluar y proponer mejoras en la infraestructura del embalse Las Garzas, con especial atención en el vertedero y el canal de descarga. El propósito principal es diseñar soluciones que mejoren la capacidad del embalse para manejar caudales máximos, asegurando su durabilidad estructural y minimizando impactos ambientales.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Proponer mejoras al embalse Las Garzas, ubicado en Ninhue, a través de la actualización de sistemas constructivos en el vertedero del embalse.

2.2. Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte de un embalse tipo en la comuna de Ninhue, abordando aspectos como su ubicación geográfica y regulación por parte de la Dirección General de Aguas (DGA).
- Analizar el estado del embalse, considerando las normativas vigentes.
- Diseñar mejoras para el embalse Las Garzas, estimando los presupuestos necesarios para implementarlas y analizando los precios unitarios de los materiales y la mano de obra requerida.

3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1. Área de Estudio

El embalse Las Garzas se sitúa en la comuna de Ninhue, provincia de Itata, Región de Ñuble. Se encuentra ubicado en la cuenca del río Itata, dentro de la subcuenca Itata Bajo y específicamente en la subsubcuenca del río Lonquén hasta el estero Itrinque. Esta localización geográfica coloca al embalse en un punto estratégico para la gestión de recursos hídricos en la zona, permitiendo la regulación y almacenamiento del agua proveniente de esta subcuenca.

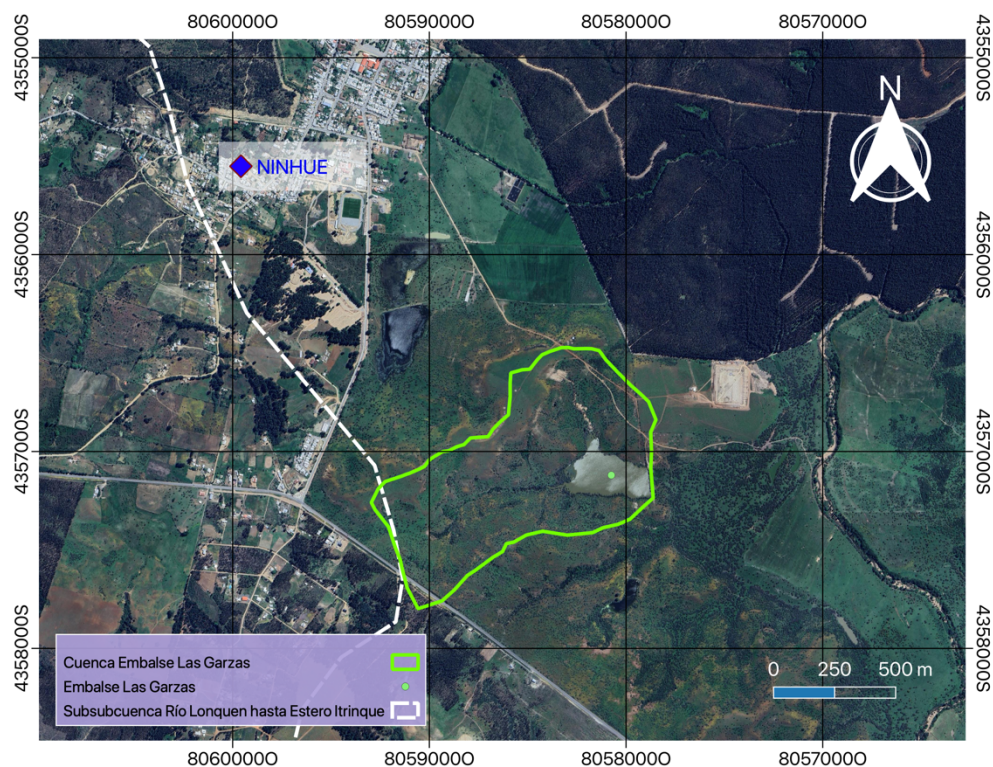


Figura 1. Ubicación geográfica embalse Las Garzas. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Situación Actual

El embalse en el momento de su creación fue diseñado con una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 100.000 m³ de agua, según Don Arturo Vega (Propietario del lugar). Esta capacidad inicial fue planificada para satisfacer las necesidades de riego agrícola y el suministro de agua para los animales.

La infraestructura del embalse incluye un muro que permite la retención de aguas de lluvia, así como estructuras de control de flujo, como el canal de descarga existente, diseñado para regular el nivel del embalse y prevenir desbordamientos durante períodos de intensas lluvias con posteriores crecidas.

El canal de descarga actual, se encuentra en estado natural, sin ningún tipo de revestimiento, como se puede ver en la Figura 2. Este canal presenta erosión significativa en sus bordes, producto del flujo de agua no controlado, lo que compromete su capacidad hidráulica. Sin mejoras, este canal enfrenta riesgos de mayor degradación, así como desbordamientos durante eventos hidrológicos extremos.



Figura 2. Condiciones actuales del embalse y su canal de descarga.

Fuente: Fotografías tomadas por José Luis Arumí, 2024.

3.3. Impacto Socioeconómico y Ambiental

El embalse no solo ha tenido un impacto histórico en términos de recursos hídricos y agricultura, sino que también ha desempeñado un papel significativo en el contexto social y ambiental de la región.

Durante años, el embalse fue un lugar de recreación para los habitantes de la comuna, donde se les permitía ir a bañarse, actividad autorizada por el propietario del terreno circundante. Sin embargo, en la actualidad, esta práctica ha cesado por la acumulación de basura que dejaban los bañistas.

En cambio, el embalse ha adquirido un nuevo papel como humedal, proporcionando un hábitat vital para diversas especies de aves, incluidos los cisnes de cuello negro. Esta función ambiental es crucial para la conservación de la biodiversidad local y destaca la importancia del embalse como un ecosistema natural en la región.

También el embalse ha desempeñado un papel crucial en la lucha contra incendios forestales en la zona. En situaciones de emergencia, los helicópteros han utilizado el embalse como fuente de agua para la extinción de incendios.

4. METODOLOGIA

4.1. Definición de la Cuenca Aportante

Delimitación de la cuenca que contribuye al embalse, identificando las áreas de captación de agua de lluvia. La cuenca actúa como un estanque que recibe la precipitación y la transforma en escorrentía. En este caso la cuenca aportante tiene un área de 0,682 km².

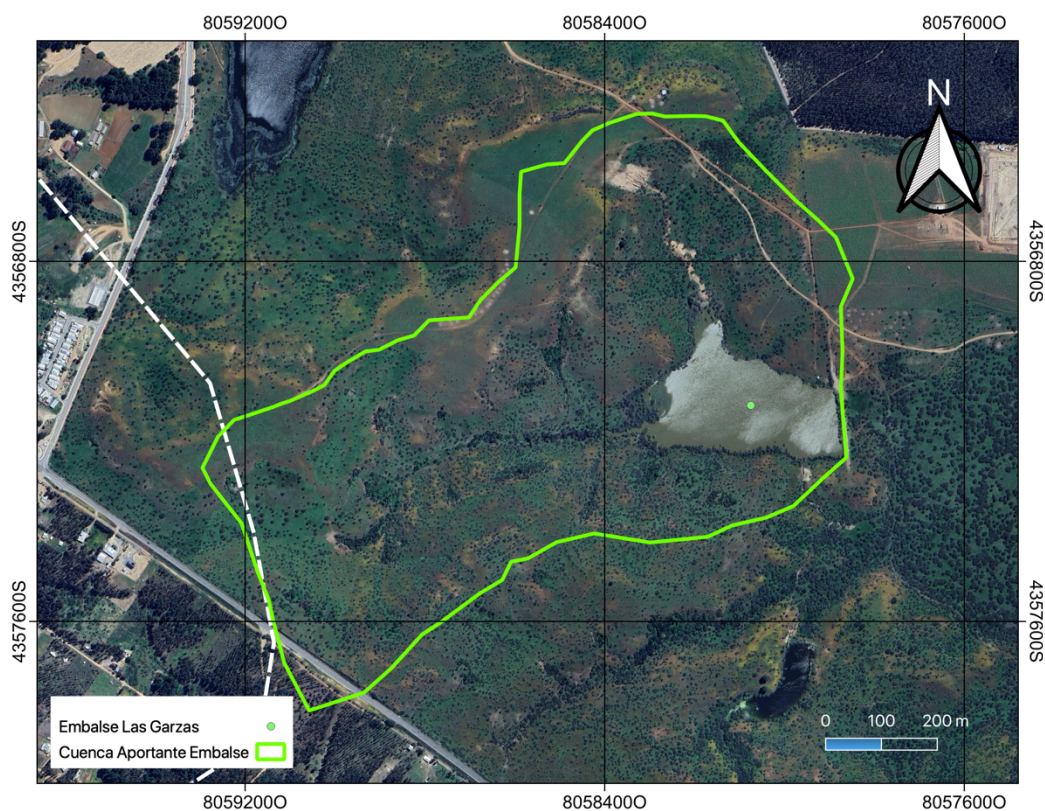


Figura 3. Cuenca Aportante. Fuente: Elaboración Propia.

4.2. Recolección y Análisis de Datos

En esta sección se detallará la metodología empleada para el cálculo del caudal máximo en el embalse de Ninhue, utilizando datos históricos de precipitación y aplicando distribuciones estadísticas para estimar las precipitaciones máximas. Posteriormente, se usará la fórmula racional para calcular el caudal máximo ($Q_{\text{máx}}$) a partir de estas precipitaciones.

4.2.1. Recolección de Datos Históricos de Precipitación

Obtener datos estadísticos desde la base de datos de las estaciones hidrológicas de la DGA, en este caso se utilizará la estación más cercana a Ninhue que es la estación San Agustín de Puñual. Se recolectarán los datos históricos de las precipitaciones máximas diarias de los últimos 30 años de dicha estación para obtener el caudal de diseño.

Tabla 2. Precipitaciones máximas ($P_{\text{máx}}$) en 24 horas de los últimos 30 años registrados por la estación meteorológica San Agustín de Puñual.

Año	$P_{\text{máx}}$ (mm)	Año	$P_{\text{máx}}$ (mm)	Año	$P_{\text{máx}}$ (mm)
1993	72,0	2003	69,0	2013	52,0
1994	44,0	2004	46,0	2014	55,0
1995	76,0	2005	106,0	2015	102,0
1996	66,6	2006	76,4	2016	58,5
1997	95,8	2007	52,0	2017	57,7
1998	30,5	2008	109,0	2018	39,5
1999	63,0	2009	164,0	2019	108,0
2000	59,0	2010	58,0	2020	56,5
2001	92,4	2011	47,5	2021	56,8
2002	106,0	2012	72,7	2023	41,4

Fuente: DGA

4.2.2. Análisis Estadístico de los Datos

En esta etapa, se calculan los estadísticos descriptivos fundamentales de los datos de precipitación para entender mejor su comportamiento y características. Los pasos detallados son los siguientes:

- Media (\bar{X}): La media aritmética se calcula sumando todas las precipitaciones y dividiendo el total por el número de datos. Este valor representa el promedio de las precipitaciones diarias máximas registradas.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad [1]$$

Donde n es el número total de datos y x_i corresponde a cada dato de la columna "Precipitación" de la Tabla 2.

