

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Evaluación De Un Sistema De Captación Y Almacenamiento De Aguas Lluvias Para El Aumento De La Disponibilidad De Agua En El Sector El Manzano Los Molles, Región De Valparaíso.

Por

Roly David Valenzuela Oyarzo

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: David Poblete López

Agosto, 2018

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco el apoyo incondicional de mi familia; a mis padres Rolando e Ibis que son un pilar fundamental en mi vida y un modelo a seguir por su entereza y dedicación en cada etapa de mi formación como persona. También agradecer el apoyo a mi hermana Karina y abuelos Fernando, Ruth y Carmen, por sus consejos y palabras de aliento en todo momento.

Agradecer a mi profesor guía David Poblete por la disposición, consejos y aliento durante el desarrollo de esta memoria. A la profesora Yerel Morales por la buena disposición cuando necesite de su ayuda y sus consejos para afrontar de mejor manera las distintas etapas de este trabajo. Por supuesto, agradecer la colaboración y el tiempo dedicado al profesor de la Universidad de Talca Roberto Pizarro.

Por el apoyo y compañerismo durante todo el proceso universitario, agradezco a Felipe, Camila, Rodrigo, Diego, Bernardo, Gary, Juan, Victor, Jerome, entre muchos otros que se dedicaron a contribuir de una u otra manera con este lindo proceso.

A mis amigos de vida que siempre han creído en mí, Constanza por ser incondicional, Alex por la preocupación y comprensión, gracias.

¡Y a todo aquel que formo parte de este proceso, GRACIAS TOTALES!

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
CAPÍTULO I.....	9
1. Introducción	9
1.1 Contexto	9
1.2 Planteamiento del problema	10
1.3 Proyecto	10
1.4 Objetivos	12
1.4.1 Objetivo general	12
1.4.2 Objetivos específicos	12
1.5 Alcances	13
CAPÍTULO II.....	14
2. Revisión Bibliográfica del Uso de Aguas Lluvia	14
2.1 Sistemas en la antigüedad	14
2.1.1 Roma	14
2.1.2 Grecia	16
2.2 Experiencia en el mundo actual.....	17
2.2.1 México	17
2.2.2 La experiencia de la organización Isla Urbana en México.....	18
2.2.3 Alemania.....	19
2.2.4 Bangladesh.....	20
2.2.5 China	21
2.2.6 Japón.....	21
2.2.7 Reino Unido.....	22
2.3 Experiencia en Chile	22
2.3.1 Experiencia sobre SCALL's para enfrentar la escasez de agua en la pequeña agricultura 23	
2.3.2 SCALL's domiciliarios en las regiones del Bio, Araucanía, Los Lagos y Los Ríos.....	23
CAPÍTULO III.....	25
3. Metodología	25
3.1 Disponibilidad de agua	25
3.1.1 Relleno de información pluviométrica	25
3.1.2 Método doble acumulada	26
3.1.3 Regresión lineal.....	27

3.1.5	Estadísticas de precipitaciones	27
3.1.6	Función de distribución de probabilidad	28
3.1.7	Formas de Determinar la Distribución de Probabilidad	28
	Distribución Gumbel:	29
	Distribución Goodrich:	30
	Distribución Log-Normal:	30
	Distribución Pearson Tipo III:	31
3.1.8	Pruebas de bondad de ajuste	32
	Test coeficiente de determinación:	32
	Test Kolmogorov – Smirnov:	32
3.2	Demanda de agua	33
3.3	Diseño del sistema	35
3.3.7	Coefficiente de eficiencia	36
3.3.8	Zona de captación	37
3.3.9	Zona de conducción	37
3.3.10	Zona de acumulación	37
3.4	Evaluación del sistema	38
3.4.1	Análisis de costo beneficios	38
3.4.2	Simulación de Montecarlo	39
3.4.3	Indicadores	40
CAPÍTULO IV		41
4.	Caracterización de la Zona de Estudio	41
4.1	Ubicación	41
4.2	Clima	42
4.3	Población	44
4.4	Situación actual	44
CAPÍTULO V		46
5.	Resultados	46
5.1	Análisis de disponibilidad de agua	46
5.1.1	Análisis meteorológico	46
5.1.2	Relleno estadístico	47
5.1.3	Análisis de precipitaciones	49
5.1.4	Cálculo de la función de distribución Gumbel	49
5.1.5	Cálculo de la función de distribución Goodrich	52
5.1.6	Cálculo de la función de distribución Log-Normal	54
5.1.7	Cálculo de la función de distribución Pearson tipo III	55

5.1.8	Resumen del análisis estadístico	57
5.2	Demanda de agua	58
5.3	Diseño del sistema	60
5.3.1	Diseño de la zona de captación	60
5.3.2	Diseño de la zona de conducción	63
5.3.3	Diseño de la zona de acumulación	64
5.3.4	Verificación de aplastamiento del emplantillado	66
5.3.5	Presupuesto de obras	67
5.3.6	Costos de materiales.....	67
5.3.7	Costos de construcción	69
5.4	Evaluación económica.....	70
5.4.1	Costos del sistema actual de reparto de agua.....	70
5.4.2	Análisis costo beneficio	72
5.4.3	Simulación de Montecarlo	74
5.4.4	Indicadores	75
	Indicadores Unitarios.....	81
CAPÍTULO VI		84
6.	Análisis de sensibilidad	84
6.1	Análisis de sensibilidad.....	84
6.1.1	Precipitación de diseño	84
6.1.2	Valor del agua	88
6.1.3	Redefinir la demanda	89
6.1.4	Serie histórica de precipitación	93
6.1.5	Evaluación de casos en el sector.....	97
6.1.6	Error de medición indirecta	102
CAPÍTULO VII		105
7.	Conclusiones	105
7.1	Conclusiones generales	105
7.2	Primera hipótesis	106
7.3	Indicadores	107
7.4	Análisis de sensibilidad.....	108
7.5	Comentarios finales	110
Referencias		111
ANEXO		114
Anexo 1		114
Anexo 2		117

Anexo 3	118
Anexo 4	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Valores de demanda estimados.	35
Tabla 3.2.- Valores de coeficiente de escorrentía.....	36
Tabla 5.1.- Información Estaciones Meteorológicas.	46
Tabla 5.2.- Precipitaciones Anuales con relleno estadístico.....	48
Tabla 5.3.- Tabla de precipitación de diseño según metodología de relleno estación Las Piedras. 48	
Tabla 5.4.- Estadígrafos de la muestra.	49
Tabla 5.5.- Parámetros de Gumbel.....	49
Tabla 5.6.- Valores de la prueba de Kolmogorov-Smirnov.	50
Tabla 5.7.- Tabla resumen con parámetros de prueba de bondad de ajuste Gumbel.	51
Tabla 5.8.- Valor de la Precipitación de diseño Gumbel.	51
Tabla 5.9.- Parámetros de Goodrich.	52
Tabla 5.10.- Tabla resumen con parámetros de prueba de bondad de ajuste Goodrich.	53
Tabla 5.11.- Valor de la Precipitación de diseño Goodrich.	53
Tabla 5.12.- Parámetros Log-normal.	54
Tabla 5.13.- Tabla resumen con parámetros de prueba de bondad de ajuste Log-normal.	55
Tabla 5.14.- Valor de la Precipitación de diseño Log-normal.	55
Tabla 5.15.- Parámetros de Pearson tipo III.	55
Tabla 5.16.- Tabla resumen con parámetros de prueba de bondad de ajuste Pearson tipo III.	56
Tabla 5.17.- Valor de la Precipitación de diseño Pearson tipo III.	56
Tabla 5.18.- Tabla resumen con resultados de prueba de bondad.	57
Tabla 5.19.- Tabla resumen de precipitación al 90% de probabilidad excedencia.....	57
Tabla 5.20.- Valores de superficie de techo.	62
Tabla 5.21.- Dimensiones de los acumuladores.	65
Tabla 5.22.- Lista de precios para la conducción.....	67
Tabla 5.23.- Lista de precios para construcción del terraplén.	67
Tabla 5.24.- Presupuesto de detalle para alternativa de 110 m ² de techo.	68
Tabla 5.25.- Lista de precios de estanques acumuladores.	68
Tabla 5.26.- Costos de construcción.....	69
Tabla 5.27.- Costos fijos del sistema.	69
Tabla 5.28.- Información de control recopilada por la Gobernación Provincial del Marga-Marga....	73
Tabla 5.29.- Tabla de la generación de series aleatorias.	74
Tabla 6.1.- Volúmenes de acumulación para FDP de Goodrich.....	85
Tabla 6.2.- Volúmenes de acumulación para FDP de Pearson tipo III.	85
Tabla 6.3.- Tabla de indicadores para la configuración de demanda de inodoros del caso 1.	98
Tabla 6.4.- Tabla de indicadores para la configuración "sin demanda" del caso 1.	99
Tabla 6.5.- Tabla de indicadores para la configuración de demanda de inodoros del caso 2.	100
Tabla 6.6.- Tabla de indicadores para la configuración "sin demanda" del caso 2.	100
Tabla 6.7.- Tabla de indicadores para la configuración de demanda de inodoros del caso 3.	101
Tabla 6.8.- Tabla de indicadores para la configuración "sin demanda" del caso 3.	101
Tabla 6.9.-Tabla con valores de diferencia porcentual para el caso 1.	103
Tabla 6.10.-Tabla con valores de diferencia porcentual para el caso 2.	103
Tabla 6.11.- Tabla con valores de diferencia porcentual para el caso 3.	104
Tabla 0.1.- Función Auxiliar de Goodrich P(p).	114
Tabla 0.2.- Valores función Chi- cuadrado, para n grados de libertad.	115
Tabla 0.3.- Distribución del estadístico de Kolmogorov – Smirnov (Dt).....	116
Tabla 0.4.- Valores función gamma.	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-Yerebatan Sarayi en Estambul, Turquía.....	14
Figura 2.2- "Domus Romana" vivienda unifamiliar.....	15
Figura 2.3- Sistemas de acumulación de aguas lluvias en Atenas.....	16
Figura 2.4- SCALL's en comunidad Cheran, estado de Michoacán.....	18
Figura 2.5- Esquema de funcionamiento SCALL's. (fuente: Isla Urbana.).....	19
Figura 2.6- Aeropuerto de Frankfurt.....	20
Figura 2.7- Sistema comunitario de aguas lluvias "Ronjinson" (fuente: UNEP).....	21
Figura 2.8- Millennium Dome de Londres.....	22
Figura 2.9- Esquema del sistema de captación y acumulación.....	24
Figura 3.1.- Representación gráfica del método doble acumulada. (fuente: [18]).....	26
Figura 3.2- Jerarquía de las necesidades de agua. (fuente: Guía técnica N°9, OMS y OPS [21]) ..	33
Figura 3.3- Distribución de agua en el hogar. [22].....	34
Figura 4.1.- Ubicación localidad Los Molles en la Provincia del Marga-marga.....	41
Figura 4.2.- Bio climas de la Región de Valparaíso. (fuente Luebert, Pliscoff) [27].....	43
Figura 4.3.- Distribución espacial de la población.....	44
Figura 4.4.- Estanques acumuladores de agua ubicados en la zona de estudio.....	45
Figura 5.1.- Mapa referencial con estaciones meteorológicas.....	46
Figura 5.2.- Distribución de consumo en el hogar. [22].....	59
Figura 5.3.- Esquema del SCALL's. (fuente Natzone.org).....	61
Figura 5.4.- Esquema de parcelación del sector en estudio.....	62
Figura 5.5.- Esquema de la conducción con malla protectora.....	64
Figura 5.6.- Esquema de la zona de acumulación.....	65
Figura 5.7.- Esquema de terraplén.....	66
Figura 5.8.- Tarifa ESVAl para el año 2017.....	71

CAPÍTULO I

1. Introducción

1.1 Contexto

En los últimos años Chile se ha visto bajo los efectos de la sequía, desertificación y degradación del suelo. Según la actualización del estado de desertificación en el "Programa de Acción Nacional Contra la Desertificación" (PANCD), conforme al compromiso adoptado ante la Convención de Naciones Unidas, indica que en materia de desertificación un 21,7% del territorio nacional presenta esta condición, en materia de degradación y también sequía los números indican que un 79,1% y 72% del país respectivamente tiene algún grado de riesgo. [1] Este panorama, genera un escenario de déficit hídrico en distintas regiones del país y así se refleja en los distintos decretos del Ministerio de Obras Públicas, que en lo que va corrido del año 2017 la región de Valparaíso presenta varias comunas declaradas como zona de escasez hídrica, es el caso de las comunas de Casablanca, Llay-Llay, Petorca, La Ligua, Cabildo, además de las provincias de Marga-Marga y Quillota. [2] [3] [4]

La captación de aguas lluvias se presenta como una alternativa para mitigar la problemática del déficit hídrico y aumentar la disponibilidad de agua. Esta alternativa se ha implementado en varias comunidades agrícolas de Chile en el último tiempo, al igual que en Latinoamérica.

Esta técnica no es nueva y se practica desde la antigüedad. Existen ejemplos de captación y almacenamiento de agua lluvia como es el tanque cisterna de Yerebatan Sarayi construido en Estambul por orden de César Justiniano (527-565 dc), que tiene capacidad de almacenar 80 mil metros cúbicos de agua de lluvia. [5]

El sistema de cosecha de aguas lluvias consiste en una zona de captación donde se impermeabiliza una superficie que capta el agua, además de una zona de conducción que canaliza el agua recolectada previamente pasada por un filtro que evita que partículas de mayor tamaño ingresen en la conducción hasta la zona de almacenamiento.

Es aquí donde se retiene el agua para posteriormente ser derivada al sistema de distribución. En el caso que el consumo sea destinado a bebida humana se debe realizar un pequeño tratamiento para potabilizar el agua que consiste básicamente en una filtración y desinfección.

1.2 Planteamiento del problema

En la provincia del Marga-Marga, específicamente en todo el sector correspondiente a El Manzano que se ubica a 12 kilómetros al suroeste de la ciudad de Quilpué, no cuenta con servicio de agua potable por parte de ninguna empresa sanitaria, debido a que se encuentra fuera de la cobertura del área de concesión. Sumado a esto, la problemática se agudiza por el hecho de que el pozo que antiguamente abastecía el predio tiene hoy en día un rendimiento que es prácticamente nulo, dado que debe abastecer a una mayor población a consecuencia del parcelamiento del fundo y su posterior crecimiento demográfico. Además, los propios pobladores constatan que el nivel freático en la zona ha descendido, ya que se realizó una profundización del pozo que cuenta con una bomba sumergida y aun así el pozo no arroja caudal.

Considerando los acontecimientos anteriores, la población residente tiene dificultad para abastecerse con agua para su consumo. Debido a esta problemática los pobladores solicitaron a la Municipalidad de Quilpué que los abastezca de agua potable.

La Municipalidad asigna recursos para abastecer la demanda de agua a través del llamado "caudal solidario", que corresponde a 71,5 litros diarios por persona, que son distribuidos mediante camiones aljibe en el sector. La problemática presente es que el caudal solidario no cubre todas las necesidades básicas domésticas de una persona como lo es el beber, cocinar, el aseo personal que contempla el lavado de dientes, duchas, la descarga de inodoros y lavar ropa, según lo estipulado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), donde establece que el acceso óptimo para el uso doméstico de agua va desde los 100 litros diarios per cápita o más. [6] Este caudal de 100 litros diarios garantiza atender las necesidades básicas de higiene de la población evitando la proliferación de enfermedades causadas por la falta de agua en los hogares.

Además, es necesario comprender que el gasto público para abastecer a la población de agua es cuantioso, puntualmente en la provincia del Marga-marga durante el período 2016-2017 la gobernación provincial a través de las municipalidades tuvo un gasto fiscal que asciende a los \$460.831.603 mensuales sólo por concepto de entrega de agua. Lo que genera otra problemática a la entidad pública que se hace responsable por estos ítems, ya que los recursos empleados para abastecer de agua los distintos sectores son dineros fiscales que pudiesen ser utilizados de otra manera o en otras mejoras para la comunidad.

Debido a la sumatoria de las dificultades antes mencionadas, es que se produce un gran problema para los distintos actores sociales en la zona. Ya sean los pobladores por la falta de agua para su consumo, como para las autoridades locales que deben asignar una gran cantidad de recursos económicos con el fin de solucionar este problema desde el punto de vista de la emergencia, ya que la solución implementada no es sustentable en el tiempo, debido a que los recursos son limitados.

1.3 Proyecto

El propósito del proyecto es establecer una metodología que permita evaluar de manera adecuada los sistemas de captación y acumulación de aguas lluvias. Además, de generar directrices para la continuidad de estudios en este ámbito que incentive la innovación y la creación de nuevas tecnologías, que faciliten la implementación de este tipo de sistemas de manera más accesibles, eficientes y amigables para con la comunidad.

En este trabajo de título se evalúa un Sistema de Captación y Almacenamiento de Aguas Lluvias (SCALL's) en el sector El Manzano, con el propósito de aumentar la disponibilidad de agua en los hogares y alcanzar niveles óptimos de acceso al recurso agua en base a lo estipulado por la OMS. El alcanzar estos niveles de acceso al agua trae consigo mejoras sustanciales en la calidad de vida de las personas, no solo en el ámbito de la salud sino también en el ámbito económico y social.

Para alcanzar estos objetivos se proyecta la superficie de techo como zona de captación y en base al análisis estadístico realizado a las precipitaciones en la zona de estudio, se determinan valores de precipitaciones de diseño asociadas a ciertos periodos de retorno. Con estos resultados se estiman los volúmenes de agua acumulables del sistema, además de establecer periodos de abastecimiento según la demanda que se le asigna para el agua captada. Para definir la viabilidad del sistema se evalúan diversos escenarios posibles en base a la generación de series de datos aleatorios de precipitación y utilizando el análisis de costos y beneficios,

En base a la metodología, se obtiene información relevante para la implementación de los SCALL's como una alternativa sustentable para el abastecimiento de agua, considerando que a nivel país se invierte gran cantidad de recursos económicos para abastecer a diversas zonas de agua potable mediante camiones aljibe.

En la presente memoria se encuentra la secuencia lógica del estudio, que comprende en el capítulo I la introducción al tema, donde se aborda el contexto de escasez hídrica a nivel país, el problema que genera este contexto de escasez y la falta de agua en ciertos lugares rurales que se ven en la necesidad de pedir abastecimiento de agua mediante camiones aljibe. Posteriormente se menciona la propuesta de memoria con sus respectivos objetivos y alcances.

En el capítulo II se enfoca principalmente en presentar algunas referencias bibliográficas de sistemas de captación de aguas lluvias en la antigüedad y en la actualidad, tanto en diversas partes del mundo como en Chile.

En el capítulo III se explica la metodología utilizada del estudio, la que comienza por la evaluación de la hidrología del sector, con el fin de estimar la cantidad de agua potencialmente acumulable y la demanda del sector, en base a estudios de la Organización Mundial de la Salud. Posteriormente se desarrollan los principales lineamientos para el diseño de cada uno de los componentes del sistema, para estimar los presupuestos y poder integrar la variable económica al estudio, la cual se evaluará mediante las herramientas del análisis de costos y beneficios en los diversos escenarios posibles en base a la generación de series sintéticas de datos aleatorios de precipitación durante la vida útil del proyecto.

En el capítulo IV se caracteriza la zona de estudio, se entrega datos de su ubicación, extensión, la población residente, su climatología y se explica en más detalle la situación actual en el sector.

En el capítulo V se muestran los resultados obtenidos de la implementación de la metodología explicada en el capítulo III. En este apartado es donde se entrega toda la información y datos duros obtenidos del desarrollo de la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación, que posibilita continuar con la secuencia lógica del trabajo y que permitirá el análisis comparativo que se presenta en el siguiente capítulo del análisis de sensibilidad. En el capítulo VI se analizan estos resultados y se establecen conclusiones finales del trabajo, que permiten establecer cursos de acción y toma de decisiones en materia de políticas públicas como privadas en torno a la temática abordada en esta memoria y que son presentadas en el capítulo VII.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Generar una metodología para evaluar técnica y económicamente la alternativa del sistema de captación y almacenamiento de aguas lluvias para el abastecimiento de agua destinada al uso doméstico

1.4.2 Objetivos específicos.

- Evaluar la hidrología del sector, estimar el agua potencialmente acumulable y evaluar la demanda de agua en la zona de estudio.
- Diseñar y proyectar hidráulicamente el sistema de captación, conducción y acumulación de aguas lluvias, además de determinar el presupuesto de las obras y sus alternativas.
- Evaluar el análisis costo – beneficio de la propuesta, en base al actual sistema de abastecimiento para establecer los cursos de acción más eficientes según las alternativas planteadas.
- Aplicar metodología en la localidad El Manzano, en el sector de Los Molles, región de Valparaíso para aumentar la disponibilidad de agua.

1.5 Alcances

El sector seleccionado para análisis corresponde a la localidad rural El Manzano, en el sector de Los Molles, provincia del Marga-Marga, región de Valparaíso. En la actualidad la Municipalidad de Quilpué abastece a 16 familias en este sector, favoreciendo a una población de 72 personas con agua potable.

El planteamiento del sistema de cosecha de agua lluvia, se presenta como una alternativa para el aumento de la cantidad de agua que ofrece el actual sistema de abastecimiento. Esto estará sujeto a la condición hidrológica y la demanda de consumo del sector, que permitirá definir si el sistema a implementar podrá funcionar como un sistema complementario al actual plan de abastecimiento.

La utilización del agua acumulada se destinará para uso doméstico de segundo orden, que contempla el uso de higiene dentro del hogar como lo es limpiar, uso de lavadora, uso de inodoro, entre otras actividades. Este criterio se adopta en función de la disponibilidad y la cantidad de agua obtenida del análisis por lo que se definirá la demanda final una vez que el avance del trabajo permita concluir en que uso de segundo orden se puede destinar el agua acumulada.

A medida que el trabajo entregue resultados del potencial acumulable, se podrá definir la disponibilidad de agua y su uso final. La disposición del recurso agua obtenido será empleada durante todo el año siempre y cuando el agua alcance para la demanda asignada.

En el estudio solo se considerará los registros de información pluviométrica necesarios para el análisis y la generación de la lluvia de diseño. Se obtendrá la información en base a los registros disponible por la Dirección General de Agua.

Inicialmente y tomando como referencia estudios similares anteriores, la lluvia de diseño asociada a una probabilidad de excedencia se definirá en un rango de funcionamiento del 90% del tiempo para el diseño del sistema.

Para el análisis de este estudio no se requiere la implementación de algún software específico. Lo que no impide la utilización de alguno para el procesamiento de información.

El análisis para definir el presupuesto del sistema será en base a los materiales, construcción y operación de las obras. Estos valores son referenciados a la información de proveedores locales, además de información obtenida desde los organismos gubernamentales como municipalidades y gobernaciones provinciales.

La evaluación económica se ajusta a los parámetros definidos para la evaluación de proyectos sociales del ministerio de desarrollo social (MIDESO). La evaluación de los beneficios sociales de la propuesta es mencionada en el trabajo por el valor agregado que atribuye al proyecto, sin embargo, no son cuantificados debido a que escapa de las temáticas de la ingeniería civil.

La evaluación del sistema diseñado se basa en la generación de escenarios aleatorios también conocido como método de Montecarlo, durante un periodo de tiempo igual al tiempo de vida útil del proyecto que corresponde a 15 años.

CAPÍTULO II

2. Revisión Bibliográfica del Uso de Aguas Lluvia

2.1 Sistemas en la antigüedad

La captación y almacenamiento del agua lluvia no es una tecnología nueva, estas técnicas se han desarrollado ancestralmente por el hombre para el abastecimiento de agua para 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".

En el continente americano, se han observado técnicas de captación de aguas lluvias, que fueron creadas hace 500 años en los Estados Unidos, México, India y África. (Frasier, 1994; Bazza y tayaa, 1994). [7] El agua lluvia ya era utilizada en la antigüedad en Mandaba, Petra, México y Roma. [8]

2.1.1 Roma

El imperio romano fue notable en el uso de las aguas lluvias para satisfacer las demandas de las ciudades, por lo que se constituyó como el mayor ejemplo de uso de estas técnicas en la antigüedad. Un claro ejemplo son los estanques cisternas construidos en Estambul por César Justiniano y César Constantino, que acumulan 80.000 y 50.000 metros cúbicos de agua respectivamente. Probablemente la cisterna de Yerebatan Sarayi construida entre los años 527-565 D.C por César Justiniano sea la más grande (Figura 2.1), mide 140 x 70 metros y su estructura es soportada por 336 columnas de mármol de 9 metros de altura. Esta cisterna sirvió como depósitos de almacenamiento centralizado, donde el agua se recogía de los techos y calles pavimentadas para posteriormente pasar por un sofisticado sistema de filtros.



Figura 2.1-Yerebatan Sarayi en Estambul, Turquía.

Sin embargo, el imperio romano tuvo su influencia en cuanto a este tipo de tecnologías, desde la antigua Grecia. Arqueólogos han hallado sofisticados sistemas de captación y almacenamiento de agua lluvia, en la isla de Creta, mientras se trabajaba en la reconstrucción del Palacio de Knossos que data del 1700 A.C. Esta influencia se podía apreciar durante la República Romana entre los siglos III y IV A.C, donde la ciudad de Roma en su mayoría se componía de viviendas unifamiliares llamadas "Domus" que contaba con un espacio principal a cielo abierto ("atrio"). En él se instalaba un estanque para recoger el agua de lluvia llamado "impluvium", este sistema cumplía con varios propósitos, para consumo humano, como fines domésticos e incluso funcionaba como especie de aire acondicionado cuando esta agua se evaporaba, mejorando el microclima de la vivienda. Debido a efectos de la urbanización y el aumento de la población, el desarrollo de las zonas de acumulación cambio hacia la confección de cisternas subterráneas, que trajo consigo acumular mayores volúmenes de agua y evitar su evaporación por el hecho de ser cisternas cerradas.



Figura 2.2- "Domus Romana" vivienda unifamiliar.

Pero pese a que la recolección y el almacenamiento de agua de lluvia en cisternas cerradas nunca fueron utilizados de nuevo en la misma medida que en la antigua Roma; estas se emplearon en ocasiones en que las circunstancias exigían una tecnología apropiada, como sucedía en zonas semidesérticas, donde se construían viviendas sin manantiales o pozos en los alrededores. [9]

2.1.2 Grecia

El régimen irregular de lluvias en Grecia hacía necesaria la previsión y la captación de agua en épocas de abundancia para utilizarla en momentos de escasez. Entre los depósitos de agua y las cisternas conocidos, se encuentra el de la isla de Rodas y la famosa isla de Hybla (Sicilia). Se trataba de un gran depósito de 1.300 metros de perímetro y 9 de profundidad, que almacenaba el agua de lluvia. Combinaba las funciones de piscina, estanque para peces y depósito de agua para riego. También se conoce bastante del abastecimiento de aguas de Atenas y la gestión sostenible de agua urbana. Atenas fue la más importante ciudad de la antigüedad con una población de más de 200.000 personas. Sus condiciones climáticas hacen que la falta de agua fuera característica recurrente de la zona. Las fuentes naturales no bastaban para proporcionar el agua que la gente necesitaba, por lo que se acostumbraron a hacer pozos y cisternas para recoger el agua de lluvia, además de construir acueductos.

La más importante obra fue el acueducto de los Pisistratidas, construido en época del 510 a.C. Llevaba el agua desde el monte Himeto, a unos 7,5 kilómetros de distancia hasta el centro de la ciudad de Atenas. Se han descubierto algunas de las cañerías de arcilla, así como servidores que se cruzan en cruz, contruidos en mampostería, que traían aguas de lluvias y de las fuentes próximas. [10]



Figura 2.3- Sistemas de acumulación de aguas lluvias en Atenas.

2.2 Experiencia en el mundo actual

Si bien los sistemas de captación y almacenamiento de aguas lluvias (SCALL's) son técnicas aplicadas desde la antigüedad, el aumento de la demanda de agua producto del crecimiento de la población y el avance en las tecnologías de redes centralizadas para abastecer desde fuentes cercanas superficiales y manantiales a la población, dio paso progresivo al abandono de estos sistemas de captación. [9]

En las últimas décadas estos sistemas han recobrado valor y han sido implementado en diversas partes del mundo. Debido principalmente por la escasez e irregularidad con que se presentan las lluvias en ciertas zonas semiáridas del planeta, que afecta principalmente la agricultura siendo limitada por la escasa cantidad de recursos hídricos disponibles [11]. Las experiencias obtenidas de estos sistemas implementados en diversas partes se presentan en los siguientes ejemplos.

2.2.1 México

El gobierno mexicano a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), trabaja en el fomento de la utilización de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales, mediante cursos de capacitación a la población, convenios con otras instituciones en implementaciones de SCALL's, subsidios, entre otras medidas. Un claro ejemplo es el programa "PROCAPTAR", que surge de la necesidad de dotar a la población rural de México, donde existan dificultades de índole técnica y económica para ser abastecidos mediante formas convencionales como se realiza comúnmente en zonas urbanas. El programa permite abastecer de agua a la gente que no cuenta con el vital elemento, mediante subsidios para la implementación de sistemas de captación de aguas lluvias.

Otro de los convenios entre los gobiernos municipales de Patzcuaro, Erongaricuaru, Tzintzuntzan y Quiroga sumado a el gobierno del estado de Michoacan, la fundación Gonzalo Rio Arronte y el IMTA es la aplicación sustentable de diversos proyectos que permitan la conservación en torno a la cuenca del lago Patzcuaro, dentro de este marco se genera la oportunidad de la implementación de SCALL's en las escuelas rurales, disminuyendo la problemática sanitaria debido a la poca disponibilidad del recurso. Hasta la fecha se tiene instalados 15 SCALL's en la cuenca del lago, cubriendo un volumen de almacenamiento de 5.040 metros cúbicos. Debido al buen desempeño del proyecto se han seleccionado 4 escuelas rurales más para la instalación de nuevos sistemas para poder alcanzar los 10.000 metros cúbicos. [12]

Uno de los sistemas comunitarios de captación pluvial llevado a cabo por el IMTA es en la comunidad de Cheran, en el estado de Michoacán, el cual tiene una capacidad de 20.000 metros cúbicos. Tiene una geometría de hoyo de dimensiones 80 x 50 x 7 metros con captación de 16.000 metros cuadrados de superficie, que abastece a una planta purificadora de agua para envasado en garrafas, la planta tiene la capacidad de envasar 1000 garrafas al día. [13]



Figura 2.4- SCALL's en comunidad Cheran, estado de Michoacán.

2.2.2 La experiencia de la organización Isla Urbana en México

El proyecto fue fundado en colaboración con el Instituto Internacional de Recursos Renovables AC en el 2009 en la localidad Cultura Maya, una colonia popular al sur del Distrito Federal donde se viven graves problemas de escasez de agua. El trabajo de la organización se ha enfocado en aprender a captar la lluvia de la forma más práctica posible para poder abastecer de agua a comunidades que carezcan del recurso, instalando sistemas de captación desde viviendas pequeñas, aisladas en sierras lejanas, hasta en fábricas y negocios del centro de la ciudad de México

En el DF ya cuentan con más de 1600 SCALL's instalados beneficiando a una población de 11.200 personas y con cerca de 80 millones de litros de agua captados. El sistema que implementan es la captación mediante la techumbre de la vivienda, conduciéndola por medio de tuberías a través de filtros para separar los materiales particulados, además cuenta con un sistema de separación de primeras lluvias, para finalmente disponer el agua captada en una cisterna como se ilustra en la *Figura 2.5.*

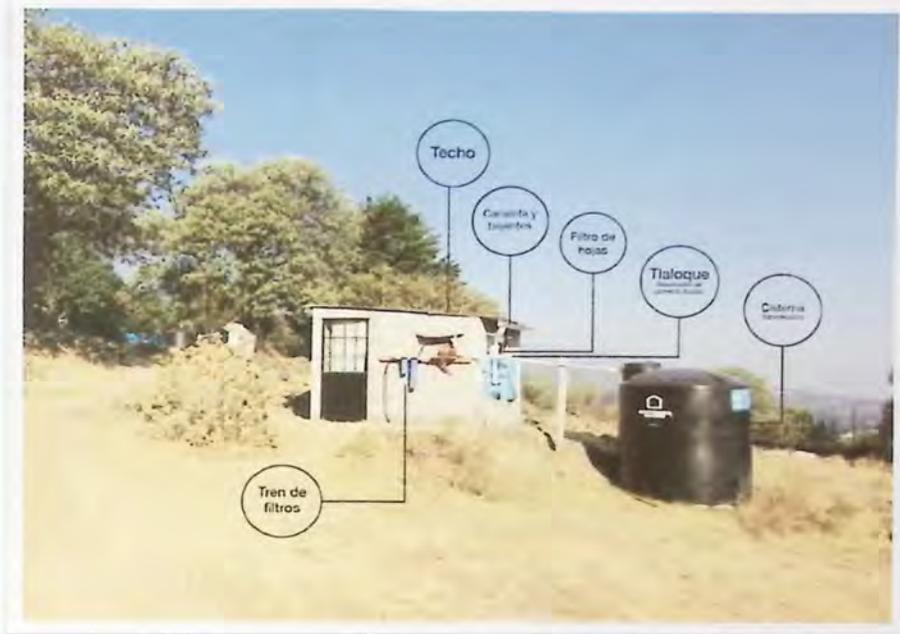


Figura 2.5- Esquema de funcionamiento SCALL's. (fuente: Isla Urbana.)

2.2.3 Alemania

En la capital alemana de Berlín, se ubica el complejo Daimler Chrysler Potsdamer Platz, que utiliza los techos de los 19 edificios que lo conforman como zona de captación de aguas lluvias, sumando alrededor de 32.000 metros cuadrados de captación que se almacena en un estanque subterráneo de una capacidad de 3.500 metros cúbicos con el fin de usar esta agua para descarga de inodoros, el riego de zonas verdes y llenar un estanque artificial.

El Belss Luedecke Strasse Building State, es otro proyecto de captación de aguas lluvias conformado por 7.000 metros cuadrados de cubiertas que descarga a un estanque de 160 metros cúbicos, además de contar con un sistema de escurrimiento de calles, estacionamientos y vías peatonales que aporta un área extra de 4.200 metros cuadrados más de captación que proveen de agua para descargas de inodoros y riego de jardines. Cerca del 58% del agua lluvia que cae dentro del sistema se retiene, además de contar con un sistema que permite eliminar los primeros flujos con contaminantes al alcantarillado de aguas lluvias. [14]

Otro de los proyectos sustentable corresponde al terminal aéreo de Frankfurt, el cual se implementó el sistema de captación de aguas lluvias más grande de Alemania, la zona de captación tiene un área de 26.800 metros cuadrados ubicado en la mayoría de las zonas techadas del aeropuerto y siendo almacenada en el subterráneo con capacidad de 600 metros cúbicos, con el fin de usar el recurso agua en sanitarios, riego y limpieza del sistema de aire acondicionado.



Figura 2.6- Aeropuerto de Frankfurt.

La Universidad Técnica de Darmstadt, ubicada en la ciudad del mismo nombre, posee un sistema de captación de aguas lluvias, que permite abastecer sus instalaciones del agua para fines de limpieza de superficies, descarga de inodoros y con fines de refrigeración. Desde la implementación de este sistema se ha reducido la demanda de agua potable solo al 20%, proporcionada desde la red pública con propósito de ser bebida lo que implica un ahorro de agua potable de 80.000 litros al año.

