

Evaluación de los métodos para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento de un sistema de recolección y aprovechamiento de agua lluvia en el área metropolitana de Bucaramanga (Santander)

Arley David Celis Vargas

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil

Director:

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña
Ingeniero Sanitario, MSc, PhD

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga

2018

Dedicatoria

Para todas y cada una de las personas que me generan admiración: mi familia, mis amigos, los buenos mentores y cada individuo ejemplar que aporta a la construcción de una mejor sociedad.

Arley David Celis Vargas

Agradecimientos

El autor expresa agradecimiento y admiración hacia el profesor Edgar Ricardo Oviedo Ocaña por la dirección de este trabajo y las demás enseñanzas impartidas en el período de pregrado.

Arley David Celis Vargas

Tabla de contenido

Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1. Objetivo general.....	15
1.2. Objetivos específicos	15
2. Marco de referencia	16
3. Materiales y métodos	20
3.1. Descripción de los casos de estudio.....	20
3.2. Estimación del volumen por diferentes métodos	23
3.2.1. Métodos simplificados	23
3.2.2. Métodos de simulación continua de balance de masa	23
3.2.2.1. Ecuaciones de balance de masa YAS, YBS y θ	23
3.2.2.2. Ecuaciones de balance de masa descritas por E. Ghisi	24
3.2.2.3. Ecuaciones de balance de masa asociadas al método Rippl	24
3.2.3. Método de dimensionado económico	25
3.2.4. Métodos estadísticos	26
3.2.4.1. Método basado en un generador de lluvia estocástica no paramétrica	26
3.2.4.2. Método basado en un modelo probabilístico	27
3.3. Análisis comparativo de métodos	27
3.4. Proposición de un método.....	27
4. Resultados y discusión	28
4.1. Análisis comparativo de métodos	28
4.2. Proposición de un método.....	38

5. Conclusiones.....	42
Referencias bibliográficas.....	44
Apéndices.....	57

Lista de tablas

Tabla 1. Características de las viviendas estudiadas.....	22
Tabla 2. Resultados de la aplicación de los métodos para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento en el sitio A.....	31
Tabla 3. Resultados de la aplicación de los métodos para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento en el sitio B.....	32
Tabla 4. Medidas de dispersión para los resultados de la Figura 9.....	37
Tabla 5. Comparación cualitativa de los métodos	38

Lista de figuras

Figura 1. Patrones de precipitación promedio para los períodos considerados.....	21
Figura 2. Patrones de demanda.....	22
Figura 3. Curva de ajuste que representa el costo del tanque en función de su capacidad.....	26
Figura 4. Eficiencia en función del volumen, simulaciones continuas para los sitios A y B respectivamente.....	30
Figura 5. Inversión y ahorro de agua potable en función del tamaño del tanque para el sitio A...	33
Figura 6. Inversión y ahorro de agua potable en función del tamaño del tanque para el sitio B ...	34
Figura 7. Comportamiento de la precisión del método no paramétrico para diez simulaciones por cada eficiencia tipo (cada color), ejemplo para el sitio B usando ecuaciones de balance YAS	35
Figura 8. Decaimiento de la eficiencia máxima para incrementos en el período de retorno, simulación probabilística usando YAS para el sitio A	35
Figura 9. Comparación cuantitativa para un nivel de eficiencia prefijado	36

Lista de apéndices

Apéndice A. Configuración y elementos típicos de un SCALL	57
Apéndice B. Imágenes alusivas a los casos de estudio	58
Apéndice C. Descripción de los métodos simplificados	59
Apéndice D. Descripción de las simulaciones continuas de balance de masa YAS, YBS y θ	60
Apéndice E. Descripción de las simulaciones continuas de balance de masa según E. Ghisi	61
Apéndice F. Descripción de las simulaciones continuas de balance de masa para el método Rippl	62
Apéndice G. Descripción de las funciones para el dimensionado económico	63
Apéndice H. Procedimiento aplicado por SARET para el método no paramétrico	64
Apéndice I. Descripción de los componentes del método probabilístico	65
Apéndice J. Definición de las variables para la comparación cualitativa	66

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA (SANTANDER). *

AUTOR: ARLEY DAVID CELIS VARGAS. **

PALABRAS CLAVE: CAPTACIÓN DE AGUA LLUVIA, TANQUE DE RESERVA, MÉTODOS, DIMENSIONAMIENTO.

DESCRIPCIÓN:

Los sistemas de captación y aprovechamiento de agua lluvia (SCALL) han sido ampliamente identificados como una solución adecuada para abordar la problemática de la disponibilidad de agua. Uno de los componentes más importantes de un SCALL es el tanque de almacenamiento. Por lo tanto, el tamaño correcto del tanque es relevante debido a que impacta en la eficiencia, el tratamiento, los costos y el rendimiento del sistema. Existe una extensa cantidad de literatura acerca de metodologías para estimar el tamaño del tanque de un SCALL. Los métodos presentados en este documento pueden agruparse en cuatro categorías: i) Procedimientos simplificados, ii) Simulaciones continuas de balance de masa, iii) Métodos de dimensionamiento basados en funciones de costos, y iv) Métodos basados en enfoques estadísticos (procedimientos probabilísticos). Los enfoques para dimensionar el tanque de almacenamiento varían en complejidad, sofisticación y precisión. En efecto, no existe consenso entre los investigadores sobre cuál es el mejor método para dimensionar el tanque. Por este motivo, este estudio tiene como objetivo recopilar y aplicar algunos métodos para identificar mediante la comparación, cuál es la técnica más adecuada para dimensionar el tanque de un SCALL considerando las características de un país en desarrollo. Para ello, doce métodos de cálculo son presentados, analizados y aplicados a dos casos de estudio ubicados en Bucaramanga. Los resultados sugieren que los métodos para el dimensionado del tanque de un SCALL se deben aplicar a cada situación específica, entonces el método más apropiado es aquel que mejor resuelve el problema para cada situación; sin embargo, se propone una combinación de métodos. El análisis mostró que es importante incluir la variable relativa al pronóstico de lluvia por medio de la precipitación histórica ya que los métodos más apropiados para enfrentar los retos del futuro serán los más resilientes.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Ingeniero Sanitario, MSc, PhD.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF METHODS TO SIZE RAINWATER STORAGE TANKS USING TWO CASE STUDIES LOCATED IN BUCARAMANGA (SANTANDER). *

AUTHOR: ARLEY DAVID CELIS VARGAS. **

KEYWORDS: RAINWATER HARVESTING, STORAGE TANK, METHODS, SIZING.

DESCRIPTION:

Rainwater harvesting systems (RWHS) have been widely identified as a proper solution to tackle the water availability problem. One of the most important components of a RWHS is the storage tank. Therefore, the correct tank size is relevant due to it impacts on the efficiency, treatment, costs and system performance. There is a significant amount of literature concerning methodologies to estimate the size of a RWHS tank. The methods presented in this paper can be grouped into four categories: i) Simplified procedures, ii) Continuous mass balance simulations, iii) Sizing methods based on cost functions, and iv) Methods based on statistical approaches (probabilistic procedures). Storage tank sizing approaches vary in complexity, sophistication and accuracy. In fact, there is no consensus among researchers regarding what is the best method to size the tank. For this reason, this study aims to compile and apply some methods to identify by means of comparison what is the most suitable technique to size a RWHS tank considering the characteristics of a developing country. To do so, twelve calculation methods are presented, analyzed and applied to two case studies located in Bucaramanga. The results suggest that RWHS tank sizing approaches must be performed for each specific situation, then the most appropriate method is the one that best solves the problem for each situation; however, a combination of methods is proposed. The analysis showed that it is important to include the variable relative to the forecast of rainfall by means of the historical precipitation because the most appropriate methods to face the future challenges will be the most resilient ones.

* Bachelor Thesis.

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Sanitary Engineer, MSc, PhD.

Introducción

Las estimaciones actuales indican que cada año se agregan 83 millones de habitantes a la población mundial (UN, 2017). Otros factores como la urbanización acelerada, la industrialización, el aumento del sector agrícola, la producción de energía y la influencia del cambio climático, son algunos de los elementos que acentúan la presión sobre el recurso hídrico (WWAP, 2017). Un punto clave consiste en que la vulnerabilidad de la población humana y de los sistemas naturales al cambio climático varía fundamentalmente según las regiones y según las poblaciones dentro de las regiones (IPCC, 2011). Es probable que las poblaciones más pobres resulten siendo las más afectadas, lo cual se evidencia con la mitad de la población de los países en desarrollo expuesta a condiciones negativas como fuentes de agua de baja calidad (WWAP, 2003). Estos contextos en vía de desarrollo ameritan atención porque su infraestructura y sus sistemas aún no se han construido, entonces existe la posibilidad de hacer que las ciudades futuras sean climáticamente inteligentes, reduciendo así los riesgos climáticos y aumentando los beneficios ambientales y económicos (WWAP, 2015). Este panorama de un sistema bajo presión y de tendencias no positivas, plantea la necesidad de soluciones adaptativas que permitan un desarrollo sostenible y establezcan opciones resilientes que aumenten la probabilidad de superar las distintas las amenazas (WHO, 2009).