- Desviación Estándar (S): La desviación estándar mide la dispersión de los datos alrededor de la media. Se calcula como la raíz cuadrada de la varianza. La varianza es la media de los cuadrados de las diferencias entre cada observación y la media.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad [2]$$

Donde \bar{X} es la media de los datos, n es el número total de datos y x_i corresponde a cada dato de la columna "Precipitación" de la Tabla 2.

- Coeficiente de Asimetría (CA): Este coeficiente mide la simetría de la distribución de los datos de precipitación. Un valor de asimetría positivo indica que predominan lluvias ligeras con eventos extremos ocasionales, mientras que un valor negativo significa lluvias intensas más frecuentes y pocos eventos de baja precipitación. Se calcula usando la fórmula:

$$CA = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{X}}{s} \right)^3}{(n-1)(n-2)} \quad [3]$$

Donde S es la desviación estándar de los datos, n es el número total de datos y x_i corresponde a cada dato de la columna "Precipitación" de la Tabla 2.

Se aplicará el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S), el que se utiliza para evaluar si una muestra de datos sigue una distribución teórica específica. Esta prueba compara la función de distribución acumulada de los datos de la muestra con la función de distribución acumulada de las distribuciones teóricas. El test comparará tres distribuciones teóricas con una distribución observada, en este caso, las distribuciones teóricas serán Log-Normal, Log-Pearson y Gumbel; mientras que la observada será la distribución Weibull. El objetivo es determinar si las diferencias entre dos funciones son lo suficientemente pequeñas como para aceptar que los datos siguen la distribución teórica.

Las distribuciones Log-Pearson y Gumbel son ampliamente utilizadas en hidrología, particularmente para modelar eventos extremos (Griffis & Stedinger, 2007). La distribución Log Normal transforma datos asimétricos a una forma normal lo que es útil para cualquier análisis estadístico. Esta distribución es adecuada para datos siempre positivos, como caudal y precipitación (Koutsoyiannis, 2004). La Log Pearson, recomendada por el USGS, es igualmente adecuada para una amplia gama de datos hidrológicos para eventos extremos. La distribución Gumbel es adecuada para modelar valores extremos máximos; por lo tanto, es importante para el análisis de las precipitaciones y caudales máximos extremos (Coles, 2001). Las distribuciones permiten procesar y planificar de manera efectiva en la ingeniería hidráulica y gestión de riesgos.

El cálculo de las distribuciones teóricas y observada comienza ordenando los datos de la Tabla 2 de mayor a menor para después utilizar las fórmulas disponibles en Microsoft Excel.

Para la Distribución Weibull será:

$$Weibull = \frac{r}{(n+1)} \cdot 100 \quad [4]$$

Donde r es la posición del dato ordenado, con $r = 1, 2, 3, \dots, n$; con n es el número total de datos.

Tabla 2. Distribución ordenada de precipitaciones máximas diarias (P_{máx}).

r	Año	P _{máx} (mm)	r	Año	P _{máx} (mm)
1	2009	164,0	16	2000	59,0
2	2008	109,0	17	2016	58,5
3	2019	108,0	18	2010	58,0
4	2002	106,0	19	2017	57,7
5	2005	106,0	20	2021	56,8
6	2015	102,0	21	2020	56,5
7	1997	95,8	22	2014	55,0
8	2001	92,4	23	2007	52,0
9	2006	76,4	24	2013	52,0
10	1995	76,0	25	2011	47,5
11	2012	72,7	26	2004	46,0
12	1993	72,0	27	1994	44,0
13	2003	69,0	28	2023	41,4
14	1996	66,6	29	2018	39,5
15	1999	63,0	30	1998	30,5

Fuente: Elaboración Propia.

Para calcular las distribuciones teóricas se utilizarán las siguientes fórmulas de Microsoft Excel:

- Log Normal: Para esta distribución se necesita calcular el logaritmo natural de la columna 'Precipitación' de la Tabla 3, para luego obtener la media (\bar{X}) y la desviación estándar (S).

$$\text{Log Normal} = 100 - \text{DISTR.LOGNORM}(\text{Precipitación}; \bar{X}; S; \text{VERDADERO}) \cdot 100 \quad [5]$$

- Log Pearson: Para esta distribución se necesita calcular el logaritmo de la columna 'Precipitación' de la Tabla 3, para luego obtener la media (\bar{X}), la desviación estándar (S) y el coeficiente de asimetría (CA).

$$\begin{aligned} \text{Log Pearson} = & (1 - \text{SI.ERROR}(\text{SI}(\text{CA} > 0; \text{DISTR.GAMMA.N}(\text{LOG}(\text{Precipitación}) - \\ & (\bar{X} - 2 \cdot \frac{S}{\text{CA}}); \frac{4}{\text{CA}^2}; S \cdot \text{CA}/2; \text{VERDADERO}); \text{SI}(\text{CA} < 0; 1 - \text{DISTR.GAMMA.N}(-\text{LOG}(\text{Precipitación}) + \\ & \bar{X} - 2 \cdot S/\text{CA}; 4/\text{CA}^2; -S \cdot \text{CA}/2; \text{VERDADERO}); \text{DISTR.NORM.N}(\text{LOG}(\text{Precipitación}); \\ & \bar{X}; S; \text{VERDADERO))))); \text{NOD}())) \cdot 100 \end{aligned} \quad [6]$$

- Gumbel: Para obtener esta distribución se necesita calcular la media (\bar{X}) y la desviación estándar (S) de la columna 'Precipitación' de la Tabla 3.

$$\text{Gumbel} = \left(1 - \text{EXP} \left(-\text{EXP} \left(-1 \cdot \left(\frac{1,161}{S} \cdot (\text{Precipitación} - \bar{X}) + 0,545 \right) \right) \right) \right) \cdot 100 \quad [7]$$

Posteriormente se buscará la máxima diferencia entre las probabilidades teóricas resultantes y la probabilidad Weibull, lo que se define por:

$$\text{Dif}_{\text{máx}} = \max [P(\text{Weibull}) - P(\text{teórica})] \quad [8]$$

Este valor se comparará con el valor crítico $d_{\text{crít}}$ para comprobar si la distribución Weibull se ajusta bien a cada distribución teórica. Para que la distribución observada se ajuste a la teórica es necesario que el valor de máxima diferencia ($\text{Dif}_{\text{máx}}$) sea menor al valor crítico $d_{\text{crít}}$; dicho valor crítico se obtendrá de la Tabla 4, fijando un nivel de significancia (α) de 0,05 y un tamaño de muestra de 30 datos, este será 0,24.

Tabla 3. Valores críticos d_{crit} para el test K-S para diferentes tamaños de muestra y niveles de significancia.

Tamaño de la muestra	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
5	0,51	0,56	0,67
10	0,37	0,41	0,49
15	0,30	0,34	0,40
20	0,26	0,29	0,35
25	0,24	0,26	0,32
30	0,22	0,24	0,29
40	0,19	0,21	0,25
n grande	$1,22 / (n)^{1/2}$	$1,36 / (n)^{1/2}$	$1,63 / (n)^{1/2}$

Fuente: Aparicio, 1993.

4.3. Precipitación Máxima

Se realizará el cálculo de la precipitación máxima ($P_{m\acute{a}x}$) en 24 horas para las tres distribuciones teóricas, utilizando tres períodos de retorno (T) y su respectiva probabilidad de excedencia (P_{exc}). Para ello se trabajará con las siguientes fórmulas:

$$P_{exc} = \frac{1}{T} \quad [9]$$

- Log Normal: Utilizando la media (\bar{X}), la desviación estándar (S), calculados anteriormente, y la probabilidad de excedencia, se obtendrá:

$$P_{m\acute{a}x} = INV.LOGNORM(1 - P_{exc}; \bar{X}; S) \quad [10]$$

- Log Pearson: Utilizando la media (\bar{X}), la desviación estándar (S), el coeficiente de asimetría (CA), calculados anteriormente, y la probabilidad de excedencia, se obtendrá:

$$P_{m\acute{a}x} = 10^{(SI.ERROR(SI(CA > 0; INV.GAMMA(1 - P_{exc}; 4/CA^2; S \cdot CA/2) + \bar{X} - 2 \cdot S/CA; SI(CA < 0; -INV.GAMMA(P_{exc}; 4/CA^2; -S \cdot CA/2) + \bar{X} - 2 \cdot S/CA; INV.NORM(1 - P_{exc}; \bar{X}; S))); NOD())} \quad [11]$$

- Gumbel: Para el cálculo de esta precipitación máxima ($P_{m\acute{a}x}$) se utiliza la media (\bar{X}) y la desviación estándar (S), obtenidos anteriormente, teniendo así:

$$P_{m\acute{a}x} = (-LN(-LN(1 - P_{exc})) - 0,545) \cdot (\bar{X}/1,161) + S \quad [12]$$

4.4. Caudal Máximo ($Q_{m\acute{a}x}$)

4.4.1. Tiempo de concentración (T_c)

Para obtener el caudal de diseño se necesitará calcular el tiempo de concentración (T_c) que según la DGA (2010), "Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre." (p. 15). Para el cálculo de esta variable se utilizará la fórmula del California Highways and Public Works de EE.UU.:

$$T_c = 0,95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad [13]$$

Donde L es la longitud del cauce principal, en km; y H es el desnivel máximo de la cuenca, en m.

En este proyecto, la longitud del cauce es de 0,96 km aprox., mientras que el desnivel de la cuenca es de 16 m.