2.2.4 Banqladesh

Los cerca de 1000 sistemas de captación de aguas lluvias instalados desde el año 1977 por la organización no gubernamental "Forum for Drinkin Water Supply and Sanitation", han servido como una alternativa viable de abastecimiento de agua a la población para beber y cocinar de manera segura, ya que implica grandes riesgos para la salud la utilización de agua subterránea o superficial debido al alto índice de contaminación del suelo por arsénico.

El agua captada por estos sistemas en localidades rurales y urbanas más desatendidas tiene como principal objetivo mejorar el acceso a este tipo de instalaciones, teniendo un servicio seguro, sostenible y asequible. Las pruebas de calidad del agua han demostrado que el agua se puede conservar durante cuatro o cinco meses sin contaminación bacteriana en distintos tipos de estanques como son de ferrocemento, albañilería, tanques de anillos RCC, entre otros. [14]

2.2.5 China

Gansu es una de las provincias más secas de China. La precipitación anual bordea los 300 milímetros y su evaporación potencial llega hasta los 1500 milímetros, por lo que los recursos de agua subterránea y superficial son escasos, esto implica que la agricultura y por ende la población dependa de las precipitaciones, que generalmente sufre por suministros inadecuados de agua potable.

Es por lo anterior que, el gobierno chino ha implementado el llamado "Proyecto 121" que consiste en el apoyo económico a las familias que implementen sistemas de captación de aguas lluvias conformados por un campo de captación de aguas lluvias, dos almacenamientos y un terreno para cultivar con el fin de incentivar y promover el desarrollo social y económico de la zona de la meseta de Loess de Gansu, afectada por la escasez de agua.

Este proyecto ha demostrado ser exitoso en el suministro de agua potable para más de 1.3 millones de personas y hasta el año 2000 se contabilizaban más de 2.18 millones de tanques de agua con una capacidad total de 73.1 millones de metros cúbicos en la provincia entregando riego suplementario para 236.400 hectáreas de tierra. Esta experiencia permitió desarrollar la agricultura de secano siendo adoptada por otras 17 provincias de China, construyendo 5.6 millones de tanques con la capacidad de almacenar 1.8 billones de metros cúbicos, que suministra agua potable a más de 15 millones de personas y riego suplementario para 1.2 millones de hectáreas de tierra.

2.2.6 Japón

En la ciudad japonesa de Tokio, se fomenta a nivel comunitario la utilización del agua lluvia mediante las instalaciones denominadas "Ronjinson", se encuentran en la vía pública y consiste en la captación de agua mediante techos y acumulada en pozos subterráneos, que se pueden extraer mediante una bomba manual como se aprecia en la *Figura 2.7*. El agua captada es utilizada para riego de jardines, aseo de superficies de piso y fachadas, en casos de incendios y como agua de consumo en casos de emergencias.

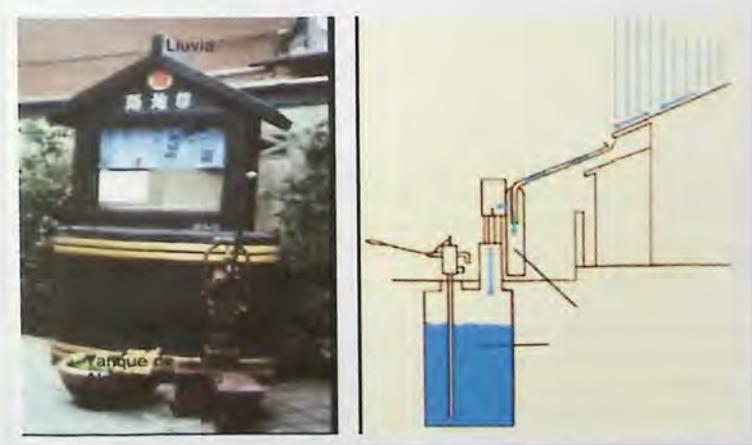


Figura 2.7- Sistema comunitario de aguas lluvias "Ronjinson" (fuente: UNEP)

2.2.7 Reino Unido

El imponente "Millennium Dome" en Londres es otro ejemplo a gran escala de sistemas de captación de aguas lluvias, tiene una superficie de captación aproximada de 100.000 metros cuadrados, donde el agua recolectada es trasladada por unos anillos alrededor del domo hasta un sistema de acumulación de 800 metros cúbicos, el agua acumulada puede ser llevada por impulsión mecánica hasta una planta de tratamiento o puede ser descargada hacia el río Támesis.



Figura 2.8- Millennium Dome de Londres

Además del domo en Londres hay 2.200 metros cuadrados de superficies de captación que se acumulan en tanques de 15 metros cúbicos usados para descargas de inodoros en edificios de centros comerciales. [15]

2.3 Experiencia en Chile

Existen varias zonas a lo largo del país que durante todo el año no cuentan con disponibilidad de agua, inclusive para el consumo humano. Estas zonas son críticas y en los últimos años son varias las comunas y provincias que han sido declaradas zonas de Catástrofe, Emergencia Agrícola o Escasez Hídrica, por parte de los Ministerios del Interior, de Agricultura y Obras Públicas, derivados de los efectos producidos por el déficit hídrico que afecta a estas zonas del país. [9]

Es por esta razón que desde hace ya un tiempo instituciones gubernamentales, como lo es el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), la Comisión Nacional de Riego (CNR) vienen trabajando en la implementación distintos tipos de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en distintas zonas del centro sur del país, sobre todo en el seco costero de las regiones de O'Higgins y el Maule. Este tipo de iniciativas permite aumentar la disponibilidad de agua, con diversas finalidades ya sea destinando el recurso a la agricultura, ganadería e incluso uso doméstico.

2.3.1 Experiencia sobre SCALL's para enfrentar la escasez de agua en la pequeña agricultura

En el año 2009, con apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y la Unión Europea, se inició un proyecto para captación de agua de lluvias por pequeños agricultores. En esa época, los agricultores realizaban captación de agua de lluvia mediante almacenamiento en botellas de plástico de diferentes capacidades y depósitos metálicos de 200 litros. Posteriormente se aportó con nuevos sistemas de captación de agua lluvia, donde el tejado de las casas se utiliza como superficie de recolección del agua lluvia. El agua es conducida mediante tubos de PVC a estanques que pueden tener una capacidad de 5.400 a 20.000 litros.

Una de las consideraciones importantes y que diferenciaba de otras estructuras utilizadas en América Latina y el Caribe es que las estructuras de almacenamiento sean resistentes a los sismos, por lo que los requisitos estructurales son mayores.

En cuanto al uso del agua captada, se destacó el potencial del riego tecnificado bajo condiciones gravitacionales como lo es el riego por goteo y/o cintas. Donde se abastece pequeños invernaderos familiares de producción de hortalizas y la aplicación de técnicas de cultivo hidropónico que permite obtener varias cosechas y darle a los pequeños agricultores un valor agregado como lo es la lechuga hidropónica que son altamente apreciadas en el mercado por la limpieza de estas.

Otro de los sistemas de captación de aguas lluvias es el tranque acumulador, orientado a los pequeños y grandes agricultores. El agua es captada mediante terrazas colectoras y conducidas por caminos con pendiente ligera que llevan el agua hasta los depósitos de entre 1.000 y 1.500 metros cúbicos según estipula el ingeniero Jorge Carrasco del INIA en el contexto del seminario internacional sobre sistemas de captación de aguas lluvia. [5]

2.3.2 SCALL's domiciliarios en las regiones del Bio, Araucanía, Los Lagos y Los Ríos.

Bajo el plan nacional para enfrentar la sequía, es que el gobierno de Chile por medio de las respectivas intendencias regionales crea el programa de sistemas de captación de aguas lluvias para el uso doméstico, con el fin de implementar 6.500 SCALL's en los domicilios que antes se abastecían de camiones aljibe.

Los objetivos del programa se centran en la implementación de soluciones innovadoras y más apropiadas para aumentar la disponibilidad de agua para uso doméstico en los sectores rurales de las regiones, disminuyendo la cantidad de camiones aljibe que circulan en la zona para el reparto de agua, promover la participación de las municipalidades en la implementación de soluciones para enfrentar la problemática de abastecimiento de agua en los sectores rurales y proveer de SCALL's a las familias que actualmente reciben agua a través de camiones aljibe financiados por la subsecretaría de interior.

Los sistemas están compuestos por un kit instalado de captación de aguas lluvias para techos de viviendas e infraestructura de aproximadamente 50 m^2 para utilizar el agua como uso doméstico, que cuenta con canaletas, bombas manuales, estanques de almacenamiento, filtros y sistema de cloración [16]. El esquema propuesto considera a su vez un sistema de rebalse, un dosificador de cloro, además de una base estabilizada que funcione como soporte del estanque acumulador como se muestra en la *Figura 2.9*.

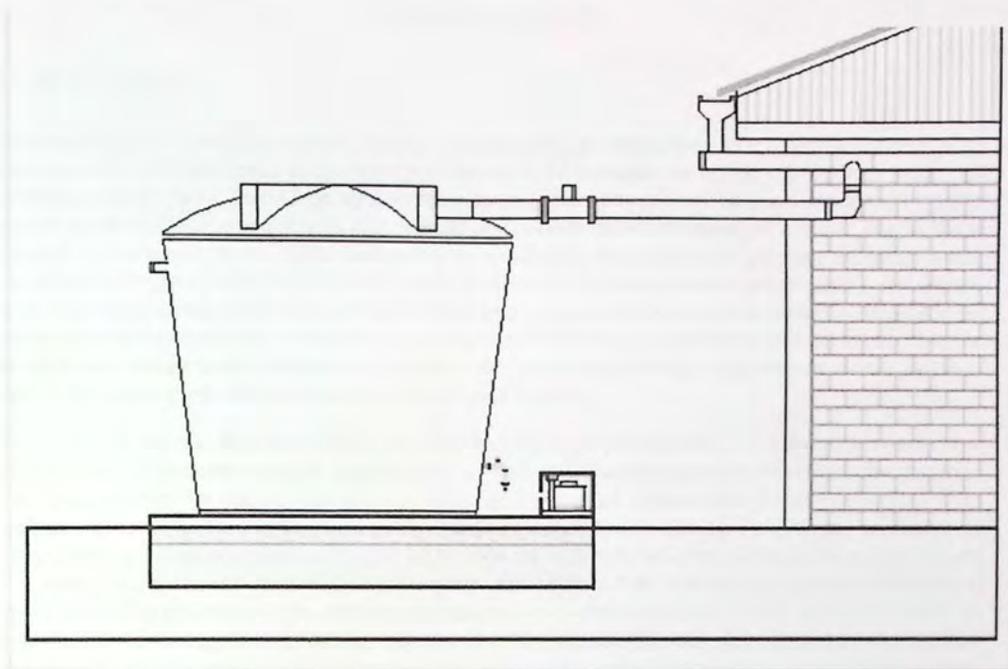


Figura 2.9- Esquema del sistema de captación y acumulación.

Entre los años 2016 y 2017, solo en la región del Biobío se realizó la instalación de estos SCALL's en más de 540 viviendas por la empresa contratista Agua Dulce Chile, que se encuentra autorizada por la empresa Esbbio para entregar soluciones hídricas relacionada con instalaciones sanitarias [17].

CAPÍTULO III

3. Metodología

La metodología presentada en este capítulo corresponde al marco teórico y a los fundamentos de los principios utilizados para determinar y procesar la información recopilada. En primer lugar, los apartados de la disponibilidad de agua corresponden a la obtención de la precipitación de diseño mediante un análisis estadístico de las precipitaciones históricas en la zona de estudio, con el fin de obtener la lluvia de diseño. Este parámetro se encuentra asociado a un periodo de retorno que permite establecer un valor de probabilidad de excedencia que estipula que sobre el 90% del tiempo el sistema cumpla con lo diseñado. Posteriormente y una vez obtenida la precipitación de diseño se puede estimar el agua potencialmente acumulable, lo que entrega una referencia de los volúmenes de agua que puede captar el sistema, con este valor referencial de agua captada se puede definir la demanda de agua y el uso final del agua dentro del hogar.

Para el apartado del diseño se establecen los lineamientos principales y el dimensionamiento del sistema, utilizando la información recopilada en terreno sobre las extensiones de superficies de techo y su materialidad se obtiene los presupuestos que permiten obtener los datos necesarios para realizar los análisis de costos y beneficios de las propuestas, y que son evaluados mediante la generación de series aleatorias de datos en función de la probabilidad de distribución que se ajusta a la serie de datos históricos de precipitaciones del sector. Esta metodología permite analizar el comportamiento del sistema de captación de aguas lluvias diseñado para el 90% de probabilidad de excedencia, en diversos escenarios y obtener distintos rangos de valores de nuestros indicadores que permite que la toma de decisiones se facilite al obtener esta información, ya sea para generar políticas públicas como proyectos de inversión privada.

3.1 Disponibilidad de agua

En primer lugar, para estimar la disponibilidad de agua caída en un sector, es necesario hacer un análisis de precipitaciones, el que debe realizarse en función de los datos medidos históricamente en la estación más cercana al lugar de estudio. En este caso corresponde a la estación Las Piedras, que se encuentra a unos 7 kilómetros de distancia con la zona de estudio, al analizar la serie de datos se observa que la serie se encuentra incompleta. Por lo tanto, es necesario realizar un relleno de información en base a una estación patrón. Para el relleno de información es necesario saber que la estación utilizada como patrón debe tener una concordancia entre sus mediciones y las mediciones de la estación a rellenar. Posteriormente la serie de datos de precipitación se ajusta a una función de distribución y se comprueba si el ajuste es representativo, con el fin de poder definir un parámetro llamado precipitación de diseño el cual permitirá obtener los valores de agua caída que permite dimensionar los sistemas.

3.1.1 Relleno de información pluviométrica

Para poder hacer el relleno de información, primeramente, se debe seleccionar una estación patrón la cual debe tener una consistencia entre la serie de datos completa y la que se desea rellenar. Para esto es que mediante el método de la doble acumulada se revisa el comportamiento entre ambas series de datos.

3.1.2 Método doble acumulada.

El método de doble acumulada o doble masa considera que, en una zona meteorológica homogénea, los valores de precipitación medidos en distintos puntos de esta zona en un margen de tiempo ya sea anuales o estacionales, tienen una relación de proporcionalidad entre ellos que puede representarse de manera gráfica.

Para hacer esta representación gráfica se debe identificar una estación meteorológica con registros pluviométricos confiables, la cual se define como estación patrón o base, cuya serie de datos debe coincidir con los registros de la estación que se desea rellenar. En un sistema coordinado, en el eje de las abscisas se grafica los valores de precipitación anual de la estación base y en el eje de las ordenadas se grafica los valores de la estación a rellenar. Si los registros no han sufrido variaciones, los puntos se alinean en una recta con pendiente única, lo que implica que no se debe realizar correcciones a la serie de datos; en cambio si presenta variaciones en este comportamiento quiere decir que hay valores erróneos por lo que se debe corregir a partir del año donde se ubique esa variación, aplicando un factor de corrección que es proporcional a la variación de la pendiente de la recta. El factor de corrección se obtiene de la relación P_c/P_e como se ejemplifica en la *Figura 3.1*, en este caso la relación P_c/P_e es menor a 1, ya que los registros medidos han sido menores a los reales. Por ende, deben ser corregidos desde ese instante. [18]

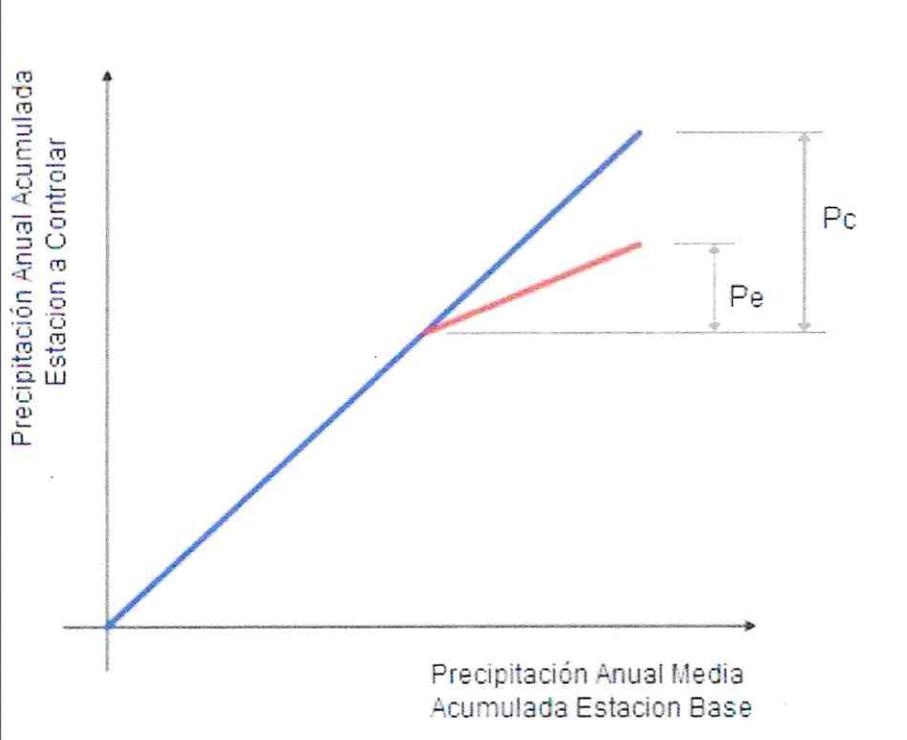


Figura 3.1.- Representación gráfica del método doble acumulada. (fuente: [18])

3.1.3 Regresión lineal.

El método de correlación lineal es uno de los más utilizados y se recomienda para la estimación de datos mensuales y anuales de la estación en estudio y las de una estación pluviométrica cercana, que cuente con una estadística consistente y observada. [19] Son herramientas estadísticas comúnmente empleadas en hidrología para estimar datos faltantes y ampliar el registro de cierta estación meteorológica.

Para el relleno de información se requiere establecer una regresión y correlación lineal entre una estación patrón y la que tenga carencia de datos, mediante una ecuación lineal de dos variables del tipo:

$$y = b * x + a \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

y = valor estimado de la precipitación para la estación sin información en mm

x = valor de precipitación registrado en la estación patrón en mm

a, b = constantes de regresión

Es necesario establecer la calidad del ajuste para comprobar que la generación de información es consistente y representativa de la realidad. Por esta razón, es posible utilizar el coeficiente de correlación lineal (R) para establecer la calidad de los datos, su valor fluctúa entre $-1 < R < 1$, donde el valor 0 indica una correlación nula entre los datos y -1 o 1 para una correlación total. En términos hidrológicos, se considera aceptable una regresión cuyo valor de R sea mayor a 0,8. [19]

3.1.5 Estadísticas de precipitaciones

En ingeniería hidráulica es común la utilización de las probabilidades para estimar la ocurrencia de eventos en un periodo de tiempo determinado, es por eso que los parámetros de diseño se encuentran asociados a las probabilidades de ocurrencia, en este caso la probabilidad que exceda un cierto valor de precipitación. Para efectos de este trabajo de título se considera definir la precipitación de diseño en términos de la probabilidad de excedencia a través de funciones de distribución de probabilidad. La probabilidad de excedencia elegida corresponde al 90% del tiempo, lo cual garantiza que al menos la precipitación asociada a este valor se cumplirá durante el 90% del tiempo analizado.

Para comenzar a analizar la serie de datos, se debe determinar los estadígrafos de posición, también llamados de tendencia central, que establece el valor en cual se agrupan los datos obtenidos, como es el caso de la media aritmética. Estos estadígrafos o estadísticos extraen información de una muestra, por lo que indican las características de la población:

• **Media:** Es el valor esperado de la variable misma o primer momento respecto al origen. Muestra la tendencia central de la distribución y su valor estimado a partir de la muestra, es:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ecuación 3.2}$$

• **Desviación Estándar:** Es una medida de la variabilidad, ya que es la raíz cuadrada de los cuadrados de las diferencias y su valor estimado se define como:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

• El Momento Central de Orden 3 (Asimetría): Se define como la sumatoria de los de los desvíos de la serie de datos, con respecto a la media elevados al cubo y cuya sumatoria se divide por el número de datos.

$$m^3 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{n} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

3.1.6 Función de distribución de probabilidad

Las funciones de distribución de probabilidad (FDP) se definen como una función que asigna una probabilidad a cada evento definido sobre una variable aleatoria. Un concepto básico para definir una FDP en hidrología es el Periodo de Retorno, que se define como el tiempo que transcurre entre dos eventos y se define con la letra "T". Un segundo concepto para definir una FDP es la probabilidad de Excedencia, que se asocia al periodo de retorno e indica la probabilidad que la variable aleatoria exceda un determinado valor. Se define según la siguiente expresión:

$$P(x > X) = \frac{1}{T} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

En el mismo contexto la probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor menor o igual a un número X, está dada por la función de distribución de probabilidad F(X), de la siguiente manera. [20]

$$F(x) = P(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

3.1.7 Formas de Determinar la Distribución de Probabilidad

Para definir la función de distribución de probabilidad que mejor se ajusta al comportamiento de la variable hidrológica (precipitación), se analiza varios modelos de manera que representen de mejor forma el comportamiento de la variable hidrológica.

Diagrama de FDP

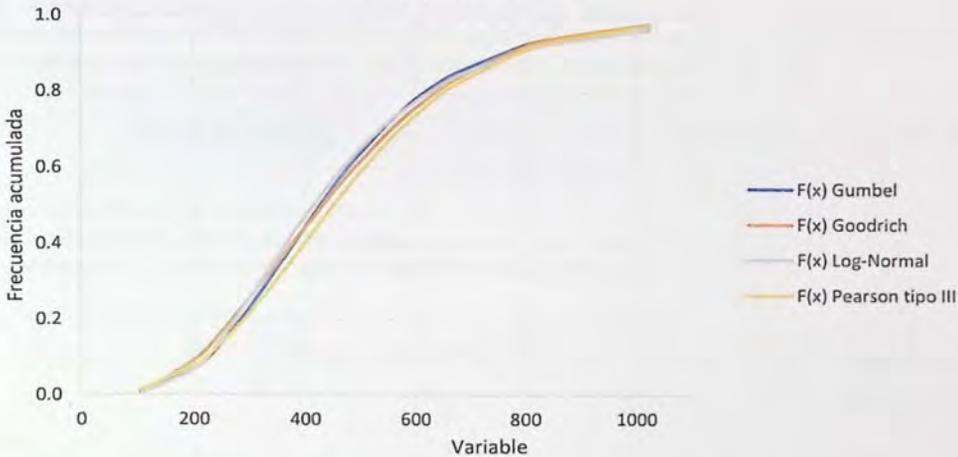


Gráfico 3.1- Diagrama de comportamiento de la función de distribución de probabilidad.

Un ejemplo, es la Ley de Distribución de Gumbel la cual ha demostrado poseer una adecuada capacidad de ajuste, a valores máximos, (Pizarro y Novoa 1986). [20]

Así mismo la función de distribución de probabilidad de Gumbel se comporta de la siguiente forma:

Distribución Gumbel:

$$P(x \leq X) = F(x) = e^{-e^{-d(x-\mu)}} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde:

X: Valor a asumir por la variable aleatoria (precipitación de diseño)

e: Constante de Neper.

μ y d: Parámetros para ajustar la función.

Los parámetros d y μ se obtienen, en base a la media aritmética (\bar{x}) y la desviación estándar (S) de la muestra:

$$d = \frac{1}{0,7797 \cdot S} ; \quad \mu = \bar{x} - 0,450047 \cdot S \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Distribución Goodrich:

Para el análisis y ajuste de la función de distribución se prueba la FDP de Goodrich, tiene la característica de eliminar los valores extremos, cuya probabilidad de ocurrencia es muy pequeña. Lo cual consigue suprimir las distorsiones que provocan los valores anómalos. [20] [18]

$$P(x \leq X) = F(x) = 1 - e^{-\alpha(x-x_1)^{\frac{1}{p}}} \quad ; \quad x_1 < x < \infty \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde:

X: Valor a asumir por la variable aleatoria.

x_1, α, p : Parámetros para ajustar la función.

Los parámetros se determinan según las siguientes ecuaciones:

$$\frac{m^3}{S^3} = P(p) \quad ; \quad \alpha^{2p} = \frac{1}{S^2} [\Gamma(2p+1) - \Gamma^2(p+1)] \quad ; \quad x_1 = \bar{x} - \frac{\Gamma(p+1)}{\alpha^p} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Donde:

m^3 = Momento central de orden 3.

S^3 = Desviación estándar al cubo.

$P(p)$ = Función auxiliar de Goodrich.

S^2 = Varianza muestral.

Γ = Función Gamma.

\bar{x} = Media muestral.

Desde la función auxiliar de Goodrich definida anteriormente, permite determinar el valor de p en base a la *Tabla 0.1* en el anexo 1.

Los valores de la función Gamma a considerar para la solución del sistema de ecuaciones se encuentran en la *Tabla 0.4*.

Distribución Log-Normal:

$$P(x \leq X) = F(x) = \frac{1}{2\pi x\beta} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} dx \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Donde los parámetros α y β se basan en logaritmos de la variable aleatoria y son definidos de la siguiente manera:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$\beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - \alpha)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Donde:

X = Valor a asumir por la variable aleatoria (precipitación de diseño)

e = Constante de Neper.

α y β = Parámetros para ajustar la función.

Se asigna una variable estandarizada de la forma:

$$Z = \frac{\ln x_i - \alpha}{\beta} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Por lo que al igual que en la distribución Normal, se encuentra la probabilidad en función de la variable x definida como:

$$x = e^{\beta z + \alpha} \quad \text{Ecuación 3.15}$$

Distribución Pearson Tipo III:

$$P(x \leq X) = F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma \beta} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)} \left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)^{\beta-1} dx \quad \text{Ecuación 3.16}$$

$$\alpha = \frac{s}{\sqrt{\beta}} \quad ; \quad \beta = \left(\frac{2}{\gamma}\right)^2 \quad ; \quad \delta = \bar{x} - \alpha\beta \quad ; \quad Y = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3 / n}{s^3} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

Donde:

Y = Coeficiente de sesgo.

α , β y δ = Parámetros de ajuste.

S = Desviación estándar.

\bar{x} = Media aritmética.

Se asigna una variable estandarizada " γ " definida como:

$$\gamma = \frac{x - \delta}{\alpha} \quad \text{Ecuación 3.18}$$

Posteriormente, el ajuste se realiza a través de la tabla chi-cuadrado donde:

$$x^2 = 2 * \gamma \quad ; \quad \mu = 2 * \beta \quad \text{Ecuación 3.19}$$

Por lo tanto, la variable aleatoria "x" se define a partir de lo señalado anteriormente como:

$$x = \gamma * \alpha + \delta \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Y la probabilidad es obtenida a través de los valores presentes en la tabla de percentiles de la distribución de χ^2 , con n grados de libertad. La

Tabla 0.2 presenta los valores a asumir por la función chi-cuadrado. [20]

3.1.8 Pruebas de bondad de ajuste

Luego del ajuste de la función de distribución, es necesario definir si el ajuste es adecuado y de calidad. Para esto se emplea una serie de pruebas con distinto grado de efectividad, estas pruebas determinan el nivel de asimilación de los datos observados en una variable. Dentro de las pruebas a utilizar se encuentran la prueba de Kolmogorov – Smirnov y Coeficiente de determinación (R^2). [20]

Test coeficiente de determinación:

El coeficiente de determinación mide la porción de variabilidad total de las frecuencias observadas respecto a su media que es explicada por el modelo o la función de distribución de probabilidad. La expresión que la define es la siguiente:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Fn(x)_i - F(x)_i)^2}{\sum(Fn(x)_i - \overline{Fn(x)})^2} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

Donde:

R^2 = Coeficiente de determinación $0 \leq R^2 \leq 1$.

$F_n(x)_i$ = Frecuencia observada acumulada.

$F(x)_i$ = Frecuencia teórica acumulada.

$\overline{Fn(x)}$ = Media de las frecuencias observadas acumuladas.

Test Kolmogorov – Smirnov:

Esta prueba corrobora la bondad de ajuste de la distribución de probabilidad mediante el valor absoluto de la máxima diferencia entre la distribución acumulada observada y la teórica.

Para poder determinar las frecuencias acumuladas tanto teórica como observadas, se deben ordenar las frecuencias observadas en orden de menor a mayor y aplicar la siguiente expresión:

$$Fn(x) = \frac{n}{N+1} \quad \text{Ecuación 3.22}$$

Donde:

$F_n(x)$ = Frecuencia observada acumulada.

n = Número de orden ascendente de la serie de datos.

N = Número total de datos.

La frecuencia teórica acumulada corresponde ser determinada mediante la función de distribución correspondiente.

Para poder concluir con la prueba, se debe determinar el supremo de las diferencias, denominado por la letra "D", que consiste en calcular el valor absoluto de la máxima diferencia entre las frecuencias observadas y las acumuladas como se expresa a continuación:

$$D = \text{Sup} |Fn(x)_i - F(x)_i| \quad \text{Ecuación 3.23}$$

Donde:

D = Supremo de las diferencias.

$F_n(x)_i$ = Frecuencia observada acumulada.

$F(x)_i$ = Frecuencia teórica acumulada.

El valor obtenido del supremo de las diferencias se debe comparar con el valor de la tabla Kolmogorov – Smirnov (D_t). Si se cumple que D_t es mayor que el supremo de las diferencias, se puede aceptar el ajuste. Por lo tanto, se debe cumplir:

$$D_t \geq D$$

Al cumplir esta condición, se acepta que el ajuste es correcto a la función de distribución de probabilidad empleada y cumple con el nivel de confiabilidad asumido (Pizarro et al., 2004). [9]

3.2 Demanda de agua

Para establecer un valor de demanda de agua, es necesario considerar que el suministro de agua es uno de los requerimientos fundamentales para el humano, ya que sin ella no se puede sostener la vida por más allá de unos pocos días. Es necesario considerar que, un acceso adecuado al suministro garantiza mejoras significativas en materias de higiene y salud, trayendo consigo beneficios sanitarios y sociales.

La demanda de agua en el sector de estudio queda definida según los criterios del diseño, las alternativas de funcionamiento y en función del agua caída. Otro criterio que se considera para definir la demanda es lo establecido por la Organización Mundial de la Salud en el estudio "Domestic Water Quantity, Service Level and Health", en el cual estipula un caudal de acceso óptimo para que el ser humano atienda todas las necesidades básicas de higiene de manera continua y tenga un bajo efecto perjudicial para la salud. Esto corresponde a un caudal de 100 [lt/día]. [6]



Figura 3.2- Jerarquía de las necesidades de agua. (fuente: Guía técnica N°9, OMS y OPS [21])

En base a la pirámide de jerarquía de la *Figura 3.2*, el valor adoptado como óptimo al acceso de agua considera que, para cubrir necesidades básicas de higiene y salud los 100 litros diarios por persona, debiese utilizarse para el lavado de ropa, el aseo personal, para cocinar y beber. Tanto el uso de agua para "consumo" como "higiene", tienen consecuencias directas para la salud, en relación con las necesidades fisiológicas como en el control de diversas enfermedades infecciosas. El abastecimiento de agua y las mejoras en el servicio de ésta, no solo permite el cumplimiento de las necesidades básicas del ser humano, si no evita que la propagación de enfermedades como lo son el tracoma, la esquistosomiasis, la ascariasis, la tricuriasis, la anquilostomiasis, entre otras enfermedades infecciosas que pueden afectar por la falta de agua. [6]

Debido a la naturaleza del agua captada y sin ningún tipo de tratamiento, la disposición final del recurso captado puede cumplir perfectamente con los estándares de consumo doméstico de segundo orden, que corresponden al ítem de higiene dentro del hogar como lo son el uso de lavado de ropa, limpieza, descarga de inodoros, entre otros similares. Siendo considerado este punto uno de los mayores consumos dentro del hogar como se muestra en la *Figura 3.3*.

Consumo de agua en el hogar

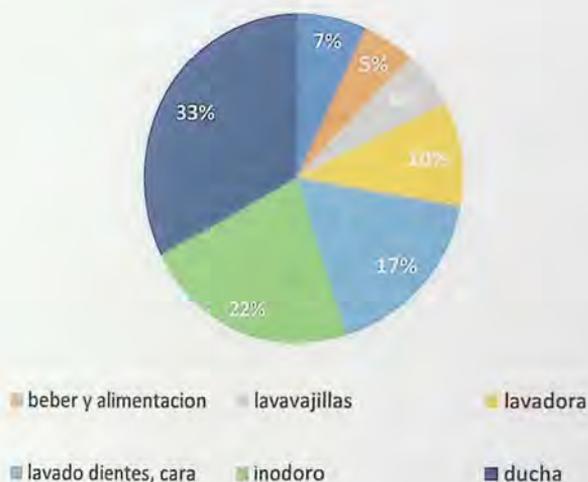


Figura 3.3- Distribución de agua en el hogar. [22]

Para el caso de la presente memoria, la estimación de la demanda será base a los catálogos de especificaciones técnicas de un inodoro (Anexo 2) donde se asume que los estanques tienen una capacidad de 6 litros.

Para este caso, se estimará una demanda constante por el uso de inodoro, ya que se considera que una persona tira la cadena 6 veces al día, este valor se obtuvo desde una pequeña encuesta realizada entre algunos de los habitantes del sector. Lo que implica que una persona utiliza el inodoro unas 180 veces al mes, por ende, el volumen de demanda corresponde a 1080 litros mensuales. Con este valor estimado de la demanda de inodoro y la *Figura 3.3* de distribución de agua en el hogar se estiman los demás valores de demanda para distintos usos que se presentan en la *Tabla 3.1*.

Tabla 3.1- Valores de demanda estimados.

Uso	Porcentaje %	Volumen [lts/mes/pers]
Beber y alimentación	5.2	250
Lavado dientes, cara	17.2	931
Lavavajillas	5.5	264
Lavadora	10.3	500
Inodoro	22.3	1080
Ducha	32.7	1583
Otros	6.8	330
Inodoro + Ducha	55.1	2663
Inodoro + Lavadora	32.7	1580
Lavavajillas + lavadora + inodoro + lavado de dientes y cara	55.3	2674
Total	100	4837

3.3 Diseño del sistema

Para definir las dimensiones y el layout del sistema, se considera varios aspectos con el fin de generar una la propuesta de diseño lo más económica y funcional posible. Para poder dimensionar las zonas de captación, conducción y acumulación es necesario utilizar el parámetro definido anteriormente, la precipitación de diseño que en función de las extensiones de las zonas de captación permite estimar el volumen de agua captada.

En primera instancia se pensó en generar un sistema comunitario, pero las dificultades técnicas de implementar este tipo de sistema en el lugar, sumado a la alta plusvalía de la zona de estudio no hace factible considerar esta idea. Ya que se considera la utilización de zonas de captación y acumulación en espacios comunes que aumentaría los costos considerablemente, por lo tanto, se propone utilizar los techos de las casas como zona de captación ya que la mayoría de la zona de estudio posee techumbres de materiales adecuados para la captación como lo es hormigón, techos metálicos, tejas asfálticas entre otros. Además, se considera un coeficiente de eficiencia por el agua que se puede desperdiciar de ser captada por efectos como viento, el rebote de la gota, entre otros.