Entre las distintas soluciones que ofrece la gestión del recurso hídrico, diversos autores han situado a los SCALL como una posibilidad adaptativa para encarar los retos actuales (Schuetze y Chelleri, 2013; Aberra, 2014; Wilk y Wittgren, 2009). Por ejemplo, Sample y Liu (2014) evidenciaron la adaptabilidad de los SCALL mediante el concepto del doble propósito; la

captación de agua lluvia para aliviar los problemas de consumo y para reducir los riesgos provocados por la escorrentía.

Existen diferentes configuraciones de un SCALL; sin embargo, de todos los elementos que conforman un diseño típico, el tanque de almacenamiento resulta relevante debido a que incide sobre aspectos primordiales como los costos, el desempeño, el tratamiento y la eficiencia (Chilton et al., 2000; Campisano et al., 2017; Ghisi, 2010; Campisano y Modica, 2012; Pelak y Porporato, 2016). El tanque ha capturado la atención de diversos estudios, motivo por el cual en los últimos años se ha evidenciado un conjunto de distintas metodologías para cuantificar su volumen. Cada método resuelve el problema del dimensionamiento de una manera particular, asumiendo los criterios que cada estudio considera pertinentes. Estudios como el realizado por Liaw y Tsai (2004) abordan la cuestión como un problema de costos. Otros evalúan el comportamiento de un tamaño de tanque a partir de ecuaciones de balance de masa (Fewkes, 1999b; Ghisi et al., 2007; Sanches et al., 2015), y ciertos estudios como el desarrollado por Lash et al. (2014), consideran que el dimensionamiento debe realizarse teniendo en cuenta la adaptabilidad al cambio climático. A pesar de que diferentes estudios han dimensionado el tanque de un SCALL, aún no existe un consenso sobre este dimensionamiento, lo cual se evidencia en las distintas maneras reportadas en la literatura.

Este estudio caracteriza un conjunto de métodos para el dimensionado de tanques, con la finalidad de sugerir cuáles son los procedimientos más adecuados teniendo en cuenta las condiciones de un país en desarrollo (como el contexto colombiano). La identificación de las metodologías más adecuadas no solo aporta al diseño e implementación de estos sistemas, sino que contribuye al desarrollo de un tema de interés general.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar los métodos para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento de un sistema de recolección y aprovechamiento de agua lluvia en unidades residenciales, aplicados a dos casos de estudio en el área metropolitana de Bucaramanga en el departamento de Santander, Colombia.

1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las variables empleadas en los métodos para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento de un sistema de recolección y aprovechamiento de aguas lluvias.
- Discutir la aplicación de cada uno de los métodos encontrados a dos casos particulares de estudio teniendo en cuenta los criterios pertinentes.
- Proponer el método con mayor aproximación a las condiciones y al comportamiento del contexto de estudio.

2. Marco de referencia

Un SCALL se define como la captura, el desvío y el almacenamiento de la lluvia para una serie de propósitos distintos, incluyendo: el riego de jardines, el consumo de agua, la recarga de acuíferos, el control de la escorrentía, el uso en labores domésticas, entre otros (TWDB, 2005). Los diseños de estos sistemas varían según las particularidades de cada aplicación; sin embargo, es posible identificar un número de elementos que conforman la base de estos modelos (ver Apéndice A), por ejemplo: área de captación, tanque de almacenamiento, canaletas, bajantes, interceptor de primeras lluvias, filtros, grifos, equipos de bombeo y tubería de conducción (Ariyananda, 2015). La superficie de captación recolecta la precipitación que escurre hacia las canaletas para luego ingresar a un sistema de control de calidad (filtros, separador de primer flujo o pantallas), posteriormente, el agua se transporta por bajantes que la conducen al tanque, allí de ser necesario se utilizan equipos de bombeo y tuberías de conducción para la distribución según los usos planteados (Campisano et al., 2017).

El tanque de reserva se ha consolidado como el componente principal de estos sistemas debido a que influye directamente sobre factores primordiales, como lo son: los costos, el tratamiento, la eficiencia y el almacenamiento (Chilton et al., 2000). En consecuencia, en los últimos 20 años se han sugerido diversos modelos alrededor del mundo para dimensionarlos (Campisano et al., 2017). Los enfoques para dimensionar el tanque varían en sofisticación, precisión y contexto, lo cual ha generado la consideración de criterios dispares. La revisión bibliográfica evidencia la existencia de por lo menos cuatro grandes grupos de metodologías: los métodos simplificados; las simulaciones continuas con ecuaciones de balance de masa; los diseños basados en costos, y los procedimientos estadísticos.

Los métodos simplificados constituyen un conjunto de procedimientos básicos que permiten un dimensionamiento rudimentario, su aplicación suele limitarse a: predimensionar los tanques en sistemas de pequeña envergadura cuya demanda sea más o menos uniforme (ANQIP, 2015); cuando se carece de registros de precipitación detallados; el suministro de agua no depende enteramente del SCALL; se necesita un dimensionamiento rápido, o cuando la implementación depende meramente de fines ambientales y no de criterios de factibilidad económica. La mayoría de los documentos (ANQIP, 2015; DIN, 2002; EA, 2010; IRC, 2007; UNEP, 2009) que abordan estos procedimientos son manuales, normas o especificaciones técnicas, que tienen como propósito introducir la temática y crear conciencia de la implementación de opciones de suministro de agua sostenibles.

Los métodos que usan simulaciones continuas de balance de masa son otra alternativa para dimensionar los tanques. McMahon y Adeloje (como se citó en Mitchell, 2007), definen este tipo de métodos como un análisis de comportamiento que utiliza simulaciones continuas para rastrear las entradas y salidas, cambiando así, el volumen de almacenamiento de acuerdo con una ecuación de balance de masa. Para Campisano et al. (2017), estos modelos dependen especialmente de cuatro módulos interrelacionados, como lo son: definición del patrón de demanda, caracterización del modelo de precipitación, simulación bajo una ecuación de balance y publicación de resultados. Estos métodos evalúan el desempeño del sistema mediante el cálculo de la eficiencia, que consiste en el cociente entre la cantidad de agua que aporta el SCALL sobre la demanda general para la cual se diseñó el sistema (Fewkes, 2012). Este tipo de procedimiento incorpora la posibilidad de simular bajo cualquier intervalo de tiempo, lo cual permite hacer un seguimiento a las diferentes variables e integrar la estacionalidad de las entradas y salidas. Jenkins et al. (1978), identificaron dos modelos de balance fundamentales: el suministro después del derrame y el suministro antes

del derrame, o en sus siglas en inglés YAS y YBS respectivamente. Latham (1983) posteriormente describió una relación general para los modelos de Jenkins et al. (1978), y otros autores plantearon nuevas ecuaciones de balance como lo son el método Rippl y el sugerido por Ghisi et al. (2004). Los modelos aplicados en la literatura son diversos, algunos emplean el algoritmo de balance YAS (Liuzzo et al., 2016; Fewkes, 1999a; Ward et al., 2010; Campisano y Modica, 2014; Liaw y Chiang, 2014), YBS (Imteaz et al., 2011a, 2011b, 2012; Karim et al., 2015; Khastagir y Jayasuriya, 2010; Londra et al., 2015; Hajani y Rahman, 2014; Rahman et al., 2012; Villareal y Dixon, 2005), modelos intermedios entre YAS y YBS (Fewkes y Butler, 1999; Fewkes, 1999b; Mitchell, 2007), y finalmente, otros autores utilizan ecuaciones de balance de masa distintas (Matos et al., 2013; Soni et al., 2008; Santos y Taveira-Pinto, 2013; Sanches et al., 2015; Ghisi et al., 2007, 2009, 2010, 2013; Silva y Ghisi, 2016; Lopes et al., 2016; Souza y Ghisi, 2012; Jung et al., 2015).

El problema del volumen del tanque también puede abordarse desde la viabilidad económica. López- Patiño et al. (2011), plantearon un método basado en la maximización de las ganancias relativas al ahorro de agua potable mediante el dimensionamiento a partir de ecuaciones de balance hídrico. Liaw y Tsai (2004), desarrollaron un modelo argumentado en la optimización de la función de costos para valores predeterminados de confiabilidad, área de captación y volumen del tanque. Chiu et al. (2015), generaron un modelo para la ciudad de Taipéi en donde se estudió la optimización del sistema mediante la viabilidad financiera del ahorro de agua potable y su energía asociada, dando variación espacial y temporal por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Otros autores (Campisano y Modica, 2012; Pelak y Porporato, 2016; Okoye et al., 2015), abordaron el problema a partir de la minimización de funciones relativas al valor presente neto y a los costos del sistema.