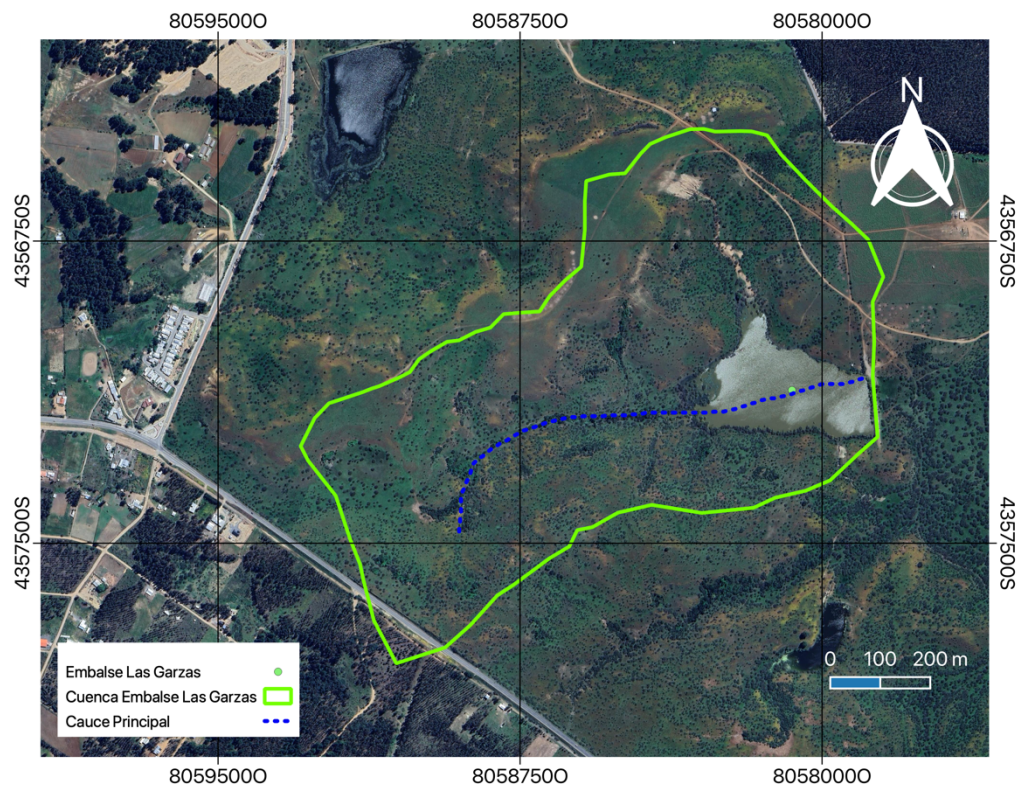


Figura 4. Cuenca aportante y cauce principal del embalse. Fuente: Elaboración Propia.

4.4.2. Cálculo de la Intensidad (i)

La intensidad de precipitación es una métrica clave en el diseño hidráulico, ya que influye directamente en la capacidad de drenaje y la prevención de inundaciones (Pizarro et al., 2016).

El análisis de la intensidad de precipitación es crucial para comprender y gestionar los riesgos asociados a eventos meteorológicos extremos, como lluvias torrenciales que pueden causar inundaciones y desbordamientos de ríos.

Para el cálculo de la intensidad se utilizará la siguiente fórmula:

$$i = \frac{P_{m\acute{a}x}}{24} \cdot \sqrt{\frac{24}{Tc}} \quad [14]$$

Donde i corresponde a la intensidad de precipitación, en mm/hr; $P_{m\acute{a}x}$ es la precipitación máxima en 24 horas, en mm; y Tc es el tiempo de concentración de la cuenca, en horas.

4.4.3. Fórmula Racional para calcular $Q_{m\acute{a}x}$

El cálculo del caudal máximo se llevará a cabo utilizando la Fórmula Racional y se calculará para las tres distribuciones teóricas.

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \quad [15]$$

Donde Q es el caudal instantáneo máximo de período de retorno, en m^3/s ; C es el coeficiente de escorrentía (Tabla 5); i es la intensidad media de lluvia asociada al período de retorno T , en mm/h; y A es el área de la cuenca, en km^2 .

Tabla 4. Coeficiente de escorrentía para distintas regiones de Chile.

Región	C
III	0,009
IV- Cuenca Elqui	0,025
IV-Cuenca Limarí	0,078
IV-Cuenca Choapa	0,080
V	0,080
VI	0,310
VII	0,390
VIII	0,360
IX	0,280

Fuente: DGA

4.5. Diseño de Mejoras

El diseño de mejoras del vertedero y canal de descarga tiene como objetivo garantizar la seguridad y eficiencia hidráulica del sistema frente a caudales máximos previstos. Estas mejoras buscan minimizar el riesgo de desbordamiento, erosión y otros daños estructurales asociados con eventos hidrológicos extremos.

El análisis se divide en dos partes principales: el diseño del vertedero y la evaluación del canal de descarga, considerando distintas alternativas geométricas y de revestimiento para optimizar su capacidad hidráulica y funcionalidad.

Antes de analizar las mejoras propuestas para el vertedero y el canal de descarga, es importante definir estos elementos fundamentales del diseño hidráulico; un vertedero es una estructura hidráulica diseñada para controlar el nivel del agua en un embalse o sistema de almacenamiento, regulando la evacuación de caudales máximos hacia estructuras aguas abajo (DOH, 2020). Por otro lado, un canal de descarga es el elemento encargado de conducir este flujo de manera segura hacia su destino final, evitando erosión y pérdidas hidráulicas (DOH, 2020).

4.5.1. Diseño del Vertedero

Una vez calculado el caudal máximo ($Q_{\text{máx}}$) para el embalse, se procede a utilizar esta información como base para el diseño hidráulico del vertedero. El caudal máximo, obtenido a partir de datos históricos de precipitación y análisis

hidrológico, es fundamental para dimensionar las estructuras del vertedero de manera que sean capaces de manejar eventos de crecida de manera segura.

Para realizar este diseño, se empleará el software HCanales (Máximo Villón Béjar), una herramienta especializada en el análisis y diseño de canales hidráulicos. Con el $Q_{\text{máx}}$ calculado se buscará la carga sobre el vertedero (h), aplicando diferentes geometrías de vertedero para encontrar la configuración que mejor maneje el caudal de diseño sin riesgo de desbordamiento.

El análisis se realizará considerando tres alternativas de sección de vertedero que existen en el software, para ello se utilizará un ancho (L) de 3 metros en cada caso y el caudal máximo ($Q_{\text{máx}}$) a calcular, así:

1. Vertedero Rectangular: Este tipo de vertedero permite un flujo constante y es adecuado para caudales altos. La fórmula de descarga es:

$$Q_{\text{vertedero}} = C_d \cdot L \cdot h^{3/2} \quad [16]$$

Despejando la carga sobre el vertedero (h):

$$h = \left(\frac{Q_{\text{vertedero}}}{C_d \cdot L} \right)^{2/3} \quad [17]$$

Donde Q es el caudal que fluye por el vertedero, en m^3/s ; C_d es el Coeficiente de descarga; L es el ancho del vertedero, en m ; y h es la carga sobre el vertedero, en m .

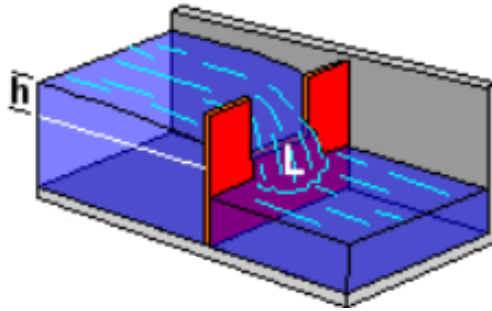


Figura 5. Ejemplo de vertedero rectangular. Fuente: HCanales.

2. Vertedero Triangular: Este diseño es eficaz para manejar caudales variables, particularmente en situaciones donde se espera que el flujo fluctúe.

La fórmula de descarga para un vertedero triangular es:

$$Q_{\text{vertedero}} = Cd \cdot h^{5/2} \quad [18]$$

Despejando la carga sobre el vertedero (h):

$$h = \left(\frac{Q_{\text{vertedero}}}{Cd} \right)^{2/5} \quad [19]$$

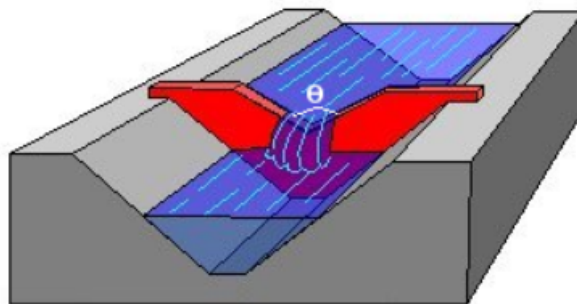


Figura 6. Ejemplo de vertedero triangular. Fuente: HCanales.

Donde Q es el caudal que fluye por el vertedero, en m³/s; Cd es el coeficiente de descarga en función del ángulo θ y h es la carga sobre el vertedero. En esta oportunidad se trabajará con un ángulo de 90°.

Ángulo θ	15°	30°	45°	60°	90°	120°
Cd	0.206	0.392	0.596	0.819	1.4	2.465
Válido para h >	0.15	0.205	0.185	0.17	0.14	0.12

Figura 7. Valores del coeficiente de descarga (Cd) en función del ángulo θ .
Fuente: HCanales.

3. Vvertedero Trapezoidal: Este tipo combina una base rectangular y lados inclinados, proporcionando una descarga adaptable a flujos variables. Su fórmula de descarga es:

$$Q_{\text{vertedero}} = 1,859 \cdot L \cdot h^{3/2} \quad [20]$$

Despejando la carga sobre el vertedero (h):

$$h = \left(\frac{Q_{\text{vertedero}}}{1,859 \cdot L} \right)^{2/3} \quad [21]$$

Donde Q es el caudal, en m³/s; L es la longitud de cresta, m; h es la carga sobre el vertedero, en m.

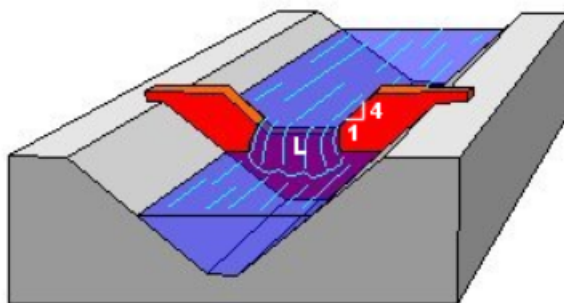


Figura 8. Ejemplo de vertedero trapecoidal. Fuente: HCanales.

Cada alternativa se evaluará para obtener la altura del agua sobre el vertedero que garantiza que el flujo sea manejado adecuadamente. A partir de estos resultados, se seleccionará la configuración que cumple con el caudal de diseño sin superar la capacidad de estructura.

4.5.2. Propuestas de Mejora del Canal de Descarga

El canal de descarga conduce el flujo evacuado por el vertedero hacia un punto seguro aguas abajo. Aquí es necesario verificar si puede manejar el $Q_{\text{máx}}$ considerando su geometría, pendiente y revestimiento.

4.5.2.1. Revestimiento con hormigón

El revestimiento de canales de riego con hormigón es una práctica común en la ingeniería hidráulica, reconocida por su durabilidad y eficiencia en la conducción de agua. Este material permite minimizar las pérdidas por infiltración y garantiza la estabilidad de las estructuras (Morales & Sánchez, 2013). Uno de los principales objetivos del revestimiento es reducir las pérdidas de agua que se infiltra en el suelo, así como también proteger el canal

de la erosión, que puede ser causada por el flujo de agua o por la acción de sedimentos arrastrados.