La zona de conducción queda definida por mallas y filtros que evitan que la calidad del agua se vea mermada por algún tipo de material particulado o de mayor tamaño durante el proceso de captación y conducción hasta la zona de acumulación. La zona de captación queda definida en función de la precipitación de diseño, la demanda y la extensión de la captación.

3.3.7 Coefficiente de eficiencia

El coeficiente de eficiencia se define como la porción de agua caída que escurre superficialmente sin considerar las pérdidas por evaporación, infiltración, efectos del viento, el efecto rebote y depende directamente del tipo de superficie. Para poder capturar la mayor cantidad de aguas lluvias, el coeficiente de eficiencia de la superficie de captación debe ser lo más cercano al valor 1, siendo lo más impermeable posible con el fin de optimizar la captura de agua. Este coeficiente representa todos los posibles efectos que no permitan capturar la totalidad de agua caída.

La relevancia de considerar un material adecuado para el diseño de la zona de captación es en favor de captar la mayor cantidad de agua, sin pérdidas excesivas y de buena calidad. En casos que la zona de captación sea en terreno natural se presenta en la *Tabla 3.2* distintos valores de coeficientes de escorrentía que son implementadas de igual manera en el método racional, que se asumirán como coeficiente de eficiencia según el tipo de material y/o cobertura de suelo ya que representa de buena manera los efectos de las posibles pérdidas de agua.

Tabla 3.2- Valores de coeficiente de escorrentía.

Tipo de superficie	Coefficiente de escorrentía
Pavimentos de hormigón y bituminosos.	0,70 a 0,95
Superficies lisas, impermeables como techos en metal, en teja asfáltica, de concreto, entre otros.	0,90
Pavimentos de macadam	0,25 a 0,60
Adoquinados	0,50 a 0,70
Superficie de grava	0,15 a 0,30
Zonas arboladas y bosque	0,10 a 0,20
Zona con vegetación densa:	
Terrenos granulares	0,05 a 0,35
Terrenos arcillosos	0,15 a 0,50
Zona con vegetación media:	
Terrenos granulares	0,10 a 0,50
Terrenos arcillosos	0,30 a 0,75
Tierra sin vegetación	0,20 a 0,80
Zonas cultivadas	0,20 a 0,40

Fuente: Salinas, A.2010.

Para determinar el volumen de agua captada en una superficie de drenaje, es importante definir el coeficiente de eficiencia. Para un correcto funcionamiento y diseño del sistema es importante definir la materialidad de la zona de captación y que el área de esta zona sea del tamaño suficiente para proveer el volumen necesario.

El coeficiente de eficiencia se obtiene de la materialidad, idealmente se utiliza materiales impermeables como lo es el hormigón, techumbre metálicas o geomembranas. Los valores varían entre $C = 0,85$ en el caso del hormigón revestido de un producto impermeabilizante a $C = 0,95$ en el caso de geomembrana. [9]

3.3.8 Zona de captación

En base a las recomendaciones del Manual de Diseño y Construcción de Sistemas de Captación de Aguas Lluvias del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, el área de captación se calcula en base a la fórmula anteriormente presentada, el cual para efectos del cálculo se considera un análisis mensual y sus dimensiones están sujetas a las condiciones de precipitación (Precipitación de diseño), volumen de acumulación y material impermeable a utilizar. Por ende, la superficie a impermeabilizar queda definida por la siguiente expresión: [9] [23]

$$V_{Ac} = P * C * A_c \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Donde:

A_c = Área de captación

V_{Ac} = Volumen de acumulación

P = Precipitación de diseño

C = Coeficiente de escorrentía

3.3.9 Zona de conducción

Esta parte de la estructura es la encargada de conducir el agua desde la zona de captación hasta la zona de acumulación, idealmente esta zona de conducción se diseña gravitacionalmente para disminuir los costos tanto económicos como energéticos. Generalmente dentro del diseño se contempla la utilización de distintos filtros y rejillas que ayudan a retener cierto tipo de materiales particulados o de mayor tamaño como lo puede ser hojas, piedrecillas, etc. En ocasiones se incluye en el diseño un sistema de decantación de sedimentos con el objetivo de mejorar la calidad del agua acumulada.

El cálculo de esta zona está regido por las leyes de la hidráulica, por lo que debe cumplir con los requisitos de presiones, ya que se contempla la construcción de esta conducción de manera cerrada para evitar que el agua este expuesta constantemente al ambiente.

3.3.10 Zona de acumulación

Corresponde a la zona donde se almacena el agua captada para su posterior utilización, su volumen está condicionado a los parámetros definidos anteriormente, como lo es la precipitación de diseño, el área de captación de cada vivienda y la demanda asignada para el agua captada. Además de cumplir con los requisitos mínimos de materialidad.

Dentro de estas condiciones mínimas se considera que la materialidad del acumulador sea adecuada para resistir los esfuerzos propios generados por el volumen de agua que se desea acumular, también es importante que el agua se mantenga en buen estado por lo que el material seleccionado debe garantizar que no se produzca la generación de hongos por la larga exposición con el agua o la generación de algas por efectos del sol.

Los materiales comúnmente utilizados para acumuladores son diversos donde destacan los estanques de fibra de vidrio, polietileno, PVC, ferrocemento, hormigón y uno que otro tipo de estanques flexibles de geomembranas.

3.4 Evaluación del sistema

Una vez dimensionado el sistema se procede a evaluar su funcionamiento en base a distintos escenarios mediante la simulación de Montecarlo, la cual genera distintas series de datos aleatorios de precipitaciones, que se encuentra en función del ajuste de la probabilidad de distribución seleccionada anteriormente en el análisis estadístico, mediante esta metodología se plantea la opción de evaluar el desempeño del sistema en distintos escenarios posibles que añade una variabilidad al análisis pudiendo disminuir el factor riesgo al analizar distintos casos y no solo uno. Dentro de los indicadores a considerar los principales se derivan de la herramienta financiera del análisis de costo beneficio, como lo son el beneficio anual, el Valor Actual Neto y por otra parte los valores de disponibilidad de agua durante el año, la cantidad de agua aprovechada, entre otros.

3.4.1 Análisis de costo beneficios

Para tomar decisiones con respecto a un proyecto, es necesario realizar un análisis a priori y verificar si es viable económicamente llevar a cabo el proyecto evaluado.

El análisis de costo-beneficio es una herramienta financiera que mide la relación entre los costos y beneficios asociados a un proyecto de inversión con el fin de evaluar su rentabilidad, se basa en los principios de las finanzas y la economía. El análisis de costo beneficio es empleado como herramienta para medir la rentabilidad de la inversión de un proyecto, mide la relación de flujos entre los costos y los beneficios económico de la propuesta. Para el análisis se considera una tasa social de descuento del 6% según lo estipulado por la División de Evaluación Social de Inversiones del Ministerio de Desarrollo Social (MIDESO) en sus cursos de capacitación para la preparación y evaluación social de proyectos [32]. Además, para los proyectos de ingeniería, la proyección de la vida útil se estima de 15 años.

El principal indicador que se utiliza en el análisis costo-beneficio para determinar la rentabilidad de un proyecto de inversión corresponde al Valor Actual Neto. [24]

El Valor Actual Neto o VAN se define como la diferencia entre los valores actuales de los beneficios brutos, los valores actuales de los costos y las inversiones. Se expresa de la siguiente manera:

$$VAN = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{B_i - C_i}{(1+r)^i} \quad \text{Ecuación 3.25}$$

Donde:

B_i = Beneficios.

C_i = Costos.

r = Tasa de descuento

n = Limite de la evaluación (Generalmente se asocia a la vida útil de la inversión inicial).

Según esta metodología, un proyecto es viable cuando la suma de todos los flujos descontados al presente (VAN) presenta un valor mayor a cero. En el caso que el valor sea igual a cero, para el inversionista es indiferente desarrollar o no el proyecto, pero en el caso que el valor del VAN sea negativo implica una pérdida de capital para el inversor.

Este análisis no solo puede ser asignado a un solo proyecto y ver su viabilidad, puede determinar cuál de muchos proyectos analizados es más rentable.

Para efectos de este trabajo, los flujos de beneficios y costos están definidos de manera anual y en función del valor del costo marginal que implica llevar agua a esta zona según la estimación realizada.

3.4.2 Simulación de Montecarlo

La Simulación de Montecarlo es una técnica que permite llevar a cabo la valoración de los proyectos de inversión considerando que una, o varias, de las variables que se utilizan para la determinación de los flujos netos de caja no son variables ciertas, sino que pueden tomar varios valores de acuerdo a una cierta probabilidad. Por tanto, se trata de una técnica que permite introducir aleatoriedad y además, el concepto de riesgo en la valoración de los proyectos de inversión.

La técnica de la simulación de Montecarlo se basa en simular la realidad a través del estudio de una muestra, que se ha generado de forma totalmente aleatoria. Es una técnica utilizada en diferentes campos, como los de finanzas, gestión de proyectos, energía, manufacturación, ingeniería, investigación y desarrollo, seguros, petróleo y gas, transporte y medio ambiente. [25]

Resulta de gran utilidad en los casos en los que no es posible obtener información sobre la realidad a analizar o cuando la experimentación no es posible y/o es muy costosa. Permite tener en cuenta para el análisis un elevado número de escenarios aleatorios, por lo que, se puede decir que hace posible llevar la técnica del análisis ampliando la perspectiva de los escenarios posibles. De esta forma, se pueden realizar análisis que se ajusten en mayor medida a la variabilidad real de las variables consideradas. La aplicación de esta técnica se basa en la identificación de las variables que se consideran más significativas, así como las relaciones existentes entre ellas para explicar la realidad en estudio mediante la sustitución del universo real, por un universo teórico utilizando números aleatorios. [26]

Para efectos de esta investigación, se genera de forma aleatoria 40 series de precipitaciones en función de la probabilidad de distribución elegida en base al estudio estadístico de las precipitaciones. Cada serie está conformada por 15 años de datos anuales de precipitación, dado que la vida útil considerado en el proyecto es de 15 años como se explica en apartados anteriores. La evaluación de los escenarios posibles (aleatorios) se lleva a cabo para el diseño del sistema con el 90% de probabilidad de excedencia.

Se obtiene de estas simulaciones los datos de los indicadores para las 40 series generadas, donde para cada serie generada se obtiene el valor promedio de los 15 años así obteniendo un rango de 40 datos en el cual estos valores probables entregan una mejor aproximación de los indicadores que permiten que la toma de decisión sea facilitada.

3.4.3 Indicadores

La toma de decisiones es un proceso sistemático y racional a través del cual se selecciona la una alternativa entre varias. En la gestión de toma de decisiones, es importante que todos los actores que se vean directamente involucrados con el proyecto cuenten con información necesaria para tener un conocimiento de lo planificado y en qué medida este proyecto cumplirá con las metas y expectativas propuestas.

Para ello, es esencial contar con distintos indicadores que posibiliten y faciliten la comparación del proyecto ante otras alternativas a evaluar. Para efectos de esta memoria se consideran los siguientes indicadores:

- **Inversión:** corresponde a la inyección de recursos monetarios en la etapa inicial que permite llevar a cabo el proyecto y que queda definido en base a los presupuestos de las distintas configuraciones del proyecto que se está analizando en este estudio.
- **Disponibilidad:** este indicador se define como la cantidad de tiempo en meses en el cual se cumple la demanda al 100% durante un año, por lo que se dispone de agua para satisfacer la demanda planteada en esta memoria. Cabe mencionar que este indicador no contabiliza los meses que reciba menos de la cantidad demandada por los habitantes, eso no quiere decir que no haya agua.
- **Beneficio anual:** como su nombre lo indica corresponde a el valor monetario de beneficio que se obtiene del uso del proyecto anualmente. Este valor queda definido por la cantidad de agua aprovechada, que se valoriza con el costo marginal de llevar esa cantidad de agua extra por el actual sistema de camiones aljibe.
- **Valor Actual Neto:** como ya se había definido en la sesión 3.4.1, es un valor que refleja la rentabilidad de distintos flujos netos de cajas futuros originados por la inversión. Este valor debe adoptar un valor positivo para que el inversor obtenga una rentabilidad mayor a la tasa de descuento definida para el proyecto, lo que implicaría que el proyecto puede llevarse a cabo. Para el caso que su valor sea negativo el proyecto no es rentable por lo que no se recomienda invertir y en el caso que su valor sea cero, para el inversor es indiferente el hecho de invertir o no sus recursos.
- **Agua aprovechada:** se define como la cantidad de agua captada por el sistema y que se ha utilizado por los habitantes, según la demanda definida en el estudio.
- **Agua no aprovechada:** contrariamente al ítem anterior, es el agua captada por el sistema que no ha sido utilizada por los habitantes

Con el fin de generar mayor información e independizar los valores de los indicadores de la cantidad de personas que habitan por casa y la extensión de las zonas de captación, se generan otros indicadores que se definen como unitarios.

CAPÍTULO IV

4. Caracterización de la Zona de Estudio

4.1 Ubicación

La zona de estudio se encuentra en la V Región de Valparaíso, perteneciente a la provincia del Marga-marga, y a la comuna de Quilpué. El sector El Manzano se ubica en la localidad de los Molles a unos 10 kilómetros al sureste de la ciudad de Quilpué. Sus coordenadas UTM son 19H norte: 6334690.56 m S; este: 278001.07 m E. el acceso principal a la localidad se realiza mediante la ruta F-50 Lo Orozco desde Quilpué en dirección hacia la ruta 68, tomando el desvío de la ruta F-740.



Figura 4.1.- Ubicación localidad Los Molles en la Provincia del Marga-marga.

El sector en estudio pertenece a la cuenca costera entre Aconcagua y Maipo, a su vez se ubica en la subcuenca del estero Marga-marga, como lo estipula el inventario público de cuencas hidrográficas de la Dirección General de Aguas.

4.2 Clima

El clima en la Región de Valparaíso se presenta con algunas variaciones, posee un clima templado mediterráneo, al norte del río Aconcagua presenta un grado mayor de semiaridez y a medida que se acerca a el litoral es más húmedo del tipo mediterráneo costero y hacia la cordillera se caracteriza por el frío de altura.

El Océano Pacífico tiene gran influencia en la climatología de la región, al igual que el efecto de la corriente de Humboldt, funcionando como regulador de temperaturas. Las direcciones predominantes de los vientos, todas de componente oceánico y portadoras de humedad, explican la constante presencia de este factor en el clima regional.

La corriente de Humboldt determina la existencia constante de bandas de bajas temperaturas cercanas a la costa, contribuyendo al descenso de las temperaturas continentales.

En general en la Región de Valparaíso se distinguen cuatro tipos de climas:

- Clima de estepa cálido: Ubicado al norte del río Aconcagua, caracterizado por la escasa humedad atmosférica, fuerte oscilación térmica diaria y temperaturas media anuales de 15°C. las precipitaciones alcanzan hasta los 200 mm al año.
- Clima templado de tipo mediterráneo costero: Se presenta en toda la costa de la región, las variaciones de temperaturas son menores por la influencia del océano, siendo más homogénea durante el año con un promedio de 14° C. La humedad relativa es superior al 75% y las precipitaciones alcanzan unos 450 mm anual.
- Clima templado de tipo mediterráneo cálido: Este clima se desarrolla al sur desde el río Aconcagua. Se caracteriza por ser más seco y con variación térmica mayor que en la costa. La temperatura media llega a los 15, 5° C y las precipitaciones varían según la altitud pudiendo llegar hasta los 300 mm.
- Clima frío de altura: Se ubica por sobre los 3000 metros de altura en la cordillera de los Andes. Predominan las bajas temperaturas y de precipitaciones sólidas, especialmente en invierno.

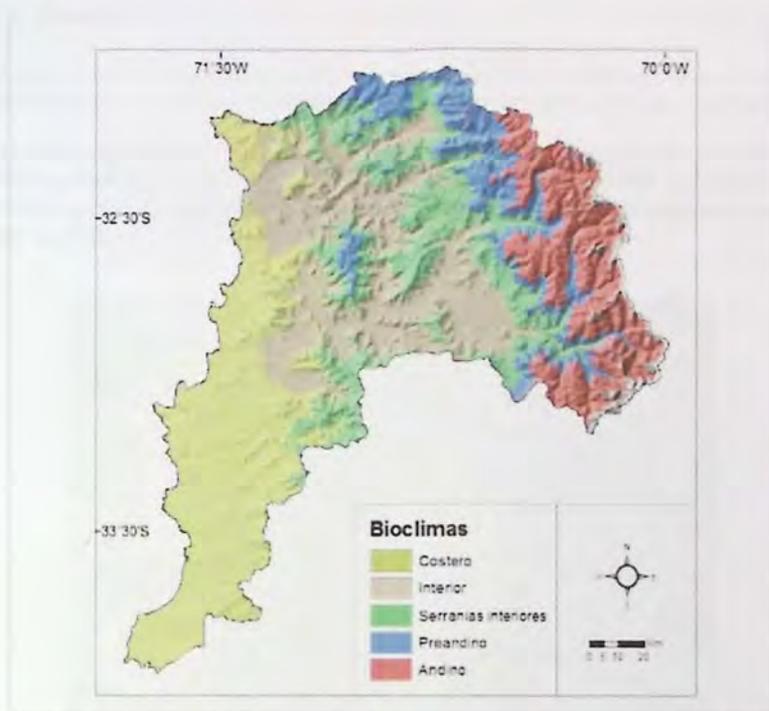


Figura 4.2.- Bio climas de la Región de Valparaíso. (fuente Luebert, Plischoff) [27]

El clima en la zona de estudio corresponde a un clima templado de tipo mediterráneo costero característico de la zona litoral de la región de Valparaíso su influencia llega hasta el interior por medio de los valles, es un clima templado con lluvias invernales y con estación seca prolongada. El clima presenta un mayor grado de continentalidad debido a su distanciamiento del litoral y por la presencia de la cordillera de la costa, esta disminución de la influencia del océano provoca que las variaciones térmicas no sean tan bajas comparadas con planicies litorales. La humedad relativa disminuye al igual que a nubosidad característica de la costa esta condición se da principalmente en verano. En invierno la situación es más uniforme en toda la zona, debido al desplazamiento del anticiclón del Pacífico hacia el norte y sus consecuentes entradas de sistemas frontales y de humedad costera que al no tener la influencia del anticiclón puede sortear con mayor libertad el relieve de la zona. [28] [29]

4.3 Población

En el sector el Manzano habitan 16 familias que son abastecidas de manera constante de agua potable mediante camiones aljibe distribuidos por el departamento de operativa de la municipalidad.

En base a los registros de la I. Municipalidad de Quilpué, las 16 familias que conforman el total de la población abastecida corresponden a 72 personas que son beneficiadas directamente. La distribución espacial del sector se lleva a cabo en un poco más de 35 hectáreas parceladas como se muestra en la imagen.



Figura 4.3.- Distribución espacial de la población.

4.4 Situación actual

El sector de estudio antiguamente perteneció al Fundo El Manzano, de ahí es que proviene el nombre de la localidad. Posteriormente este fundo fue parcelado y paulatinamente han llegado familias a vivir, desde la llegada de las primeras familias al sector fueron abastecidas desde un antiguo pozo que se ubicaba en el fundo. El aumento de la población y en mayor medida la escasez de lluvia ha provocado que el nivel freático del sector haya disminuido considerablemente, según la información recopilada de los habitantes, el pozo no es capaz de funcionar de manera continua, por el contrario, su funcionamiento es irregular y por periodos menores a 15 minutos, abasteciendo a las casas más cercanas a su ubicación que son alrededor de 3 viviendas. Las casas que se encuentren en una cota mayor o más alejadas del pozo no alcanzan a recibir agua, esta condición se da días posterior a lluvias largas, ya que el resto del tiempo el pozo no funciona.

Esta situación provocó la necesidad de los pobladores de buscar otras fuentes de agua; según lo que estipula una de las vecinas del sector, las autoridades locales han anunciado medidas ante la problemática como lo es la extensión de la red urbana, la construcción de estanques elevados de hormigón (copas de agua), sin respuestas satisfactorias hace varios años.

Es por esto que se solicitó a la municipalidad el abastecimiento de agua potable al sector mediante camiones aljibe, previo a un catastro por medio de la asistencia social de la municipalidad acreditando la situación de escasez.

En la actualidad la población residente recibe agua potable de parte de la municipalidad mediante camiones aljibe una vez a la semana, el día que reciben el agua es el día sábado y el volumen entregado a cada habitante corresponde a 500 litros según la disposición de la municipalidad.

La localidad no posee ningún tipo de sistema comunitario, ya sea de almacenamiento o distribución de esta agua entregada, es por ello que cada familia tiene sus propios estanques acumuladores donde almacenan el agua traída por los camiones aljibe, en la mayoría de las parcelas tienen sus propios sistemas de conducciones cerradas para la distribución del agua hasta las viviendas impulsadas por bombas de baja potencia como se muestra en la *Figura 4.4.*



Figura 4.4.- Estanques acumuladores de agua ubicados en la zona de estudio.

Si bien la calidad del agua que se obtiene mediante los camiones aljibe es potable, es una tendencia dentro de la población que el uso sea destinado para un consumo doméstico de segundo orden, ya sea destinado a lavar, aseo, higiene, entre otros. Sin embargo, para bebida y cocina, los habitantes prefieren utilizar agua embotellada. Es por esta razón que el agua captada se considera que sea utilizada para usos domésticos secundarios.

Dado que el abastecimiento de agua funciona con la entrega de un caudal solidario, los 500 litros semanales por persona no dan abasto para cumplir con las necesidades básicas de consumo. Teniendo en cuenta que una persona utiliza alrededor de 125-200 litros diario. [30]

Pero para efectos de esta memoria, se considera las recomendaciones de la UNESCO sobre el consumo diario, que debiese ser más de 100 litros de agua por persona. [6]

CAPÍTULO V

5. Resultados

En esta sección del trabajo se procede a explicar y observar los resultados obtenidos para el análisis técnico y económico de las distintas alternativas presentes en la zona de estudio, como las variables que afectan de manera directa en los distintos cursos de acción de la investigación.

Para comprender de mejor manera los resultados obtenidos en la simulación, se procede a explicar las consideraciones y los datos duros utilizados para el procesamiento de la metodología y su posterior presentación de los resultados.

5.1 Análisis de disponibilidad de agua

5.1.1 Análisis meteorológico

Para la realización del análisis se considera utilizar los datos obtenidos desde los registros de la Dirección General de Aguas, específicamente los datos de las estaciones más cercanas a la zona de estudio que corresponde a las estaciones de Lago Peñuelas y Las Piedras. Ambas estaciones se encuentran en la Región de Valparaíso, además, se considera una ventana de 26 años de estadísticas desde el año 1991-2016. La información de las estaciones se presenta en la Tabla 5.1 y su ubicación se muestra en el mapa de la Figura 5.1.

Tabla 5.1.- Información Estaciones Meteorológicas.

Nombre Estación	Código BNA	Región	Comuna	UTM Norte	UTM Este
Las Piedras	05500001-8	Valparaíso	Quilpué	6328800	281295
Lago Peñuelas	05510002-0	Valparaíso	Valparaíso	6329353	261447



Figura 5.1.- Mapa referencial con estaciones meteorológicas.

La estación Las Piedras presenta lagunas de datos de precipitación. Por lo que se procede a generar un relleno de datos en base a la información de la estación Lago Peñuelas, que se escoge debido a su cercanía a la zona de estudio. Es por ello que se debe verificar si las estaciones son concordantes entre sí, para ver su correlación se aplica el método de la curva doble acumulada.



Gráfico 5.1.- Curva Doble Acumulada.

La curva doble acumulada tiene un buen ajuste debido a la correlación lineal con un $R = 0,998$ por lo que el relleno estadístico entre estas estaciones es factible dado que su comportamiento es concordante y no presenta variaciones en su pendiente por lo que no debe ser corregida.

5.1.2 Relleno estadístico

El análisis se basó en las precipitaciones anuales de cada estación en la cual se consideraron los años con información suficiente, mediante una regresión lineal se obtuvo que el ajuste entre los datos de ambas estaciones queda definido por la línea de tendencia la cual tiene la forma $Y = 0,714x - 0,8754$ siendo la variable X los datos de precipitación de la estación Lago Peñuela y la variable Y las precipitaciones de la estación Las Piedras con una correlación $R = 0,9033$.

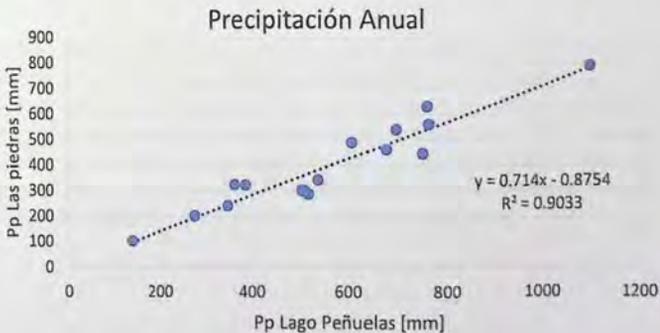


Gráfico 5.2.- Precipitación Anual Lago Peñuelas vs Las Piedras.

Los datos obtenidos para el relleno estadístico se presentan en la Tabla 5.2:

Tabla 5.2.- Precipitaciones Anuales con relleno estadístico.

Año	Pp Anual_Lago Peñuelas	Pp Anual_Las Piedras	Año	Pp Anual_Lago Peñuelas	Pp Anual_Las Piedras
1991	830,1	591,8	2004	696,4	542,3
1992	1097,5	790,3	2005	760,1	632,1
1993	518,2	287,5	2006	763,5	561,8
1994	525,9	374,6	2007	276,0	202,8
1995	447,7	318,8	2008	751,5	446,6
1996	515,7	367,3	2009	504,5	303,0
1997	1303,5	1022,3	2010	362,5	326,5
1998	137,9	104,3	2011	386,5	324,5
1999	606,8	491,0	2012	676	462,5
2000	942,5	672,1	2013	347,6	243,2
2001	868,1	618,9	2014	538,1	344,5
2002	1185,5	845,6	2015	676,8	482,3
2003	510,0	300,9	2016	436,0	310,4

Como se menciona en el capítulo de Metodología para el relleno mensual de los datos se usan dos metodologías distintas. La primera consiste en hacer el análisis por medio de regresiones lineales entre los datos de la estación patrón y la estación a rellenar. Una vez obtenido la correlación entre estos datos es que se genera la ecuación lineal que representa el comportamiento de los datos mes a mes y se genera los datos faltantes asociado al año correspondiente. Para poder tener un análisis de sensibilidad con respecto al relleno de la información se procede a utilizar la metodología de relleno por percentil, en la cual se busca a que percentil corresponde el dato que falta en la estación patrón y se aplica este mismo percentil en la serie de datos de la estación incompleta.

Tabla 5.3.- Tabla de precipitación de diseño según metodología de relleno estación Las Piedras.

Tipo de regresión	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Lineal	0.4	0.9	2.5	8.7	36.3	70.5	36.6	38.4	17.2	12.9	3.7	2.2
Percentil	0.3	0.8	2.2	8.5	29.6	67.2	39.2	37.1	20.6	10.5	2.8	2.4
Diferencia	20%	17%	10%	3%	9%	5%	7%	3%	13%	19%	24%	9%

En la Tabla 5.3 se muestra la variación de la precipitación de diseño para el 90% de probabilidad de excedencia con las dos metodologías, donde se puede apreciar que la diferencia no es considerable dado que las variaciones en los meses con mayor error porcentual no son superiores al milímetro. Esto se debe a que la mayoría de los datos en los meses de enero y febrero corresponden a valores cercanos al cero, lo que hace más susceptible que a pequeños cambios el error aumente considerablemente. Por lo tanto, se estima que para efectos de este trabajo de título el método de relleno de la información faltante no condiciona los resultados obtenidos.

5.1.3 Análisis de precipitaciones

Para comenzar con el análisis de precipitaciones, se considera la serie de datos anuales de la estación Las Piedras, se necesita obtener los estadígrafos de la serie de datos, correspondiente a la media aritmética y la desviación estándar de la muestra cómo se presenta en la Tabla 5.4:

Tabla 5.4.- Estadígrafos de la muestra.

Estadístico	Valor	Unidad
Media (\bar{x})	460,31	[mm]
Desviación estándar (S)	213,27	[mm]

Posteriormente, con los resultados de los estadísticos media y desviación estándar, se procede a ajustar las series anuales de precipitación anteriormente presentados. Para esto es preciso determinar los parámetros de las funciones consideradas.

5.1.4 Cálculo de la función de distribución Gumbel

Los parámetros d y μ se obtienen, en base a la media aritmética (\bar{x}) y la desviación estándar (S) de la muestra:

$$d = \frac{1}{0,7797 * S} ; \quad \mu = \bar{x} - 0,450047 * S \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Tabla 5.5.- Parámetros de Gumbel.

Parámetro	Valor
d	0,006014
u	364,33

Una vez determinados los parámetros de Gumbel, se debe ajustar la Función de Distribución de Probabilidad (FDP). Para esto, primero se debe ordenar la variable aleatoria en forma creciente, posteriormente se debe determinar la frecuencia observada acumulada $F_n(x)$ y la frecuencia teórica acumulada $F(x)$. Las frecuencias observadas se calculan de la siguiente manera:

$$F_n(x) = \frac{n}{N+1} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Donde:

$F_n(x)$ = Frecuencia Observada Acumulada.

n = Número del dato.

N = Número total de datos.

Por su parte, la frecuencia teórica acumulada de la función de Gumbel se obtiene a través de la siguiente expresión, donde se consideran los parámetros anteriormente calculados.

$$F(x) = e^{-e^{-d(x-\mu)}} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

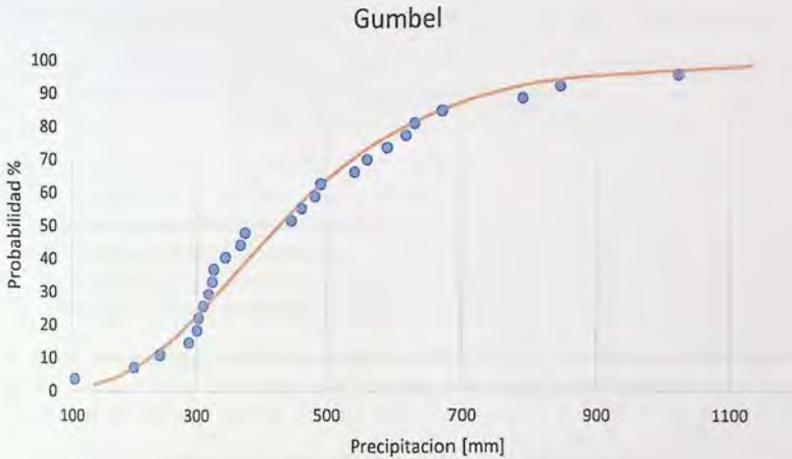


Gráfico 5.3.- Ajuste función de distribución de Gumbel.

Para terminar con el ajuste, es necesario comprobar su calidad, para esto se aplican 2 pruebas de bondad de ajuste la prueba de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de Coeficiente de Determinación (R^2).

El primero se calcula mediante la obtención del supremo de las diferencias, que consiste en determinar el valor absoluto de la máxima diferencia entre las frecuencias observadas y acumuladas. Esta diferencia se denomina por la letra D.

$$D = \text{Sup } |Fn(x)_i - F(x)_i| \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Donde:

D = Supremo de las diferencias.

$Fn(x)_i$ = Frecuencia observada acumulada.

$F(x)_i$ = Frecuencia teórica acumulada.

Una vez obtenido el supremo de las diferencias, se compara con el valor de la tabla Kolmogorov-Smirnov, este valor tabulado está en función de la cantidad de datos totales de la muestra y su nivel de confianza asumido en 95%.

Tabla 5.6.- Valores de la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Parámetro	Valor
D	0,091
Dt	0,259

Si el valor obtenido de la tabla K-S (D_t), (Anexo N°1) es mayor que el supremo de las diferencias (D), se puede aceptar la hipótesis que indicaría que se está en presencia de un buen ajuste con el nivel de confianza asumido.

$$D_t \geq D$$

Por otra parte, para calcular el Coeficiente de Determinación (R^2) se debe considerar la ecuación:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Fn(x)_i - F(x)_i)^2}{\sum(Fn(x)_i - \bar{Fn}(x))^2} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Donde:

R^2 = Coeficiente de determinación $0 \leq R^2 \leq 1$.

$Fn(x)_i$ = Frecuencia observada acumulada.

$F(x)_i$ = Frecuencia teórica acumulada.

$\bar{Fn}(x)$ = Media de las frecuencias observadas acumuladas.

El resultado de la prueba de coeficiente de determinación $R^2 = 0,977$ indica una buena correlación para el ajuste de la función de distribución de Gumbel. Se presenta tabla resumen con los parámetros de las pruebas de bondad de ajuste.

Tabla 5.7.- Tabla resumen con parámetros de prueba de bondad de ajuste Gumbel.

FDP	D	D_t	Ajuste K-S	Ajuste R^2
Gumbel	0,091	0,259	Se Acepta	0,977

Para encontrar el valor de la precipitación de diseño se debe estipular la probabilidad de excedencia con la que el sistema va a funcionar, para la cual la precipitación de diseño queda definida por:

$$P_{dis} = x = \mu - \left(\frac{\ln - \ln F(x)}{d} \right) \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Tabla 5.8.- Valor de la Precipitación de diseño Gumbel.

Pexc %	Pp Diseño [mm]
90	225,6

5.1.5 Cálculo de la función de distribución Goodrich

Para realizar el ajuste de la función de Goodrich se procede de manera similar al caso anterior. Primero se debe determinar los parámetros del ajuste.

El primer parámetro en obtener es "p", para esto es que se debe encontrar el valor de la función auxiliar de Goodrich ($P(p)$) y a su vez se debe calcular el valor del momento de tercer orden (m^3) que se define como:

$$m^3 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^3}{n} \quad \text{Ecuación 5.7}$$

Por lo tanto, el valor de la función auxiliar de Goodrich corresponde a $P(p) = 0,767$, de manera que con este valor se ingresa a la Tabla 0.1 y se interpola el valor de "p" siendo $p = 0,55$

El siguiente parámetro a calcular se encuentra en función de la varianza muestral (s^2) y la función Gamma (Γ) como se aprecie en su fórmula:

$$\alpha = (1/S^2 [\Gamma(2p + 1) - \Gamma^2(p + 1)])^{\frac{1}{2p}} \quad \text{Ecuación 5.8}$$

La función gamma se puede resolver o buscar su valor en Tabla 0.4, en la cual se entra a buscar el valor de la función resolviendo $(2p+1)$ y $(p+1)$

$$\Gamma(2p + 1) = \Gamma(2 * 0,55 + 1) = \Gamma(2,1) \quad \text{Ecuación 5.9}$$

$$\Gamma(p + 1) = \Gamma(0,55 + 1) = \Gamma(1,55) \quad \text{Ecuación 5.10}$$

La tabla de valores de función Gamma solo tiene valores tabulados desde 1 hasta 1,99, por lo que para encontrar el valor correspondiente a $\Gamma(2,1)$ debemos considerar la siguiente transformación:

$$\Gamma(p + m) = (p + m - 1)(p + m - 2)(p + m - 3) \dots (p + m - n) \Gamma(p) \quad \text{Ecuación 5.11}$$

Para el caso de $\Gamma(2,1) = (1,1 + 1 - 1) * \Gamma(1,1) = 1,1 * \Gamma(1,1)$, por lo que el valor a encontrar debe ser de $\Gamma(1,1) = 0,951$ y este multiplicado por 1,1 para obtener finalmente el valor deseado de $\Gamma(2,1) = 1,046$. Por ende, reemplazando estos valores se obtiene el valor de $\alpha = 1,72E-05$.