Existe un conjunto de métodos soportado en procedimientos probabilísticos, estocásticos y regresivos. En general, este tipo de metodologías buscan incorporar la variable del cambio climático al problema del dimensionamiento, que para el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014a) no solo es más que evidente, sino que amplificará los riesgos existentes y creará nuevas amenazas para los sistemas naturales y humanos, afectando sobre todo a las comunidades más desfavorecidas. Ferrand (2014) sugirió que es esencial adaptarse al cambio climático y aumentar la resiliencia humana mediante los SCALL, por ende, algunos métodos buscan incorporar dicha variable. Algunos procedimientos se argumentan en la teoría de la probabilidad, por ejemplo: Lee et al. (2000), usaron un análisis secuencial de picos para considerar la probabilidad de falla en el regadío de un cultivo de té en el norte de Taiwán. Otros estudios también han evidenciado el enfoque probabilístico para abordar el dimensionamiento (Raimondi y Becciu, 2014; Su et al., 2009; Lash et al., 2014; Youn et al., 2012; Guo y Baetz., 2007; Wang y Blackmore, 2012; Basinger et al., 2010). Algunos autores han aplicado modelos de correlación, a saber: Hanson y Vogel (2014) usaron una regresión de mínimos cuadrados ordinarios multivariados para generalizar las relaciones de rendimiento- almacenamiento en todo el territorio de los EE. UU, mientras que Andrade et al. (2017) estudiaron la relevancia de las variables hidrológicas en la eficiencia del ahorro de agua mediante un estudio estadístico multivariable que incluyó un análisis de correlación canónica.

Debido a lo anterior, este estudio apunta a identificar el método más adecuado para dimensionar el tanque de un SCALL teniendo como referencia un país en desarrollo (Colombia). Analizar los diferentes métodos permitirá establecer el mejor enfoque para dimensionar el tanque, lo cual será útil no solo para diseñadores y usuarios, sino para aportar al curso que debe seguir el estudio del tema.

3. Materiales y métodos

Para lograr el objetivo de este estudio se realizó una consulta bibliográfica en bases de datos académicas (Scopus®, ScienceDirect®, ProQuest® y Springer®), las cuales permitieron recopilar un conjunto de diferentes métodos (descritos en 48 artículos). Un filtrado de información fue llevado a cabo para identificar los documentos con el mayor potencial de aplicación a los casos de estudio, lo cual resultó en 12 publicaciones académicas que plantean distintos métodos. Los métodos seleccionados se aplicaron a dos hogares residenciales ubicados en Colombia mediante un conjunto de hojas de cálculo desarrolladas en el lenguaje de programación Visual Basic for Applications (VBA). Las 12 metodologías estudiadas se organizaron en cuatro conjuntos: métodos simplificados, métodos de simulación continua con balances de masa, métodos económicos y métodos estadísticos. Se realizó una comparación cualitativa y cuantitativa de las metodologías agrupadas para identificar la más adecuada según el contexto de estudio. Por último, se abordó una propuesta acerca de los procedimientos más adecuados para dimensionar el tanque de sistemas en países en desarrollo.

3.1. Descripción de los sitios de estudio

Los métodos seleccionados se aplicaron a dos casos de estudio ubicados en el área metropolitana de Bucaramanga, Colombia (ver Apéndice B). Las viviendas se caracterizan por presentar bajos (p. ej., 130 L/hab/día) y altos (p. ej., 203 L/hab/día) consumos de agua, denominándose A y B respectivamente. La vivienda A pertenece a la Ciudadela Nuevo Girón, mientras que la vivienda B hace parte de la urbanización Toscana que se encuentra localizada en el municipio de Floridablanca.

El régimen de precipitación (ver Figura 1) se caracteriza por ser bimodal, con dos periodos de lluvia y dos periodos secos durante el año. La información pluviométrica se tomó del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) a partir de dos estaciones meteorológicas cercanas a las viviendas (500 m para el caso A y 2000 m para el caso B). La información cuenta con una resolución temporal diaria por 25 años para A y por 15 años para B.

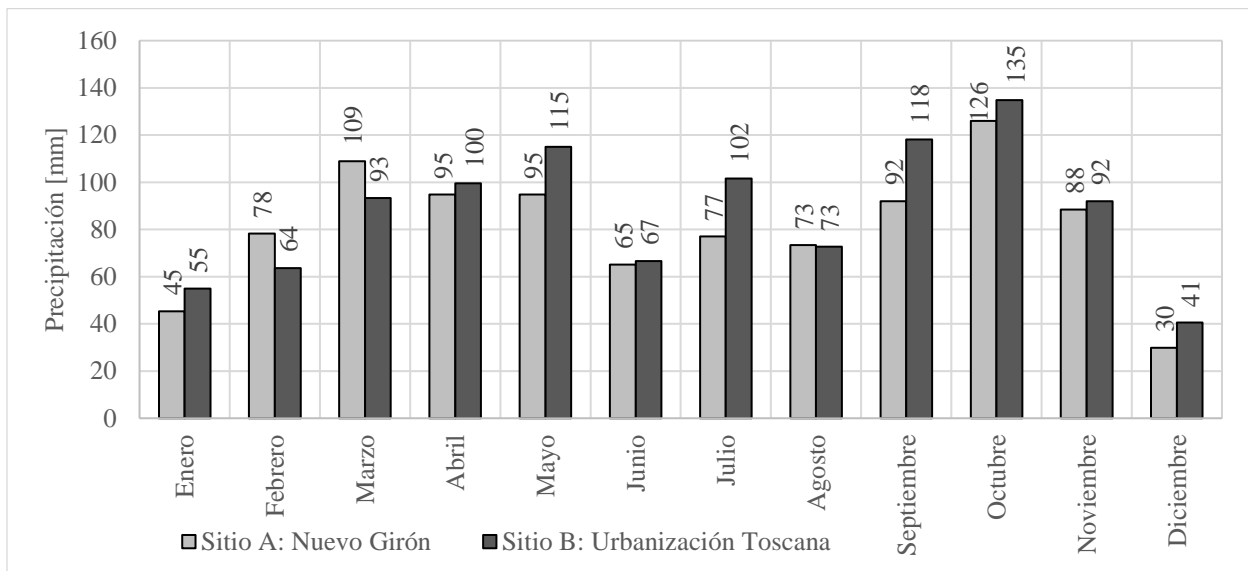


Figura 1. Patrones de precipitación promedio para los períodos considerados.

La información de los contextos de estudio (ver Tabla 1) se encuentra en las investigaciones realizadas por Domínguez et al. (2017) y Oviedo- Ocaña et al. (2017) (casos A y B respectivamente). En estos trabajos se identificó que los usuarios mostraron aceptación por el uso de aguas lluvias en tareas que no requieren agua estrictamente potable, específicamente, se plantearon labores de riego, aseo en el interior del hogar y lavado de ropa; sin embargo, en este estudio no se consideró el consumo por concepto de inodoros ya que los sistemas fueron originalmente diseñados para cubrir esta demanda con el uso de aguas grises. Los diseños originales también incluyen el uso de tanques de 500 y 2000 litros para los SCALL de las viviendas A y B respectivamente.

Tabla 1.

Características de las viviendas estudiadas.

Características	Unidades	Sitio A	Sitio B
Estrato socioeconómico	-	1	6
Número de niveles	-	2	2 + Ático
Habitantes por vivienda (U)	[hab/viv]	5	4
Área de la vivienda	[m ²]	48	216
Área de la cubierta (A)	[m ²]	30.5	101
Material de la cubierta	-	Asbesto-Cemento	Arcilla española
Coefficiente de escorrentía (C)	-	0.9	0.9
Eficiencia del filtro (I)	-	0.9	0.9
Período máximo de retención (N)	[día]	25	25
Volumen inicial en reserva	[L]	0	0
Precipitación promedio anual (P)	[mm/año]	974	1053
Resolución de los registros	-	Diaria	Diaria
Cantidad de registros	[año]	25	15
Temperatura promedio	[°C]	25	25
Consumo de agua potable	[L/hab/día]	130 ±61	203 ±84
Usos del agua lluvia	[% del consumo de agua potable]	Riego: 2.6% Aseo interno: 4.8% Lavadora: 12%	Riego: 3.4% Aseo interno: 5.5% Lavadora + Fregadero: 27%
Demanda promedio no potable (C _{AE})	[L/hab/año]	9212	26617

De otro lado, para la aplicación de los distintos métodos se consideraron patrones de demanda a escala diaria (ver Figura 2), que se construyeron a partir de porcentajes de consumo adoptados de resoluciones nacionales (Ángel, 2001) y de estudios anteriores (Domínguez et al., 2017; Oviedo- Ocaña et al., 2017; Ghisi et al., 2017).