Para trabajar con hormigón es necesario preparar el terreno ya que el suelo debe ser compactado y nivelado antes de aplicar el revestimiento para asegurar una base estable y uniforme. También se deben considerar sistemas de drenaje debajo del revestimiento para manejar la presión del agua subterránea y evitar levantamientos o agrietamientos del hormigón.



Figura 9. Canal de hormigón utilizado en obras hidráulicas.
Fuente: DPV Ingeniería.

Las principales ventajas de este tipo de construcciones son la durabilidad de la obra ya que el hormigón es un material muy duradero y puede resistir las condiciones ambientales adversas. Requiere menos mantenimiento comparado con canales no revestidos y mejora significativamente la eficiencia

del transporte de agua. Por contraparte como desventajas principales tiene su alto costo inicial, y su rigidez, lo que puede ser problemático en áreas con movimientos de terreno significativos.

Algunas consideraciones ambientales son que el revestimiento de hormigón puede afectar negativamente a los hábitats acuáticos y a la biodiversidad en el canal. Aunque en este caso, no habría un impacto significativo en la construcción del vertedero, porque este sólo se utiliza en caso de crecidas del embalse.

4.5.2.2. Geomembrana

El revestimiento con geomembrana es una técnica similar al revestimiento con hormigón, pero con diferencias significativas en términos de materiales, aplicación y características. Las geomembranas, especialmente las fabricadas con polietileno de alta densidad (HDPE), son ampliamente utilizadas en la impermeabilización de canales y embalses debido a su alta resistencia y flexibilidad, lo que las convierte en una opción eficiente y duradera (González & Pérez, 2015). Aunque no tan rígidas como el hormigón, las geomembranas también ayudan a proteger las paredes y el fondo del canal contra la erosión causada por el flujo de agua.

Existen varios tipos de geomembranas, como por ejemplo el HDPE, es el tipo de geomembrana más común, conocida por su resistencia a productos químicos y larga vida útil; también existe el Cloruro de Polivinilo (PVC) que es

más flexible que el HDPE, el PVC es fácil de instalar y se adapta bien a las superficies irregulares. Sin embargo, su durabilidad puede ser menor en comparación con el HDPE. Finalmente está el Polipropileno, el que se utiliza especialmente en aplicaciones donde se requiere mayor flexibilidad y resistencia al desgaste.

Al igual que el revestimiento con hormigón, el terreno debe estar bien preparado antes de la instalación de la geomembrana. Se necesita nivelar y compactar el suelo para evitar que objetos punzantes o irregularidades dañen la geomembrana. Las geomembranas se desenrollan sobre el canal preparado y se fijan en su lugar mediante anclajes o se cubren con una capa de suelo o grava. Es crucial que las uniones entre las diferentes láminas sean bien selladas para asegurar la impermeabilidad. En algunos casos, se coloca una capa protectora sobre la geomembrana, como una malla geotextil, para protegerla de daños mecánicos y de la exposición a los rayos UV.

Entre las principales ventajas de esta alternativa están la flexibilidad, ya que se adapta fácilmente a diferentes formas y tamaños de canales, incluyendo curvas y pendientes. A diferencia del revestimiento con hormigón, el trabajo con geomembranas tiene un coste inicial más bajo. También la instalación de geomembranas es más rápida, y son más ligeras, lo que facilita su transporte y manipulación.



Figura 10. Revestimiento de canal con geomembrana HDPE.
Fuente: Technoflow.

Como principales desventajas está la durabilidad, aunque son duraderas, las geomembranas suelen tener una vida útil menor en comparación con el hormigón, y pueden requerir reemplazo o reparación con el tiempo. Pueden ser perforadas o dañadas por objetos afilados, roedores, o raíces de plantas, lo que compromete su impermeabilidad.

En términos medioambientales se puede decir que las geomembranas son más amigables con el entorno natural en comparación con el hormigón, ya que no altera significativamente los organismos acuáticos, en caso de que existan. Algunas geomembranas, especialmente las de PVC, pueden liberar compuestos químicos al degradarse, lo que podría afectar la calidad del agua.

4.5.2.3. Gaviones

Los gaviones son estructuras de contención, a cualquier obra capaz de contener o soportar las presiones laterales o empujes, generados por los suelos contenidos y sobrecargas externas (CChC) . Generalmente se trata de mallas metálicas rellenas de piedras, utilizadas principalmente para la estabilización de suelos, control de erosión, y construcción de muros de contención. En el contexto de canales de riego, los gaviones se utilizan para reforzar las márgenes y el lecho del canal, protegiéndolos de la erosión y mejorando la durabilidad de la infraestructura.



Figura 11. Definición y usos de gaviones. Fuente: ConceptoDefinición.de.

La malla de los gaviones suele estar hecha de acero galvanizado para resistir la corrosión, y se rellena con piedras de tamaño uniforme. También son

modulares, lo que permite construir estructuras de diferentes formas y tamaños, adaptándose a las necesidades específicas del canal.

Sus principales ventajas son la resistencia a la erosión y a las fluctuaciones de flujo de agua; permite el paso del agua a través de la estructura, lo que ayuda a aliviar la presión hidrostática y reduce el riesgo de colapso. Por el contrario, como desventajas está su alto costo en comparación con otros métodos de revestimiento, esto debido a la mano de obra y materiales involucrados. Así como también su mantenimiento, ya que los gaviones pueden requerir mantenimiento en la malla si esta se deteriorara con el tiempo.

Ambientalmente se puede añadir que los gaviones, al estar rellenos de piedras, permiten la colonización por vegetación natural, lo que contribuye a la integración del canal con el entorno que lo rodea. Esto favorece la biodiversidad y la estabilización de suelos a largo plazo. También reducen la erosión del canal, ya que disminuyen el arrastre de sedimentos, lo cual es beneficioso para la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos. Por el contrario, el uso de mallas de acero galvanizado puede generar residuos si no se realiza un manejo adecuado al final de su vida útil.

4.5.2.4. Tuberías TDP

Las Tuberías de Distribución de Polietileno (TDP) son tuberías flexibles de alta resistencia utilizadas para la conducción de agua en sistemas de riego. Son ampliamente reconocidas por su resistencia y flexibilidad, características que

las hacen ideales para su uso en sistemas de riego y conducción de agua en terrenos irregulares (Fernández & López, 2014), proporcionando una solución eficiente y de bajo mantenimiento. Son fabricadas con HDPE, resistentes a la corrosión, químicos y a los efectos del sol. Dependiendo del caudal existente, hay tuberías disponibles en diferentes diámetros.

Las ventajas de este tipo de revestimiento son la reducción de pérdidas, esto debido a que, al entubar el agua las pérdidas por infiltración y evaporación disminuyen significativamente. Las tuberías TDP son ligeras y fáciles de instalar, incluso en terrenos difíciles. Su durabilidad y resistencia a la corrosión reducen la necesidad de mantenimiento a lo largo del tiempo.

Mientras que entre las desventajas más importantes están el costo de instalación, especialmente para grandes extensiones de canales. Aunque son flexibles, las tuberías TDP pueden no ser adecuadas para zonas con movimiento de tierra significativo o donde se requiere una adaptación precisa a la topografía.

Al minimizar las pérdidas por infiltración y evaporación, las tuberías TDP ayudan a conservar recursos hídricos, lo que es beneficioso para el entorno y las comunidades cercanas. La instalación de tuberías generalmente requiere menos movimiento de tierra que otros métodos, reduciendo así el impacto sobre el terreno natural y los ecosistemas.



Figura 12. Ejemplo de tuberías utilizadas en sistemas de drenaje.
Fuente: Comisur.

La fabricación de tuberías TDP involucra el uso de derivados del petróleo, lo que tiene un impacto ambiental relacionado con la extracción de recursos no renovables y la emisión de gases de efecto invernadero. Esto implica que son de un material no biodegradable y, al final de su vida útil, pueden representar un desafío de disposición si no se reciclan adecuadamente.

4.5.3. Análisis del Canal de Descarga

Se analizará la capacidad del canal de descarga en dos tramos con pendientes y revestimientos distintos, utilizando la ecuación de Manning. El objetivo es determinar si el canal puede evacuar el caudal máximo de diseño ($Q_{\text{máx}}$) para cada revestimiento propuesto. Además, se calcularán las áreas, perímetros mojados y radios hidráulicos correspondientes, ajustando según las características geométricas del canal.

En primer lugar, se definen los parámetros que se utilizarán en el cálculo. Para el estudio, el canal de descarga será dividido en dos tramos para facilitar su diseño y análisis. Cada tramo tiene un ancho de solera de 5 metros, pero difieren en su longitud y pendiente. El primer tramo tendrá una longitud de 55 metros, mientras que la longitud del segundo tramo será de 60 metros. La pendiente es la relación entre el desnivel del terreno (Δh) y la longitud del canal (L). Se obtiene con:

$$S = \frac{\Delta h}{L} \quad [22]$$

Para el tramo 1 el desnivel del terreno es de 0,6 metros, y para el tramo 2 es de 0,5 metros.

Tabla 6. Coeficientes de Manning (n) para distintas alternativas de revestimiento del vertedero.

Material de Revestimiento	n
Hormigón	0,014
Geomembranas	0,012
Gaviones	0,026
Tuberías TDP	0,009

Fuente: Chow, 1959

En cada tramo y alternativa de revestimiento se calcularán las áreas transversales (A) y el radio hidráulico (R), mientras que el coeficiente de rugosidad (n) se obtendrá de la Tabla 6.

- Área Transversal (A): representa la sección efectiva del flujo de agua dentro del canal, y es fundamental para determinar la capacidad de transporte del canal (Chow, 1959).
 - o Para secciones trapezoidales: El área transversal de un canal trapezoidal se calcula sumando el área del rectángulo formado por el ancho de solera y la profundidad, y el área de los triángulos laterales definidos por el talud.

$$A = b \cdot p + m \cdot p^2 \quad [23]$$

Donde b es el ancho de solera, en m; p la profundidad del canal, en m; y m es el talud correspondiente en cada alternativa que se obtendrá de la Tabla 6.

- o Para tuberías: el área transversal del flujo de tuberías depende del diámetro de la tubería (DDD).

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad [24]$$

Donde D es el diámetro de la tubería seleccionada, en m.

- Perímetro Mojado (P): Es la longitud de la línea de sección que está en contacto con el agua (Chow, 1959).