El último parámetro a determinar para el ajuste de Goodrich corresponde a $x_1 = \bar{x} - \frac{\Gamma(p+1)}{\alpha^p}$, y que obtiene un valor de $x_1 = 85$.

Tabla 5.9.- Parámetros de Goodrich.

Parámetro	Valor
p	0,55
α	1,72E-05
X1	85

Una vez determinados los parámetros de Goodrich, se debe ajustar la Función de Distribución. La frecuencia observada acumulada $F_n(x)$ se calcula de la misma manera que para Gumbel y la frecuencia teórica acumulada $F(x)$ definida como:

$$F(x) = 1 - e^{-\alpha^*(x-x_1)^{\frac{1}{\beta}}} \quad ; \quad x_1 < x < \infty \quad \text{Ecuación 5.12}$$

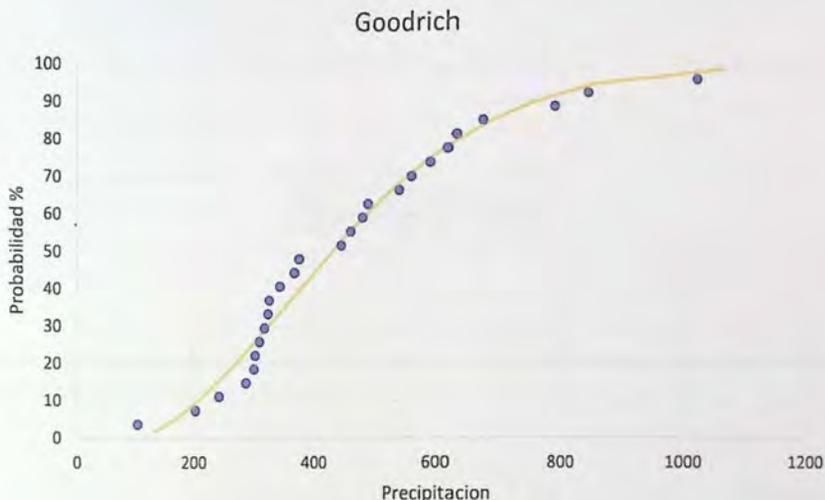


Gráfico 5.4.- Ajuste función de distribución de Goodrich.

Para saber si el ajuste es adecuado se realiza las mismas pruebas de bondad de ajuste, sus resultados son los siguientes:

Tabla 5.10.- Tabla resumen con parámetros de prueba de bondad de ajuste Goodrich.

FDP	D	Dt	Ajuste K-S	Ajuste R^2
Goodrich	0,085	0,259	Se Acepta	0,977

El valor de la precipitación de diseño queda en función de la probabilidad de excedencia con la que el sistema va a funcionar, para la cual la precipitación de diseño queda definida por:

$$P_{dis} = x = x_1 + \frac{1}{\alpha^p} [-\ln(1 - F(x))]^p \quad \text{Ecuación 5.13}$$

Tabla 5.11.- Valor de la Precipitación de diseño Goodrich.

Pexc %	Pp Diseño [mm]
90	207,4

5.1.6 Cálculo de la función de distribución Log-Normal

Para el cálculo de la función de distribución de probabilidad se requiere los parámetros α y β que basan en logaritmos de la variable aleatoria y son definidos de la siguiente manera:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n} \tag{Ecuación 5.14}$$

$$\beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - \alpha)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{Ecuación 5.15}$$

Los valores de los parámetros se presentan en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12.- Parámetros Log-normal.

Parámetro	Valor
α	6,025
β	0,4817

Debido a la complejidad de la función de distribución de probabilidad log-normal, es que se considera estandarizar la expresión en una variable "z".

$$F(x) = \frac{1}{2\pi x \beta} \int_0^x e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta} \right)^2} dx \tag{Ecuación 5.16}$$

$$z = \frac{\ln x_i - \alpha}{\beta} \tag{Ecuación 5.17}$$

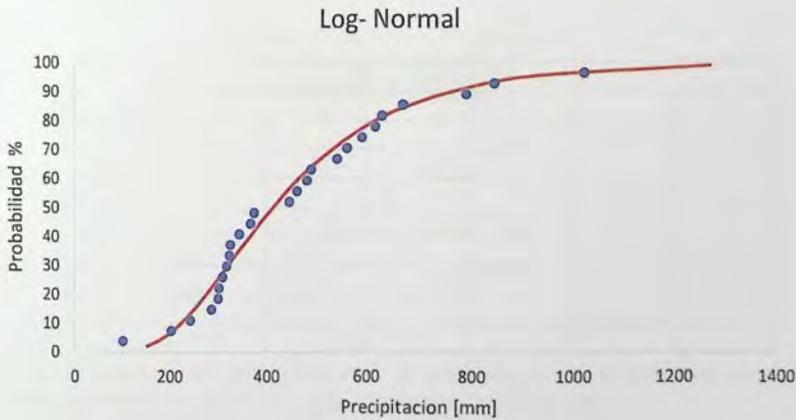


Gráfico 5.5.- Ajuste función de distribución de Log-Normal.

Con esta variable ya definida se ingresa a las tablas de probabilidad Normal o de Gauss y se obtiene el valor correspondiente a la frecuencia teórica $F(x)$. De la misma manera que en los ajustes de distribución anteriores se realizan las mismas pruebas de bondad de ajuste ya definidas anteriormente.

Tabla 5.13.- Tabla resumen con parámetros de prueba de bondad de ajuste Log-normal.

FDP	D	Dt	Ajuste K-S	Ajuste R^2
Log-normal	0,0784	0,259	Se Acepta	0,997

Para encontrar la precipitación de diseño, se necesita ingresar a la tabla de probabilidad normal para obtener el valor de la variable estandarizada "z" por lo que ingresando el valor de la probabilidad de ocurrencia encontramos el valor de "z" y reemplazada en la siguiente expresión se obtiene el valor de la precipitación de diseño.

$$P_{dis} = X = e^{\beta \cdot z + \alpha} \quad \text{Ecuación 5.18}$$

Tabla 5.14.- Valor de la Precipitación de diseño Log-normal.

Pexc %	Pp Diseño [mm]
90	223,1

5.1.7 Cálculo de la función de distribución Pearson tipo III

Los parámetros necesarios para ajustar la distribución Pearson tipo III, son:

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}} \quad ; \quad \beta = \left(\frac{2}{Y}\right)^2 \quad ; \quad \delta = \bar{x} - \alpha\beta \quad ; \quad Y = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3 / n}{S^3}$$

Tabla 5.15.- Parámetros de Pearson tipo III.

Parámetro	Valor
Y	0,77
α	81,80
β	6,80
δ	-95,74

Para resolver de manera más sencilla la función, se utiliza una variable estandarizada para poder obtener el valor de X^2 e ingresar a la tabla de chi cuadrado con este valor.

$$\gamma = \frac{x - \delta}{\alpha} \quad \text{Ecuación 5.19}$$

$$x^2 = 2 * \gamma \quad ; \quad \mu = 2 * \beta$$

Ecuación 5.20

$$x = \gamma * \alpha + \delta$$

Ecuación 5.21

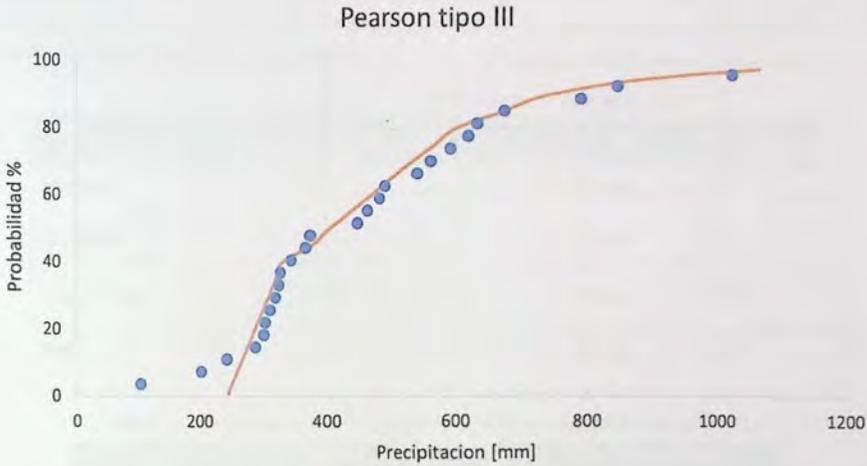


Gráfico 5.6.- Ajuste función de distribución de Pearson tipo III.

Los resultados de las pruebas de bondad de ajuste se presentan en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16.- Tabla resumen con parámetros de prueba de bondad de ajuste Pearson tipo III.

FDP	D	Dt	Ajuste K-S	Ajuste R^2
Pearson tipo III	0,128	0,259	Se Acepta	0,964

Para encontrar la precipitación de diseño, se necesita ingresar a la tabla de probabilidad chi cuadrado para obtener el valor de la variable, por lo que ingresando el valor de la probabilidad de ocurrencia encontramos el valor de " x^2 " y reemplazada en la expresión se obtiene el valor de la precipitación de diseño.

Tabla 5.17.- Valor de la Precipitación de diseño Pearson tipo III.

Pexc %	Pp Diseño [mm]
90	265,1

5.1.8 Resumen del análisis estadístico.

En base a la metodología ya presentada del análisis estocástico de precipitaciones arroja como resultado que la función de distribución de probabilidades que mejor se ajustó a la serie de datos de precipitación es la función Log Normal, como se puede apreciar en la Tabla 5.18 el test de Kolmogorov- Smirnov acepta el ajuste de todas las funciones y siendo el mejor ajuste para la función Log-Normal según el test de correlación.

Tabla 5.18.- Tabla resumen con resultados de prueba de bondad.

FDP	D	Dt	Ajuste K-S	Ajuste R^2
Gumbel	0,075	0,259	Se Acepta	0,986
Goodrich	0,085	0,259	Se Acepta	0,977
Log-Normal	0,078	0,259	Se Acepta	0,997 *
Pearson III	0,128	0,259	Se Acepta	0,964

Tabla 5.19.- Tabla resumen de precipitación al 90% de probabilidad excedencia.

FDP	Pexc %	Pp Diseño [mm]	Diferencia %
Gumbel	90	225,6	1,1%
Goodrich	90	207,4	-7,0 %
Log-Normal	90	223,1	-
Pearson tipo III	90	265,1	18,8 %

Si bien la función Log- Normal es la que se ajusta de mejor manera, ninguna de las funciones restantes fue rechazada y su coeficiente de correlación cuadrado es muy cercano entre sí como se aprecia en Tabla 5.18. La diferencia entre el valor de precipitación de diseño elegida y las asociadas a las otras FDP se puede observar en la Tabla 5.19.

En base a la precipitación de diseño elegida para el 90% de probabilidad de excedencia y mediante regresión lineal es que se conforma el Gráfico 5.7 de precipitación a nivel mensual.

Precipitación de diseño Log- Normal

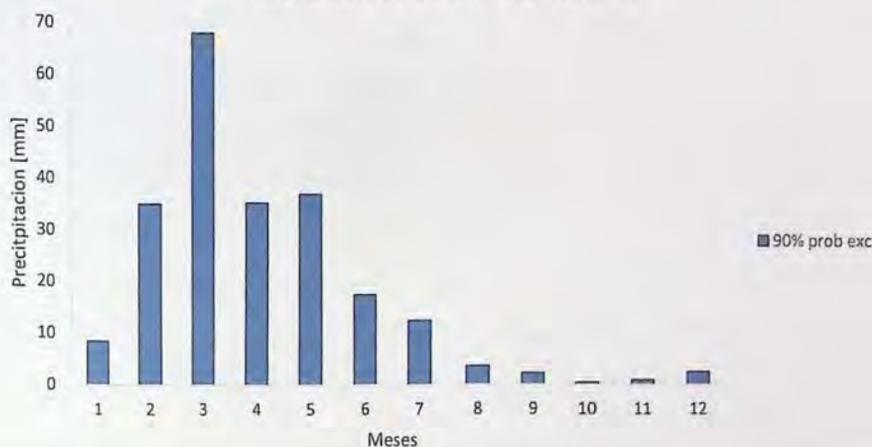


Gráfico 5.7.- Precipitación mensual asociada a probabilidad de excedencia del ajuste Log- Normal.

Por lo tanto, se logra obtener los posibles volúmenes captables en base a la precipitación de diseño para el ajuste de función de distribución Log-Normal que corresponde a una precipitación de diseño anual de 223,1 mm.

5.2 Demanda de agua

Para establecer un valor de demanda de agua, se considera el estudio "Domestic Water Quantity, Service Level and Health" que define que el acceso óptimo al suministro de agua de manera continua y que su consumo cubre todas las necesidades básicas y de higiene. Corresponde a un caudal de 100 [lt/persona/día] o superior, garantizando un nivel adecuado y sin riesgos para la salud.

Por lo tanto, y de acuerdo a la situación actual del sector se debe suplir la diferencia que se produce entre la entrega de agua por parte de la municipalidad (71,5 lt/per/día) y el valor adoptado como acceso óptimo al recurso (100 lt/per/día). Lo que significa aumentar la disponibilidad de agua en por lo menos 28,5 [lt/persona/día].

Es necesario establecer y conocer la disposición final del recurso captado por el sistema, por lo que para definir este parámetro se considera que el agua de lluvia sin ningún tipo de tratamiento puede cumplir perfectamente las condiciones de consumo doméstico de segunda necesidad, dentro de los usos establecidos dentro de esta categoría se encuentra la descarga de inodoro, uso para el lavado de ropa y limpieza de otro tipo de superficies. Estos ítems son los que más recurso utilizan dentro de la distribución del consumo de agua en el hogar como se puede apreciar en la Figura 5.2. [22]

Consumo de agua en el hogar

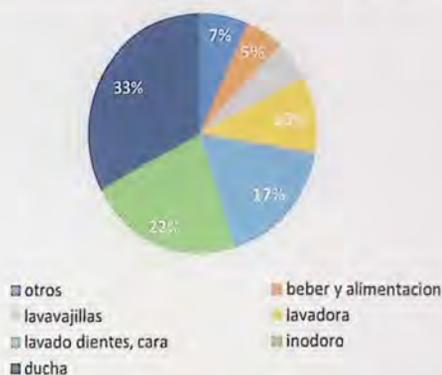


Figura 5.2.- Distribución de consumo en el hogar. [22]

Teniendo en cuenta este factor y los beneficios que implica cumplir con esta demanda, se considera utilizar el agua captada por el sistema para la descarga de inodoros, que su consumo llega al 22% del agua total consumida dentro del hogar.

En base a los catálogos de especificaciones técnicas de un inodoro (Anexo 2) se asume que los estanques tienen una capacidad de 6 litros, además se considera que una persona tira la cadena 6 veces al día debido a una encuesta realizada entre algunos de los habitantes del sector. Por lo tanto, el agua destinada al uso de inodoro por persona diariamente corresponde a 36 litros, lo que se traduce a un consumo mensual de 1080 litros per cápita.

Si el sistema es capaz de cumplir con esta demanda de volumen mensualmente, significa que aumentaría la disponibilidad de agua en un 50.4% con respecto a la actual cantidad de agua que entrega el abastecimiento con camiones aljibe, esto quiere decir que cada mes que cumpla la demanda per cápita de 1080 litros el SCALL's está entregando la mitad de agua más de lo que entrega el camión aljibe.

Si el análisis se lleva a los volúmenes diarios según la disponibilidad de cada mes, en el *Gráfico 5.8* se observa una simulación utilizando la precipitación de diseño del 90% de probabilidad de excedencia, para la configuración de 110 metros cuadrados de superficie de captación y para dos personas viviendo por casa. En color azul se grafica el valor diario definido por la OMS como un volumen de agua óptimo para el consumo que corresponde a 100 litros diarios, En color rojo el volumen que entrega el municipio mediante camiones aljibe que corresponde a 71,43 litros diarios, y en la curva de color verde son los volúmenes del sistema complementario mes a mes según la cantidad de agua acumulada. Por lo tanto, se observa que para un sistema de dos personas y 110 m^2 de superficie de techo se cumple con la demanda asignada de inodoros al 100% durante 7 meses del año periodo de junio a diciembre, una vez que llega el mes de febrero el sistema ya no tiene agua acumulada por lo que solo queda con el agua entregada por los camiones.

Sistema Mixto

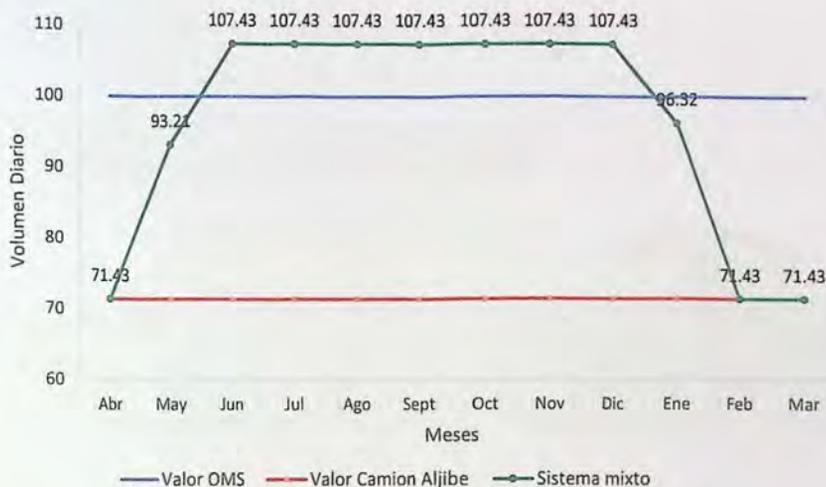


Gráfico 5.8- Simulación del funcionamiento del sistema mixto.

Por lo tanto, la demanda se define de manera constante y mensual de 1080 litros por persona. Con este apartado se cumple el primer objetivo específico de esta memoria que corresponde hacer la evaluación hidrológica del sector y estimar el agua potencialmente captable y la demanda.

5.3 Diseño del sistema

Para diseñar el layout del sistema y proyectar un adecuado funcionamiento de los sistemas de captación y acumulación de aguas lluvias, se define la variable del rango de funcionamiento en un 90% de la probabilidad de excedencia, esto quiere decir que la precipitación de diseño con la cual se proyecte el sistema cumplirá con el 90% del tiempo de la vida útil del proyecto. Este parámetro asegura el funcionamiento durante la mayor parte de la vida útil del sistema. Por lo que las dimensiones especificadas en este capítulo están conformadas bajo este criterio para su posterior evaluación.

5.3.1 Diseño de la zona de captación

Para la implementación de la zona de captación del agua lluvia y en base a consideraciones para optimizar los recursos materiales y económicos, es que se plantea que el sistema utilice la estructura de las techumbres de las casas como superficie de captación.



Figura 5.3.- Esquema del SCALL's. (fuente Natzone.org)

Debido a la configuración del tipo de casas en el sector de estudio, hay techumbres que varían su materialidad y extensión. Para unificar criterios tanto de materialidad como de extensión es que en base a imágenes satelitales se determina las distintas dimensiones y materialidades de techumbres. Donde la mayor parte de las techumbres del sector corresponden a materiales impermeables como lo son planchas metálicas, tejas asfálticas, hormigón y en casos puntuales tejados.

En base a los datos de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los materiales impermeables como son los techos metálicos, de tejas asfálticas y hormigón armado tienen un mismo coeficiente de escorrentía que corresponde a 0,9 por lo que la diferencia de materialidad en el cálculo del agua potencialmente acumulable no influye, no así la superficie de techo que tiene una influencia directa en el volumen de agua a captar.

Para procesar la información, es que a través de imágenes satelitales se obtuvieron las dimensiones de las superficies de techos. Como se muestra en el esquema de la Figura 5.4 y los valores en la Tabla 5.20.



Figura 5.4.- Esquema de parcelación del sector en estudio.

Tabla 5.20.- Valores de superficie de techo.

Lote N°	Superficie de techo [m ²]	Perímetro [m]	Lote N°	Superficie de techo [m ²]	Perímetro [m]
1	238 ± 11,9	79 ± 3,1	9	92 ± 4,6	54 ± 2,2
2	108 ± 5,4	53 ± 2,1	10	267 ± 13,3	100 ± 4
3	147 ± 7,4	57 ± 2,3	11	113 ± 5,7	43 ± 1,7
4	149 ± 7,5	63 ± 2,5	12	121 ± 6	48 ± 1,9
5	116 ± 5,8	53 ± 2,1	13	109 ± 5,5	46 ± 1,8
6	173 ± 8,7	55 ± 2,2	14	62 ± 3,1	33 ± 1,3
7	175 ± 8,8	70 ± 2,8	15	120 ± 6	46 ± 1,8
8	112 ± 5,6	42 ± 1,7	16	201 ± 10	91 ± 3,6

Para efectos del análisis se considera aproximaciones a dimensiones representativas con la finalidad de realizar la evaluación de diversas alternativas. Se considera las dimensiones 110, 130, 150 y 170 metros cuadrados.

Agua Potencialmente Acumulable

En base a los datos de la precipitación de diseño y los parámetros mencionados anteriormente, el volumen de agua potencialmente acumulable queda definida por la Ecuación 3.24 en función de las distintas superficies de captación consideradas como se muestra en la siguiente gráfica.

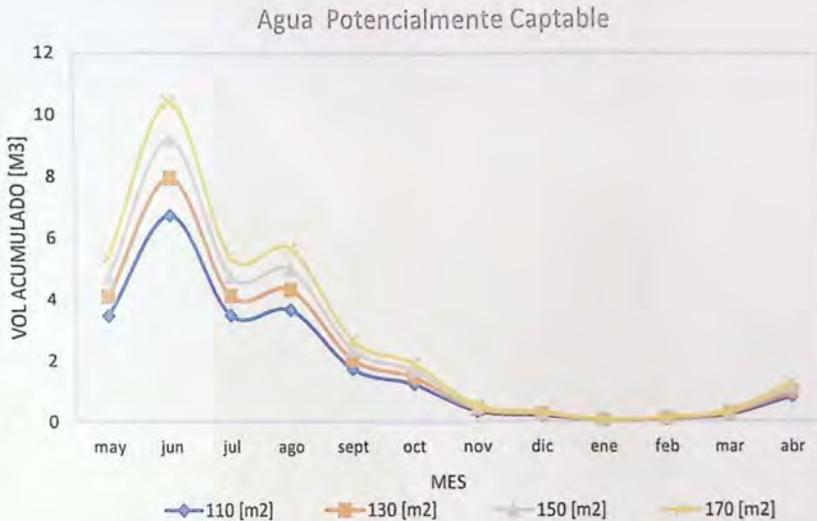


Gráfico 5.9.- Agua potencialmente acumulable según superficie de techo para Pexc 90%.

Anualmente se puede llegar a captar desde 22 m^3 a 34 m^3 de agua por vivienda, según la extensión de la zona de captación que corresponda, siendo 110 m^2 y 170 m^2 respectivamente, para una precipitación anual de $223,1 \text{ [mm]}$ correspondiente a la precipitación de diseño del 90% de la probabilidad de excedencia.

5.3.2 Diseño de la zona de conducción

La zona de conducción será conformada por redes de canaletas y tuberías que conducirán el agua captada por los techos hasta un estanque de acumulación, además de agregar mallas para evitar que residuos de mayor tamaño como hojas y piedras obstruyan la circulación del agua captada como se aprecia en la Figura 5.5. Dentro de la zona de la conducción se contempla la utilización de un filtro para mejorar la calidad del agua, evitando la entrada de elemento a los estanques de acumulación como insectos, arañas, tierra, hojas, entre otros elementos que la primera malla en las canaletas no fuese capaz de retener.

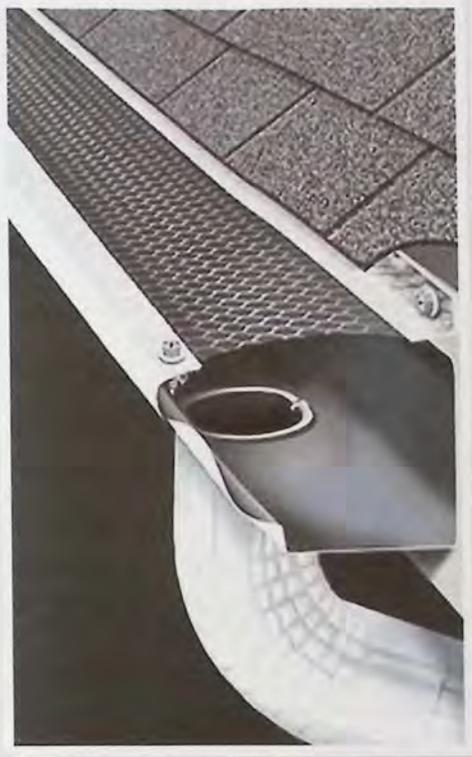


Figura 5.5.- Esquema de la conducción con malla protectora.

Al igual que en la zona de captación, las variaciones en la superficie de los techos y las diferentes configuraciones genera múltiples medidas de perímetro entre las viviendas. Por lo que hace difícil establecer generalidades para unificar los criterios de diseño. Es por esta razón que se considera valores fijos de perímetros asociados a cada superficie de techo, lo que implica que los costos asociados a la materialidad de este ítem serán fijos para efectos del análisis.

5.3.3 Diseño de la zona de acumulación

Para la zona de acumulación se utiliza depósitos de polietileno de alta densidad, la dimensión de los estanques dependerá de la capacidad de volumen que se desea acumular. El depósito debe ser ubicado en una superficie compacta y nivelada para evitar deformaciones innecesarias al momento de ser llenados, es por esta razón que se contempla un emplantillado de hormigón de 5 centímetros de espesor. Además, se contempla la confección de un terraplén de 55 cm, debido que la toma de agua de los inodoros generalmente fluctúa entre 20 y 50 centímetros de altura. Esta consideración de diseño tiene la finalidad que el sistema funcione totalmente por gravedad, de lo contrario el sistema debería ser impulsado por algún sistema mecánico que impulse el agua hasta los artefactos, lo que incrementaría los costos asociados al funcionamiento del sistema.



Figura 5.6.- Esquema de la zona de acumulación.

El principal criterio de diseño para determinar las dimensiones de la zona de acumulación y su capacidad corresponde en primera instancia de disponer del agua captada necesaria para satisfacer la demanda estimada de inodoros durante la mayor cantidad de meses posible. En caso de exceso de agua comparado con la demanda, la capacidad de los estanques acumuladores se limita a lo necesario. Por lo que según cada configuración de oferta/demanda se asocia una capacidad distinta de volumen del acumulador como se muestra en la Tabla 5.21:

Tabla 5.21.- Dimensiones de los acumuladores.

Configuración					
Techo	2 personas	3 personas	4 personas	5 personas	6 personas
110 m ²	10 m ³	5 m ³	3 m ³	3 m ³	3 m ³
130 m ²	15 m ³	7.5 m ³	5 m ³	3 m ³	3 m ³
150 m ²	10 m ³	10 m ³	7.5 m ³	5 m ³	3 m ³
170 m ²	10 m ³	15 m ³	10 m ³	7.5 m ³	5 m ³

5.3.4 Verificación de aplastamiento del emplantillado

Para evitar que el emplantillado de hormigón falle por aplastamiento, se debe verificar que la tensión producida por el peso del volumen de agua contenido en el estanque sea menor que la resistencia admisible del concreto. Según el reglamento de requisitos para el concreto estructural (conocido como ACI 318S-11) el concreto tiene un esfuerzo de resistencia al aplastamiento de $0,85 \cdot f'c$, donde $f'c$ corresponde a la resistencia de compresión por unidad de área.

Capacidad > Demanda

$$0,85 \cdot f'c > \frac{\text{Peso}}{\text{Área}} \quad \text{Ecuación 5.22}$$

Para el caso más desfavorable, que considera un estanque de 40 metros cúbicos, el peso ejercido por el volumen acumulado corresponde a 40 toneladas y las dimensiones de área transversal del estanque cilíndrico corresponde a un diámetro de 350 centímetros.

$$\text{Área} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad \text{Ecuación 5.23}$$

$$\text{Área} = \frac{\pi \cdot 3,5^2}{4} = 9,62 \text{ [m}^2\text{]}$$

La tensión mecánica uniaxial queda definida por:

$$\sigma = \frac{\text{Peso}}{\text{Área}} = \frac{40 \text{ [ton]}}{9,62 \text{ [m}^2\text{]}} = 4,16 \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right] = 0,42 \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \quad \text{Ecuación 5.24}$$

$$0,85 \cdot f'c > 0,42 \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

Por lo tanto, la resistencia específica $f'c$ de concreto debe ser mayor que $0,5 \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$.

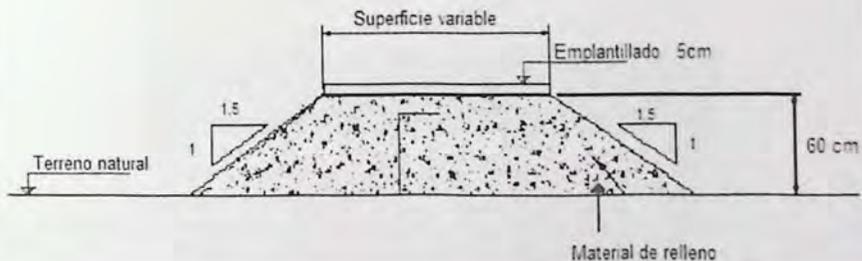


Figura 5.7.- Esquema de terraplén.

5.3.5 Presupuesto de obras

Para realizar un presupuesto de manera ordenada y clara, es que se subdivide por ítem de las zonas a construir y su detalle. Es importante establecer que los precios referenciados corresponden a los precios que se encuentran actualmente en el mercado y que eventualmente pueden presentar variaciones según el proveedor. Ya se ha mencionado que los hogares presentan distintas configuraciones en sus construcciones, por lo que debemos establecer ciertas suposiciones que permitan definir el presupuesto.

- Las casas son de dos pisos, por lo que se considera que la altura es de 6 metros.
- Se considera que los techos tienen dos caídas de agua.
- Para la superficie de 110 metros cuadrados se considera un perímetro de 55 metros.
- Para la superficie de 130 metros cuadrados se considera un perímetro de 60 metros.
- Para la superficie de 150 metros cuadrados se considera un perímetro de 65 metros.
- Para la superficie de 170 metros cuadrados se considera un perímetro de 75 metros.
- La excavación se considera manual en Terreno de Cualquiera Naturaleza (TCN).
- La resistencia del hormigón del emplantillado cumple con la verificación de aplastamiento.

5.3.6 Costos de materiales

Listado de precios:

Tabla 5.22.- Lista de precios para la conducción.

Zona de conducción	
Material	Precio unitario
Canaleta PVC 4 [m] blanco	\$ 4.387
Tubo de bajada 3 [m] blanco	\$ 2.898
Esquinero	\$ 1.745
Codo de bajada	\$ 1.714
Unión bajada	\$ 2.218
Tapas	\$ 225
Uniones de canaletas	\$ 800
Filtro	\$ 20.000
Ganchos de soporte	\$ 732
Copla tubo de bajada	\$ 1.152
Abrazadera de tubo de bajada	\$ 473

Tabla 5.23.- Lista de precios para construcción del terraplén.

Terraplén	
Material	Precio unitario
Excavación tierra m ³	\$ 12.000
Arriendo compactador manual 4 [hrs]	\$ 4.868
Arriendo betonera 4 [hrs]	\$ 4.793
Gravilla m ³	\$ 6.000
Arena m ³	\$ 8.000
Cemento 25 kg Bio Bio	\$ 3.580

*Los precios corresponden a los proveedores ferreteros comerciales, en base al manual de precios ONDAC y el catálogo de precios 2018 de Vinilit.

A continuación, se presenta el presupuesto correspondiente a los costos fijos del análisis económico de la alternativa más común en la zona de estudio que corresponde a la zona de captación de 110 metros cuadrados de techo. Los demás costos asociados a las otras alternativas presentadas se pueden apreciar en el Anexo 3.

Tabla 5.24.- Presupuesto de detalle para alternativa de 110 m² de techo.

Para 110 m ²				
Ítem	Precio unitario	Cantidad	Unidad	Precio
Zona de conducción				
Perímetro considerado		55	m ²	
Esquineros	\$ 1.745	4	Unid	\$ 6.980
Tapas	\$ 225	2	Unid	\$ 450
Unión de bajada	\$ 2.218	2	Unid	\$ 4.436
Tubo de bajada 3 [m]	\$ 2.898	6	Unid	\$ 17.388
Canaleta PVC 4 [m]	\$ 4.387	14	Unid	\$ 61.418
Ganchos	\$ 732	56	Unid	\$ 40.992
Filtro	\$ 20.000	1	Unid	\$ 20.000
Codo de bajada	\$ 1.714	2	Unid	\$ 3.428
Uniones de canaleta	\$ 800	13	Unid	\$ 10.400
Abrazadera de tubo	\$ 473	12	Unid	\$ 5.676
Llave de bola doble	\$ 20.347	2	Unid	\$ 40.694
TERRAPLEN				
Gravilla	\$ 12.000	0,5	m ³	\$ 6.000
Arena	\$ 16.000	0,5	m ³	\$ 8.000
Cemento 25 [kg] Bio Bio	\$ 3.580	6	Sacos	\$ 21.480
Arriendo compactador	\$ 4.868	4	Hrs	\$ 19.472
Arriendo betonera 4 hrs	\$ 4.793	4	Hrs	\$ 19.172
COSTO TOTAL				\$ 285.986

Dentro de los costos variables del sistema corresponde a la zona de acumulación, que dependerá de los volúmenes de agua que se quiera almacenar, además de otros factores como el financiamiento de las obras. Por lo tanto, el volumen del acumulador será una de las variables a considerar en las diversas alternativas y configuraciones de los sistemas a implementar.

Lista de precios de estanques acumuladores

Tabla 5.25.- Lista de precios de estanques acumuladores.

Estanques acumuladores	
Volumen de estanque	Precio unitario
3 m ³	\$ 303.190
5 m ³	\$ 457.990
7.5 m ³	\$ 569.800
10 m ³	\$ 1.809.350
15 m ³	\$ 1.969.990
20 m ³	\$ 3.317.400
30 m ³	\$ 4.550.000
35 m ³	\$ 5.310.870

*Los precios corresponden al proveedor infraplast.

5.3.7 Costos de construcción

Para poder cuantificar el costo de construcción e implementación del sistema de captación de aguas lluvias, es necesario definir la metodología de trabajo. Debido a que el enfoque de la memoria está apuntado hacia sistemas unifamiliares, se considera que una cuadrilla conformada por 3 personas que llevará a cabo la labor de implementar el proyecto.