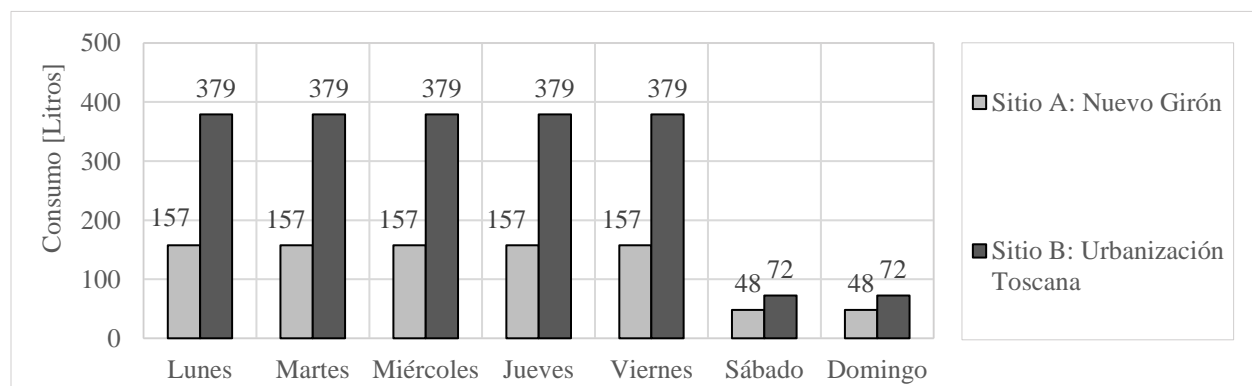


Figura 2. Patrones de demanda.

3.2. Estimación del volumen por diferentes métodos

Para los casos de estudio expuestos, se aplicaron 12 procedimientos agrupados en cuatro conjuntos: i) Métodos simplificados, ii) Métodos de simulación continua de balance de masa, iii) Método de dimensionado con función de costos, y iv) Métodos estadísticos (probabilísticos).

3.2.1. Métodos simplificados. Para esta categoría se aplicaron los métodos planteados por cuatro guías de carácter institucional, dichas instituciones corresponden a: Asociación Portuguesa para la Calidad y Eficiencia en Servicios de Edificaciones (ANQIP); Instituto Alemán de Normalización (DIN); Agencia Medioambiental (EA), y Centro Internacional de Agua y Saneamiento (IRC). Estos métodos se caracterizan por ser dimensionamientos sencillos basados principalmente en relaciones entre variables de fácil medición. Los valores adoptados durante la simulación del volumen de almacenamiento usando los métodos simplificados, se tomaron según lo sugerido por las guías respectivas (ver Apéndice C) y en coherencia con lo definido para los casos de estudio (ver Tabla 1).

3.2.2. Métodos de simulación continua de balance de masa. En esta categoría se aplicaron cinco procedimientos para el dimensionado del tanque, este conjunto incluye los métodos: YAS, YBS, Theta (θ), Rippl y el algoritmo de Ghisi. En estos métodos se determinan los cambios en el almacenamiento de agua en un tanque (cuyo tamaño debe ser fijado previamente) a través de ecuaciones de balance de masa (Liaw y Tsai, 2004). Todos los modelos que se abordan corresponden a simulaciones continuas, diferenciándose en la ecuación de balance de masa que describe el comportamiento de la cantidad de reserva en el tanque.

3.2.2.1. Ecuaciones de balance de masa YAS, YBS y θ . Se aplicaron tres ecuaciones de balance hídrico (ver Apéndice D), conocidas como YAS, YBS y una forma general para la variable θ (Fewkes, 1999b). La ecuación YAS se puede entender como la extracción de la demanda después

de que se ha agregado la lluvia al tanque y se ha producido el derrame, mientras que la ecuación YBS asume que la demanda se retira antes de que se produzca el derrame. El último algoritmo de simulación corresponde a una ecuación generalizada para un parámetro θ , el cual se definió con el valor de 0.5 para representar un método intermedio entre YAS y YBS. Se adoptó la definición de eficiencia como un parámetro clave para determinar el rendimiento del sistema. Esta eficiencia se describe como el cociente entre la cantidad de agua que el SCALL en realidad aporta, sobre la demanda ideal para la cual se realizó el diseño (Fewkes, 2012).

3.2.2.2. Ecuaciones de balance de masa descritas por E. Ghisi. Se aplicó la metodología propuesta por Ghisi et al. (2007), quienes formularon el programa computacional Neptuno para evaluar el potencial de ahorro de agua potable en cuatro estados de la región Sureste de Brasil. Las ecuaciones adoptadas para evaluar el comportamiento del nivel del tanque a través del tiempo están planteadas en Ghisi y Marcel (2014) (ver Apéndice E). Para este método también se adoptó la definición de eficiencia descrita por Fewkes (2012).

3.2.2.3. Ecuaciones de balance de masa asociadas al método Rippl. Se aplicó el método Rippl que calcula el volumen de reserva necesario para regular las salidas del tanque permitiendo un suministro constante del sistema. Es decir, calcula el exceso de agua que se requiere almacenar durante las temporadas lluviosas para compensar las carencias en los tiempos de sequía (Tomaz, 2005; Quadros, 2010). Esta metodología (ver Apéndice F) tiende a sobredimensionar el tanque debido a que está planteada para cumplir demandas de agua en períodos críticos; sin embargo, posee la ventaja de chequear el límite máximo del tanque ya que está proyectado para suplir una eficiencia ideal del 100% (Sanches et al., 2015). El volumen del tanque se calcula como la máxima diferencia acumulada (positiva) entre la demanda y el agua lluvia recolectada (Matos et al., 2013).

3.2.3. Método de dimensionado económico. Se aplicó un método que considera información relativa a los costos del sistema. Este procedimiento se argumenta en maximizar la rentabilidad en la inversión a escala anual, a partir del ahorro obtenido por dejar de consumir agua potable de los sistemas entubados (López- Patiño et al., 2011). En este método cuando el volumen del tanque supera cierto nivel, el costo de inversión se incrementa a gran escala mientras que la eficiencia no lo hace. Para la aplicación, es necesario construir una función de costos amortizados de inversión en función del tamaño del depósito y contrastar dicha información, contra una curva asociada al costo de ahorro que se genera al dejar de demandar una cantidad de agua potable desde los prestadores de servicios públicos (ver Apéndice G).

La función de costos amortizados de inversión se construye a partir de la consideración de todos los costos asociados a la inversión que debería adoptarse en caso tal, de elegir construir un sistema para un tamaño de tanque definido. Para describir la función, es necesario aplicar un modelo de regresión que se ajuste al comportamiento inversión- volumen.

La curva de ahorro de agua potable se genera a partir de cualquier modelo de simulación continua que se base en una relación volumen- eficiencia (p. ej., que para cada volumen permita conocer el valor de la eficiencia asociada). La función de volumen-eficiencia, se multiplica por el valor de la demanda de agua lluvia inicialmente planteada, y por el precio unitario del agua que se adquiere al tomarla de los prestadores de servicios públicos.

Para la aplicación de este método, a partir de la cotización de tanques de almacenamiento en una empresa distribuidora local (Homecenter-Sodimac, Bucaramanga), se construyó una curva de ajuste que describe la inversión por concepto de tanque en función del volumen (ver Figura 3). Adicionalmente, otros parámetros necesarios para la aplicación del método se adoptaron según lo planteado por López- Patiño et al. (2011) y facturas locales, estas consideraciones incluyen:

- Tasa de interés real: 2 %
- Período de amortización (vida útil): 15 [Años]
- Precio unitario del agua potable: 3,461.00 [COP/m³]

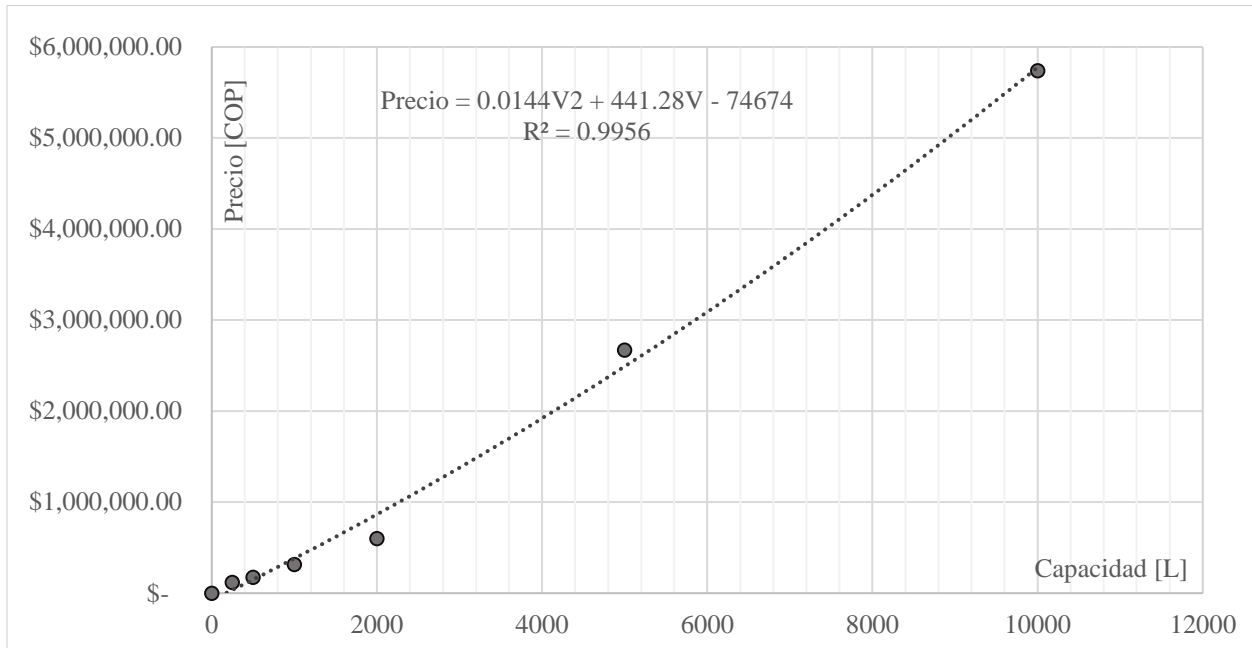


Figura 3. Curva de ajuste que representa el costo del tanque en función de su capacidad.