- Para secciones trapezoidales: el perímetro se calcula combinando la solera y los lados inclinados, lo que depende de la profundidad y el talud del canal

$$P = b + 2 \cdot \sqrt{(m \cdot p)^2 + p^2} \quad [25]$$

Donde b es el ancho de solera, en m; p la profundidad del canal, en m; y m es el talud correspondiente en cada alternativa.

- Para tuberías: Cuando la tubería está completamente llena, el perímetro mojado es el perímetro completo de la tubería.

$$P = \pi \cdot D \quad [26]$$

Donde D es el diámetro de la tubería seleccionada, en m.

- Radio Hidráulico (R): Es la relación entre el área transversal y el perímetro mojado (Chow, 1959).

$$R = \frac{A}{P} \quad [27]$$

Donde A es el área transversal, en m²; y P es el perímetro mojado, en m.

Una vez obtenidas todas las variables se procederá a aplicar la ecuación de Manning, para calcular la capacidad de flujo (Qcanal) del canal de descarga para cada tramo y revestimiento. Esto se realizará para comparar la capacidad de flujo del canal con el caudal de diseño de éste, verificando si el canal es

capaz de evacuar el caudal a obtener; si $Q_{canal} \geq Q_{vertedero}$, el canal puede evacuar sin riesgo de desbordamiento, en cambio si $Q_{canal} \leq Q_{vertedero}$, el canal no será capaz de evacuar el agua, lo que puede provocar desbordamientos, daños estructurales, o inundaciones.

$$Q_{canal} = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad [28]$$

Donde Q_{canal} es la capacidad de flujo del canal de descarga, en m^3/s ; n es el coeficiente de rugosidad de Manning; A es el área de la sección transversal del flujo, en m^2 ; R es el radio hidráulico, en m ; y S es la pendiente del canal.

Una vez obtenido el caudal Q_{canal} , se procederá a utilizar el software HCanales para validar los cálculos y analizar el comportamiento del flujo en el canal de descarga. Este programa permite evaluar la velocidad del flujo y verificar que esté dentro del rango aceptable. De esta manera, se seleccionará la alternativa más adecuada que asegure tanto la eficiencia hidráulica como la durabilidad y sostenibilidad del canal de descarga.

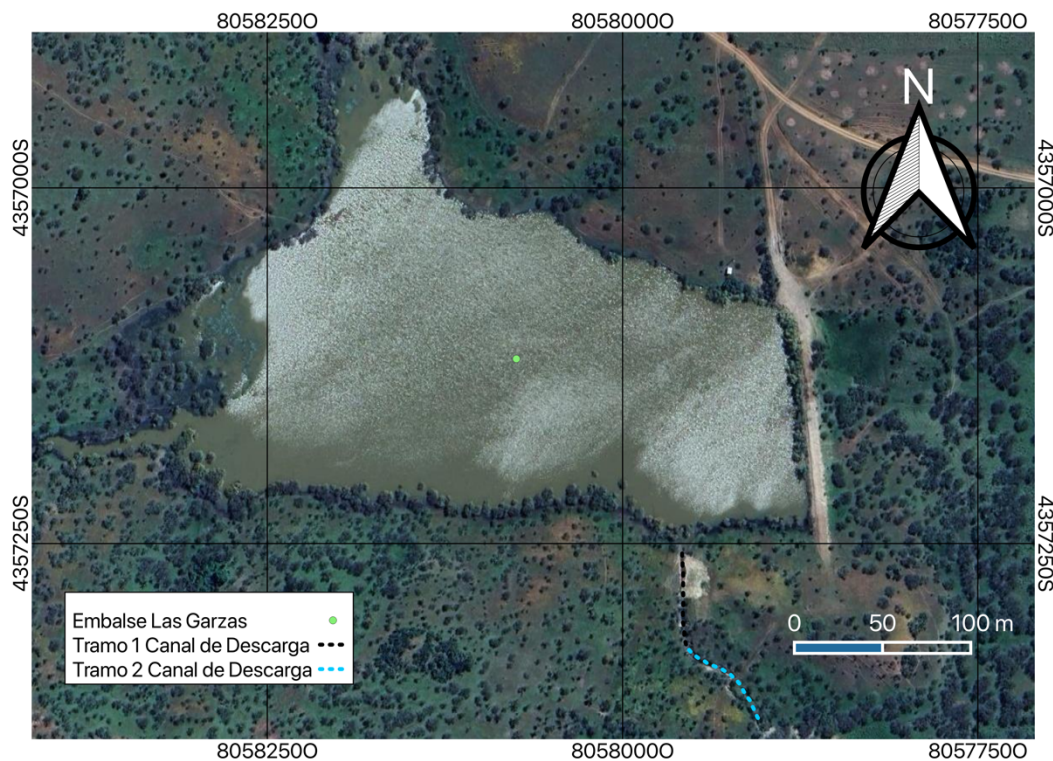


Figura 13. Canal de descarga del embalse Las Garzas, dividido en dos tramos.
Fuente: Elaboración Propia.

4.5.4. Presupuesto

El cálculo del presupuesto es fundamental para seleccionar la alternativa de revestimiento más adecuada en los tramos del canal de descarga. En este apartado, se analizan los costos de construcción, considerando la cantidad de material necesario, los costos unitarios, y las particularidades de cada revestimiento.

Para obtener el presupuesto de cada alternativa es necesario calcular el volumen requerido de cada material a evaluar. Para calcular la superficie de revestimiento del canal de descarga, se deben considerar la superficie del fondo (solera) y las superficies de las paredes laterales (debido a los taludes).

4.5.4.1. Cálculo de Volúmenes y Superficies

Para el cálculo de volúmenes y superficies necesarios para las distintas alternativas de revestimiento en el Tramo 1 y Tramo 2 del vertedero. Se necesitarán los siguientes datos:

- Ancho de Solera (b): Es el ancho del fondo del canal, en este caso corresponde a 5 metros.
- Longitud del Canal (L): Es la longitud del tramo del canal que se está considerando, en este caso el tramo 1 será de 55 metros y el tramo 2 de 60 metros.
- Pendiente (S): Es la relación entre el desnivel del terreno (Δh) y la longitud del canal (L). Se obtiene con la Ecuación (22)
- Profundidad (p): Es la altura desde la base del canal hasta el borde del talud.
- Talud (Z): Es la relación entre la distancia horizontal y la distancia vertical del talud.
- Diámetro (D): Diámetro de la tubería seleccionada, en este caso, D = 1000 mm.

Tabla 7. Taludes (Z) y Diámetro (D) para las distintas alternativas de revestimiento del vertedero.

Material de Revestimiento	Z	Material de Revestimiento	D (m)
Hormigón	1,0	Tuberías TDP	1,0
Geomembranas	2,5		
Gaviones	0,5		

Fuente: Elaboración Propia.

En primer lugar, se calculará la profundidad del canal (p) con la Ec.29.

$$p = L \cdot S \quad [29]$$

Donde L es la longitud de cada Tramo y S es la pendiente del Tramo correspondiente.

A partir de esta profundidad y los taludes de la Tabla 5. para cada material de revestimiento, se determinarán las longitudes inclinadas de los taludes (Lp) para hormigón, geomembrana, y gaviones, utilizando la fórmula:

$$Lp = \sqrt{(Z \cdot p)^2 + Z^2} \quad [30]$$

Donde Z es el talud del material seleccionado y h es la profundidad del canal.

Con las longitudes inclinadas calculadas, se procederá a determinar la superficie total de revestimiento (St) para cada material, sumando la superficie del fondo (solera) y las superficies de las paredes laterales.

$$St = b \cdot L + 2 \cdot (L \cdot Lp) \quad [31]$$

Donde b es el ancho de solera del vertedero, L es la longitud del Tramo seleccionado y Lp la longitud inclinada de los taludes.

Finalmente, se calculó el volumen de material necesario multiplicando la superficie total (St) por el espesor correspondiente de cada material.

$$V = St \cdot Espesor \quad [32]$$

Ahora para calcular las superficies y volúmenes asociados a las tuberías TDP se deben comenzar obteniendo la superficie interior de la tubería (Si) se calcula utilizando la fórmula para la superficie lateral de un cilindro:

$$Si = \pi \cdot D \cdot L \quad [33]$$

Donde Si es la superficie interior de la tubería, D es el diámetro de la tubería y L es la longitud de la tubería.

Luego, el volumen de la tubería se calcula utilizando la fórmula para el volumen de un cilindro:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L \quad [34]$$

Donde V es el volumen de la tubería, D es el diámetro de la tubería y L es la longitud de la tubería.

5. RESULTADOS

5.1. Análisis Estadístico

En el análisis estadístico, se calculó la media, la desviación estándar y el coeficiente de asimetría de las precipitaciones máximas diarias registradas en los últimos 30 años en la estación meteorológica de San Agustín de Puñual. Estos cálculos permitieron caracterizar la distribución de los datos, identificando patrones y tendencias que son fundamentales para el diseño hidráulico del vertedero.

La media de las precipitaciones máximas fue de 71,11 mm, lo que representa el promedio de las lluvias más intensas en el área de estudio durante el período analizado. La desviación estándar de 28,49 mm indica que los eventos de lluvia extrema tienen una dispersión considerable. El coeficiente de asimetría de 1,34 revela hay una mayor ocurrencia de eventos con precipitaciones por encima de la media.

Tabla 8. Estadísticos descriptivos de las precipitaciones máximas diarias ($P_{\text{máx}}$) y de los logaritmos naturales ($\ln P_{\text{máx}}$) y decimales ($\log P_{\text{máx}}$).

	$P_{\text{máx}}$	$\ln(P_{\text{máx}})$	$\log(P_{\text{máx}})$
\bar{X}	71,11	4,20	1,82
S	28,49	0,37	0,16
CA	1,34	0,31	0,31

Fuente: Elaboración Propia.

5.2. Validación de Distribuciones

Se aplicó el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para validar si las precipitaciones máximas diarias siguen alguna de las distribuciones teóricas: Log-Normal, Log-Pearson, y Gumbel. Este test comparó las probabilidades observadas con las teóricas y calculó las diferencias máximas (D_{fmax}) entre ellas (Tabla 10).

Los resultados (Tabla 10) indican que la distribución Log-Pearson presenta la menor diferencia máxima en comparación con las otras distribuciones, lo que sugiere que es la más adecuada para modelar los datos de precipitación en esta región.

Tabla 9. Probabilidades de excedencia para distintas distribuciones estadísticas de precipitaciones máximas.