Los gastos de construcción son considerados para la implementación del sistema para una sola vivienda y dentro de estos costos se considera el arriendo de herramientas, traslado de material y la mano de obra.

Para conformar la cuadrilla se contempla a un maestro primera de gasfitería y dos ayudantes jornales de construcción, dentro de las funciones a realizar se encuentra la excavación de 6 metros cúbicos de terreno de cualquier naturaleza (TCN) con un rendimiento teórico de 4 cubos en una jornada por jornal, además el relleno y compactación del terraplén en capas de 30 centímetros con compactador manual cada jornal tiene un rendimiento de 8 cubos en una jornada de 8 horas. Para el emplantillado de espesor 5 centímetros incluyendo la confección manual del hormigón y su acarreo a menos de 10 metros del lugar, un jornal tiene un rendimiento de 2,08 metros cúbicos en una jornada de 8 horas.

Para obtener el rendimiento de la instalación del sistema de canaletas y tuberías, se considera el rendimiento de la instalación de agua potable de tuberías de 75 milímetros, en la cual un maestro primero más un ayudante tienen un rendimiento teórico de 44 metros lineales de instalación y prueba del sistema. [31]

En base a estos rendimientos es que se considera que la cuadrilla de un maestro primera y dos jornales pueden desempeñar la construcción en 3 jornadas de 8 horas.

Tabla 5.26.- Costos de construcción.

Ítem	Precio unitario	Cantidad	Unidad	Precio
Arriendo compactador manual	\$ 4.868	4	Hrs	\$ 19.472
Arriendo betonera	\$ 4.793	4	Hrs	\$ 19.172
Transporte de áridos	\$ 7.000	1	Viajes	\$ 7.000
Maestro 1° Gasfitero	\$ 4.933	24	Hrs	\$ 118.392
Jornal en construcción	\$ 3.509	48	Hrs	\$ 168.432
			COSTO TOTAL	\$ 332.468

Por lo tanto, los costos fijos para construir el sistema de captación de aguas lluvias considerando materiales y construcción corresponden a:

Tabla 5.27.- Costos fijos del sistema.

Alternativa de captación	
Superficie de techo	Costo fijo
110 m ²	\$ 618.454
130 m ²	\$ 624.399
150 m ²	\$ 650.229
170 m ²	\$ 653.659

5.4 Evaluación económica

5.4.1 Costos del sistema actual de reparto de agua

Como se mencionó previamente. Actualmente en la zona de estudio la población es abastecida de agua potable mediante camiones aljibe. Estos camiones aljibe son proporcionados por la Municipalidad de Quilpué, que previamente son solicitados por los mismos habitantes afectados, posteriormente son evaluados por la asistencia social municipal que acredita la condición de falta de agua en el sector y es el Departamento de Operativa el encargado de despachar y distribuir el agua potable.

Para poder establecer el costo asociado de llevar agua a estas zonas que no poseen una red de distribución del recurso, es necesario considerar todos los gastos que incurre la municipalidad para hacer posible esta acción.

Primeramente, se debe considerar el costo del camión aljibe para esto se considera un ítem de arriendo que su valor asciende a los \$2.7 millones de pesos mensuales más IVA según lo consultado al proveedor, dentro del costo total se considera un ítem por mantención que lo considera como un 12% del valor del ítem de arriendo, por lo tanto, solo por disponer del camión el valor corresponde a 3.671.816 pesos. Además, para llevar el agua a las distintas zonas se debe contratar un chofer y dos peonetas por camión según lo estipula el encargado de operativa de la municipalidad, los valores respecto a los sueldos que se manejan corresponden a \$700.000 pesos para choferes y \$300.000 pesos para peonetas, estos valores incluyen el 33% por concepto de leyes sociales.

Para certificar la calidad del agua según lo establece la normativa vigente "Requisitos de calidad del agua para diferentes usos" NCH1333 de 1978, es que la municipalidad compra el agua a la empresa sanitaria ESVAL. La sanitaria cobra \$729,28 pesos por metro cúbico de agua más el cargo fijo según lo establece la tarifa 2017 de la *Figura 5.8*.

ESVAL S.A.			
Diario de publicación:		El Mostrador.cl	
Fecha de publicación:		12-Ene-17	
Fecha de vigencia:		12-Ene-17	
Grupo tarifario:		1	
Localidades:		Valparaíso, Quilpué, Villa Alemana, Viña del Mar, Renca, Con Con, Pudahuel, Peñuelas, Curacautín y Casablanca.	
Cargos	Valores	Cargos	Valores
Cargo fijo cliente (\$/mes)	1.114	Corre (\$/evento)	
Variables (\$/m ³)		Visita de corte	4.421
Agua Potable con fluor no punta	729,28	Primera instancia	4.447
Alcantarado no punta y punta	547,89	Segunda instancia	4.888
Agua Potable con fluor punta	730,97	Reposición (\$/evento)	
Sobreconsumo agua potable con fluor punta	1.586,99	Primera instancia	4.474
Otros cobros (\$/mes)		Segunda instancia	4.230
Grifos	1.655	Control de Riles (\$/evento)	
Aportes financiamiento reembolsable (\$/m ³)		Batch	106.428
Producción de Agua Potable con fluor	748,00	8 horas	107.702
Distribución de Agua Potable	1.706,12	12 horas	204.040
Rectificación de Agua Servidas	1.254,09	24 horas	248.511
Disposición con trat. de Agua Servidas	100,03	grupo 1	0
Verificación de medidores (\$/evento)		grupo 2	9.800
15 mm	18.284	grupo 3	9.150
19 mm	14.312	grupo 4	8.000
25 mm	12.395	grupo 5	5.076
38 mm	12.281	grupo 6	10.294
50 mm	112.621	grupo 7	10.150
60 mm	115.924	costo administ.	10.391
100 mm	136.652	Cobro por revisión de proyectos	
150 mm	200.548	para \$11.156.536,1 - a \$223.130.726	1,15% de Inv
		Para I < 0 - a \$11.156.536	156.240
		Para I > 0 - a \$223.130.726	3.104.844
		Serv. Producción de AP Intermediario Inv. Norte Mar	
		producción agua potable no punta	236,30
		producción agua potable punta	236,30
		producción agua potable sobreconsumo	305,51

Figura 5.8.- Tarifa ESVAL para el año 2017.

El último ítem a considerar es el combustible, los camiones aljibe son petroleros por lo que consumen Diesel según "el sistema de información en línea de precios de combustibles en estaciones de servicio" establece que para la zona de Quilpué el valor del combustible corresponde \$520 pesos más IVA. Además, según el registro de la municipalidad los camiones gastan alrededor de 1182 litros de combustible mensual.

Finalmente, con los antecedentes recabados se estima los costos totales mensuales que incurre la municipalidad para llevar el recurso y se divide por la cantidad de agua entregada para obtener el precio del metro cúbico de agua entregada, que corresponde a \$11.594 [CPL/m³].

Este valor es un promedio obtenido en base a la información disponible, que esta susceptible a cambios según otros parámetros que complican la estimación de este valor como lo es la distancia que deben recorrer para abastecer, los camiones utilizados para realizar esta entrega de agua, la fluctuación del precio de los combustibles, entre otros.

5.4.2 Análisis costo beneficio

El análisis de costo beneficio es empleado como herramienta para medir la rentabilidad de la inversión de un proyecto, mide la relación de flujos entre los costos y los beneficios económicos de la propuesta. Para el análisis se considera una tasa social de descuento del 6% según lo estipulado por la División de Evaluación Social de Inversiones del Ministerio de Desarrollo Social (MIDESO) en sus cursos de capacitación para la preparación y evaluación social de proyectos [32]. Además, para los proyectos de ingeniería, la proyección de la vida útil se estima de 15 años.

El principal costo del sistema corresponde a la inversión inicial debido a los costos de construcción y materialidad estipulado en los presupuestos detallados anteriormente, además se considera un ítem de mantenimiento ya sea con el fin de reparar o cambiar piezas rotas o simplemente por concepto de limpieza anual. Este valor adoptado corresponde a un monto de \$50.000 pesos chilenos anuales, no se considera un monto mayor debido que la limpieza del sistema no contempla mayor dificultad y el valor adoptado es para el cambio de alguna pieza que se pudiese romper.

Como principal beneficio económico del sistema es el valor que se le da al agua captada, este valor se asume igual al costo marginal de abastecer de agua potable la zona de estudio, el cual se estimó en \$11.594 pesos. Este valor se puede estimar de distintas formas según los parámetros y consideraciones que se pueden valorizar de llevar agua extra a un lugar de escasez y a su vez de que tan profundo es el análisis para dar el valor de disponer del agua. Ya que el agua mejora sustancialmente la calidad de vida de las personas, trae consigo otros beneficios sociales y de salud que se pueden cuantificar y dar un valor agregado al recurso.

Para efectos de este análisis el valor estimado es referencial con respecto a lo que cuesta llevar agua a la zona de estudio según el mercado. Sin embargo, se considera que es un valor conservador al no incluir algunos de los beneficios de salud y sociales mencionados anteriormente. Si se compara con los valores que se manejan en otras instituciones públicas como lo es la Gobernación Provincial el precio que pagan por el agua puede alcanzar incluso el doble del valor estimado. Por lo tanto, otros organismos o instituciones pueden considerar que llevar un metro cúbico de agua extra es mucho más importante y valorarlo de manera distinta.

La Tabla 5.28 detalla una serie de proveedores que abastecen de agua en la Provincia del Marga-Marga y los valores de la cantidad de personas beneficiadas, los metros cúbicos repartidos mensualmente y el valor pagado por los municipios por el servicio, estos datos fueron recopilados y facilitados por la Gobernación Provincial y corresponden al periodo de tiempo entre noviembre del 2015 hasta marzo del 2017.

Tabla 5.28.- Información de control recopilada por la Gobernación Provincial del Marga-Marga.

Proveedor	Comuna	N° de camión / mes	N° de personas	Cantidad de m ³ mensual (*)	Valor pagado	Valor m ³ de agua.	Desde	Hasta
Sociedad Constr. Y Tte. M&M	Olmué	3 / 3	1805	1,133	\$105,924,240	\$31,172	27-11-2015	27-02-2016
Sociedad Constr. Y Tte. M&M	Olmué	3 / 3	1825	1,133	\$111,780,000	\$32,895	29-02-2016	29-05-2016
Joel Valdenegro Parra	Olmué	3 / 3	1825	1,510	\$112,104,000	\$24,750	01-06-2016	01-09-2016
Sociedad Constr. Y Tte. M&M	Olmué	3 / 3	1825	1,560	\$109,079,100	\$23,307	07-09-2016	07-12-2016
Constr. Cerro Negro	Olmué	3 / 3	1825	2,555	\$53,820,000	\$7,022	28-12-2016	28-03-2017
Luis Montenegro Arancibia	Limache	3 / 4	500	1,950	\$155,808,360	\$19,975	06-01-2016	29-04-2016
Luis Montenegro Arancibia	Limache	3 / 4	378	2,250	\$159,969,600	\$17,774	30-04-2016	30-08-2016
David Delgado Galleguillos	Limache	2 / 3	392	1,880	\$75,249,620	\$13,342	07-09-2016	07-12-2016
Sociedad Constr. Y Tte. M&M	Villa Alemana	2 / 4	522	1,474	\$104,800,800	\$17,780	22-12-2015	22-04-2016
Sociedad Constr. Y Tte. M&M	Villa Alemana	2 / 3	522	1,649	\$107,859,200	\$21,798	02-05-2016	02-08-2016
Frutícola Sierra Nevada LTDA.	Villa Alemana	2 / 4	522	1,474	\$75,276,000	\$12,771	21-10-2016	21-02-2017
Comerc. Tte. Invers. Max SPA	Quilpué	3 / 4	435	1,493	\$146,907,360	\$24,607	30-12-2015	30-04-2016
Comerc. Tte. Invers. Max SPA	Quilpué	3 / 4	495	1,493	\$150,796,800	\$25,259	02-05-2016	02-09-2016
Comerc. Ttes. Invers. Max SPA	Quilpué	3 / 4	495	1,493	\$148,679,280	\$24,854	07-09-2016	07-01-2017

(*) Agua proporcionada por municipios.

5.4.3 Simulación de Montecarlo

Para llevar a cabo la simulación de Montecarlo, se eligió la variable de precipitación anual para ser generada de manera aleatoria. Primeramente, se toma valores aleatorios entre 0 y 1, una vez generado estos valores aleatorios se les asocia a una probabilidad de excedencia y a su vez a esta se le aplica la inversa de la función Log Normal obteniendo la variable estandarizada. Se utiliza esta inversa ya que fue la función de distribución de probabilidad que mejor se ajustó a la serie de datos de la estación meteorológica. Una vez obtenida la variable estandarizada se despeja la variable que corresponde a la precipitación anual, de esta forma se generan las series sintéticas aleatorias de precipitación.

Tabla 5.29.- Tabla de la generación de series aleatorias.

Año	Pocc	Pexc	Z	PP Anual (mm)
1	87%	13.5	1.1044811	703.9
2	24%	75.9	-0.70338726	294.6
3	84%	15.9	0.99699871	668.3
4	47%	53.3	-0.08248065	397.3
5	51%	49.3	0.01753052	416.9
6	19%	80.5	-0.8604749	273.1
7	82%	18.4	0.89877178	637.4
8	85%	15.4	1.0203977	675.9
9	62%	38.3	0.29723399	477.1
10	11%	88.8	-1.21791351	229.9
11	72%	27.7	0.59054572	549.5
12	80%	20.4	0.8290889	616.4
13	30%	70.2	-0.52941187	320.3
14	2%	97.6	-1.98067921	159.2
15	90%	10.1	1.27682775	764.8

Con esta técnica se permite agregar aleatoriedad y por lo tanto se incluye el riesgo en la valoración del proyecto de inversión.

Para efectos de este trabajo, se generaron de forma aleatoria 40 series sintéticas de precipitaciones en función de la probabilidad de distribución Log Normal. Estas 40 series están compuestas de 15 años de datos cada una, ya que se considera la vida útil del proyecto de 15 años como la extensión de tiempo para el análisis y evaluación del sistema. Es importante considerar que con esta técnica cada año de precipitación es generado de manera independiente del año anterior, esto en la realidad no es necesariamente así, ya que existen periodos asociados a fenómenos que se prolongan por una cantidad de tiempo, como lo son los fenómenos del Niño y la Niña que condicionan el comportamiento de las precipitaciones por lo que esta razón puede ser una posible fuente de error.

SERIES ALEATORIAS

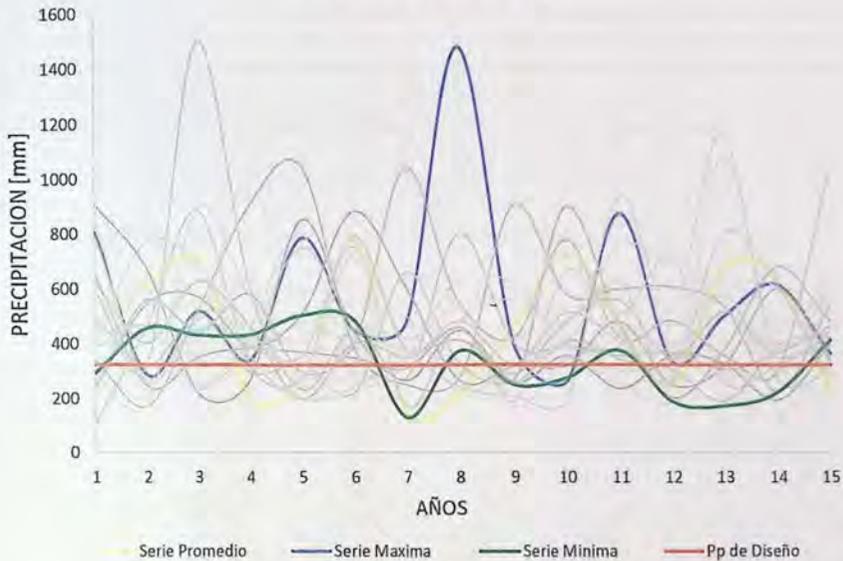


Gráfico 5.10- Series Sintéticas a través del método de Montecarlo.

En el Gráfico 5.10 se resalta en color verde la serie que alcanza el menor valor promedio de todas las series generadas aleatoriamente, de igual manera la serie de color azul es la serie con el mayor valor promedio, el color amarillo indica la serie promedio y en color rojo se define el valor de la precipitación de diseño asociada al 90% de la probabilidad de excedencia.

Es importante recalcar que el diseño y dimensionamiento de los sistemas de acumulación son hechos con el parámetro de la precipitación de diseño del 90% de probabilidad de excedencia, una vez dimensionados se utiliza la metodología de Montecarlo para generar las series aleatorias de precipitaciones y posteriormente se evalúa estos sistemas utilizando estas 40 series aleatorias obteniendo los valores de los distintos indicadores que permiten caracterizar y evaluar el rendimiento del sistema. Los valores de las series aleatorias de precipitación se aprecian en el Anexo 4.

5.4.4 Indicadores

Los resultados obtenidos de la simulación de las series sintéticas se presentan a continuación expresados mediante los indicadores anteriormente mencionados.

Inversión: Dado que la inversión total está en función de los presupuestos de cada configuración estos valores son constantes, debido que el sistema es diseñado solo para que cumpla con la probabilidad de excedencia del 90%.

Para las distintas alternativas de sistemas que se plantean dentro del análisis, se aprecia una gran diferencia entre los valores a invertir, principalmente entre las configuraciones de menores personas con respecto a los de mayor cantidad de habitantes por casa. Esta diferencia que duplica para los casos de 2 personas por vivienda además en algunos casos para 3 y 4 personas respectivamente

se debe principalmente a la cantidad de agua que se debe acumular, ya que, para las configuraciones anteriormente nombradas, los volúmenes de acumulación superan los 10 metros cúbicos por lo que el costo de almacenar sobre este valor encarece de manera notoria los sistemas. Esto se debe que el costo de construcción y materialidad de todo el sistema sin considerar acumulación no varía considerablemente entre las distintas alternativas y bordea los \$650.000 pesos chilenos (CPL) por lo que la mayor influencia en esta diferencia va asociada a el costo de los estanques acumuladores que sobre 10 metros cúbicos se encarecen notoriamente.

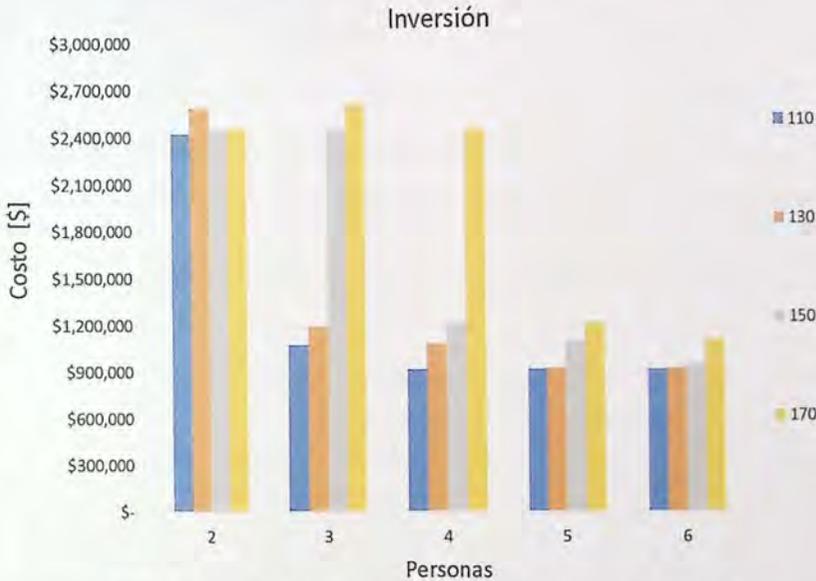


Gráfico 5.11-Valores de inversión total para distintas configuraciones de sistema.

El rango de los valores de inversión que se manejan es entre \$920.000 - \$2.620.000 CPL. Exceptuando las configuraciones nombradas en el párrafo anterior, el valor de la inversión para la mayoría de las alternativas bordea los \$1.100.000 CPL.

Disponibilidad: Primeramente, para entender cómo funciona el indicador de disponibilidad, se plantea el ejemplo para la lluvia de diseño del 90% que corresponde a 223,1 [mm]. La disponibilidad va en función directa de la demanda y se contabiliza cuando está es satisfecha completamente, en el Gráfico 5.12 se visualiza la configuración de 170 m² cuyo valor de disponibilidad para 2 personas es del año completo debido a la cantidad de agua disponible, pero si analizamos la disponibilidad para 4 personas se observa que solo 7 meses del año se puede satisfacer la demanda al 100%.

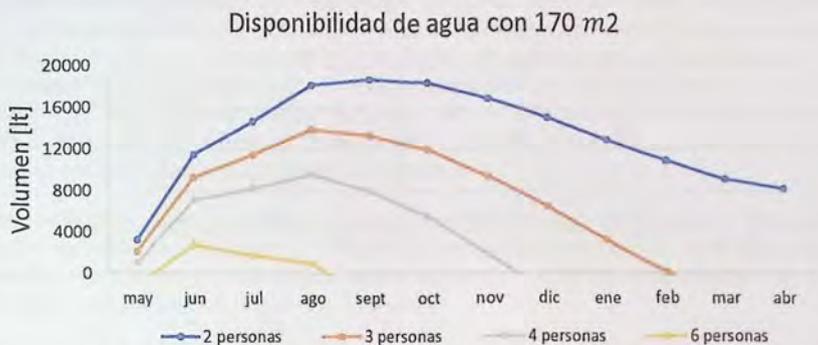


Gráfico 5.12.- Resultados de la disponibilidad de agua para 170 m² de techo con la lluvia de diseño.

Este mismo análisis se lleva para la evaluación de las series sintéticas aleatorias, realizando histogramas para los indicadores de disponibilidad de agua, beneficio anual, agua aprovechada y VAN, el cual se grafica las distribuciones acumuladas de cada indicador antes mencionados, la división de los rangos de clases es arbitrario con el fin de apreciar mejor los valores de cada indicador.



Gráfico 5.13.- Distribuciones acumuladas de disponibilidad de agua.

Como se aprecia en el Gráfico 5.13, la mayor disponibilidad de agua se presenta para configuraciones donde las personas por viviendas son menos, ya que el agua caída es suficiente para abastecer durante 10 a 12 meses durante el año. En cambio, para mayor cantidad de personas la disponibilidad de agua es claramente menor llegando abastecer a la población durante 2 a 4 meses.

Beneficio anual: El beneficio anual del sistema queda definido como el valor económico de llevar cierta cantidad de agua extra en el actual sistema de abastecimiento (aljibes), que es producido por los SCALL's. Este valor considerado es la estimación del costo marginal de llevar un metro cúbico de agua extra en referencia al mercado, esto no quiere decir que el valor de metro cúbico de agua sea el real. Ya que según información recopilada el valor de agua llevada por camiones se rentabiliza de mayor manera por lo que nuestro análisis está basado en un costo conservador lo que implica que los beneficios pueden ser mayores a los obtenidos.

Los beneficios anuales son directamente proporcionales al agua aprovechada e inversamente proporcional a la disponibilidad. Las configuraciones con mayores beneficios son las que utilizan de manera efectiva toda el agua captada por los SCALL's por ende las configuraciones con mayor demanda son precisamente las de mayor beneficio.

En este caso el indicador no asigna su valor a cumplir el 100% de la demanda mes a mes, si no va relacionado con la mayor cantidad de agua aprovechada.

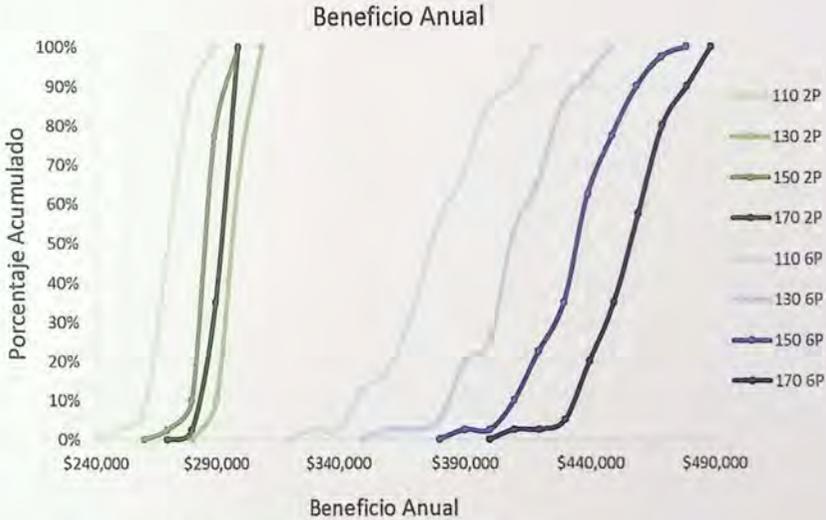


Gráfico 5.14.- Distribución acumulada del beneficio anual.

El rango de beneficio anual de los SCALL's se encuentra entre los \$240.000 a los \$500.000 CPL. Siendo la configuración de 170 metros cuadrados de superficie de captación y 6 habitantes con mayores beneficios donde el rango para esa configuración varía desde los \$410.000 a \$500.000. Por el contrario, los menores beneficios se obtuvieron para la configuración de 110 metros cuadrados de superficie de captación y para 2 habitantes por vivienda con un rango de valores entre los \$240.000 - \$290.000.

VAN: El Valor Actual Neto es uno de los principales indicadores del estudio que representa la factibilidad del proyecto, por lo que a la hora de la toma de decisiones es de los puntos fuertes para analizar.

El VAN actualiza los flujos de caja, en el caso de esta memoria corresponde a la inversión y el beneficio anual, por lo que proyecta el beneficio a una tasa de descuento del 6% anual para proyectos sociales y lo analiza con respecto a la vida útil que en este caso se considera 15 años. Al realizar esta proyección de los flujos de caja se puede obtener el valor del VAN que indica si el proyecto es rentable o no llevarlo a cabo.

En cuanto a los resultados de la proyección realizada a través de la generación de las series sintéticas, se aprecia en el Gráfico 5.15 que los valores de VAN para las configuraciones ya establecidas oscilan entre los -\$290.000 y los \$3.500.000 CPL.

Sin embargo, las configuraciones con mayores habitantes por viviendas rentabilizan de mejor manera el proyecto que configuraciones con menores habitantes.



Gráfico 5.15.- Distribución acumulada del Valor Actual Neto.

Con el fin de apreciar de mejor manera los valores de la distribución acumulada del Valor Actual Neto, se presenta el Gráfico 5.16 para los valores correspondiente a la configuración para dos personas y el Gráfico 5.17 para los valores correspondiente a la configuración de 6 personas por hogar.

Los valores correspondientes a la configuración de 110 metros cuadrados de superficie de captación para dos personas, se observa que cerca del 90% de los valores del VAN son negativos, por lo que quizás es más oportuno obtener 20 metros cuadrados más de superficie para que el sistema rentabilice mejor. Ya que para 130 metros cuadrados un poco más del 30% de los datos obtienen valores negativos.

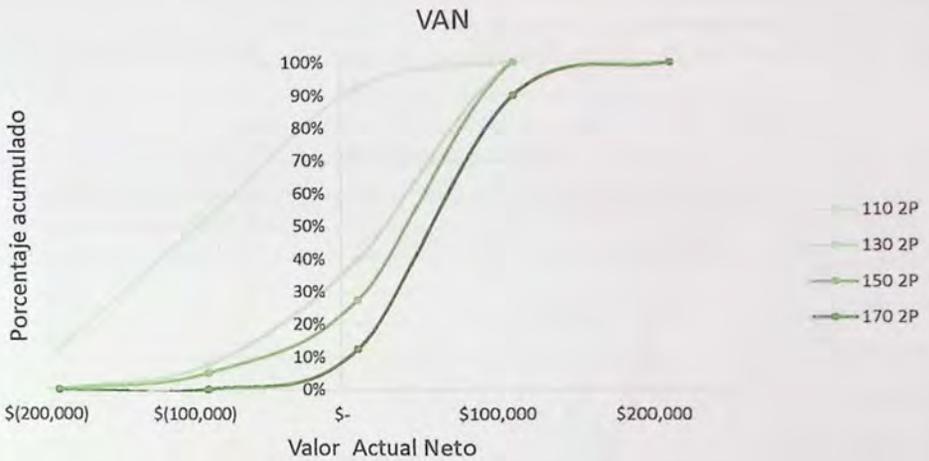


Gráfico 5.16.- Distribución Acumulada del VAN para 2 personas.

En el caso de las configuraciones para 6 personas viviendo en un hogar, los valores del VAN se encuentran todos por sobre los 2 millones de pesos debido que los volúmenes de agua aprovechada son mayores producto de una mayor demanda por el número de gente viviendo en una casa, por el contrario, la inversión para estos sistemas es menor debido que el volumen de regulación que necesitan estos sistemas es mucho menor ya que la mayoría del agua se utiliza a medida que se va acumulando.

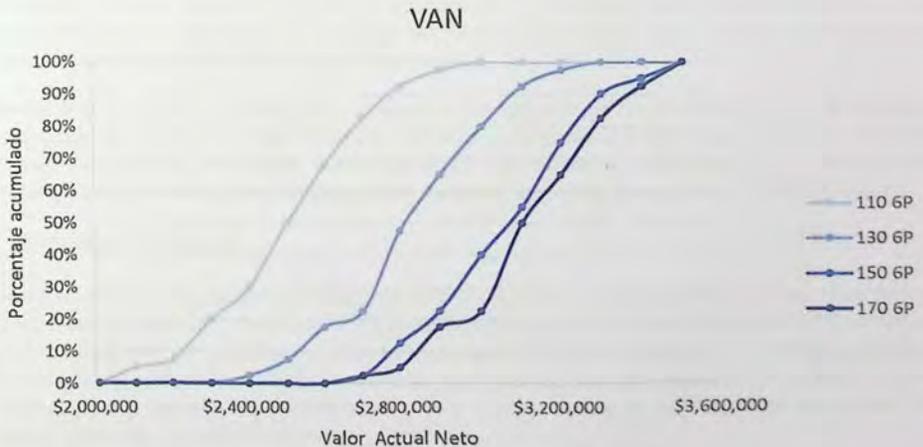


Gráfico 5.17.- Distribución acumulada del el Van para 6 personas.

Agua aprovechada: Este indicador tiene la representación de los volúmenes de agua que son utilizados en base a la demanda estipulada en esta memoria y la disponibilidad de agua. El rango de volúmenes utilizados para estos sistemas se encuentra entre los 20 y 43 metros cúbicos de agua anualmente.



Gráfico 5.18.- Distribución acumulada del agua aprovechada por el sistema.

Agua no aprovechada: Este indicador genera indicios del agua que el sistema es capaz de captar, sin embargo, dada la demanda definida en este trabajo y la configuración correspondiente no se utiliza. Este indicador representa el potencial del sistema lo cual permite a la hora de la toma de decisiones asignar otras demandas según sea el caso.

Para generar otra arista al análisis se independizan los indicadores de la superficie y de la cantidad de personas que habitan por cada vivienda, de manera de generar indicadores unitarios y realizar una segunda derivada del análisis. Esta independización de los indicadores permite generar una comparación entre las distintas configuraciones teniendo la misma dimensión en consideración.

Indicadores Unitarios

Inversión unitaria: Al igual que el indicador de la "inversión" sus valores al ser constantes mantienen la misma proporcionalidad, sobre todo con la inversión asociada a las configuraciones de 2 personas con respecto al resto. En cuanto a los casos particulares de 3 y 4 personas con 170 metros cuadrados de superficie y por efecto de economía de escala, los valores unitarios mantienen la tendencia de la inversión, pero la razón de las diferencias es menor y como era de esperar las configuraciones de mayores personas son menos costosas.

Los valores unitarios de la inversión para 2 personas son en promedio de \$9.000 pesos chilenos por metro cuadrado, para 3 personas el promedio bordea los \$4.000 pesos chilenos y para 4,5,6 personas los valores corresponden a \$2.000, \$1.500 y \$1.000 pesos respectivamente.

Inversion Unitaria

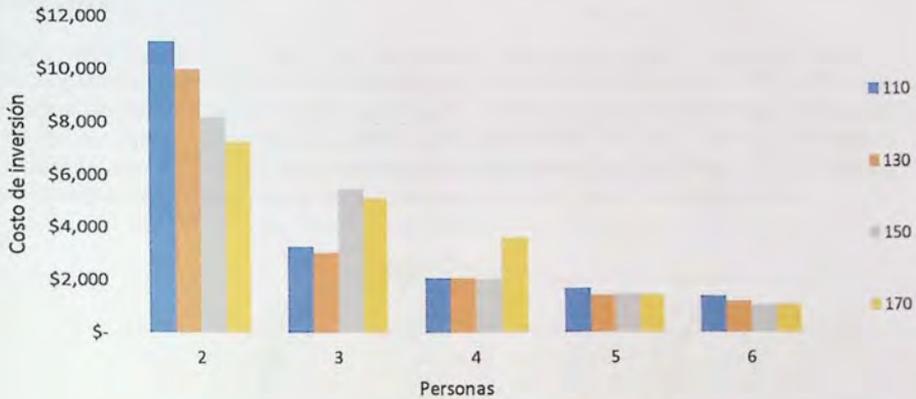


Gráfico 5.19.- Inversión unitaria.

Beneficio anual unitario: En cuanto a los beneficios unitarios presentan una relación inversa con respecto al indicador "beneficio anual", donde los mayores beneficios económicos por metro cuadrado de superficie se obtienen para las configuraciones donde habitan menos personas por vivienda. Este comportamiento se explica debido que la cantidad de agua por metro cuadrado de superficie es menor por cada habitante cuando hay más personas viviendo en una sola casa, por lo que el agua aprovechada es menor en estas configuraciones y como estas dos variables son directamente proporcional entre si el beneficio es menor.

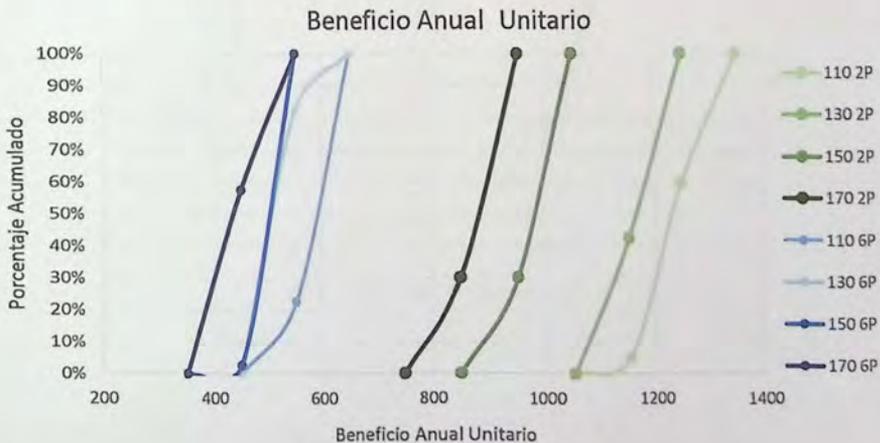


Gráfico 5.20- Beneficio anual unitario.