3.2.4. Métodos estadísticos. En esta categoría se aplicaron dos métodos: generador de precipitación estocástica no paramétrica y un modelo probabilístico. Ambas metodologías funcionan bajo cualquier método de simulación continua de balance de masa que permita evaluar el desempeño para un tamaño de tanque particular. El primer procedimiento genera como resultado precipitaciones estocásticas basadas en cadenas de Markov de primer orden, mientras que el segundo genera una curva que describe el comportamiento del volumen del tanque, el déficit y la probabilidad de excedencia.

3.2.4.1. Método basado en un generador de lluvia estocástica no paramétrica. Se aplicó la propuesta descrita por Basinger et al. (2010). Quienes aplicaron un algoritmo para la generación

de precipitaciones estocásticas basadas en técnicas no paramétricas. Los métodos no paramétricos usan probabilidades para describir la ocurrencia de lluvia, pero estas se derivan directamente de las observaciones locales, lo cual permite generar un modelo portable que trabaja para cualquier período histórico de precipitación. Se empleó la herramienta “Estimación de Almacenamiento y Confiabilidad” (en sus siglas en inglés SARET), que consiste en una serie de pasos programados en una hoja de cálculo en VBA (ver Apéndice H).

3.2.4.2. Método basado en un modelo probabilístico. Se emplearon las relaciones probabilísticas entre la capacidad del tanque y las tasas de déficit en el suministro descritas por Su et al. (2009). Para lograr este objetivo, se aplicó un procedimiento que consiste en dos partes (ver Apéndice I), un modelo de simulación de balance de masa y un modelamiento probabilístico. Para este estudio, el comportamiento probabilístico de las variables aleatorias se describió mediante el uso de la distribución normal, tal como lo planteado por Su et al. (2009).

3.3. Análisis comparativo de métodos

Se realizó un análisis comparativo mediante un estudio cualitativo y cuantitativo. Para la comparación cualitativa se propusieron seis variables (ver Apéndice J): la robustez; el potencial de incorporación a otros métodos; el aporte a la resiliencia; la precisión de múltiples simulaciones; el nivel de información requerido, y la dificultad en la aplicación del método. La confrontación cuantitativa evaluó directamente los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones por cada método, esto para varios porcentajes de eficiencia y para una eficiencia clave que evita sobredimensionar el tanque.

3.4. Proposición de un método

Se realiza una propuesta del método que mejor se ajusta a las condiciones de los casos de estudio. La propuesta se hace a partir de la evaluación de los resultados obtenidos de la comparación entre

los métodos. Para ello, se discute la aplicabilidad de los procedimientos en las condiciones de países en desarrollo, tomando como ejemplo a Colombia y considerando que el método sugerido no solo debe dimensionar el tanque de manera adecuada, sino que debe aportar a la adaptabilidad de estos sistemas.

4. Resultados y discusión

Las capacidades del tanque y los demás resultados se calcularon a partir de simulaciones hechas por hojas de cálculo programadas en el lenguaje VBA. Los siguientes análisis se basan en estos resultados y en los diferentes criterios que permiten estudiar y comparar los métodos en pos del más adecuado.

4.1. Análisis comparativo de métodos

Los volúmenes obtenidos de la simulación por cada método para el sitio A se presentan en la Tabla 2, mientras que los resultados para el sitio B se ilustran en la Tabla 3. Para cada método se presenta una relación entre la capacidad del tanque y el valor de la eficiencia (si el método lo requiere).

Los métodos simplificados tienen la ventaja de permitir dimensionamientos rápidos y sencillos usando información básica, anual y de fácil acceso; sin embargo, estos procedimientos están limitados a proyectos de pequeña envergadura en donde los consumos sean aproximadamente uniformes en el tiempo. Estos métodos tienen la desventaja de no ser procedimientos realistas al no permitir la generación de patrones de precipitación y consumo a diferentes escalas temporales, que permitan hacer un seguimiento al comportamiento del sistema. De las Tablas 2 y 3 se puede observar que para ambos sitios los métodos ANQIP (2015), DIN (2002) y EA (2010) presentan los volúmenes más grandes con eficiencias similares al 50% y 70% (si se compara con las simulaciones continuas) para las viviendas A y B respectivamente, mientras que el método IRC

(2007) arroja valores mucho menores. Los tres primeros procedimientos generan capacidades similares ya que la única diferencia entre sus planteamientos es un coeficiente empírico que presenta pequeñas variaciones (p. ej., Z_i), mientras que en el cuarto método varía más. Este coeficiente que depende del método corresponde a un porcentaje aplicado al volumen captado y demandado anualmente (ver Apéndice C). De los cuatro métodos, los procedimientos que mejor argumentan este coeficiente son ANQIP (2015) e IRC (2007). Por otra parte, a diferencia de los tres primeros métodos, el cuarto no elige el mínimo entre la oferta y la demanda, lo cual puede generar sobredimensionamientos si llueve mucho y se demanda poco.

Los métodos basados en ecuaciones de balance de masa son procedimientos detallados que permiten hacer un seguimiento al estado del tanque a través de una duración definida. Estos métodos tienen la capacidad de adaptar la variabilidad temporal a cualquier intervalo, siempre y cuando se cuente con el registro de precipitación y el patrón de demanda a la resolución temporal deseada. Los métodos de simulación continua a excepción del método Rippl, tienen la ventaja de analizar el comportamiento del sistema (a través de la eficiencia) en función de las capacidades del tanque, lo cual da autonomía al usuario en la elección del rendimiento. Los resultados de las Tablas 2 y 3 muestran que no siempre un aumento en la capacidad del tanque resulta en un incremento notable en la eficiencia, el comportamiento se asemeja a un crecimiento asintótico limitado por la eficiencia máxima (ver Figura 4). De las Tablas 2 y 3 se observa que los métodos YAS y YBS constituyen los resultados más y menos conservadores respectivamente, mientras que los resultados para $\theta=0.5$ y el método de Ghisi son valores intermedios. Los métodos YBS y $\theta=0.5$ se caracterizan por no necesitar tanque para pequeñas eficiencias, lo cual a priori parece poco prudente. El método Rippl solo calcula un único resultado, el correspondiente al exceso de agua que se requiere almacenar durante la temporada de lluvias para contrarrestar las sequías, por esta

razón el método Rippl tiende a sobredimensionar el tanque. El resultado del método Rippl para el sitio A es mayor que los volúmenes correspondientes a la eficiencia máxima por los otros métodos de simulación continua, lo inverso ocurre para el sitio B. Este comportamiento es clave para seleccionar el método en situaciones donde se busque suplir la totalidad de la demanda. Esta particularidad obedece al contraste entre lo que se capta y se demanda; es decir, a la relación oferta-demanda medida por la eficiencia máxima que puede lograr el sistema, que para el sitio A es mucho más baja que en el sitio B. En otras palabras, si la configuración del sistema planteado (incluyendo área, patrón de precipitación, coeficientes de pérdidas, etc.) permite captar un volumen pequeño en consideración con lo demandado (incluyendo habitantes, usos, costumbres, patrones de demanda, etc.) probablemente el método Rippl sobredimensionará más el tanque que los otros métodos de simulación continua, lo contrario ocurre para la situación opuesta.