Año	P _{máx} (mm)	P(Weibull)	P(Log-Normal)	P(Log-Pearson)	P(Gumbel)
1	164,0	3,23	0,75	1,28	1,31
2	109,0	6,45	9,11	9,63	11,65
3	108,0	9,68	9,52	10,01	12,10
4	106,0	12,90	10,40	10,82	13,06
5	106,0	16,13	10,40	10,82	13,06
6	102,0	19,35	12,39	12,63	15,18
7	95,8	22,58	16,18	16,06	19,11
8	92,4	25,81	18,68	18,32	21,61
9	76,4	29,03	35,25	33,62	37,34
10	76,0	32,26	35,78	34,12	37,82
11	72,7	35,48	40,32	38,45	41,93
12	72,0	38,71	41,33	39,43	42,83
13	69,0	41,94	45,83	43,81	46,84
14	66,6	45,16	49,62	47,56	50,18
15	63,0	48,39	55,57	53,56	55,38
16	59,0	51,61	62,42	60,64	61,32
17	58,5	54,84	63,28	61,54	62,07
18	58,0	58,06	64,15	62,45	62,82
19	57,7	61,29	64,67	63,00	63,26
20	56,8	64,52	66,22	64,66	64,61
21	56,5	67,74	66,74	65,21	65,06
22	55,0	70,97	69,33	67,97	67,30
23	52,0	74,19	74,41	73,48	71,73
24	52,0	77,42	74,41	73,48	71,73
25	47,5	80,65	81,58	81,40	78,07
26	46,0	83,87	83,79	83,86	80,07
27	44,0	87,10	86,55	86,93	82,62
28	41,4	90,32	89,78	90,50	85,71
29	39,5	93,55	91,86	92,76	87,78
30	30,5	96,77	98,17	98,98	95,19

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 10. Diferencias entre cada probabilidad observada (Log Normal [LN], Log Pearson [LP] y Gumbel [G]) y la probabilidad teórica (Weibull [W]) para la validación de distribuciones mediante el test K-S.

Año	P _{máx} (mm)	W - LN	W - LP	W - G	Año	P _{máx} (mm)	W - LN	W - LP	W - G
1	164	0,025	0,019	0,019	16	59	0,108	0,09	0,097
2	109	0,027	0,032	0,052	17	58,5	0,084	0,067	0,072
3	108	0,002	0,003	0,024	18	58	0,061	0,044	0,048
4	106	0,025	0,021	0,002	19	57,7	0,034	0,017	0,02
5	106	0,057	0,053	0,031	20	56,8	0,017	0,001	0,001
6	102	0,070	0,067	0,042	21	56,5	0,010	0,025	0,027
7	95,8	0,064	0,065	0,035	22	55	0,016	0,030	0,037
8	92,4	0,071	0,075	0,042	23	52	0,002	0,007	0,025
9	76,4	0,062	0,046	0,083	24	52	0,030	0,039	0,057
10	76	0,035	0,019	0,056	25	47,5	0,009	0,008	0,026
11	72,7	0,048	0,030	0,064	26	46	0,001	0,000	0,038
12	72	0,026	0,007	0,041	27	44	0,005	0,002	0,045
13	69	0,039	0,019	0,049	28	41,4	0,005	0,002	0,046
14	66,6	0,045	0,024	0,050	29	39,5	0,017	0,008	0,058
15	63	0,072	0,052	0,070	30	30,5	0,014	0,022	0,016

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 11. Diferencias máximas ($Dif_{máx}$) entre cada probabilidad observada (Log Normal [LN], Log Pearson [LP] y Gumbel [G]) y la probabilidad teórica (Weibull [W]) para la validación de distribuciones.

Test K-S	$Dif_{máx}$
W - LN	0,11
W - LP	0,09
W - G	0,10

Fuente: Elaboración Propia.

5.3. Precipitación Máxima y Caudal Máximo

Utilizando la distribución seleccionada en el análisis anterior, se estimaron las precipitaciones máximas para diferentes períodos de retorno (50, 100 y 250 años) y se calcularon los caudales máximos utilizando la fórmula racional.

Para un período de retorno de 50 años, la precipitación máxima estimada utilizando la distribución Log-Pearson fue de 151,3 mm, lo que resultó en un

caudal máximo de 3,8 m³/s. Para un período de retorno de 100 años, la precipitación máxima fue de 171,4 mm, con un caudal máximo de 4,3 m³/s. Finalmente, para un período de retorno de 250 años, la precipitación máxima alcanzó 199,8 mm, generando un caudal máximo aproximado de 5,0 m³/s.

Estos cálculos son cruciales para el dimensionamiento de las estructuras del vertedero, asegurando que puedan manejar los caudales más extremos previstos. Los resultados se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 12. Precipitación máxima estimada (P_{máx}), tiempo de concentración (T_c), coeficiente de escorrentía (C), intensidad de precipitación (i), área de la cuenca (A) y caudal máximo (Q_{máx}) para diferentes períodos de retorno (T) usando la distribución Log-Pearson.

T (años)	P _{máx} (mm)	T _c (h)	C	i (mm/hr)	A (km ²)	Q _{máx} (m ³ /s)
50	151,3	0,31	0,36	55,3	0,682	3,8
100	171,4	0,31	0,36	62,7	0,682	4,3
250	199,8	0,31	0,36	73,0	0,682	5,0

Fuente: Elaboración Propia.

5.4. Diseño de Mejoras.

Con los caudales máximos calculados, se procedió al diseño del vertedero para así continuar con las propuestas en mejoras para el canal de descarga, evaluando las distintas alternativas de revestimiento: hormigón, geomembrana, gaviones y tuberías TDP. Para facilitar y optimizar este proceso, se utilizó el software HCanales, una herramienta especializada en el análisis y diseño de canales hidráulicos.

5.4.1. Análisis del Vertedero

El diseño del vertedero se centró en garantizar la evacuación segura del caudal máximo de diseño ($Q_{\text{máx}}$), para ello se evaluaron tres alternativas de diseño hidráulico para el vertedero: rectangular, triangular y trapezoidal. Para cada una de estas geometrías, se aplicaron las fórmulas de descarga correspondientes, que permiten calcular la carga sobre el vertedero (h) para cada tipo de diseño.

El valor de h calculado para cada geometría fue el siguiente:

- Para el vertedero rectangular: $h = 0,94$ m.
- Para el vertedero triangular: $h = 1,66$ m.
- Para el vertedero trapezoidal: $h = 0,93$ m.

Se optó por el vertedero rectangular debido a su simplicidad constructiva, mayor facilidad de mantenimiento y eficiencia en la evacuación del caudal, lo que lo hace más adecuado para el proyecto en comparación con las otras alternativas.

En cuanto al valor de la carga sobre el vertedero (h), se decidió fijar en 1 m, en lugar de utilizar el valor calculado de 0,94 m. Esta decisión se basó en la necesidad de asegurar un margen de seguridad adicional, garantizando que el vertedero pueda manejar adecuadamente las variaciones en el caudal sin riesgo de desbordamientos, especialmente durante eventos extremos de

lluvia. Además, un valor de 1 m facilita la construcción y optimiza la implementación del diseño.

Finalmente, utilizando un ancho de vertedero de 3 metros, un coeficiente de descarga de 1,84 una carga sobre el vertedero de 1 metro, se obtuvo un caudal de diseño ($Q_{\text{vertedero}}$) de 5,52 (m^3/s).

5.4.2. Análisis del Canal de Descarga

El análisis del canal de descarga se realizó para evaluar la capacidad hidráulica de cada alternativa de revestimiento en los dos tramos del canal. Además, se compararon los caudales calculados con la Ecuación 28 (Q_{canal}) para cada alternativa de revestimiento con el caudal del vertedero obtenido con la Ecuación 16, que es el flujo máximo a evacuar por el vertedero rectangular, con el fin de garantizar que el canal pueda manejar el flujo sin riesgos de desbordamiento.

Tabla 13. Capacidad hidráulica del canal de descarga en el Tramo 1 para cada alternativa de revestimiento.

Material de Revestimiento	Tramo 1			
	A (m^2)	P (m)	R (m)	Q canal (m^3/s)
Hormigón	3,36	6,70	0,50	15,83
Geomembrana	3,90	8,23	0,47	20,63
Gavión	3,18	6,34	0,50	8,06
Tuberías TDP	1,04	3,14	0,33	5,73

Fuente: Elaboración Propia.

En el Tramo 1, el revestimiento de geomembrana muestra la mayor capacidad hidráulica con un caudal de 20,63 m³/s, significativamente mayor que el caudal del vertedero (5,52 m³/s), lo que garantiza que el canal puede manejar el flujo esperado sin problemas, aunque podría considerarse un sobredimensionamiento. El hormigón, con un caudal de 15,83 m³/s, también tiene capacidad suficiente para evacuar el caudal del vertedero, aunque su rendimiento es inferior al de la geomembrana debido a su mayor coeficiente de rugosidad. El revestimiento con gaviones, con un caudal de 8,06 m³/s, tiene una capacidad intermedia, aún superior al caudal del vertedero, lo que lo convierte en una opción viable para el Tramo 1, especialmente en áreas donde se priorice la estabilidad estructural y la ecología. Las tuberías TDP, con un caudal de 5,73 m³/s, aunque superan el caudal máximo esperado, tienen una capacidad limitada en comparación con las otras opciones.

Tabla 14. Capacidad hidráulica del canal de descarga en el Tramo 2 para cada alternativa de revestimiento.

Tramo 2				
Material de Revestimiento	A (m ²)	P (m)	R (m)	Qcanal (m ³ /s)
Hormigón	2,75	6,41	0,43	10,20
Geomembrana	3,13	7,69	0,41	13,04
Gavión	2,63	6,12	0,43	5,24
Tuberías TDP	1,04	3,14	0,33	5,01

Fuente: Elaboración Propia.

En el Tramo 2, la geomembrana sigue siendo la opción más eficiente, con un caudal de 13,04 m³/s, lo que supera ampliamente el caudal del vertedero. El hormigón, con un caudal de 10,20 m³/s, también ofrece una capacidad

adecuada, pero nuevamente con un rendimiento inferior al de la geomembrana. El revestimiento con gaviones, con un caudal de 5,24 m³/s, está cerca del límite para manejar el caudal del vertedero, lo que lo hace adecuado, pero con menos margen que en el Tramo 1. Finalmente, las tuberías TDP, con un caudal de 5,01 m³/s, presentan una capacidad marginal para evacuar el caudal del vertedero, lo que sugiere que podrían no ser suficientes en escenarios extremos sin ajustes adicionales en el diseño.

5.4.3. Uso de HCanales

El software HCanales se utilizó para simular el flujo de agua a través del canal de descarga bajo distintas condiciones, permitiendo ajustar parámetros como la pendiente del canal y la rugosidad del revestimiento, definida por el coeficiente de Manning (Tabla 6). A través de estas simulaciones, se pudo calcular la velocidad del flujo en cada tramo del canal y evaluar la estabilidad estructural de cada opción de revestimiento.