VAN unitario: Este indicador tiene mayor incidencia debido que muestra de mejor manera la rentabilización de los sistemas en base a sus parámetros unitarios por lo que no influye la escala de los volúmenes si no el mejor rendimiento entre la inversión y los beneficios por unidad de superficie por persona.

Como se aprecia en el Gráfico 5.21 la configuración óptima entre la relación inversión y beneficios corresponde a la alternativa de funcionamiento para 3 personas con superficies de 110 y 130 metros cuadrados, donde la rentabilización se encuentra entre los \$4.000 y \$5.500 pesos chilenos por unidad de superficie por persona. Asimismo, las configuraciones para los 110 metros cuadrados de superficie para 4, 5 y 6 personas obtienen los mayores valores de este indicador. Por el contrario, las configuraciones correspondientes a 2 personas son las de menos rentabilidad unitaria.

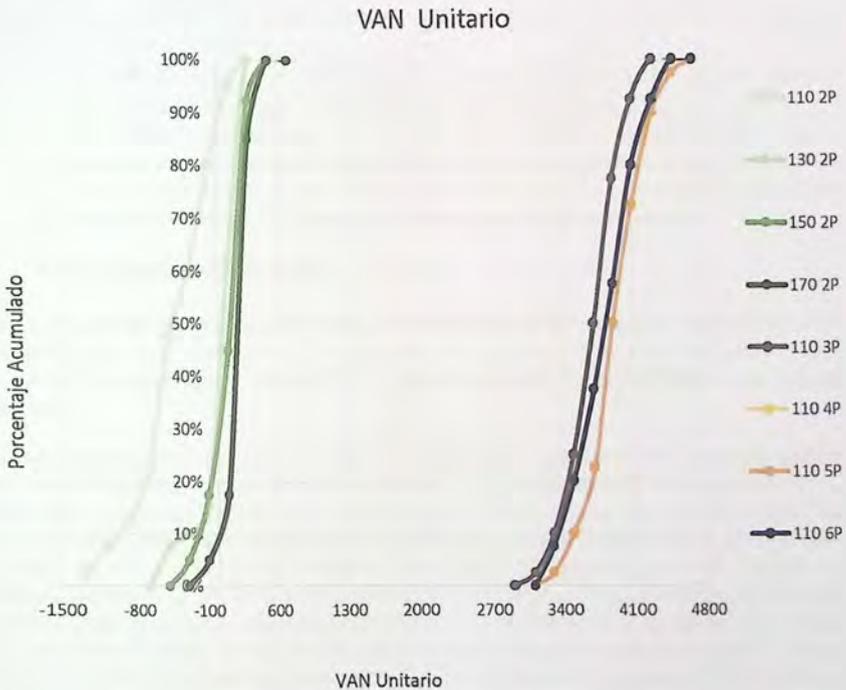


Gráfico 5.21- Valor Actual Neto unitario.

CAPÍTULO VI

6. Análisis de sensibilidad

En esta sección del trabajo se entrega información con respecto a la sensibilidad de los sistemas ante la variabilidad de los criterios y parámetros seleccionados durante la memoria de título. Se revisa el comportamiento de los indicadores utilizados anteriormente en base al sistema original que se define en el Capítulo V de resultados.

6.1 Análisis de sensibilidad

Los parámetros revisados para el análisis de sensibilidad corresponden a:

- La precipitación de diseño asociada a las funciones de distribución de probabilidad de Goodrich y Pearson tipo III.
- El valor de llevar agua extra a la zona de estudio utilizando los valores referenciales obtenidos desde la Gobernación Provincial del Marga-Marga.
- Redefinición de la demanda del agua para la total utilización del agua caída en la zona.
- Evaluar los sistemas con la serie histórica de precipitaciones de la estación Las Piedras, con los datos históricos del periodo de tiempo comprendido entre los años 2001 y 2016.
- Revisar los casos de las personas que viven en el sector El Manzano.

6.1.1 Precipitación de diseño

Debido a que las pruebas de ajuste de las distintas Funciones de Distribución de Probabilidad (FDP) se aceptaron todas y considerando que una tiene mejor correlación que las otras, no sería correcto descartar una por sobre la otra debido a la poca diferencia entre estos valores de las pruebas de ajustes.

La precipitación de diseño está asociada a las diferentes FDP utilizadas para esta investigación, por lo que se considera evaluar Goodrich y Pearson ya que son las FDP con mayor diferencia con respecto a la función elegida para el diseño que es la función Log Normal. Según cada FDP se obtiene un valor distinto de precipitación de diseño para una probabilidad de excedencia elegida, en el caso de este análisis se eligió utilizar la probabilidad de excedencia del 90 %. Una vez elegida esta precipitación se genera el análisis para obtener la cantidad de agua captada para las distintas configuraciones en función de la superficie de techo y se descuenta la demanda asignada para la descarga de inodoros. En función de estas consideraciones se ajustan los distintos estanques acumuladores para cumplir con la demanda y el agua que sobra en algunas configuraciones no se acumula por lo que se restringen los estanques para minimizar los costos.

Debido que la precipitación de diseño es un parámetro de dimensionamiento de los acumuladores el análisis de sensibilidad de esta variable implica un cambio en los volúmenes de los estanques acumuladores presentados en el capítulo anterior y se comparan con el resultado original derivado de la utilización de la FDP Log Normal.

Función de Distribución de Probabilidad de Goodrich

La precipitación de diseño para el 90% de probabilidad de excedencia de esta función corresponde a 207,4 milímetros de precipitación anual como se observa en la Tabla 5.19, por lo tanto (en base a la explicación del párrafo anterior), los volúmenes de los acumuladores para esta precipitación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6.1.- Volúmenes de acumulación para FDP de Goodrich.

Configuración					
Techo	2 personas	3 personas	4 personas	5 personas	6 personas
110 m ²	7.5 m ³	3 m ³	3 m ³	3 m ³	3 m ³
130 m ²	10 m ³	3 m ³	3 m ³	3 m ³	3 m ³
150 m ²	10 m ³	5 m ³	5 m ³	5 m ³	3 m ³
170 m ²	10 m ³	10 m ³	10 m ³	5 m ³	5 m ³

Función de Distribución de Probabilidad de Pearson tipo III

La precipitación de diseño para el 90% de probabilidad de excedencia de esta función corresponde a 265,1 milímetros de precipitación anual como se observa en la Tabla 5.19, por lo tanto, los volúmenes de los acumuladores para esta variación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6.2.- Volúmenes de acumulación para FDP de Pearson tipo III.

Configuración					
Techo	2 personas	3 personas	4 personas	5 personas	6 personas
110 m ²	10 m ³	7.5 m ³	5 m ³	3 m ³	3 m ³
130 m ²	10 m ³	15 m ³	7.5 m ³	5 m ³	3 m ³
150 m ²	10 m ³	15 m ³	15 m ³	7.5 m ³	5 m ³
170 m ²	15 m ³	15 m ³	15 m ³	10 m ³	7.5 m ³

La diferencia entre los valores de precipitación de diseño es de -7% y 18,8% para Goodrich y Pearson respectivamente en comparación con la función Log Normal seleccionada. Se presenta el Gráfico 6.1 con la información de todas las captaciones de techo, sin embargo, para mejorar la visualización de los datos se presenta el Gráfico 6.2 con la información filtrada de los casos 110 y 170 metros cuadrados.

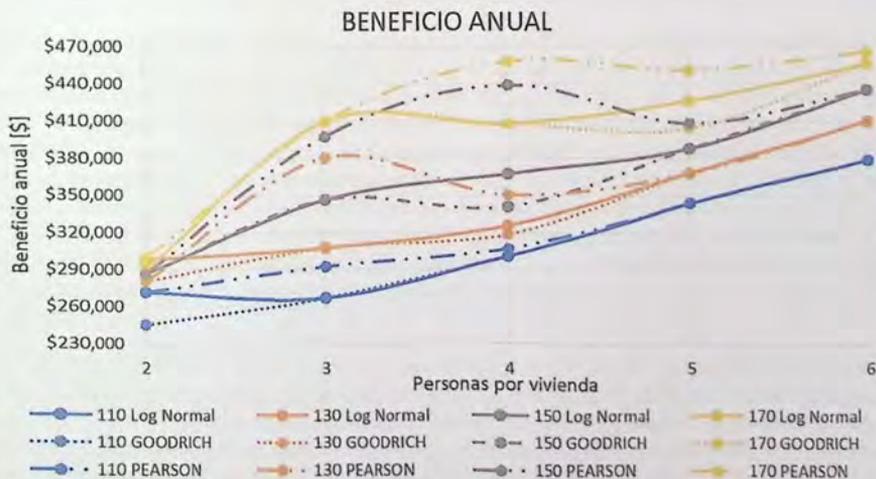


Gráfico 6.1.- Beneficio anual para distintas FDP.

Esta diferencia es tan mínima que para ciertas configuraciones el comportamiento de los resultados comparte el mismo valor. Por ejemplo, si observamos el Gráfico 6.2 la curva para los 110 m² de superficie de captación se nota que el beneficio anual a medida que hay más de 4 personas por vivienda es indiferente de la FDP elegida en cambio para 2 y 3 personas los valores cambian. Por el contrario, para superficies de techo de 170 m² para 2 y 3 personas los beneficios anuales son los mismos para cualquier FDP en cambio sobre las 3 personas el comportamiento de los beneficios es dispar siendo la función Pearson con mayores beneficios por sobre la Log Normal y la Goodrich respectivamente.

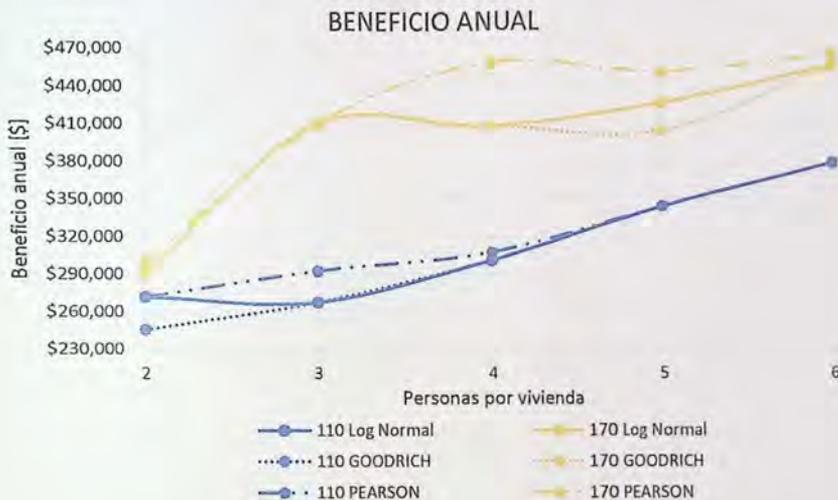


Gráfico 6.2- Beneficio anual para caso de 110 m² y 170m².

Para el caso del indicador VAN las diferencias entre las FDP varían en algunos casos particulares, si analizamos las curvas para la superficie de captación de 110 m² las diferencias entre las tres funciones no son de gran consideración salvo en el caso para 2 personas en la cual los valores del VAN al escoger Goodrich se disparan rotundamente hasta alcanzar valores que bordean los \$800.000, en comparación con los valores negativos que comparten Log Normal y Pearson. Esta diferencia se debe que la precipitación asociada a la FDP de Goodrich es menor que las demás, por lo que a la hora de dimensionar los estanques se necesitó para esa configuración un acumulador de 7,5 m³ en vez de los 10 m³ utilizados para las FDP de Pearson y Log Normal lo que implica que la inversión es menor por ende se rentabiliza de mejor manera. La información se presenta en el Gráfico 6.3, pero para mejorar la visualización de los casos ejemplificados se presenta el Gráfico 6.4 con información filtrada.

De igual manera que el caso de 110 m² sucede para el de 130 m² de captación, pero para la configuración con 3 personas por vivienda. En el caso de 150 m² se observa una diferencia en los valores del VAN para 3 y 4 personas donde la función Pearson se escapa de la tendencia central y por último para las superficies de techo de 170 m² las diferencias se presentan en las configuraciones de 4 y 5 personas por vivienda, en la cual se observan variaciones de \$360.000 y \$870.000 pesos respectivamente.

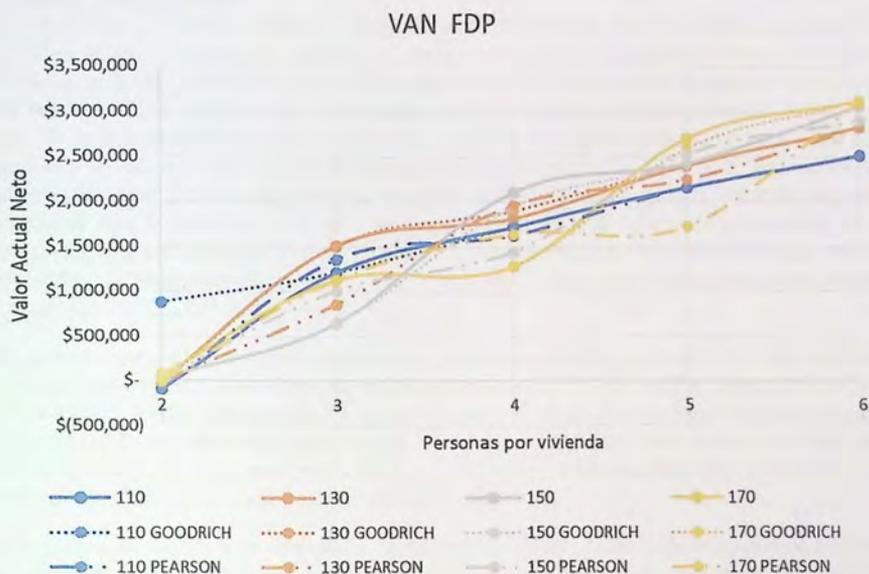


Gráfico 6.3.- Valor Actual Neto para distintas FDP.

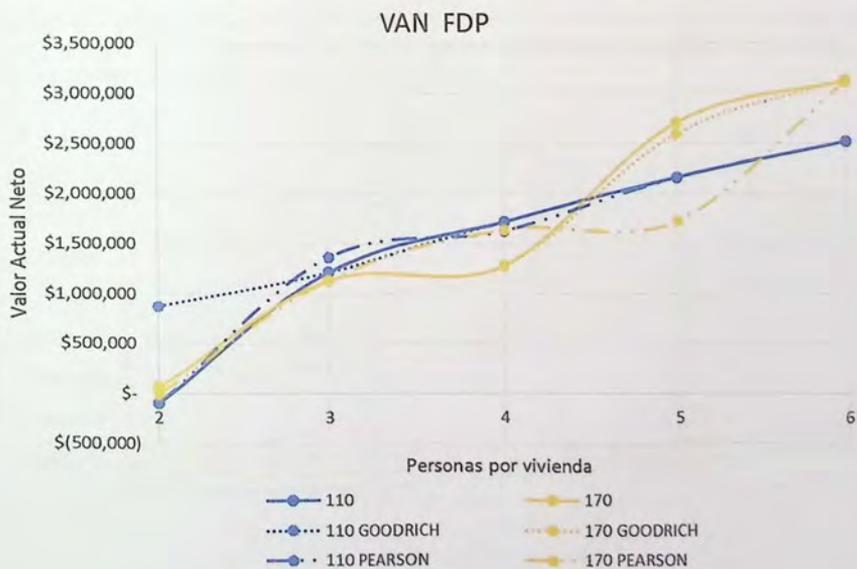


Gráfico 6.4- Valor Actual Neto para casos de 110 m² y 170 m².

6.1.2 Valor del agua

Este parámetro se estimó en base al costo marginal de mercado de llevar agua extra mediante camiones aljibe a la zona de estudio. Este valor como se explicó anteriormente se considera conservador debido que el valor real de llevar agua tiene otras consideraciones que para efectos de esta memoria no se cuantificó como lo es la utilidad de la empresa que otorgue el servicio, la distancia desde la fuente de abastecimiento hasta la zona de estudio, los beneficios asociados a la mejora de la calidad de vida y de salud que se obtiene al disponer de más agua, entre otros factores que se puede cuantificar y que puede valorizar de mejor manera el agua captada. Además, se debe considerar que la estimación del valor se generó en base a la información recopilada de la Municipalidad y esta información está sujeta a diferencias con la realidad ya que se manejan valores promedios. El valor estimado para abastecer de un metro cúbico más de agua al sector de estudio se cuantificó en \$11.594 pesos chilenos.

Para generar un análisis de sensibilidad de esta variable se considera la información obtenida desde la Gobernación Provincial del Marga-Marga para el periodo 2016 - 2017, que se presenta en la Tabla 5.28. Los valores del metro cúbico de agua para la zona de Quilpué bordean los \$24.607 pesos promedio, es justamente el valor adoptado para generar la sensibilidad en el análisis. Se utiliza este valor y no otro debido que es el precio que la municipalidad de Quilpué pagó por el servicio dentro de la comuna, la cual es donde se ubica el sector El Manzano.

Al inicio de este trabajo, no se contaba con la información de los proveedores de agua en la provincia del Marga-marga. Por lo que se procedió a estimar este valor de agua en base al costo de mercado del servicio y se generó todo el análisis mostrado en esta memoria de título, una vez obtenida la información se procedió a generar este análisis de sensibilidad con la variable del valor de agua.

Los indicadores que se encuentran afectados directamente por esta variación en el valor del agua son el beneficio anual del sistema y por ende la rentabilización del proyecto también se ve afectada, como se puede apreciar en el Gráfico 6.5 y Gráfico 6.6.

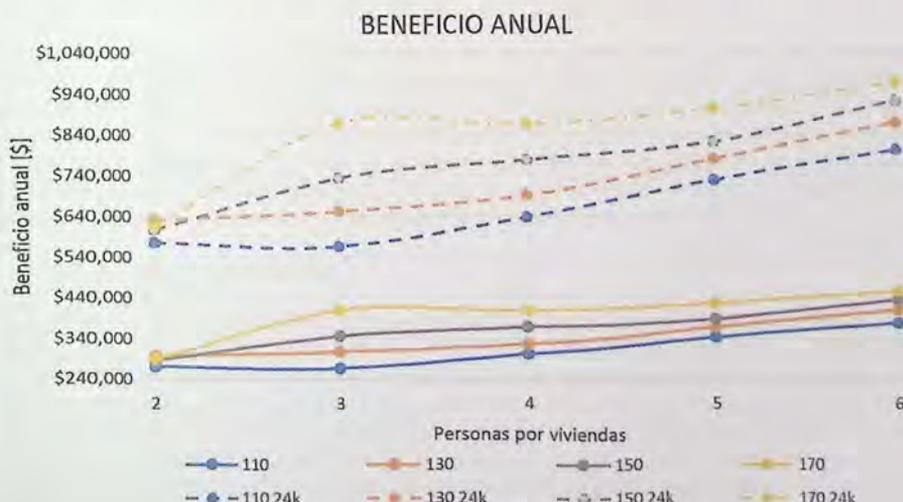


Gráfico 6.5.- Beneficio anual para distinta valoración del precio de agua.

Para el caso del beneficio el comportamiento es proporcional ya que no varía la cantidad de agua aprovechada por lo tanto el beneficio es mayor solo por la valorización del metro cúbico del agua y que puede aumentar en un 112% más de los valores obtenidos con los \$11.594.

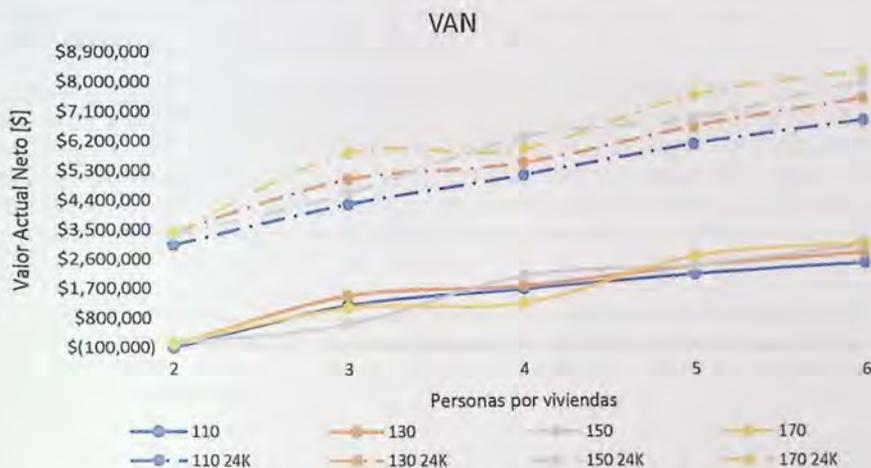


Gráfico 6.6.- Valor Actual Neto para distinta valoración del precio de agua.

Para el valor del Valor Actual Neto se presenta un claro aumento en los valores de rentabilidad para el valor adoptado de \$24.607 pesos. Por el contrario, para el valor adoptado de los \$11.594 algunas de las configuraciones con menos personas presentan valores negativos de VAN que varían entre los \$ -100.000 y los \$0 pesos, si bien estos valores de VAN son negativos y la evaluación social de proyectos rechaza los proyectos cuyos Valores Actuales Netos lo sean, el ente que lleve a cabo estos proyectos puede absorber estos costos ya que son valores cercanos al cero.

La rentabilidad con el valor de \$24.607 del metro cúbico de agua puede aumentar los valores del indicador VAN en un 241% para las configuraciones de 110 metros cuadrados y en un 231%, 255% y 278% para 130, 150 y 170 metros cuadrados. Y para todas las configuraciones el Valor Actual Neto se encuentra por sobre la barrera de los 3 millones de pesos pudiendo alcanzar los \$8.400.000 de pesos. Es interesante tener la noción de los valores que se puede rentabilizar este tipo de proyecto considerando que los sistemas están diseñados solo para la utilización del agua para descargas de inodoros teniendo una gran cantidad de agua que se deja de aprovechar.

6.1.3 Redefinir la demanda

El estudio ha contemplado en cumplir una demanda que permita aumentar la disponibilidad de agua desde los 71 litros diarios que actualmente se entrega mediante camiones aljibe a los 100 litros diarios estipulados por la Organización Mundial de la Salud que se establece como un acceso óptimo para el consumo como se explicó en el apartado 3.2. Es por esta razón que se asignó a cumplir la demanda de agua para inodoro y cuando se logra cumplir la demanda en base al agua caída se logra superar el umbral de los 100 litros. Por otra parte, hay meses donde el agua caída es mayor y hay exceso de agua para ciertas configuraciones sobre todo las que habitan menos personas por casa, por esta razón y para disminuir los costos de inversión se ajusta los volúmenes de los acumuladores como se menciona en el punto 5.3.3.

Para generar el análisis de sensibilidad de esta variable se considera aprovechar la totalidad del agua caída redefiniendo la demanda y sin restringir el uso (llamaremos a esta condición como "SIN DEMANDA"), por lo que se debe considerar volúmenes de regulación de mayores dimensiones para el uso de estos sistemas. Por simplicidad, solo se analiza la utilización de estanques de 15 y 20 metros cúbicos para todas las configuraciones, a diferencia del análisis anterior donde en cada configuración se ajustó a un volumen específico.

El primer indicador que se analiza es la cantidad de agua aprovechada la cual aumenta considerablemente en algunos casos más del doble donde las configuraciones de 110 metros cuadrados alcanzan los 45 metros cúbicos aprovechados en comparación con la demanda de inodoros solo se aprovechaba alrededor de 23 a 32 metros cúbicos anuales. Para el caso de 170 metros cuadrados de superficie de captación los volúmenes de aprovechamiento pasaron desde los 35 metros cúbicos hasta los 70 metros cúbicos de agua aprovechada como se observa en el Gráfico 6.7.

Para generar una idea de cuánta agua más se está aprovechando para la configuración de 110 metros cuadrados de techo al utilizar toda el agua caída el volumen aprovechado aumenta en un 67%, de la misma manera para 130, 150 y 170 metros cuadrados el aumento de volumen alcanza un 81%, 95% y 103% más

Agua aprovechada



Gráfico 6.7.- Agua aprovechada del sistema con demanda fija vs sin demanda.

Los valores presentados en el Gráfico 6.7 para la configuración sin demanda son la cantidad máxima de agua que pueden captar los sistemas en promedio, recordemos que estas curvas están generadas para el análisis de las series sintéticas de precipitaciones, por ende, los valores obtenidos corresponden a los promedios, lo que podría genera una idea de otros usos en que se puede utilizar el agua captada en función de estos resultados.

Si se considera como referencia la distribución de agua dentro del hogar correspondiente a la Figura 3.3, se estima que una persona consume alrededor de 58 metros cúbicos al año por lo que utilizando toda el agua captada no alcanza a cubrir todas las necesidades dentro del hogar para más de una persona. Pero esto no quiere decir que el agua captada se puede destinar a más de un uso si la cantidad de personas viviendo en un hogar lo permite, en el caso de una vivienda de 6 personas y de 170 metros cuadrados de techo cada persona puede utilizar 972 litros de agua al mes esta cantidad de agua no es suficiente para cumplir con la demanda del inodoro que recordemos corresponde a 1080 litros mensual. Sin embargo en el caso de 2 personas viviendo en una casa de 110 metros cuadrados de superficie de captación, cada una de esas personas puede disponer de 1875 litros de agua mensualmente lo que perfectamente puede suplir la demanda del inodoro más lavadora que corresponde a 1580 litros mensuales y si estas dos personas vivieran en una casa de 170 metros cuadrados de techo, cada uno puede disponer de 2900 litros que podría ser utilizado en la demanda asociada de inodoro más ducha o quizás destinar el agua para los usos de lavavajillas, lavadora, inodoro y el lavado de dientes y cara.

El beneficio anual claramente es mayor, ya que se aprovecha toda el agua caída por lo que se obtiene mayores beneficios económicos de la utilización de esa agua en la zona, los beneficios ascienden desde los \$522.000 a los \$807.000 pesos anuales. Recordar que estos valores corresponden a la valorización del metro cúbico de agua de \$11.594 pesos y que este valor puede aumentar en un 112% más si se considera el precio que paga la Municipalidad y la Gobernación Provincial.

Beneficio Anual

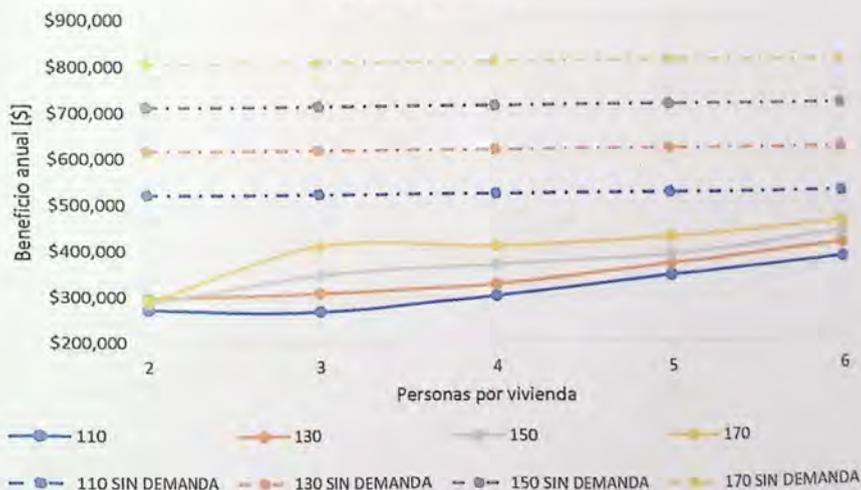


Gráfico 6.8.- Beneficio anual del sistema con demanda fija vs sin demanda.

Cuando se utiliza toda el agua caída en este sistema, los indicadores de agua aprovechada, inversión y beneficio anual se independizan de la cantidad de personas que vivan en los respectivos hogares. Ya que la única variable que influye en la cantidad de agua captada y utilizada es la dimensión de la zona de captación, por lo que los valores para 2, 3, 4, 5 y 6 personas alcanzan el mismo valor para los indicadores anteriormente mencionados.

Si se considera utilizar toda el agua, podemos tener un máximo de \$800.000 pesos de beneficio para una sola vivienda de 170 m² de superficie de techo, lo que puede generar grandes beneficios si se logra utilizar en más usos dentro del hogar. Solo en el sector de El Manzano se podría obtener entre 8 y 13 millones de pesos de beneficios anuales siendo conservadores, ya que si usamos el precio que actualmente paga el municipio estos valores aumentan entre 18 y 27,6 millones anuales en el sector.

Los valores del indicador VAN dependerán estrictamente de la elección del acumulador, para la simulación de los 15 y 20 metros cúbicos se observó que el único valor de los indicadores que varió es del VAN por lo que colocar un estanque de 20 metros cúbicos no se justifica debido que solo aumenta el valor de la inversión y no tiene ninguna mejora de rendimiento en los otros indicadores por lo tanto los valores presentados a continuación corresponden al análisis para el acumulador de 15 metros cúbicos.

El valor del indicador VAN, como se menciona en el párrafo anterior se independiza de la cantidad de personas que viven en un hogar debido que la inversión es la misma ya que todos los sistemas ocupan la misma dimensión de acumulador correspondiente a los 15 m³, además que se aprovecha la máxima agua caída por lo que el beneficio anual es el mismo dado que la demanda de agua es total. Los valores del VAN para 110, 130, 150 y 170 metros cuadrados de techo corresponde a \$2.350.000, \$3.330.000, \$4.286.000 y \$5.260.000 respectivamente como se observa en el Gráfico 6.9.

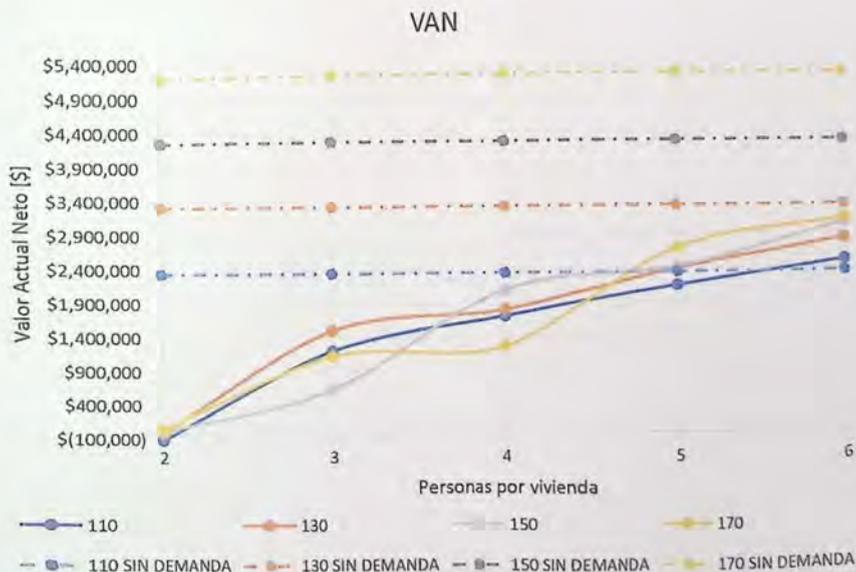


Gráfico 6.9.- Valor Actual Neto del sistema para demanda fija vs sin demanda.

6.1.4 Serie histórica de precipitación

En este apartado se evalúa los sistemas para la serie de datos históricos de la estación más cercana a la zona de estudio que corresponde a la estación meteorológica de "Las Piedras", se utiliza los datos de la Dirección General de Aguas correspondiente al período de tiempo de 15 años desde el año 2001 hasta el 2016, se evalúa los indicadores para la demanda asociada a la descarga de inodoros definida a lo largo de este trabajo y para la condición de "sin demanda" donde se utiliza toda el agua caída y captada por el sistema.

El indicador de disponibilidad de agua durante el año, que se define como la cantidad de meses donde la demanda se cumple al 100% solo aplica para la condición de demanda de inodoros ya que es una demanda fija la cual se puede cuantificar si se cumple o no. En cambio, la condición de "sin demanda" aprovecha toda el agua por lo que no se cuantifica si se cumple con la demanda.

Se observa en el Gráfico 6.10 que la disponibilidad promedio de agua de la serie histórica de datos, varía desde los 4 meses hasta los 12 meses según la configuración correspondiente. Donde las viviendas con menos personas cumplen con esta condición gran parte del tiempo, como lo es para dos personas que en casi todas sus configuraciones cumplen durante todo el año con la demanda de inodoros en cambio la configuración para 6 personas varía entre los 4 y 6 meses cumpliendo con la demanda en su totalidad. Es importante mencionar que los meses que no se cumple con el 100% de la demanda, no implica que no se esté aprovechando agua ya que puede que se utilice una cierta cantidad de agua que no satisface la demanda total, pero se utiliza de igual manera.

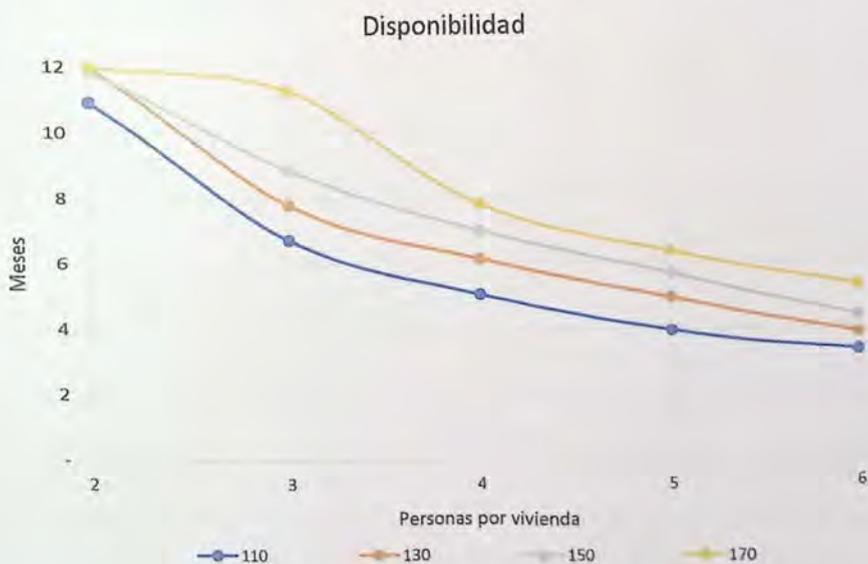


Gráfico 6.10.- Disponibilidad de meses cumpliendo 100% la demanda.

En cuanto a la cantidad de agua aprovechada, para la demanda de inodoro los volúmenes aprovechados varían según la cantidad de personas y dimensión de la zona de captación. Sin embargo, para la utilización de toda el agua se aprovecha todo el potencial del sistema por lo que los valores de agua aprovechada están en función directa de la zona de captación. Los volúmenes de la condición "sin demanda" aumentan en promedio un 52%, 63%, 76% y 82% para las configuraciones de 110, 130, 150 y 170 metros cuadrados. El máximo potencial del sistema para las configuraciones de 110, 130, 150 y 170 m² alcanzan los volúmenes de agua captada anual de 40, 47, 55 y 62 m³. Si se compara el Gráfico 6.7 con el Gráfico 6.11 se puede observar que las diferencias entre los sistemas que utilizan el agua para la descarga de inodoros tanto para la serie histórica como para la simulación de las series sintéticas presentan valores casi idénticos y los valores asociados al análisis de "sin demanda" son mayores para la simulación de las series sintéticas en el cual los volúmenes de agua aprovechada son 5 metros cúbicos más que en la serie histórica, a priori se puede deducir que la simulación de las series sintéticas tiene buenos resultados comparados con los datos de los últimos 15 años de precipitaciones.