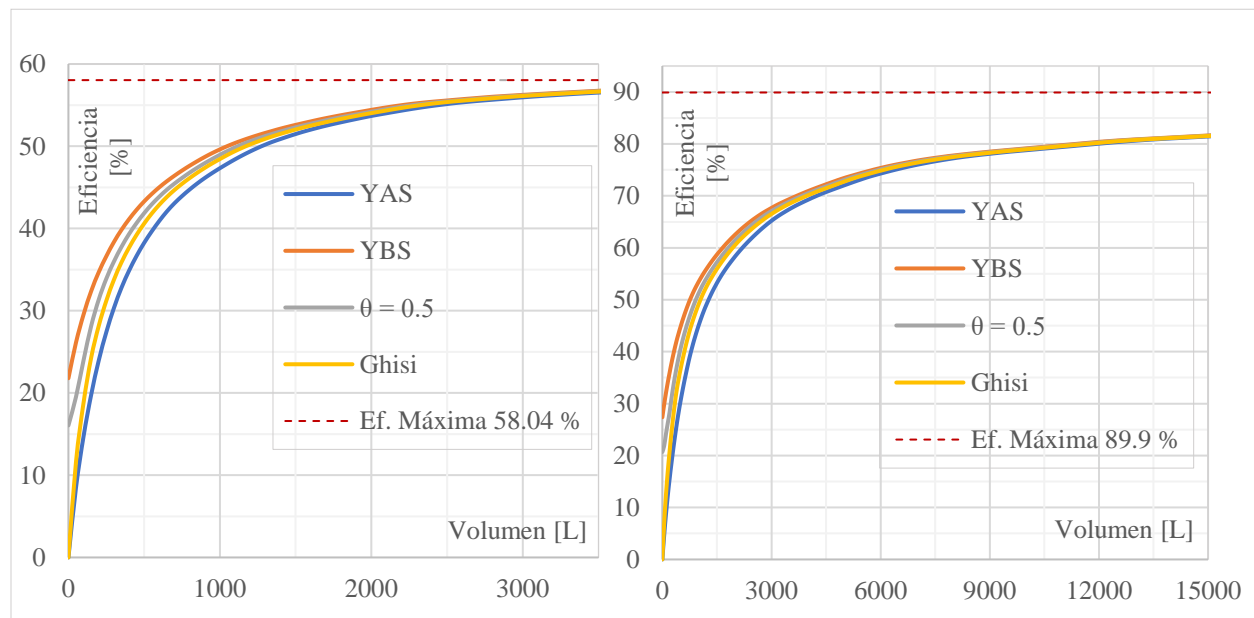


Figura 4. Eficiencia en función del volumen, simulaciones continuas para los sitios A y B respectivamente.

Tabla 2.

Resultados de la aplicación de los métodos para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento en el sitio A.

Grupo	Método		Porcentaje de eficiencia													Máx. 58.04%
			0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	57%	
Métodos de balance de masa	Método YAS (M1)		0	27	61	102	153	214	294	404	563	818	1274	2442	4041	10890
	Método de EneDir Ghisi (M2)		0	18	41	72	110	158	229	328	477	721	1171	2326	3911	10748
	Método $\theta = 0.5$ (M3)		0	0	0	0	56	111	177	276	425	668	1118	2273	3872	10728
	Método YBS (M4)		0	0	0	0	0	36	107	208	356	599	1047	2202	3808	10711
	Método Rippl (M5)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	19326
Métodos estadísticos	Método no paramétrico (M6)	YAS	0	28	63	109	162	229	321	440	692	979	1600	5866	7974	11018
		Ghisi	0	19	44	77	116	176	253	368	541	851	1569	4287	5644	7901
		$\theta = 0.5$	0	0	0	0	67	130	203	322	466	793	1412	4557	7712	9545
		YBS	0	0	0	0	0	52	126	261	439	695	1506	4781	6978	7917
	Método probabilístico (M7)	YAS TR = 2 Años	0	30	65	105	155	215	295	405	565	820	1275	2445	4045	10920
		YAS TR = 5 Años	0	35	70	120	175	250	350	500	755	1270	3590	NA	NA	NA
		YAS TR = 10 Años	0	35	75	125	190	270	385	570	950	1915	NA	NA	NA	NA
		Ghisi TR = 2 Años	0	20	45	75	115	160	230	330	480	725	1175	2330	3915	10755
		Ghisi TR = 5 Años	0	25	50	85	130	195	280	420	655	1170	3435	NA	NA	NA
		Ghisi TR = 10 Años	0	25	55	95	145	215	315	485	845	1825	NA	NA	NA	NA
		$\theta = 0.5$ TR = 2 Años	0	0	0	0	60	115	180	280	430	670	1120	2275	3875	10735
		$\theta = 0.5$ TR = 5 Años	0	0	0	20	85	145	230	365	605	1120	3435	NA	NA	NA
		$\theta = 0.5$ TR = 10 Años	0	0	0	30	95	165	260	430	795	1790	NA	NA	NA	NA
		YBS TR = 2 Años	0	0	0	0	0	40	110	210	360	600	1050	2205	3810	10715
		YBS TR = 5 Años	0	0	0	0	5	70	160	300	535	1045	3370	NA	NA	NA
YBS TR = 10 Años	0	0	0	0	20	95	200	365	725	1710	NA	NA	NA	NA		
Método de costos	Método de costos (M8)	YAS				630	Asociado a una ganancia anual de 50.100 [COP] y a una eficiencia de 41.6%									
		Ghisi				560	Asociado a una ganancia anual de 53.250 [COP] y a una eficiencia de 42.0%									
		$\theta = 0.5$				510	Asociado a una ganancia anual de 55.100 [COP] y a una eficiencia de 42.1%									
		YBS				440	Asociado a una ganancia anual de 57.500 [COP] y a una eficiencia de 42.1%									
Métodos simplificados	Método de la ANQIP (M9)		1114													
	Método del DIN (M10)		1444													
	Método de la EA (M11)		1203													
	Método del IRC (M12)		527													

Nota: en todos los casos, los volúmenes están en unidades de litros.

Tabla 3.

Resultados de la aplicación de los métodos para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento en el sitio B.

Grupo	Método		Porcentaje de eficiencia																	Máx.		
			0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%		85%	87%
Métodos de balance de masa	Método YAS (M1)		0	54	117	191	277	374	488	625	787	995	1270	1652	2200	2962	4241	6384	11932	32377	48347	64232
	Método de Enedir Ghisi (M2)		0	35	75	127	188	259	343	455	605	792	1047	1415	1934	2697	3964	6082	11662	31962	47932	63861
	Método $\theta = 0.5$ (M3)		0	0	0	0	0	119	231	341	482	669	920	1288	1814	2565	3838	5945	11518	31856	47826	63761
	Método YBS (M4)		0	0	0	0	0	0	53	173	319	509	759	1126	1657	2409	3691	5786	11359	31704	47674	63725
	Método Rippl (M5)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Métodos estadísticos	Método no paramétrico (M6)	YAS	0	57	126	205	303	406	520	686	892	1130	1381	1779	2358	3269	4620	6885	16383	33823	45954	54770
		Ghisi	0	37	80	136	200	281	379	518	676	893	1243	1587	2083	3007	4604	8287	15145	48480	60609	50480
		$\theta = 0.5$	0	0	0	0	0	156	265	403	561	773	1019	1478	2055	3271	4082	7117	17297	34466	41986	39616
		YBS	0	0	0	0	0	0	122	215	371	626	826	1374	1831	2819	4124	6215	12145	29491	46446	46152
	Método probabilístico (M7)	YAS TR = 2 Años	0	55	120	195	280	375	490	630	790	1000	1275	1655	2205	2965	4245	6385	11935	32380	48350	64235
		YAS TR = 5 Años	0	65	140	230	325	440	575	750	975	1285	1715	2355	3325	5040	8185	21210	NA	NA	NA	NA
		YAS TR = 10 Años	0	75	155	250	355	480	635	840	1120	1505	2085	2950	4535	7065	18140	NA	NA	NA	NA	NA
		Ghisi TR = 2 Años	0	40	80	130	190	260	345	460	610	795	1050	1420	1935	2700	3965	6085	11665	31965	47935	63865
		Ghisi TR = 5 Años	0	50	100	165	235	325	435	585	790	1065	1480	2090	3050	4765	7895	20980	NA	NA	NA	NA
		Ghisi TR = 10 Años	0	55	115	185	265	360	495	680	920	1290	1835	2700	4270	6765	18030	NA	NA	NA	NA	NA
		$\theta = 0.5$ TR = 2 Años	0	0	0	0	0	120	235	345	485	670	925	1290	1815	2570	3840	5950	11520	31860	47830	63765
		$\theta = 0.5$ TR = 5 Años	0	0	0	0	85	210	320	470	670	940	1355	1970	2920	4635	7740	20895	NA	NA	NA	NA
		$\theta = 0.5$ TR = 10 Años	0	0	0	0	130	250	380	560	800	1160	1715	2570	4145	6630	17925	NA	NA	NA	NA	NA
		YBS TR = 2 Años	0	0	0	0	0	0	55	175	320	510	760	1130	1660	2410	3695	5790	11360	31705	47675	63730
		YBS TR = 5 Años	0	0	0	0	0	40	165	320	515	795	1210	1825	2785	4485	7580	20865	NA	NA	NA	NA
YBS TR = 10 Años	0	0	0	0	0	95	235	415	660	1020	1575	2435	4005	6490	17815	NA	NA	NA	NA	NA		
Método de costos	Método de costos (M8)	YAS	Asociado a una ganancia anual de 148.700 [COP] y a una eficiencia de 55.6%																			
		Ghisi	Asociado a una ganancia anual de 157.900 [COP] y a una eficiencia de 56.6%																			
		$\theta = 0.5$	1710	Asociado a una ganancia anual de 162.600 [COP] y a una eficiencia de 56.6%																		
		YBS	1565	Asociado a una ganancia anual de 168.600 [COP] y a una eficiencia de 56.7%																		
Métodos simplificados	Método de la ANQIP (M9)		3988																			
	Método del DIN (M10)		5169																			
	Método de la EA (M11)		4307																			
	Método del IRC (M12)		1888																			

Nota: en todos los casos, los volúmenes están en unidades de litros.