Tabla 15. Velocidad de flujo (v) para distintas alternativas de revestimiento en el vertedero obtenidas desde HCanales. Utilizando caudal máximo (Q), ancho de solera (b), talud de las paredes (Z), diámetro de la tubería (D), coeficiente de Manning (n) y la pendiente (S) correspondiente para el Tramo 1.

Tramo 1							
Material de Revestimiento	Q (m ³ /s)	b (m)	Z	D (m)	n	S (m/m)	v (m/s)
Hormigón	15,83	5,0	1	-	0,014	0,011	4,72
Geomembrana	20,63	5,0	2,5	-	0,012	0,011	5,31
Gaviones	8,06	5,0	0,5	-	0,026	0,011	2,54
Tuberías TDP	5,73	-	-	1	0,009	0,011	-

Fuente: Elaboración Propia.

Cálculo de tirante normal secciones: trapezoidal, rectangular, triangular

Lugar: Proyecto:
Tramo: Revestimiento:

Datos:

Caudal (Q): m³/s
Ancho de solera (b): m
Talud (Z):
Rugosidad (n):
Pendiente (S): m/m

Resultados:

Tirante normal (y): m Perímetro (p): m
Área hidráulica (A): m² Radio hidráulico (R): m
Espejo de agua (T): m Velocidad (v): m/s
Número de Froude (F): Energía específica (E): m-Kg/Kg
Tipo de flujo:

Calcular Limpiar Pantalla Imprimir Menú Principal Calculadora

Ingresar el nombre del tramo del canal 14:24 15-08-2024

Figura 14. Captura de pantalla de la interfaz de HCanales para el cálculo del tirante normal en secciones trapezoidales, rectangulares y triangulares. Fuente: HCanales.

Figura 15. Captura de pantalla de la interfaz de HCanales para el cálculo del tirante normal en sección circular. Fuente: HCanales.

Tabla 16. Velocidad de flujo (v) para distintas alternativas de revestimiento en el vertedero obtenidas desde HCanales. Utilizando caudal máximo (Q), ancho de solera (b), talud de las paredes (Z), diámetro de la tubería (D), coeficiente de Manning (n) y la pendiente (S) correspondiente para el Tramo 2.

Material de Revestimiento	Tramo 2						
	Q (m^3/s)	b (m)	Z	D (m)	n	S (m/m)	v (m/s)
Hormigón	10,20	5,0	1	-	0,014	0,008	3,66
Geomembrana	13,04	5,0	2,5	-	0,012	0,008	4,12
Gaviones	5,24	5,0	0,5	-	0,026	0,008	1,97
Tuberías TDP	5,01	-	-	1	0,009	0,008	-

Fuente: Elaboración Propia.

Según HCanales, tanto para el Tramo 1 como para el Tramo 2, la velocidad resultante para la alternativa de gaviones fue una velocidad erosiva, esto indica que la velocidad del flujo calculada para el canal revestido con gaviones es lo suficientemente alta como para causar erosión en la estructura. Esto es

un problema crítico, ya que los gaviones, aunque son resistentes, pueden sufrir daños si la velocidad del agua supera su capacidad para resistir la erosión. Si la velocidad del flujo de agua es demasiado alta, las piedras dentro de los gaviones pueden comenzar a desplazarse o a ser arrastradas, lo que compromete la estabilidad de la estructura. Además, la malla metálica puede sufrir desgaste prematuro, lo que aumenta el riesgo de fallas estructurales. En el caso de las tuberías no se obtuvo un resultado para la velocidad, esto se debe a que el flujo calculado en la tubería superó la capacidad máxima de la tubería, es decir el agua en la tubería ocuparía una altura mayor que el diámetro interno de la tubería, lo cual indica que la tubería seleccionada no es suficiente para manejar el caudal previsto.

5.4.4. Resultados de los Cálculos y Presupuesto

En el Tramo 1, que tiene una longitud de 55 metros y una pendiente de 0,011, el revestimiento con hormigón requiere un volumen de 40,33 m³, mientras que la geomembrana necesita cubrir una superficie de 595,70 m². Los gaviones, por su parte, ocupan un volumen de 169,57 m³, finalmente las tuberías poseen un volumen de 43,20 m³.

Tabla 17. Superficie total (St) y volumen (V) para diferentes materiales de revestimiento en el Tramo 1 del canal de descarga, utilizando la profundidad del canal (p), la longitud de las paredes (Lp) y el diámetro de la tubería (D).

Material de Revestimiento	Tramo 1			St (m ²)	V (m ³)
	p (m)	Lp (m)	D (m)		
Hormigón	0,6	1,17	-	403,28	40,33
Geomembrana	0,6	2,92	-	595,70	1,19
Gavión	0,6	0,58	-	339,14	169,57
Tuberías TDP	-	-	1	172,79	43,20

Fuente: Elaboración Propia.

En el Tramo 2, con una longitud de 60 metros y una pendiente de 0,008, los volúmenes y superficies son mayores debido a los 5 metros de longitud extras que tiene este tramo. Aquí, el hormigón requiere 43,42 m³, la geomembrana cubre 635,41 m², los gaviones ocupan 183,54 m³, y las tuberías 47,12 m³.

Tabla 18. Superficie total (St) y volumen (V) para diferentes materiales de revestimiento en el Tramo 2 del canal de descarga, utilizando la profundidad del canal (p), la longitud de las paredes (Lp) y el diámetro de la tubería (D).

Material de Revestimiento	Tramo 2			St (m ²)	V (m ³)
	p (m)	Lp (m)	D (m)		
Hormigón	0,5	1,12	-	434,16	43,42
Geomembrana	0,5	2,80	-	635,41	1,27
Gavión	0,5	0,56	-	367,08	183,54
Tuberías TDP	-	-	1	188,50	47,12

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez obtenidos los volúmenes, se procede a calcular el presupuesto para todas las alternativas, para esto se utilizará el valor de la UF del día 10 de octubre del 2024, cuyo valor fue de \$37.945,72. Así los presupuestos se detallan en las siguientes tablas:

Tabla 19. Presupuesto detallado para el revestimiento con hormigón en los Tramos 1 y 2 del canal de descarga.

Ítem	Unidad	Cantidad Tramo 1	Cantidad Tramo 2	Precio Unitario (\$)	Costo Tramo 1 (\$)	Costo Tramo 2 (\$)	Costo Total (\$)
Hormigón H-30	m³	40,33	43,42	\$70.000	\$2.823.100	\$3.039.400	\$5.862.500
Mano de obra	día	20	22	\$17.000	\$342.805	\$369.070	\$711.875
Enfierradura	kg	5.082	5.471	\$653	\$3.321.036	\$3.575.244	\$6.896.280
Mano de obra	día	36	38	\$17.000	\$604.758	\$651.049	\$1.255.807
Moldajes	m²	403,28	434,16	\$5.686	\$2.293.248	\$2.468.846	\$4.762.094
Mano de obra	día	24	26	\$17.000	\$411.346	\$442.843	\$854.189
Transporte	m³	40,33	43,42	\$6.000	\$241.980	\$260.520	\$502.500
Total (\$)					\$10.038.272	\$10.806.972	\$20.845.245
Total (UF)					UF 264,54	UF 284,80	UF 549,34

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 20. Presupuesto detallado para el revestimiento con geomembrana en los Tramos 1 y 2 del canal de descarga.

Ítem	Unidad	Cantidad Tramo 1	Cantidad Tramo 2	Precio Unitario (\$)	Costo Tramo 1 (\$)	Costo Tramo 2 (\$)	Costo Total (\$)
Geomembrana HDPE 2mm	m²	595,7	635,41	\$2.688	\$1.601.021	\$1.707.747	\$3.308.768
Mano de obra	día	24	25	\$17.000	\$405.076	\$432.079	\$837.155
Transporte	Rollo	1	1	\$14.400	\$14.400	\$14.400	\$28.800
TOTAL (\$)	-	-	-	-	\$2.020.497	\$2.154.226	\$4.174.723
TOTAL (UF)	-	-	-	-	UF 53,25	UF 56,77	UF 110,02

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 21. Presupuesto detallado para el revestimiento con gaviones en los Tramos 1 y 2 del canal de descarga.

Ítem	Unidad	Cantidad Tramo 1	Cantidad Tramo 2	Precio Unitario (\$)	Costo Tramo 1 (\$)	Costo Tramo 2 (\$)	Costo Total (\$)
Caja para gavión	m³	169,57	183,54	\$31.218	\$5.293.687	\$5.729.807	\$11.023.494
Cable de Acero	m	358,96	265,65	\$609	\$218.485	\$161.691	\$380.175
Piedra Granítica	m³	169,57	183,54	\$10.706	\$1.815.498	\$1.965.067	\$3.780.565
Mano de obra	día	34	37	\$20.000	\$678.280	\$734.160	\$1.412.440
Transporte	m³	169,57	183,54	\$14.400	\$2.441.808	\$2.642.976	\$5.084.784
TOTAL (\$)	-	-	-	-	\$10.447.758	\$11.233.701	\$21.681.458
TOTAL (UF)	-	-	-	-	\$275,33	\$296,05	\$571,38

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 22. Presupuesto detallado para el uso de Tuberías TDP en los Tramos 1 y 2 del canal de descarga.

Ítem	Unidad	Cantidad Tramo 1	Cantidad Tramo 2	Precio Unitario (\$)	Costo Tramo 1 (\$)	Costo Tramo 2 (\$)	Costo Total (\$)
Tubería Corrugada 40'' 1000mm X 6m	m	55	60	\$117.500	\$6.462.500	\$7.050.000	\$13.512.500
Mano de obra	día	14	15	\$20.000	\$275.000	\$300.000	\$575.000
Transporte	m ³	43,2	47,12	\$14.400	\$622.080	\$678.528	\$1.300.608
TOTAL (\$)	-	-	-	-	\$7.359.580	\$8.028.528	\$15.388.108
TOTAL (UF)	-	-	-	-	193,95	211,58	405,53

Fuente: Elaboración Propia.

El análisis de costos muestra que la opción de geomembranas es la más económica en términos de inversión inicial, seguida por las tuberías TDP, el hormigón y finalmente los gaviones, que resultan ser la alternativa más costosa. Estos resultados proporcionan una base sólida para la toma de decisiones en cuanto a la selección del revestimiento más adecuado, considerando no solo los aspectos técnicos, sino también los costos de implementación.

5.4.5. Propuesta de Diseño

Se propone una solución combinada para el diseño del canal de descarga del embalse Las Garzas. El proyecto contempla un tramo inicial de 55 metros revestido con hormigón, seleccionado por su alta resistencia estructural y capacidad hidráulica, adecuado para zonas con mayor pendiente y carga de flujo. El tramo posterior de 60 metros será revestido con geomembrana HDPE, lo que permite reducir pérdidas por infiltración y optimizar los costos de construcción en una zona de menor exigencia hidráulica. Ambas soluciones se complementan con una estructura de vertedero rectangular de 3 metros de

ancho, dimensionado para evacuar adecuadamente los caudales de diseño. Esta propuesta busca garantizar la eficiencia hidráulica, durabilidad y sostenibilidad de la infraestructura, adaptándose a las condiciones topográficas y funcionales del proyecto.