En los gráficos 6.11, 6.12 y 6.13 se agregan los casos reales evaluados en el apartado 6.1.5. En los cuales los marcadores en forma de cuadrado representan los valores asociados al análisis con la demanda fija de inodoros, mientras que los marcadores con forma de triángulo representan los valores asociados para el análisis de toda el agua aprovechada. Los colores son para diferenciar el caso respectivo siendo el rojo el primer caso, el celeste el segundo caso y de verde el tercer caso.

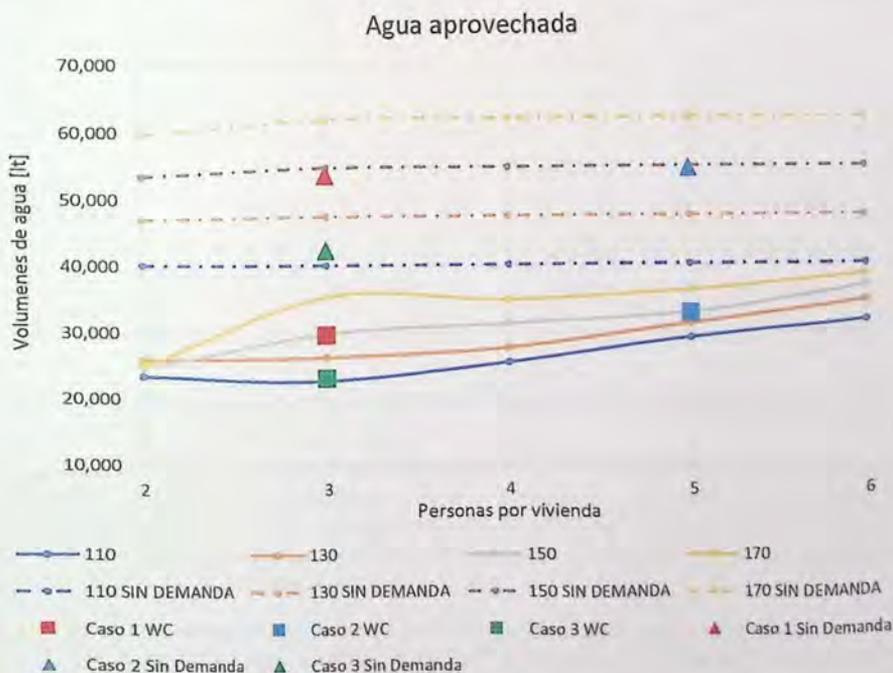


Gráfico 6.11.- Agua aprovechada de la demanda fija vs sin demanda, para datos históricos de precipitación.

El rango del beneficio anual para la demanda de inodoros varía entre los \$270.000 y los \$450.000 en cuanto a la condición "sin demanda" el rango de valores se encuentra entre los \$465.000 y los \$720.000 el aumento porcentual para cada configuración de superficie de techo de 110, 130, 150 y 170 metros cuadrados es igual al del indicador de agua aprovechada de 52%, 63%, 76% y 82% respectivamente como se aprecia en el Gráfico 6.12.

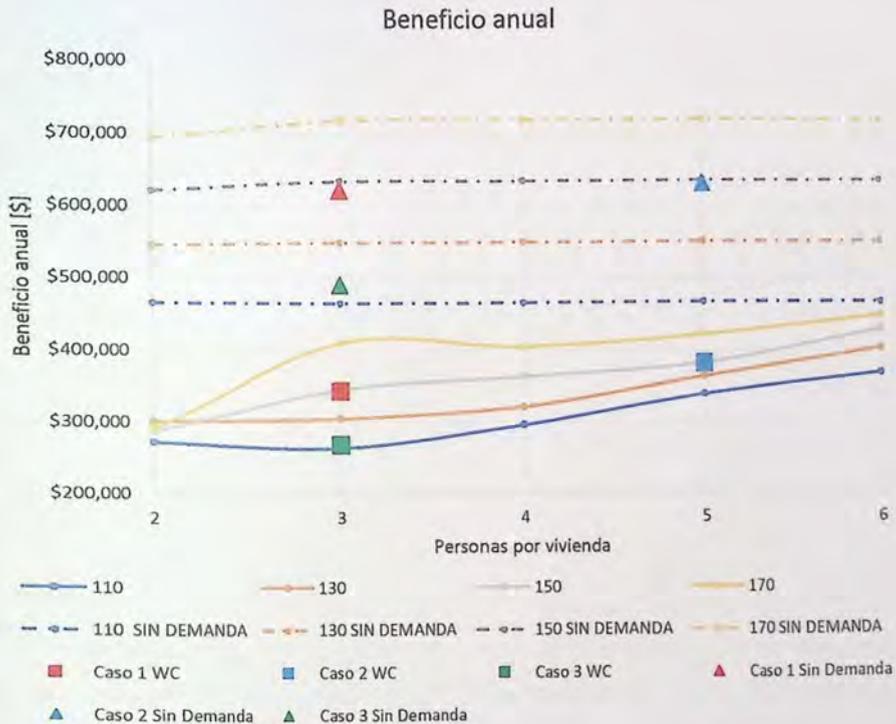


Gráfico 6.12.- Beneficio anual de la demanda fija vs sin demanda, para datos históricos de precipitación.

En cuanto a los Valores Actuales Netos correspondiente a la rentabilización del sistema con los datos de los últimos 15 años de precipitación, los rangos entre las dos condiciones de demanda tanto asignada para inodoros como para utilizar toda el agua captada varía notoriamente. Ya que para la condición "sin demanda" todos los valores de VAN son positivos y sobre los \$1.900.000, alcanzando hasta valores de \$4.642.000 pesos chilenos.

Para la condición de demanda fija de inodoros el rango se encuentra entre los \$-80.000 hasta los \$3.000.000, presentando para la configuración de 2 personas en 110 metros cuadrados valores negativos de VAN.

El aumento porcentual que presenta la condición "sin demanda" con respecto a la condición de demanda fija alcanza un 32% para las configuraciones de 110 metros cuadrados, un 68% para la configuración de 130 metros cuadrados y para las configuraciones de 150 y 170 metros cuadrados presenta un aumento porcentual de 127% y 180% respectivamente.

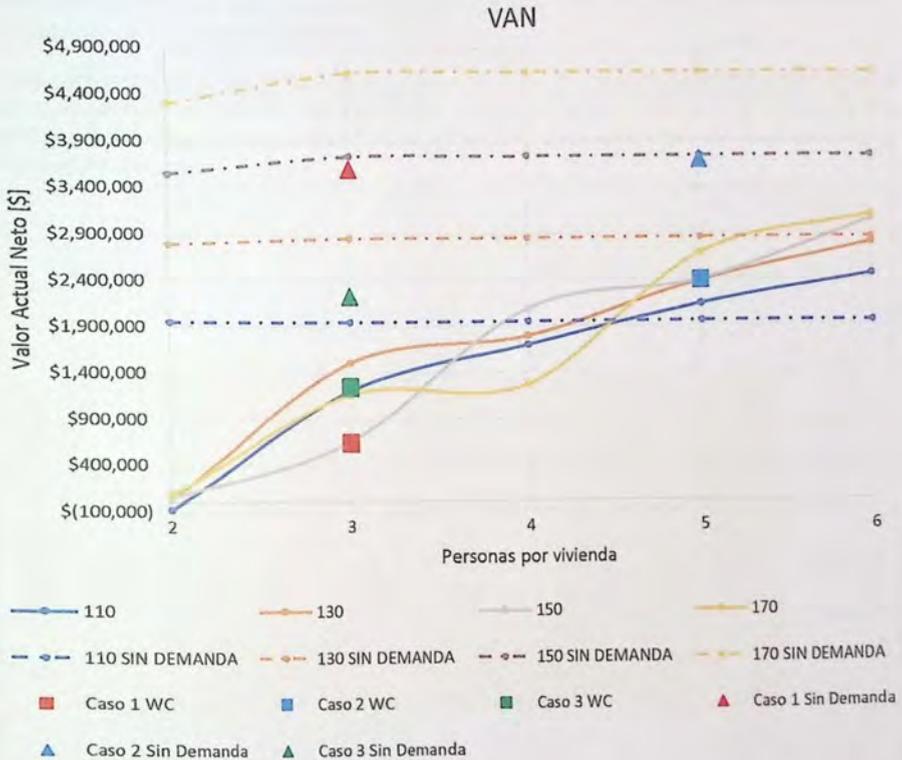


Gráfico 6.13.- Valor Actual Neto de la demanda fija vs sin demanda, para datos históricos de precipitación.

6.1.5 Evaluación de casos en el sector

En esta sección se evalúa la situación de 3 viviendas en el sector de El Manzano con la información recopilada en terreno y analizadas tanto la serie histórica de los últimos 15 años de precipitación como para la evaluación con el método de Montecarlo. Se presentan resultados de indicadores para la configuración superficie de techo/habitantes de la demanda fija para la descarga de inodoros y de la utilización de toda el agua captada. Además de mostrar el rango de "valores probables", el cual para efectos de este trabajo se considera entre el 20% y el 80% de los datos del porcentaje acumulado de los distintos indicadores.

Para contextualizar el desarrollo de este apartado, se ejemplifica el análisis para las series sintéticas de precipitación del indicador de Valor Actual Neto. Las curvas de distribución acumulada del histograma mostradas en el Gráfico 5.15 se presentan a continuación para los casos puntuales a evaluar en el sector.

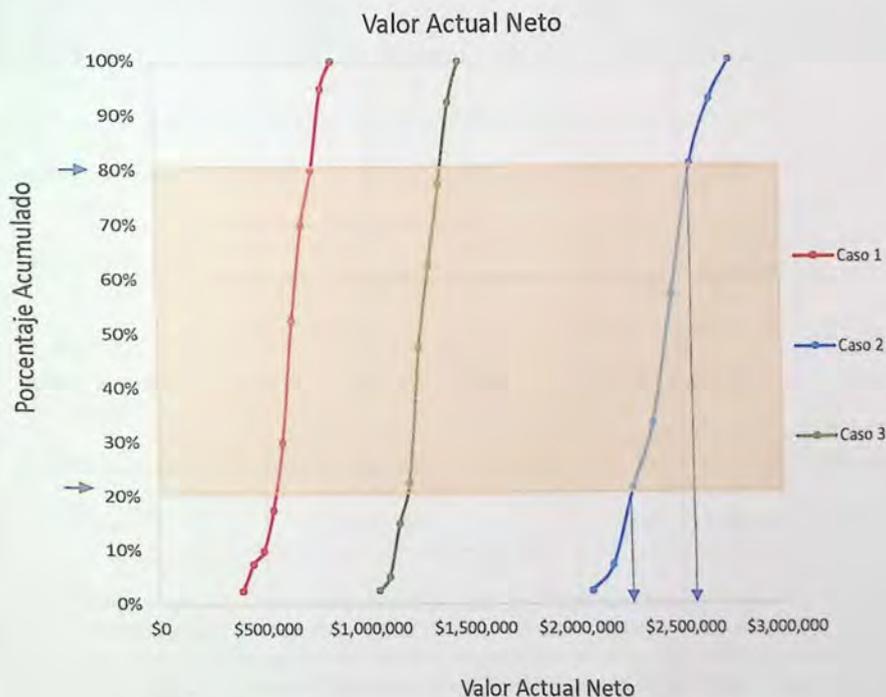


Gráfico 6.14.- Distribución acumulada del Valor Actual Neto para configuración de demanda de inodoros.

En el Gráfico 6.14 se destaca una zona entre el 20% y 80% de los datos el cual se define como el rango de valores probables, el cual representa el intervalo que contiene el 60% de los datos centrales del indicador. Este procedimiento se realiza para todos los indicadores y se presenta desde la tabla 6.3 hasta la 6.8, con sus respectivas configuraciones de demanda y según cada caso seleccionado.

Para el análisis de la serie de datos históricos de precipitación, el rango de valores probables se obtiene de la misma manera que las series sintéticas, con la diferencia que es solo una serie de 15 años de datos.

El primer caso a analizar corresponde al lote n°3 (ver Figura 5.4) del propietario de iniciales R.M. En su vivienda habitan 3 personas y cuenta con una superficie de 147 metros cuadrados (ver Tabla 5.20). Los valores de los indicadores para la condición de demanda asignada a inodoros de esta vivienda se presentan en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3.- Tabla de indicadores para la configuración de demanda de inodoros del caso 1.

Indicador	Serie histórica			Series sintéticas		
	20%	Promedio	80%	20%	Promedio	80%
Inversión	\$2.459.579			\$2.459.579		
Agua aprovechada anual	27,7 m ³	29,6 m ³	32,5 m ³	29,1 m ³	29,8 m ³	30,5 m ³
Disponibilidad anual	8,6 meses	8,9 meses	9 meses	8,7 meses	8,9 meses	9,2 meses
Agua NO aprovechada anual	9 m ³	20,7 m ³	38 m ³	22,7 m ³	27,3 m ³	33,2 m ³
Beneficio anual	\$324.000	\$343.249	\$373.000	\$336.000	\$344.796	\$353.000
VAN	5635.069			\$507.000	\$626.051	\$731.942

Los valores de los indicadores para la configuración de demanda utilizando toda el agua captada denominada condición "sin demanda" como se estableció anteriormente de esta vivienda se presenta en la Tabla 6.4, se debe considerar que para esta configuración la disponibilidad anual no aplica debido a que el agua caída se utiliza en su totalidad, por lo que la disponibilidad de cumplir con la demanda al 100% no se cuantifica debido que no hay una demanda fija asignada y esto queda reflejado en el indicador de agua no aprovechada en el cual los volúmenes son ceros.

Tabla 6.4.- Tabla de indicadores para la configuración "sin demanda" del caso 1.

Indicador	Serie histórica			Series sintéticas		
	20%	Promedio	80%	20%	Promedio	80%
Inversión	\$2.620.219			\$2.620.219		
Agua aprovechada anual	41,8 m ³	53,6 m ³	71,9 m ³	56,1 m ³	59,5 m ³	65,3 m ³
Beneficio anual	\$431.000	\$621.904	\$870.000	\$641.000	\$689.568	\$750.000
VAN	S3.599.652			\$3.543.000	\$4.041.755	\$4.743.000

Para el caso 1 los indicadores económicos presentan un alza en los beneficios y su rentabilidad durante su vida útil para la condición de usar toda el agua calda, para obtener dicho aumento en los beneficios solo basta aumentar la inversión en un 6,5% que se traduce a solo \$161.000 pesos más de lo que se invierte para el uso del agua para inodoros. En cuanto al indicador de disponibilidad solo es representativo para la demanda fija, en la cual 9 meses al menos se cumple con el 100% de la demanda de inodoros. Además, cabe destacar que los volúmenes de agua aprovechada aumentan en promedio 24 metros cúbicos si se desea implementar el sistema para captar toda el agua que consiste en cambiar la acumulación de 10 metros cúbicos para la demanda de inodoros por una acumulación de 15 metros cúbicos. Los beneficios anuales en promedio aumentan en un 81% y el Valor Actual Neto es 5,7 veces mayor para la condición de captar toda el agua y la inversión se recupera a los 3 años y 5 meses.

Para el segundo caso se analiza el lote n°4 (ver Figura 5.4) del propietario de iniciales V.S, en su vivienda habitan 5 personas y cuenta con una superficie de 149 metros cuadrados (ver Tabla 5.20). Los valores de los indicadores asociados a la demanda de inodoros para esta vivienda se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6.5.- Tabla de indicadores para la configuración de demanda de inodoros del caso 2.

Indicador	Serie histórica			Series sintéticas		
	20%	Promedio	80%	20%	Promedio	80%
Inversión	\$1.108.219			\$1.108.219		
Agua aprovechada anual	29,3 m ³	32,7 m ³	37,3 m ³	32,4 m ³	33,4 m ³	34,4 m ³
Disponibilidad anual	5 meses	5,7 meses	6 meses	5,4 meses	5,6 meses	5,9 meses
Agua NO aprovechada anual	5 m ³	16,8 m ³	31 m ³	18,2 m ³	23 m ³	28,7 m ³
Beneficio anual	\$352.000	\$379.500	\$432.000	\$376.000	\$387.000	\$401.000
VAN	\$2.384.475			\$2.260.000	\$2.413.451	\$2.560.000

Tabla 6.6.- Tabla de indicadores para la configuración "sin demanda" del caso 2.

Indicador	Serie histórica			Series sintéticas		
	20%	Promedio	80%	20%	Promedio	80%
Inversión	\$2.620.219			\$2.620.219		
Agua aprovechada anual	42,2 m ³	54,4 m ³	75,2 m ³	56,7 m ³	61 m ³	67,2 m ³
Beneficio anual	\$495.000	\$630.366	\$855.000	\$648.000	\$707.418	\$778.000
VAN	\$3.690.599			\$3.618.000	\$4.230.284	\$4.918.000

Al igual que en el caso 1 los beneficios económicos son mayores para la condición de usar toda el agua captada, pero para eso la inversión debe ser mayor ya que se debe aumentar los costos iniciales en \$1.512.000 para poder cambiar el acumulador de 5 metros cúbicos por uno de 15 metros cúbicos, que permita acumular mayores volúmenes de agua y permita aprovechar en promedio un 66,4% más de agua, lo cual se reflejaría en un aumento de los beneficios anuales pasando de los \$380.000 a los \$630.000 pesos chilenos que rentabilizaría el sistema unifamiliar en un 55% más que para la condición de solo usar el agua para la demanda de inodoros permitiendo recuperar la inversión al tercer año de funcionamiento.

Para el tercer y último caso analizado se considera el lote n°5 (ver Figura 5.4) del propietario de iniciales P.B, cuyo grupo familiar está compuesto por 3 personas y cuenta con una superficie de captación de 116 metros cuadrados (ver Tabla 5.20). Los valores de los indicadores para esta vivienda se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6.7.- Tabla de indicadores para la configuración de demanda de inodoros del caso 3.

Indicador	Serie histórica			Series sintéticas		
	20%	Promedio	80%	20%	Promedio	80%
Inversión	\$1.076.444			\$1.076.444		
Agua aprovechada anual	20,9 m ³	23,1 m ³	26,9 m ³	22,7 m ³	23,4 m ³	24,1 m ³
Disponibilidad anual	7 meses	7 meses	7 meses	6,6 meses	6,9 meses	7 meses
Agua NO aprovechada anual	6 m ³	16 m ³	28 m ³	17 m ³	21 m ³	25 m ³
Beneficio anual	\$248.000	\$267.637	\$298.000	\$264.000	\$271.558	\$279.000
VAN	\$1.242.795			\$1.167.000	\$1.225.622	\$1.367.000

Tabla 6.8.- Tabla de indicadores para la configuración "sin demanda" del caso 3.

Indicador	Serie histórica			Series sintéticas		
	20%	Promedio	80%	20%	Promedio	80%
Inversión	\$2.588.444			\$2.588.444		
Agua aprovechada anual	31,2 m ³	42,3 m ³	57,2 m ³	43,8 m ³	47,3 m ³	52,8 m ³
Beneficio anual	\$365.000	\$490.754	\$665.000	\$503.000	\$548.876	\$603.000
VAN	\$2.221.745			\$2.131.000	\$2.622.135	\$3.231.000

Para el tercer caso la tendencia no cambia en relación a que los beneficios anuales tienen una mejor valorización debido a que la cantidad de agua aprovechada es mayor para todas las configuraciones, pero para eso se debe invertir 2,4 veces más con respecto al valor del sistema para uso de inodoros que equivale a \$1.512.000 más para aumentar la acumulación y poder aprovechar en promedio 19 metros cúbicos más de agua, que valorizada a los \$11.594 pesos el metro cúbico permite aumentar de \$267.000 a \$490.000 los beneficios anuales siendo en promedio un 84% más, el cual permite que la valorización del proyecto sea un 79% más alta permitiendo recuperar la inversión en un plazo de 4 años y 3 meses.

Si se considera que una familia compra esa agua en el mercado podemos estimar que, con el sistema para usar toda el agua caída, esta familia compuesta de 3 personas podría tener un ahorro mensual de casi \$40.000 pesos promedio.

*Los valores de los indicadores de Agua aprovechada, Beneficio anual y Valor Actual Neto de las tablas 6.3 a la 6.8 se graficaron en los gráficos de la sección 6.1.4 junto con el análisis del comportamiento del sistema para la serie histórica de precipitaciones.

6.1.6 Error de medición indirecta

Para obtener las mediciones de superficie y perímetro de los techos en la zona de estudio se empleó el software de imagen satelital Google Earth Pro, dado que no se cuenta con información del creador de la plataforma con respecto a él margen de error que implica realizar mediciones a través de la aplicación, se procedió a contrarrestar estas mediciones realizadas con el software y la información entregada por el propietario de la vivienda del lote n°4 (ver Figura 5.4) obteniendo como error porcentual del 5% para mediciones de superficie y alrededor de 4% para medición de perímetro.

Con el propósito de levantar información con respecto a la variabilidad que puede ejercer este error de medición en los resultados, se procede a evaluar uno de los casos del apartado 6.1.5 y obtener resultados de los principales indicadores.

Para el caso 1 la superficie de techo es de $147 \text{ m}^2 \pm 7,4$ por lo tanto el intervalo que puede adoptar en función del error es de $[140 \text{ m}^2 ; 155 \text{ m}^2]$, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra los resultados de los indicadores para la configuración de demanda de inodoros, ya sea para la serie histórica de datos como la evaluación de las series sintéticas para los valores del rango correspondiente.

Tabla 6.9.-Tabla con valores de diferencia porcentual para el caso 1.

Indicador	Serie histórica				Series sintéticas			
	140 m ²		155 m ²		140 m ²		155 m ²	
	Valor	%	Valor	%	Valor	%	Valor	%
Inversión	\$2.459.579	0	\$2.459.579	0	\$2.459.579	0	\$2.459.579	0
Agua aprovechada anual	29,2 m ³	-1,3	30 m ³	+1,4	29,4 m ³	-1,4	30,1 m ³	+1
Beneficio anual	\$338.895	-1,3	\$347.827	+1,3	\$340.502	-1,2	\$349.242	+1,3
VAN	\$589.378	-7,2	\$682.463	+7,5	\$582.119	-7	\$671.482	+7,3

Para el caso 2 la superficie de techo es de 149 m² ± 7,5 por lo tanto el intervalo que puede adoptar en función del error es de [142 m² ;157 m²], los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6.10.-Tabla con valores de diferencia porcentual para el caso 2.

Indicador	Serie histórica				Series sintéticas			
	142 m ²		157 m ²		142 m ²		157 m ²	
	Valor	%	Valor	%	Valor	%	Valor	%
Inversión	\$1.108.219	-	\$1.108.219	-	\$1.108.219	-	\$1.108.219	-
Agua aprovechada anual	32,2 m ³	-1,5	33,2 m ³	+1,5	32,8 m ³	-1,8	33,8 m ³	+1,2
Beneficio anual	\$373.051	-1,7	\$384.855	+1,4	\$380.466	-1,7	\$392.237	+1,4
VAN	\$2.318.918	-2,8	\$2.439.436	+2,3	\$2.346.547	-2,8	\$2.467.753	+2,3

Para el caso 3 la superficie de techo es de 116 m² ± 5,8 por lo tanto el intervalo que puede adoptar en función del error es de [110 m² ;122 m²] se presenta en la Tabla 6.13 los resultados para el límite inferior de 110 m².

Tabla 6.11.- Tabla con valores de diferencia porcentual para el caso 3.

Indicador	Serie histórica				Series sintéticas			
	110 m ²		122 m ²		110 m ²		122 m ²	
	Valor	%	Valor	%	Valor	%	Valor	%
Inversión	\$1.076.444	-	\$1.194.199	+10,9	\$1.076.444	-	\$1.194.199	+10,9
Agua aprovechada anual	22,7 m ³	-1,7	25,8m ³	+11,6	23 m ³	-1,7	26 m ³	+11,1
Beneficio anual	\$263.244	-1,6	\$299.057	+11,7	\$267.233	-1,6	\$302.135	+11,2
VAN	\$1.197.636	-3,6	\$1.446.690	+16,4	\$1.211428	-1,2	\$1.452.763	+18,5

Se observa que, para los 3 casos analizados la diferencia porcentual en la mayoría de las configuraciones varía entre 1% y 7%, cuando el intervalo en función del error de la superficie no implica un cambio en el dimensionamiento del sistema, no así en el caso 3 para su límite superior de 122 m², que implicó un cambio de volumen en el estanque acumulador de 5 m³ a un estanque de 7,5 m³. Este cambio en el diseño del sistema influye en un aumento en los volúmenes de agua aprovechada por consecuente, el valor del beneficio anual presenta una variación porcentual de entre 11% y 12% para las distintas series rentabilizando el sistema hasta un 18,5% más.

En consecuencia, de las significativas variaciones de los indicadores para este caso puntual, es importante considerar los resultados como un intervalo de valores probables y no como un valor absoluto. Puesto que, para efectos de este apartado solo se analizó 3 casos de 16 posibles, donde se destaca una gran sensibilidad de los resultados con respecto a la variable de superficie de techo y el error indirecto al realizar estas mediciones.

CAPÍTULO VII

7. Conclusiones

7.1 Conclusiones generales

En este trabajo de título se propuso la idea de generar una metodología que permitiera evaluar técnica y económicamente los sistemas de captación y acumulación de aguas lluvias, con el propósito de disponer del recurso captado para el uso doméstico. Durante el desarrollo de este trabajo se logró de buena manera obtener un curso de acción con respecto al dimensionamiento de estos sistemas y permitió evaluar de forma correcta los SCALL's generando escenarios futuros mediante la simulación de Montecarlo y obteniendo distintos indicadores tanto técnicos como económicos que permiten facilitar la toma de decisiones para llevar a cabo la implementación de estos sistemas.

Dentro del propósito general de la memoria, se cumplió con una serie de objetivos que permitió el cumplimiento del objetivo general utilizando la metodología propuesta dentro de este trabajo. Se evaluó la hidrología del sector obteniendo los primeros parámetros de agua potencialmente acumulable y definiendo la demanda según las consideraciones de organismos internacionales en materia de salud como lo es la Organización Mundial de la Salud. Se logró dimensionar los sistemas de acuerdo con las condiciones del sector en estudio y se pudo estimar los presupuestos de los sistemas de captación y acumulación como la implementación de estos.

Se logro generar un análisis de costo – beneficio de la propuesta en base al actual sistema de abastecimiento, sin embargo, este análisis puede adoptar otros matices por el hecho que la valorización del recurso captado puede ser estimado con otras herramientas financieras que escapan a la formación de la carrera pudiendo tener una valorización mucho más importante si se considera que el agua no solo tiene un costo marginal de llevar este recurso desde la fuente de extracción hasta su disposición final. Este punto es muy importante y se puede dejar para que otras áreas del conocimiento puedan aportar para contribuir y seguir los estudios con respecto a la valorización del agua en zonas de escasez.

Por último, la metodología desarrollada durante el trabajo se implementó en la localidad de El Manzano en el sector Los Molles siendo utilizada para evaluar los sistemas dentro de la comunidad en la cual los SCALL's funcionan como sistemas complementarios al actual abastecimiento de camiones aljibe de manera que permita aumentar la disponibilidad en el sector. Se puede concluir que los sistemas en su mayoría de configuraciones modeladas en este estudio son económicamente rentable debido principalmente a su baja inversión, pero sin duda alguna los sistemas rinden de mejor manera si se diseñan para el aprovechamiento de toda el agua caída en vez de restringir el dimensionamiento a una demanda fija determinada. Ya que el ahorro de los costos de inversión inicial no es considerable con respecto a los beneficios obtenidos, por lo que se recomienda que los proyectos apunten a la utilización total del agua

7.2 Primera hipótesis

Primeramente, este trabajo tenía la hipótesis de revisar la factibilidad técnica y económica de la utilización de sistemas de captación y acumulación de aguas lluvias, con el fin de suplir la demanda de agua que actualmente proporciona la Municipalidad de Quilpué mediante camiones aljibes en la zona de los Molles en un sector denominado El Manzano.

Actualmente se entrega 500 litros per cápita de forma semanal en el sector, por lo que mensualmente reciben 2 metros cúbicos de agua por persona. La población que se ve beneficiada con la entrega de agua corresponde a 72 personas. Por lo tanto, los volúmenes de agua que se entregan en todo el sector El Manzano de forma mensual corresponden a 144 metros cúbicos de agua.

Una vez realizado el análisis histórico de las precipitaciones en base a estaciones cercanas a la zona de estudio, "Lago Peñuelas" y "Las Piedras", se concluyó que la cantidad de precipitación en el sector es insuficiente para poder realizar semejante proyecto. Debido que la cantidad de agua entregada anualmente por la municipalidad alcanza los 1728 metros cúbicos de agua potable en el sector. Para generar una idea si todas las casas tuvieran la dimensión de techo representativa del sector que corresponde a los 110 metros cuadrados, se alcanza a recolectar 353,4 metros cúbicos al año si se considera una precipitación de diseño con un 90% de probabilidad de excedencia, que corresponde a solo el 20,45% del total de agua que se entrega actualmente y que de todas maneras es insuficiente para considerar un acceso óptimo al recurso agua.

Debido que la cantidad de agua caída es insuficiente y considerando que el sector en estudio no cuenta con un acceso al recurso agua adecuado en base a los estudios de la Organización Mundial de la Salud (OMS), se propuso la utilización de Sistemas de Captación y Acumulación de aguas Lluvias (SCALL's), para aumentar la disponibilidad de agua en el sector y alcanzar el nivel óptimo de acceso al agua que establece la OMS que corresponde a 100 litros diarios por persona. Por lo tanto, en vez de funcionar como un reemplazo al actual sistema de abastecimiento mediante camiones aljibe, se consideró que los SCALL's funcionen como un sistema mixto entre ambos sistemas.

A lo largo de la presente memoria de título se propuso los sistemas de captación de aguas lluvias como una alternativa para aumentar la disponibilidad del recurso agua en una zona rural de la región de Valparaíso, mediante el cual se obtuvo distintos resultados que influyen directamente en los cursos de acciones para la toma de decisiones, que van en pro de variables técnicas como lo es la disponibilidad de agua durante el año, volúmenes de agua aprovechada o de variables económicas como lo son la inversión inicial y el flujo de cajas entre los costos y beneficios.

7.3 Indicadores

Las conclusiones presentadas en este apartado corresponden al análisis del sistema de captación de aguas lluvias para la utilización del recurso agua en uso doméstico de segundo orden definido para descarga de inodoros en viviendas unifamiliares. Dependiendo del enfoque que se le quiere dar al estudio, se pueden seleccionar otros tipos de indicadores que se consideren relevantes para el análisis del proyecto.

Inversión

La inversión inicial es el principal costo de los SCALL's y uno de los principales indicadores a considerar en la toma de decisiones con respecto a la realización de proyectos. Para el estudio llevado en el sector El Manzano se concluye que los sistemas con acumulaciones sobre los 10 metros cúbicos de capacidad aumentan considerablemente la inversión bordeando los \$2,5 millones de pesos, llegando incluso al doble de la inversión de los proyectos que contemplen dimensiones de acumuladores menores a 10 metros cúbicos que promedian una inversión en torno a \$1,1 millones.

Disponibilidad

La disponibilidad es otro de los indicadores que permiten la toma de decisiones si lo que interesa a la hora de decidir es la cantidad de satisfacción de la demanda, el estudio demostró que para las viviendas habitadas por dos personas independiente de la superficie de captación la demanda asignada se cumple durante todo el año ya que varía entre 11 y 12 meses durante el año. La disponibilidad para 3 personas por vivienda presenta una mayor dispersión en el cumplimiento de la demanda por lo que varía entre 7 y 11 meses. Para 4 personas viviendo en un hogar la mitad del año tendrá agua suficiente para la descarga de inodoro ya que la disponibilidad varía entre 5 y 8 meses. Para 5 y 6 personas por casa la disponibilidad se encuentra entre 3 y 6 meses. Por lo tanto, si el criterio que prima para la construcción de estos sistemas es la disponibilidad se recomendaría la construcción de sistemas para 2 y 3 personas por viviendas.

Beneficio anual y Agua aprovechada

En tanto los indicadores de beneficio anual y agua aprovechada son directamente proporcionales entre sí, por lo que si los volúmenes aprovechados aumentan los beneficios económicos anuales también. En la misma lógica el indicador de agua no aprovechada indica la cantidad de agua que el sistema puede recolectar pero que no se utiliza para ningún uso dentro del hogar, es aquí donde se cuestiona ¿Por qué cuando hay mayor cantidad de agua captada y una alta demanda (caso 170 m² y 6 personas viviendo en el hogar) también hay una alta cantidad de agua que no es aprovechada? Esto se explica porque el diseño de los sistemas está en base a la precipitación de diseño asociada al 90% de la probabilidad de excedencia de la función de distribución de probabilidad Log Normal, por lo que el valor de esta precipitación es bajo y corresponde a 223,1 mm. Por lo que al momento de diseñar con la precipitación de diseño el análisis anual demuestra que utiliza toda el agua captada, sin embargo, cuando se genera la evaluación mediante las series sintéticas estos valores de precipitación son mayores a la de diseño. Por lo tanto, se deduce que los estanques están sub dimensionados para la evaluación de las series sintéticas como la serie de datos históricos de precipitación.

Valor Actual Neto

El Valor Actual Neto es la rentabilización de los flujos de caja que se obtienen por la implementación del proyecto durante su vida útil, para la demanda de WC y los criterios de dimensionamiento explicados durante el trabajo. Los mayores valores de VAN se obtuvieron para las configuraciones donde los beneficios son mayores. La diferencia entre los mejores sistemas rentabilizados y los peores rentabilizados es considerable, por lo que a primera instancia se recomienda no implementar SCALL's para viviendas con dos personas por hogar ya que alcanzan valores de VAN promedio negativos. Para la dimensión de techo de 110 m² el 90% de los datos de la simulación de Montecarlo son negativos, de igual manera para 130 m² el 27,5% de los datos obtuvieron valores negativos. Las dimensiones de 150 y 170 m² obtuvieron el 20% y 10% de valores negativos respectivamente.

Esto es en primera instancia ya que los valores de rentabilidad negativa no superan los -\$300.000 y este valor puede ser adoptado por el inversor si considera que dentro de los beneficios de la propuesta no se encuentran cuantificados los beneficios sociales.

Indicadores unitarios

Los indicadores de forma unitaria refuerzan la idea de la economía de escala, donde la inversión unitaria es mayor para las configuraciones con menos personas. En cuanto al beneficio unitario los valores más altos por metro cuadrado se presentan en configuraciones de menos personas por vivienda, por lo tanto, las menores dimensiones de captación tienen un mejor rendimiento del beneficio por unidad de superficie. Sin embargo, este mejor rendimiento del beneficio no es capaz de contrarrestar el efecto de la inversión por lo que los valores de VAN unitario de estas configuraciones siguen siendo negativo. En cuanto a las configuraciones de 110 metros cuadrados son las que presentan menos inversión unitaria y mayor beneficio unitario por lo que se rentabilizan de mejor manera por unidad de superficie y por personas.