El dimensionamiento basado en costos es un procedimiento que adopta todas las características de los métodos de simulaciones continuas YAS, YBS, $\theta=0.5$ y método de Ghisi. En general la información que se demanda es de fácil acceso, salvo la función amortizada de inversión del sistema que implica un estudio más detallado. El comportamiento del ahorro económico por concepto de agua potable en función de la capacidad del tanque (ver Figuras 5 y 6) es similar al mostrado por las curvas de eficiencia (ver Figura 4). Las Figuras 5 y 6 evidencian que el método selecciona un único volumen que corresponde a un punto detrás del crecimiento asintótico, dicha ventaja permite fijar un volumen correspondiente a una eficiencia entre el 60% y el 85% de la eficiencia máxima aproximadamente, siendo este valor más grande para los casos de eficiencia máxima baja (sitio A) y viceversa para los que permiten una eficiencia máxima mayor (sitio B). Para las condiciones planteadas el método arrojó que la inversión es rentable (ver caso II del Apéndice G), permitiendo la obtención de ganancias cercanas a los 50.000 [COP] para el sitio A y 160.000 [COP] para el sitio B.

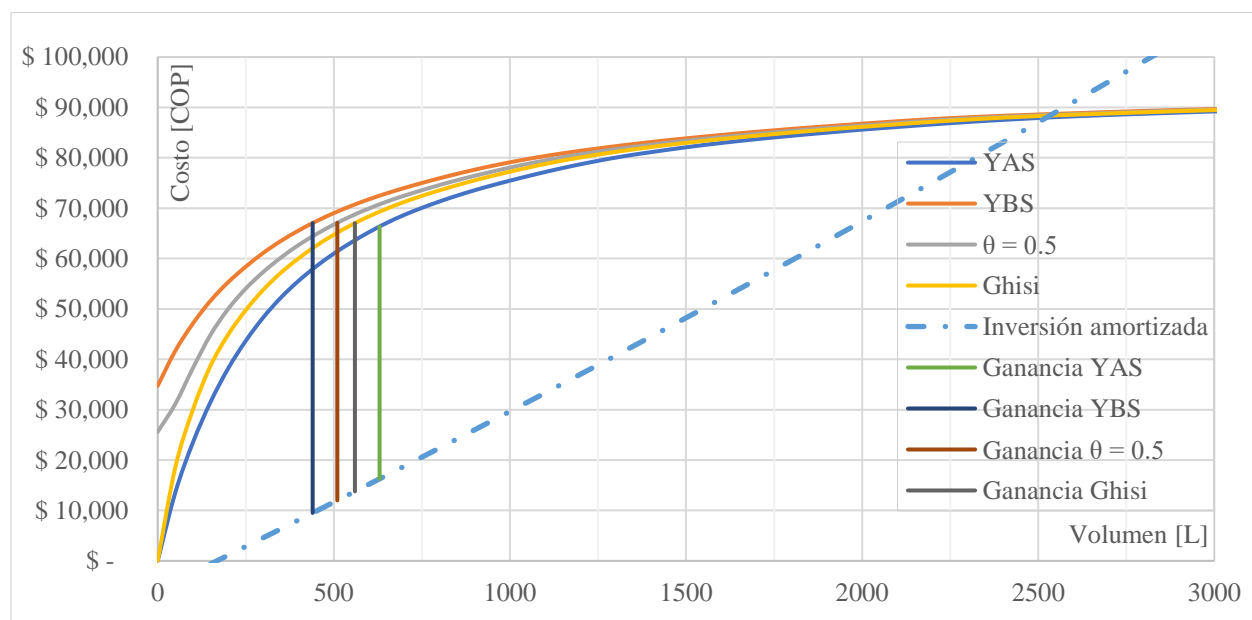


Figura 5. Inversión y ahorro de agua potable en función del tamaño del tanque para el sitio A.

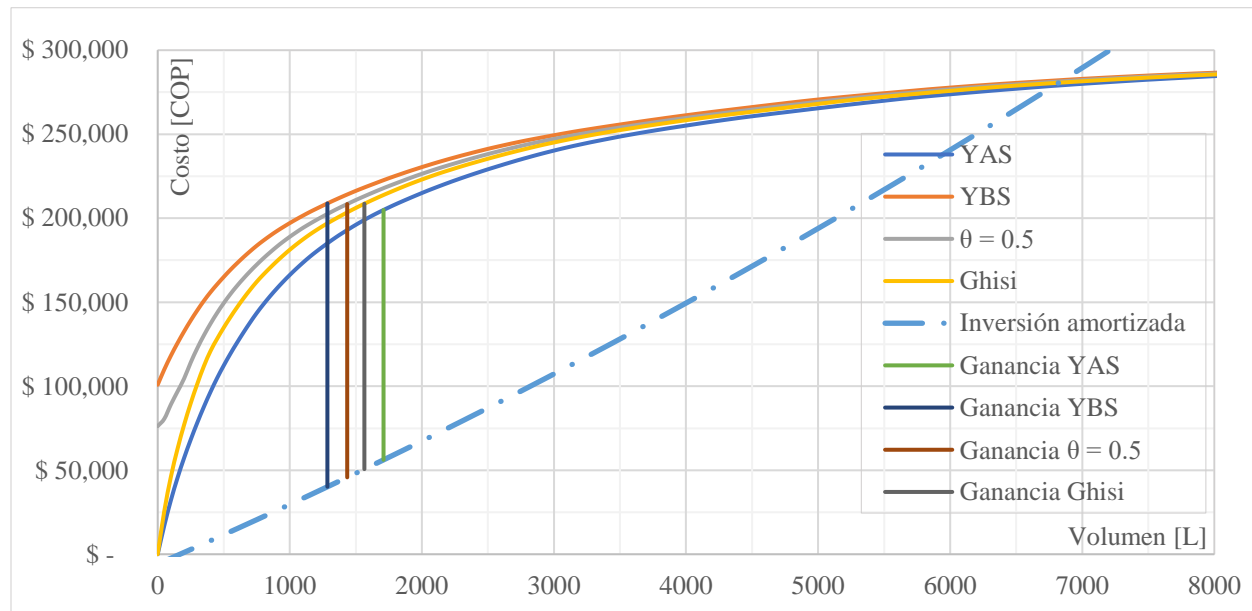


Figura 6. Inversión y ahorro de agua potable en función del tamaño del tanque para el sitio B.

Los métodos de carácter estadístico también toman las propiedades de las simulaciones continuas de balance de masa. El método no paramétrico genera precipitaciones estocásticas a partir de un algoritmo basado en valores aleatorios, estas precipitaciones pueden constituir la entrada de cualquier otro método. Los volúmenes de las Tablas 2 y 3 indican que para la mayoría de eficiencias los resultados son más conservadores que cada uno de los valores calculados por las simulaciones continuas de balance de masa, aunque este comportamiento puede no aplicar para eficiencias cercanas a la máxima. Los resultados arrojados por este método carecen de precisión debido a que el algoritmo se basa en números aleatorios; es decir, cada nueva simulación genera un volumen diferente para la misma eficiencia. La Figura 7 muestra cómo la precisión tiende a empeorar para valores de eficiencia más grandes. A pesar de la precisión, el método tiene la ventaja de ser portable al no necesitar la adopción de una función de densidad de probabilidad que se ajuste a los datos. El método probabilístico también es más conservador que los métodos de balance de masa, aunque presenta particularidades para períodos de retorno muy grandes. Las Tablas 2 y 3

muestran que para períodos mayores se hace más difícil alcanzar eficiencias grandes, esto ocurre debido a que al asumir condiciones más adversas el método disminuye la eficiencia máxima (ver Figura 8).