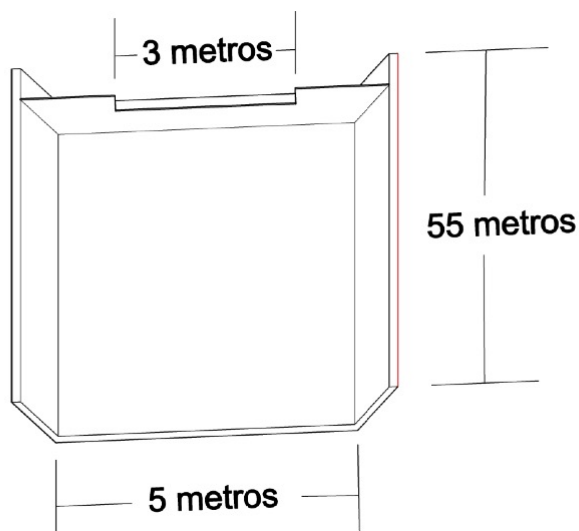


Figura 16. Esquema de la propuesta de diseño para el Tramo 1 del Canal de Descarga, revestida con hormigón. Fuente: Elaboración Propia.

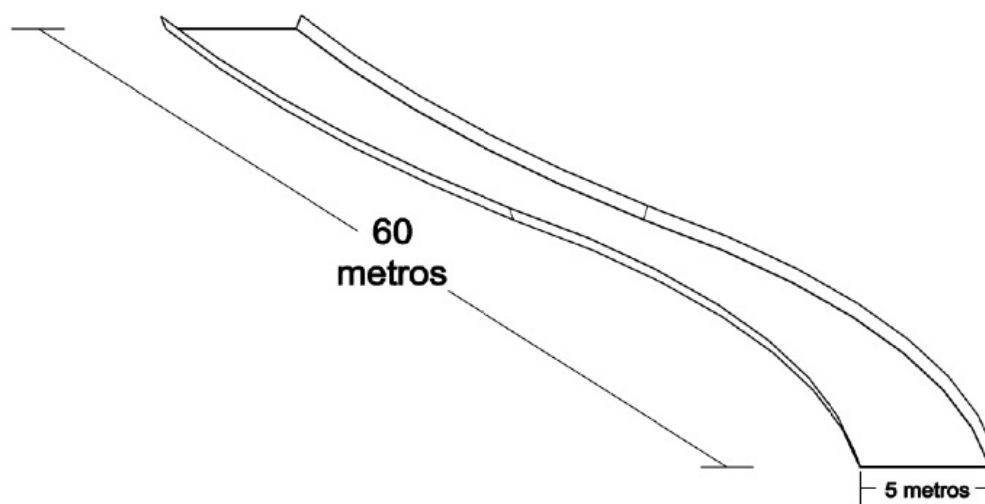


Figura 17. Esquema de la propuesta de diseño para el Tramo 2 del Canal de Descarga, revestida con geomembrana. Fuente: Elaboración Propia.

6. CONCLUSIÓN

El estudio presentado ha permitido identificar y proponer soluciones específicas para optimizar la infraestructura del embalse Las Garzas. A través de un análisis integral de datos históricos de precipitación, simulaciones hidráulicas y un enfoque técnico-económico, se han establecido alternativas de mejora que no solo garantizan la estabilidad estructural del embalse, sino también su sostenibilidad a largo plazo.

Los resultados obtenidos permitieron evaluar diferentes alternativas de revestimiento para el canal de descarga, considerando criterios técnicos, económicos y ambientales. Entre las opciones analizadas, el revestimiento con geomembranas destacó por su eficiencia hidráulica, menor costo inicial y facilidad de instalación, mientras que el revestimiento con hormigón ofreció mayor durabilidad y estabilidad estructural a largo plazo. Por otro lado, los gaviones y las tuberías TDP presentaron ventajas específicas en términos de adaptabilidad y sostenibilidad ambiental, aunque su aplicación podría estar limitada por costos o capacidades hidráulicas, ya que no fueron capaces de manejar los caudales previstos en los tramos estudiados.

El diseño optimizado del vertedero, basado en un modelo rectangular, garantiza la evacuación segura de los caudales máximos calculados para distintos períodos de retorno. Esto asegura la protección de las estructuras frente a eventos extremos, minimizando el riesgo de desbordamientos y daños.

Un aspecto a considerar es la posibilidad de combinar diferentes alternativas de revestimiento para los tramos del canal de descarga. Esta estrategia podría optimizar tanto el rendimiento hidráulico como los costos. En este contexto, se propone que el primer tramo de 55 metros, sea revestido con hormigón debido a las condiciones del terreno, siendo este más recto en este tramo, mientras que para el segundo tramo de 60 metros, podría beneficiarse de un revestimiento con geomembranas debido a su flexibilidad y eficiencia en costos, para asegurar la durabilidad en condiciones de menor pendiente y menor riesgo de erosión.

Esta combinación de materiales no solo es técnicamente viable, sino que también permite una optimización de recursos, adaptándose mejor a las condiciones específicas de cada tramo del canal. De esta forma, se aprovechan las ventajas de cada material en función de las características del terreno y del flujo de agua.

Se ha definido que el área de intervención se limitará a los primeros 115 metros del canal de descarga, dado que más allá de este punto solo existe terreno sin estructuras habitacionales ni infraestructura crítica que pueda verse afectada por eventuales crecidas. Esto significa que el principal objetivo de la intervención es encaminar las crecidas de manera que no afecten el sector más cercano al embalse, donde se concentran las áreas de mayor riesgo. La focalización en estos 115 metros asegura que los recursos sean dirigidos de manera eficiente hacia la protección de áreas vulnerables.

Finalmente, este estudio destaca la importancia de implementar un mantenimiento regular y un monitoreo continuo del embalse para prevenir problemas asociados al envejecimiento de la infraestructura y los impactos del cambio climático. Las mejoras diseñadas representan una inversión estratégica para asegurar la eficiencia hidráulica y proteger los recursos hídricos.

7. LITERATURA CITADA

- Aguilar B., Ana María (2000). Presupuesto. Temuco: INIA. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.14001/28563>
- Aparicio, F. J. (1993). Fundamentos de hidrología de superficie. México: Editorial LIMUSA.
- Arumí, J. L., Delgado, V., Stehr, A., Sandoval, M., & Urrutia, R. (2020). Los embalses y su gestión sustentable bajo el escenario de escasez hídrica (pp. 45-60).
- Cariás Juárez, B. E., Chacón Novoa, E. T., & Martínez Márquez, M. Á. (2004). Validación de metodologías para el cálculo de caudales máximos en El Salvador (Trabajo de graduación, Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”). San Salvador, El Salvador: Centroamérica.
- Chow, V. T. (1959). Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill.
- Coles, S. (2001). An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer.
- Comisión Nacional de Riego. (2023a). Embalses. Recuperado de <https://www.cnr.gob.cl/agricultores/infraestructura/infraestructura/embalses/>
- Comisión Nacional de Riego. (2023b). Programa Pequeños Embalses. Recuperado de <https://www.cnr.gob.cl/programa-pequenosembalses/>
- Comisur. (s.f.). Tuberías. Recuperado el 25 de noviembre de 2024, de https://comisur.com/pro_tuberias.html
- CYPE Ingenieros, S. A. (2024). Generador de Precios Espacios Urbanos Chile. Recuperado de http://www.chile.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/Fundaciones/Contenciones/Muros_de_gaviones/Muro_de_gaviones.html
- CYPE Ingenieros, S.A. (2024). Generador de precios de la construcción - Chile. Chile Generador de Precios. https://chile.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/calculaprecio.asp?Valor=1|0_0_0_0_0_0|0|CHA010|cha_010:_0_0_0_0_0_0_0
- CYPE Ingenieros, S.A. (2024). Sistema de moldaje de sobrecimiento. Chile Generador de Precios.

- http://www.chile.generadordeprecios.info/obra_nueva/Estructuras/Albaneria/Arranques_para_muros/EFA030_Sistema_de_moldaje_de_sobrecimiento.html
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). (2020). Glosario de términos técnicos en ingeniería hidráulica. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Recuperado de <https://doh.mop.gob.cl/publicacionesyestudios/Documents/glosario.pdf>
- Dirección General de Aguas. (2010). Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica. Santiago, Chile: DGA.
- DPV Ingeniería. (s.f.). Canales de hormigón y obras hidráulicas. Recuperado el 25 de noviembre de 2024, de <https://dpvingeneria.cl/canales-hormigon/>
- Fernández, C., & López, S. (2014). Riego y Drenaje: Principios y Tecnologías. Sevilla: Editorial Agrícola.
- González, L., & Pérez, M. (2015). Tecnologías para la Gestión Eficiente del Agua. Barcelona: Ediciones Técnicas.
- Griffis, V. W., & Stedinger, J. R. (2007). Log-Pearson type III distribution and its application in flood frequency analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 482-491.
- Irrisolar. (2024). Recuperado de <https://irrisolar.cl/product/tuberia-corrugada-40%E2%80%B3-1000mm-x-6mt/>
- Koutsoyiannis, D. (2004). Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation. *Hydrological Sciences Journal*, 575-590.
- Morales, J., & Sánchez, P. (2013). Ingeniería de Canales: Principios y Aplicaciones.
- Pizarro, R. T., Flores, J. P. V., Sangüesa, C., & Martínez, E. A. (s.f.). Diseño en canales de evacuación de aguas lluvias (Módulo 5). Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda. Recuperado de https://www.cuhs.utralca.cl/exctha/Docs/pdf/Publicaciones/manuales/e_modulo_diseno_canales.pdf
- Portal Construcción. (2024). Recuperado de <https://portal.ondac.com/601/w3-article-161677.html>

Redacción de El Tintero. (2023, 2 de agosto). Definición de Gavión. Recuperado de <https://conceptodefinicion.de/gavion/>

Technoflow. (s.f.). Revestimientos de canales con geomembrana HDPE. Recuperado el 25 de noviembre de 2024, de <https://www.technoflow.cl/servicios/revestimientos-de-canales-con-geomembrana-hdpe/>

Villón Béjar, M. (1998). HCanales: Software para el diseño y análisis de canales hidráulicos.

Vorwerk Chile. (2024). Corte de HDPE de 1 mm. Recuperado de <https://www.vorwerk.cl/producto/corte-de-hdpe-de-1-mm/>