7.4 Análisis de sensibilidad

En este apartado se presentan conclusiones con respecto a la sensibilidad de ciertos parámetros en el análisis del sistema utilizando la metodología propuesta durante la investigación. Es importante mencionar que, en la generación de las series aleatorias de precipitación, un año es generado independientemente del anterior. Esto en la realidad no es completamente así, debido que hay periodos de tiempo que se ven afectados por fenómenos climatológicos como son los fenómenos del Niño y la Niña.

Función de Distribución de Probabilidad

La diferencia entre la elección de una FDP por sobre otra no se puede descartar, ya que si bien la función Log Normal se ajustó de mejor manera que las otras, las pruebas de bondad de ajuste arrojaron que todas las funciones tienen un ajuste aceptable.

Considerando lo anterior se analizó la variabilidad del sistema con otras FDP, por lo que se pudo concluir que la elección de una por sobre otra no presenta gran influencia en los indicadores del sistema. Esto se debe que las variaciones entre las precipitaciones de diseño asociadas para el 90% de cada función y la elegida es de -7% para la función de Goodrich y de un 19% para la función Pearson tipo III, por lo que su influencia en el cambio de dimensionamiento de los sistemas en la etapa de diseño no cambia de manera significativa. De hecho, la mayoría de las configuraciones siguieron manteniendo sus dimensiones originales por lo que a la hora de la simulación de Montecarlo los resultados son diferentes, pero no muy diferentes a los elegidos originalmente. Se

propone que en estudios futuros se pudiese generar una prueba estadística para analizar si las diferencias entre las distintas FDP son o no diferencias significativas.

Valor del agua

Durante el desarrollo de este trabajo, se ha estipulado que el valor del beneficio económico del sistema se cuantifica en función de la valorización de llevar un metro cúbico más de agua que no disponían en la zona y que es producido por los SCALL's. Y en el caso que no fuera producido por los sistemas de captación de aguas lluvias, la Municipalidad o los mismos habitantes tendrían que comprar este metro cúbico de agua. Por lo tanto, se concluyó que una estimación en base al costo marginal de llevar ese metro cúbico de agua extra mediante camiones aljibe, es una medida conservadora de cuantificar el valor del agua, ya que el valor real del agua tiene un costo diferente y que se valora de mayor manera considerando otras variables que para efectos de este estudio no se consideran como los beneficios sociales, culturales y de salud.

El análisis de sensibilidad de esta variable se generó comparando la evaluación del sistema para el valor estimado en el apartado 5.4.1 correspondiente a \$11.594 $\$/m^3$ y el valor promedio pagado por la Municipalidad de Quilpué según consta en los registros de la Gobernación Provincial asciende a los \$24.607.

Se puede concluir que la valorización del agua es el parámetro más sensible y con mayor influencia en los resultados de los distintos indicadores económicos, por lo que las variaciones de los indicadores de beneficios anuales y VAN aumentan de manera considerable al utilizar los \$24.607 pesos por metro cúbico de agua extra. Para el caso del beneficio anual aumentan a más del doble su valor y el indicador VAN sobrepasa los 3,5 millones y puede alcanzar hasta una rentabilidad de 8 millones de pesos.

Redefinir la demanda

Debido a que el agua de lluvia es de naturaleza destilada, se definió que el agua captada sea utilizada como uso doméstico de segunda necesidad. Es por esto que se asigna una demanda fija para utilizar el agua en la descarga de inodoros, al momento de hacer la diferencia entre lo que entra al sistema y la demanda que sale durante el año, se presentaron configuraciones en la cual había un excedente de agua no utilizada, principalmente en las configuraciones con grandes superficies de techo y pocas personas por vivienda. Al momento de dimensionar los estanques acumuladores y los volúmenes de regulación se ajustaron con el propósito que cumpla con la demanda fija y disminuyeran los costos de inversión. Si bien la inversión disminuyó, los sistemas no rinden a todo su potencial por lo que, al diseñar los sistemas de esta manera, se deja de acumular mucha agua la cual no es aprovechada. Se observó que esta estrategia de diseño no es tan rentable, por lo que se obtienen mayores beneficios si se aumenta la inversión y se diseña para capturar y utilizar toda el agua caída.

El diseñar estos sistemas para la utilización de toda el agua trae consigo un mayor aprovechamiento del agua por lo que los beneficios anuales del sistema aumentan, y en ciertas configuraciones la rentabilidad aumenta de manera considerable. Además, los rendimientos de cada una de estas configuraciones se encuentran a su máxima capacidad utilizando toda el agua que cae en la zona.

El hecho que se utilice toda el agua no significa que estos sistemas sean utilizados como abastecimiento de todas las necesidades dentro de un hogar, pero si lo suficiente como para asignar en algunos casos más de un uso como lo son para los casos donde viven menos personas por vivienda.

Serie histórica de precipitación

Para el análisis de la serie histórica de precipitación de la estación meteorológica Las Piedras se concluye que, el comportamiento de los distintos indicadores para las distintas configuraciones de habitantes/superficie de techo presenta un menor rendimiento que el análisis de las series sintéticas aleatorias para la condición "sin demanda", en cambio para la demanda asignada de inodoros el comportamiento entre la serie histórica y las series sintéticas presentan un comportamiento mucho más similar, donde las diferencias en los indicadores no son perceptible gráficamente.

Error de medición indirecta

El error estimado asociado a la medición indirecta a través de software de imágenes satelitales tiene una influencia en el comportamiento de los sistemas muy dispar ya que, para algunos de los sistemas no cambian su diseño base, por lo tanto, la diferencia porcentual de los indicadores no es significativa alcanzando diferencias menores a 7%. En cambio, los sistemas que se ven afectados en su diseño por el margen de error presentan diferencias porcentuales mayores que pueden alcanzar hasta 19% dentro de los casos evaluados en este trabajo de título.

Por lo tanto, a la hora de realizar el análisis a través de la metodología propuesta en este trabajo es necesario establecer de buena manera la variable superficie de techo ya que, para ciertas configuraciones puede afectar en gran medida los resultados.

7.5 Comentarios finales

La implementación de los sistemas de captación y acumulación de aguas lluvias como fuente de abastecimiento de agua es una alternativa de desarrollo sustentable y amigable con el medio ambiente, por lo que este tipo de sistemas adquieren un valor agregado a la hora de ser utilizados para aumentar la disponibilidad de agua en sectores rurales o semi rurales donde haya problemas de escasez hídrica.

Los mayores beneficios de los SCALL's van asociados al área sociocultural, debido que el aumento de la disponibilidad de agua en sectores de escasez produce un mejoramiento sustancial en la calidad de vida de las personas en ámbitos de implicancia directa como es la salud y en ámbitos no tan directos como el social y recreacional.

Debido al clima semiárido de la zona y la estacionalidad de las lluvias, sumado a la poca agua caída, es que el sistema solo puede ser utilizado de manera complementaria al actual sistema de abastecimiento, permitiendo aumentar la disponibilidad de agua a estándares óptimos según lo define la OMS.

Durante la investigación se observó que el valor de los estanques acumuladores es el principal ítem dentro de los sistemas que encarecen la propuesta, ya que los costos fijos asociados a la construcción e instalación son marginales con los costos de la acumulación. Se propone continuar los estudios con respecto a los SCALL's utilizando otro tipo de acumuladores que puedan ser económicamente más asequibles. Se espera que a medida que este tipo de sistemas sean mayormente empleados y estudiados, en conjunto con el avance de nuevas tecnologías e innovación los costos de inversión de este tipo de proyectos disminuyan.

Referencias

- [1] Conaf, «<http://www.conaf.cl/>,» [En línea]. Available: <http://www.conaf.cl/casi-7-millones-de-chilenos-afectados-por-la-desertificacion/>.
- [2] Ministerio de Obras Públicas, «Decreto M.O.P N°4,» Enero 2017.
- [3] Ministerio de Obras Públicas, «Decreto M.O.P N°22,» Febrero 2017.
- [4] Ministerio de Obras Públicas, «Decreto M.O.P N°37,» Abril 2017.
- [5] P. d. I. N. U. p. e. desarrollo, «Captación y aprovechamiento de agua lluvia en America latina, experiencia y conclusiones de un debate.,» 2017.
- [6] Organización Mundial de la Salud, «Domestic water quantity, service, level and health,» Ginebra, Suiza, 2003.
- [7] J. R. Navea, «Estudio cosecha de aguas lluvias en áreas de secano Region de Coquímbo, Resumen Ejecutivo,» 2015.
- [8] Sarai Guzmán Ruiz, «Sistema de captación de aguas pluviales adaptable a casas habitación,» Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca., 2014.
- [9] A. A. C. M. J. T. P. G. M. C. Roberto Pizarro, «Manual de diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile». *Documento técnico N°36*.
- [10] A. M. V. Hoys, «Grecia, un universo de agua.,» [En línea]. Available: http://www2.uned.es/geo-1-historia-antigua-universal/PDF/09_GRECIA_AGUA%20Y%20CULTURA.pdf.
- [11] Oficina Regional de la FAO para America Latina y El Caribe, «Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia, experiencias en America Latina,» Santiago, Chile, 2000.
- [12] I. M. d. T. d. Agua, «Pagina del Gobierno Mexicano,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/imta/articulos/el-imta-trabaja-en-sistemas-de-captacion-de-agua-de-lluvia-en-escuelas-rurales?idiom=es>.
- [13] Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua, «Captación y aprovechamiento de agua pluvial a nivel domiciliario y comunitario,» de *Primer encuentro reunamos acciones por el agua*, Mexico, 2015.
- [14] U. N. E. P. (UNEP), «Rainwater harvesting and utilization, an environmetally sound approach for sustainable urban water management,» *United Nations water resources series*, n° 63, 2002.
- [15] S. Sendanayake, «Rainwater harvesting for urban living,» Sri Lanka, 2016.

- [16] Subsecretaria del interior - Intendencia regional del Biobío, «Programa sistemas de captación de agua lluvia para uso domestico,» junio 2016.
- [17] Agua Dulce Chile, «Agua Dulce Chile,» [En línea]. Available: <https://aguadulcechile.cl/>. [Último acceso: 8 mayo 2018].
- [18] Departamento de hidraulica, Universidad de Nordeste., «Guia del trabajo practico N°2 "Procesamiento de los datos de precipitacion",» Corrientes, Argentina..
- [19] Roberto Pizarro, Paula Ausensi, Dayanna Aravena, Claudia Sanguesa, «Evaluacion de métodos hidrológicos para completar datos faltantes de precipitación en estaciones pluviográficas de la VII region del Maule, Chile,» Talca.
- [20] M. A. Navarro, «Estimación de funciones de distribución de probabilidad, para caudales maximos, en la Region del Maule.,» Talca, Chile., 2007.
- [21] O. M. d. I. S. Organizacion Panamericana de la Salud, «Guia tecnica N°9 "cantidad minima de agua neCésaria para uso domestico",» 2009.
- [22] F. A. A. Carmen Albiol Omella, «AQUAE PAPERS N°6 "La reducción del consumo de agua en españa: Causas y tendencias",» Fundacion AQUAE org, Madrid, España., 2014.
- [23] T. M.-P. A. G. C. T. J. R. G. Ramon Farreny, «Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain,» Barcelona, Spain , 2011.
- [24] M. F. Stange, «Emprendimiento social y su evaluación,» Santiago de Chle, 2013.
- [25] J. G. Dan, «Introducción del Factor Humano al Análisis de Riesgo,» Barcelona, 2015.
- [26] Sonia López Martín, «expansion.com diccionario economico,» [En línea]. Available: <http://www.expansion.com/diccionario-economico/simulacion-de-monte-carlo.html>. [Último acceso: 15 junio 2018].
- [27] P. P. Federico Luebert, «Variabilidad climatica y bioclimas de la region de Valparaíso, Chile.,» 2012.
- [28] Biblioteca del Congreso Nacional Chile, «Clima y vegetación Región de Valparaíso,» [En línea]. Available: <http://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region5/clima.htm>.
- [29] Gobierno Regional de Valparaíso, «Clima regional,» [En línea]. Available: <http://www.gorevalparaiso.cl/clima.php>.
- [30] Gobierno de Chile, «Cuidemos el agua: Cifras y recomendaciones,» 14 Enero 2015. [En línea]. Available: <http://www.gob.cl/cuidemos-el-agua/>.
- [31] Camara Chilena de la Construccion , «Listado de rendimientos en que se ha basado los convenios de la construcción,» Sociedad de servicios de la construccion , 1980.

- [32] Sistema nacional de inversiones - MIDESO , «Curso de preparación y evaluación social de proyectos "EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS",» 2017.
- [34] Organización de Naciones Unidas, «18/1 El derecho humano al agua potable y saneamiento.,» de *Consejo de Derechos Humanos*, 2011.
- [35] WHO Media centre, «World Health Organization,» Julio 2017. [En línea]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs392/es/>. [Último acceso: 11 Diciembre 2017].
- [36] U. A. d. N. Leon, «UANL.mx,» 1 octubre 2013. [En línea]. Available: <http://sds.uanl.mx/el-concepto-desarrollo-sustentable/>.

ANEXO

Anexo 1

Tabla 0.1.- Función Auxiliar de Goodrich P(p).

p	P(p)	p	P(p)	p	P(p)	p	P(p)
0,01	-1,081073	0,41	0,386468	0,81	1,456904	1,21	2,674452
0,02	-1,024852	0,42	0,414146	0,82	1,484261	1,22	2,709088
0,03	-0,970701	0,43	0,441677	0,83	1,511921	,23	2,744007
0,04	-0,918454	0,44	0,469072	0,84	1,539586	1,24	2,779192
0,05	-0,867965	0,45	0,496340	0,85	1,567363	1,25	2,814648
0,06	-0,819099	0,46	0,523491	0,86	1,595254	1,26	2,850379
0,07	-0,771738	0,47	0,550535	0,87	1,623263	1,27	2,88639
0,08	-0,725772	0,48	0,577480	0,88	1,651396	1,28	2,922686
0,09	-0,681101	0,49	0,604336	0,89	1,679655	1,29	2,959269
0,10	-0,637637	0,50	0,631110	0,90	1,708044	1,30	2,996145
0,11	-0,595295	0,51	0,657811	0,91	1,736569	1,31	3,033319
0,12	-0,554002	0,52	0,684447	0,92	1,765232	1,32	3,070794
0,13	-0,513687	0,53	0,711025	0,93	1,794037	1,33	3,108576
0,14	-0,474287	0,54	0,737553	0,94	1,822990	1,34	3,146668
0,15	-0,435743	0,55	0,764037	0,95	1,852092	1,35	3,185076
0,16	-0,398001	0,56	0,790485	0,96	1,881349	1,36	3,223804
0,17	-0,361012	0,57	0,816904	0,97	1,910765	1,37	3,262857
0,18	-0,324728	0,58	0,843299	0,98	1,940342	1,38	3,30224
0,19	-0,289107	0,59	0,869677	0,99	1,970086	1,39	3,341856
0,20	-0,254109	0,60	0,896450	1,00	2,000000	1,40	3,382012
0,21	-0,219696	0,61	0,922408	1,01	2,030087	1,41	3,422412
0,22	-0,185834	0,62	0,948772	1,02	2,060353	1,42	3,463161
0,23	-0,152490	0,63	0,975143	1,03	2,090800	1,43	3,504263
0,24	-0,119634	0,64	1,001527	1,04	2,121493	1,44	3,545725
0,25	-0,087236	0,65	1,027928	1,05	2,152255	1,45	3,58755
0,26	-0,055272	0,66	1,054354	1,06	2,183271	1,46	3,629743
0,27	-0,023715	0,67	1,080608	1,07	2,214484	1,47	3,672311
0,28	0,007458	0,68	1,107295	1,08	2,245899	1,48	3,715251
0,29	0,038270	0,69	1,133822	1,09	2,277519	1,49	3,75859
0,30	0,068742	0,70	1,160392	1,10	2,309348	1,50	3,80231
0,31	0,098893	0,71	1,187011	1,11	2,341390	1,51	3,846426
0,32	0,128742	0,72	1,213684	1,12	2,373650	1,52	3,890942
0,33	0,158307	0,73	1,240415	1,13	2,406131	1,53	3,935861
0,34	0,187606	0,74	1,267209	1,14	2,438838	1,54	3,981187
0,35	0,216653	0,75	1,294070	1,15	2,471773	1,55	4,026946
0,36	0,245464	0,76	1,321003	1,16	2,504942	1,56	4,073118
0,37	0,274054	0,77	1,348013	1,17	2,538349	1,57	4,119718
0,38	0,302437	0,78	1,375104	1,18	2,571997	1,58	4,166751
0,39	0,330625	0,79	1,402279	1,19	2,605891	1,59	4,214224
0,40	0,358631	0,80	1,429545	1,20	2,640035	1,60	4,262142

Fuente: Pizarro *et al.* (1988)

Tabla 0.2.- Valores función Chi- cuadrado, para n grados de libertad.

df	0,995	0,99	0,975	0,95	0,90	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005
1	---	---	0,001	0,004	0,016	2,706	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,010	0,020	0,051	0,103	0,211	4,605	5,991	7,378	9,210	10,597
3	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	6,251	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,064	7,779	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	1,610	9,236	11,070	12,833	15,086	16,750
6	0,676	0,872	1,237	1,635	2,204	10,645	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,989	1,239	1,690	2,167	2,833	12,017	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,344	1,646	2,180	2,733	3,490	13,362	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,735	2,088	2,700	3,325	4,168	14,684	16,919	19,023	21,666	23,589
10	2,156	2,558	3,247	3,940	4,865	15,987	18,307	20,483	23,209	25,188
11	2,603	3,053	3,816	4,575	5,578	17,275	19,675	21,920	24,725	26,757
12	3,074	3,571	4,404	5,226	6,304	18,549	21,026	23,337	26,217	28,300
13	3,565	4,107	5,009	5,892	7,042	19,812	22,362	24,736	27,688	29,819
14	4,075	4,660	5,629	6,571	7,790	21,064	23,685	26,119	29,141	31,319
15	4,601	5,229	6,262	7,261	8,547	22,307	24,996	27,488	30,578	32,801
16	5,142	5,812	6,908	7,962	9,312	23,542	26,296	28,845	32,000	34,267
17	5,697	6,408	7,564	8,672	10,085	24,769	27,587	30,191	33,409	35,718
18	6,265	7,015	8,231	9,390	10,865	25,989	28,869	31,526	34,805	37,156
19	6,844	7,633	8,907	10,117	11,651	27,204	30,144	32,852	36,191	38,582
20	7,434	8,260	9,591	10,851	12,443	28,412	31,410	34,170	37,566	39,997
21	8,034	8,897	10,283	11,591	13,240	29,615	32,671	35,479	38,932	41,401
22	8,643	9,542	10,982	12,338	14,041	30,813	33,924	36,781	40,289	42,796
23	9,260	10,196	11,689	13,091	14,848	32,007	35,172	38,076	41,638	44,181
24	9,886	10,856	12,401	13,848	15,659	33,196	36,415	39,364	42,980	45,559
25	10,520	11,524	13,120	14,611	16,473	34,382	37,652	40,646	44,314	46,928
26	11,160	12,198	13,844	15,379	17,292	35,563	38,885	41,923	45,642	48,290
27	11,808	12,879	14,573	16,151	18,114	36,741	40,113	43,195	46,963	49,645
28	12,461	13,565	15,308	16,928	18,939	37,916	41,337	44,461	48,278	50,993
29	13,121	14,256	16,047	17,708	19,768	39,087	42,557	45,722	49,588	52,336
30	13,787	14,953	16,791	18,493	20,599	40,256	43,773	46,979	50,892	53,672
40	20,707	22,164	24,433	26,509	29,051	51,805	55,758	59,342	63,691	66,766
50	27,991	29,707	32,357	34,764	37,689	63,167	67,505	71,420	76,154	79,490
60	35,534	37,485	40,482	43,188	46,459	74,397	79,082	83,298	88,379	91,952
70	43,275	45,442	48,758	51,739	55,329	85,527	90,531	95,023	100,425	104,215
80	51,172	53,540	57,153	60,391	64,278	96,578	101,879	106,629	112,329	116,321
90	59,196	61,754	65,647	69,126	73,291	107,565	113,145	118,136	124,116	128,299
100	67,328	70,065	74,222	77,929	82,358	118,498	124,342	129,5		

Tabla 0.3.- Distribución del estadístico de Kolmogorov – Smirnov (Dt).

n/α	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	n/α	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1	0,900	0,950	0,975	0,990	0,995	21	0,226	0,259	0,287	0,321	0,344
2	0,684	0,776	0,842	0,900	0,929	22	0,221	0,253	0,281	0,314	0,337
3	0,565	0,636	0,780	0,785	0,829	23	0,216	0,247	0,275	0,307	0,330
4	0,493	0,565	0,624	0,689	0,734	24	0,212	0,242	0,269	0,301	0,323
5	0,447	0,509	0,563	0,627	0,669	25	0,208	0,238	0,264	0,295	0,317
6	0,410	0,468	0,519	0,577	0,617	26	0,204	0,233	0,259	0,290	0,311
7	0,381	0,436	0,483	0,538	0,576	27	0,200	0,229	0,254	0,284	0,305
8	0,358	0,410	0,454	0,507	0,542	28	0,197	0,225	0,250	0,279	0,300
9	0,339	0,387	0,430	0,480	0,513	29	0,193	0,221	0,246	0,275	0,295
10	0,323	0,369	0,409	0,457	0,489	30	0,190	0,218	0,242	0,270	0,290
11	0,308	0,352	0,391	0,437	0,468	31	0,187	0,214	0,238	0,266	0,285
12	0,296	0,338	0,375	0,419	0,449	32	0,184	0,211	0,234	0,262	0,281
13	0,285	0,325	0,361	0,404	0,432	33	0,182	0,208	0,231	0,258	0,277
14	0,275	0,314	0,349	0,390	0,418	34	0,179	0,205	0,227	0,254	0,27
15	0,266	0,304	0,338	0,377	0,404	35	0,177	0,202	0,224	0,251	0,269
16	0,258	0,295	0,327	0,366	0,392	36	0,174	0,199	0,221	0,247	0,265
17	0,250	0,286	0,318	0,355	0,381	37	0,172	0,196	0,218	0,244	0,262
18	0,244	0,279	0,309	0,346	0,371	38	0,170	0,194	0,215	0,241	0,258
19	0,237	0,271	0,301	0,337	0,361	39	0,168	0,191	0,213	0,238	0,255
20	0,232	0,265	0,294	0,329	0,352	40	0,165	0,189	0,210	0,235	0,252
>40	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,52}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{n}}$						

Tabla 0.4.- Valores función gamma.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,0	1,000	0,994	0,989	0,984	0,978	0,974	0,969	0,964	0,960	0,955
1,1	0,951	0,947	0,944	0,940	0,936	0,933	0,930	0,927	0,924	0,921
1,2	0,918	0,916	0,913	0,911	0,909	0,906	0,904	0,903	0,901	0,899
1,3	0,897	0,896	0,895	0,893	0,892	0,891	0,890	0,889	0,889	0,888
1,4	0,887	0,887	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886
1,5	0,886	0,887	0,887	0,888	0,888	0,889	0,890	0,890	0,891	0,892
1,6	0,894	0,895	0,896	0,897	0,899	0,900	0,902	0,903	0,905	0,907
1,7	0,909	0,911	0,913	0,915	0,917	0,919	0,921	0,924	0,926	0,929
1,8	0,931	0,934	0,937	0,940	0,943	0,946	0,949	0,952	0,955	0,958
1,9	0,962	0,965	0,969	0,972	0,976	0,980	0,984	0,988	0,992	0,996

Fuente: Pizarro *et al.* (1988)

Anexo 2

registrocdt.cl

WC Valencia Premium

Código W.C.	1120
Código Estanque	A02301
Características	<ul style="list-style-type: none">• Wc con tecnología Dual Flush : Sistema de doble descarga 6 lts para sólidos y 4,1 lts para líquidos• Disponible con descarga al piso• Taza redonda para optimizar espacios
Taza	Redonda
Descarga (cms)	20,5
Consumo de Agua (lts)	6/4,1 lts
Peso Aprox(Kgs)	28,4
Altura Aprox (Cms)	76,3
Profundidad Aprox (Cms)	70
Ancho Aprox (Cms)	39,5
Material	Loza
Color	Blanco
Procedencia	Chile
Producto con Certificación	Certificación Cesmec
Incluye	Wc Estanque Fitting Tapa Asiento de polipropileno
Elementos necesarios para instalar	Pernos de anclaje Llave angular Flexible para llave angular Sello de cera

Anexo 3

Presupuesto de construcción para las distintas alternativas de captación

Para 130 [m ²]				
ZONA DE CONDUCCIÓN	Precio Unitario	Cantidad	Unidad	Precio
Perímetro considerado		60	m ²	
Esquineros	\$ 1.745	8	unid	\$ 13.960
Tapas	\$ 225	4	unid	\$ 900
Unión de bajada	\$ 2.218	2	unid	\$ 4.436
Tubo de bajada 3 [m]	\$ 2.898	6	unid	\$ 17.388
Canaleta PVC 4 [m]	\$ 4.387	15	unid	\$ 65.805
Ganchos	\$ 732	60	unid	\$ 43.920
Filtro	\$ 20.000	1	unid	\$ 20.000
Codo de bajada	\$ 1.714	2	unid	\$ 3.428
Uniones de canaleta	\$ 800	2	unid	\$ 1.600
Abrazadera de tubo	\$ 473	12	unid	\$ 5.676
Llave de bola doble cementar	\$ 20.347	2	unid	\$ 40.694
TERRAPLEN				
Gravilla	\$ 12.000	0,5	m ³	\$ 6.000
Arena	\$ 16.000	0,5	m ³	\$ 8.000
Cemento 25 [kg] Bio Bio	\$ 3.580	6	sacos	\$ 21.480
Arriendo compactador	\$ 4.868	4		\$ 19.472
Arriendo betonera 4 hrs	\$ 4.793	4		\$ 19.172
			COSTO TOTAL	\$ 291.931

Para 150 [m ²]				
ZONA DE CONDUCCIÓN	Precio Unitario	Cantidad	Unidad	Precio
Perímetro considerado		65	m ²	
Esquineros	\$ 1.745	8	unid	\$ 13.960
Tapas	\$ 225	4	unid	\$ 900
Unión de bajada	\$ 2.218	2	unid	\$ 4.436
Tubo de bajada 3 [m]	\$ 2.898	6	unid	\$ 17.388
Canaleta PVC 4 [m]	\$ 4.387	17	unid	\$ 74.579
Ganchos	\$ 732	68		\$ 49.776
Filtro	\$ 20.000	1	unid	\$ 20.000
Codo de bajada	\$ 1.714	2	unid	\$ 3.428
Uniones de canaleta	\$ 800	16	unid	\$ 12.800
Abrazadera de tubo	\$ 473	12	unid	\$ 5.676
Llave de bola doble cementar	\$ 20.347	2	unid	\$ 40.694
TERRAPLEN				
Gravilla	\$ 12.000	0,5	m ³	\$ 6.000
Arena	\$ 16.000	0,5	m ³	\$ 8.000
Cemento 25 [kg] Bio Bio	\$ 3.580	6	sacos	\$ 21.480
Arriendo compactador	\$ 4.868	4		\$ 19.472
Arriendo betonera 4 hrs	\$ 4.793	4		\$ 19.172
			COSTO TOTAL	\$ 317.761

Para 170 [m ²]				
ZONA DE CONDUCCIÓN	Precio Unitario	Cantidad	Unidad	Precio
Perímetro considerado		75	m ²	
Esquineros	\$ 1.745	8	unid	\$ 13.960
Tapas	\$ 225	4	unid	\$ 900
Unión de bajada	\$ 2.218	2	unid	\$ 4.436
Tubo de bajada 3 [m]	\$ 2.898	6	unid	\$ 17.388
Canaleta PVC 4 [m]	\$ 4.387	18,75	unid	\$ 83.353
Ganchos	\$ 732	76	unid	\$ 55.632
Filtro	\$ 20.000	1	unid	\$ 20.000
Codo de bajada	\$ 1.714	2	unid	\$ 3.428
Uniones de canaleta	\$ 800	2	unid	\$ 1.600
Abrazadera de tubo	\$ 473	12	unid	\$ 5.676
Llave de bola doble cementar	\$ 20.347	2	unid	\$ 40.694
TERRAPLEN				
Gravilla	\$ 12.000	0,5	m ³	\$ 6.000
Arena	\$ 16.000	0,5	m ³	\$ 8.000
Cemento 25 [kg] Bio Bio	\$ 3.580	6	sacos	\$ 21.480
Arriendo compactador	\$ 4.868	4		\$ 19.472
Arriendo betonera 4 hrs	\$ 4.793	4		\$ 19.172
			COSTO	\$
			TOTAL	321.191

Anexo 4

Tabla con valores de las series sintéticas de precipitación generadas de manera aleatoria.

Año	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
1	311.8	118.0	787.5	483.5	221.7	289.3	304.2	325.9	425.3	439.6
2	273.9	280.8	179.8	617.1	531.1	228.5	716.8	225.9	623.3	880.7
3	456.8	328.6	344.1	707.6	136.9	242.7	653.7	482.6	537.8	308.2
4	409.5	475.4	498.3	200.5	418.7	529.0	331.0	952.4	619.1	426.4
5	301.6	479.7	578.2	277.9	360.9	344.8	860.3	564.9	211.9	320.3
6	271.0	280.3	534.2	783.6	212.8	190.2	522.5	248.9	636.1	542.7
7	365.4	306.9	139.9	143.0	1123.9	428.6	415.2	1068.8	326.1	368.8
8	497.4	310.2	573.6	222.0	717.1	518.7	1112.6	270.5	360.7	311.3
9	813.4	267.1	782.3	465.0	545.8	389.4	530.5	345.4	229.5	325.2
10	575.5	736.8	486.4	731.8	511.4	735.7	428.9	791.8	473.9	1092.2
11	267.1	811.9	713.5	466.7	227.6	369.1	297.5	148.3	448.2	470.1
12	245.3	375.3	398.7	241.7	417.7	330.8	460.0	739.2	388.0	239.9
13	950.5	670.9	318.6	678.8	300.9	781.1	634.2	379.8	394.4	539.8
14	312.3	270.3	466.5	633.2	241.6	370.6	473.6	445.6	328.4	686.5
15	573.4	262.2	543.6	217.5	665.4	469.3	291.9	509.6	299.5	643.6

Año	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20
1	482.4	739.6	804.7	452.1	849.6	281.7	279.5	430.3	387.7	788.6
2	233.0	826.3	285.1	310.9	263.1	598.1	179.8	771.5	460.6	262.0
3	401.5	461.1	518.8	401.5	780.8	244.6	900.1	685.1	232.5	486.5
4	1017.3	502.7	340.5	632.4	420.3	460.9	565.8	354.2	416.0	386.1
5	302.1	418.1	788.2	254.1	474.0	802.5	258.0	196.9	752.1	358.5
6	435.0	711.7	446.3	321.9	424.0	266.7	737.9	243.2	475.4	754.3
7	542.0	472.3	482.1	643.8	498.9	354.8	417.7	367.5	364.3	169.9
8	291.4	475.8	1485.3	547.2	217.6	533.5	634.0	325.7	241.3	460.3
9	416.8	783.3	389.3	559.3	318.4	168.1	616.2	321.6	206.9	189.8
10	389.7	362.3	262.6	476.3	346.9	343.3	401.7	405.4	197.3	663.2
11	450.7	458.1	877.0	756.2	302.5	252.7	378.2	624.6	940.0	506.3
12	1171.7	348.4	332.5	706.7	342.2	182.9	390.3	259.6	516.8	710.9
13	188.3	261.4	502.5	592.6	594.4	354.0	582.1	1087.4	1172.8	257.8
14	588.2	138.1	617.9	379.1	603.5	486.5	298.8	338.5	277.4	322.9
15	525.7	622.7	364.4	670.0	276.0	417.1	624.8	188.0	299.1	398.7

Año	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30
1	110.2	491.4	592.3	621.6	249.0	336.6	649.3	238.9	907.6	414.8
2	466.6	315.9	325.1	401.9	559.9	169.8	243.8	546.8	670.9	792.2
3	886.2	499.9	1504.3	627.0	444.5	522.9	351.4	571.3	216.8	482.1
4	322.5	295.8	601.9	461.0	582.2	909.9	382.2	391.3	269.2	572.4
5	278.8	324.5	232.9	199.2	293.7	1048.2	369.5	511.6	855.1	99.2
6	797.2	223.5	454.8	404.2	405.5	377.6	347.1	887.0	439.3	573.6
7	375.3	663.9	277.5	349.2	1046.0	251.4	311.0	605.5	267.2	246.3
8	482.0	324.8	804.1	414.1	549.1	277.4	460.0	263.5	448.7	393.2
9	323.4	258.7	399.8	288.8	420.5	907.1	267.6	315.9	259.0	550.0
10	514.6	409.7	385.8	483.1	780.0	582.8	901.4	320.9	354.9	512.2
11	406.2	339.4	354.3	556.2	419.8	601.0	466.5	480.2	234.0	75.5
12	274.0	305.9	366.7	344.6	483.9	609.6	202.8	248.3	357.7	389.7
13	805.7	188.8	304.2	517.4	354.7	536.3	378.9	321.2	323.6	696.8
14	620.1	392.7	364.9	350.0	301.3	224.1	682.1	604.5	192.9	579.4
15	250.6	440.4	462.5	423.6	1029.6	540.0	485.4	337.5	396.2	165.4

Año	S31	S32	S33	S34	S35	S36	S37	S38	S39	S40	Serie histórica
1	308.8	259.8	383.4	337.3	281.6	1163.5	232.7	434.9	293.4	332.4	658.6
2	286.9	574.3	1021.5	620.8	436.1	824.7	251.7	135.6	456.9	461.1	300.9
3	310.9	554.0	330.8	492.6	305.9	592.1	586.6	425.0	430.2	459.4	542.3
4	283.8	678.8	352.8	430.0	431.4	468.9	563.2	275.0	433.0	622.4	632.1
5	231.7	241.4	309.0	622.6	1420.6	351.6	753.7	631.5	504.8	288.1	561.8
6	301.5	1127.3	171.4	277.5	502.8	214.4	534.9	684.7	484.8	172.3	202.8
7	280.9	449.3	489.2	357.0	372.6	319.9	372.3	186.2	129.8	286.4	446.6
8	278.7	361.8	413.6	293.8	173.2	679.7	992.0	301.1	373.3	449.1	303.0
9	457.3	573.4	267.3	575.2	447.4	862.7	307.2	538.5	248.2	297.6	326.5
10	362.6	373.9	219.5	373.5	295.8	319.4	972.3	346.2	274.9	699.6	324.5
11	406.7	318.4	403.4	338.4	310.1	334.5	508.9	507.4	373.9	191.4	462.5
12	745.1	504.5	409.0	819.0	590.3	407.2	227.1	407.6	187.4	554.9	243.2
13	541.8	304.8	741.7	562.0	365.6	266.5	330.7	457.9	170.8	691.2	344.5
14	351.5	383.7	596.3	483.4	382.1	247.6	581.2	492.1	221.9	505.4	406.9
15	220.3	188.6	502.6	303.8	379.0	389.9	515.1	161.8	413.3	356.9	325.5