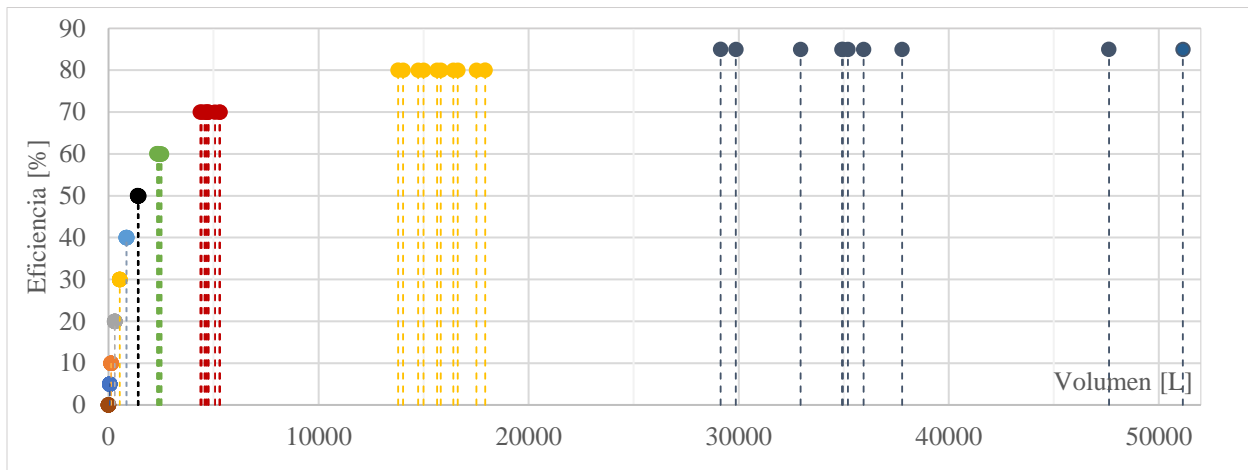


Figura 7. Comportamiento de la precisión del método no paramétrico para diez simulaciones por cada eficiencia tipo (cada color), ejemplo para el sitio B usando ecuaciones de balance YAS.

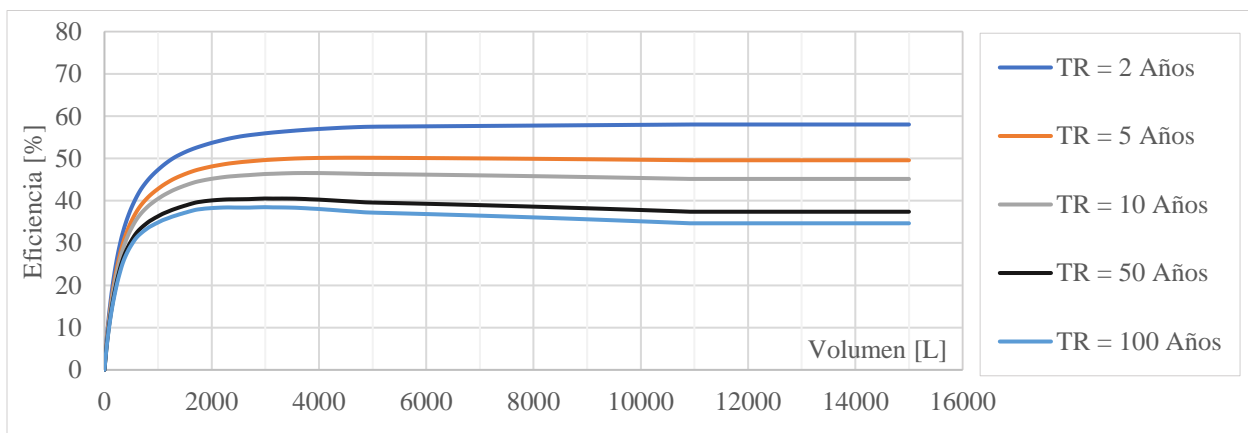


Figura 8. Decaimiento de la eficiencia máxima para incrementos en el período de retorno, simulación probabilística usando YAS para el sitio A.

Los resultados evidencian la disparidad de los métodos en aspectos cuantitativos y cualitativos. Cuantitativamente, la capacidad del tanque varía entre los métodos según la eficiencia sugerida, la cual presenta el comportamiento asintótico descrito (ver Figura 4). Para facilitar el análisis y evitar

sobredimensionar el tanque sin obtener mayores beneficios, se sugiere diseñar para un volumen asociado a una eficiencia aproximada del 65% de la eficiencia máxima (ver Figura 9). La Figura 9 evidencia que, aunque unos métodos (p. ej., M9, M10, M11, M12, M8 y M5) no permiten diseñar para cualquier eficiencia, dos de estos resultan acertados (p. ej., M12 y M8), pues calculan un punto detrás del crecimiento asintótico similar al 65% planteado, mientras que los demás (p. ej., M9, M10, M11 y M5) tienden a sobredimensionar el sistema. En cuanto a los tanques diseñados, para ambos sitios los volúmenes son similares a las capacidades asociadas al 65% de la eficiencia máxima, lo cual descarta que el sistema diseñado se haya sobredimensionado innecesariamente.

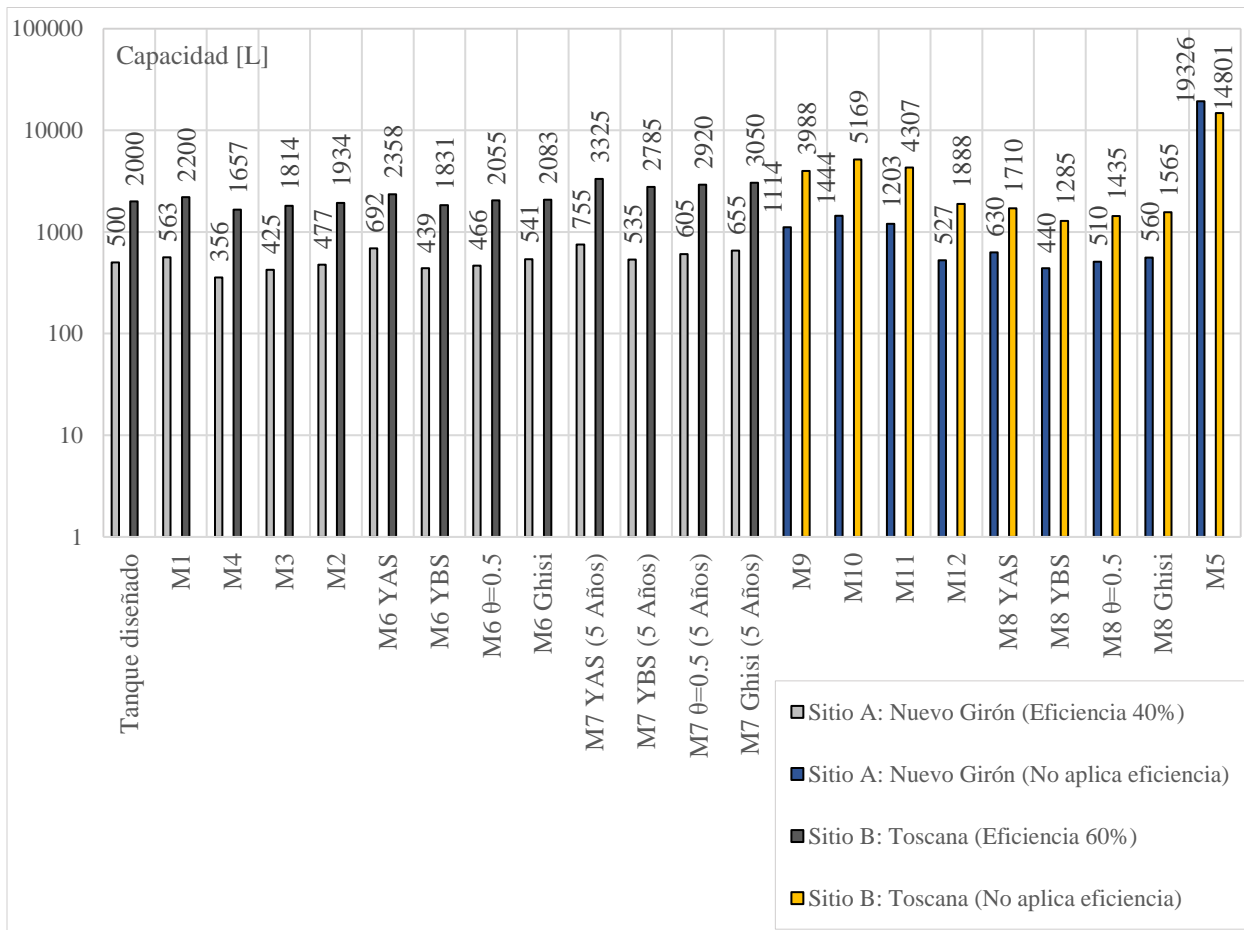


Figura 9. Comparación cuantitativa para un nivel de eficiencia prefijado.

Otra alternativa para analizar los resultados calculados por los distintos métodos en la Figura 9, consiste en la consideración de medidas de dispersión (ver Tabla 4). La Tabla 4 evidencia que, si se tiene en cuenta solo los métodos que diseñan para el 65% de la eficiencia máxima, el coeficiente de variación del sitio A resulta similar al del sitio B; sin embargo, los rangos de las capacidades son mayores en B debido a que los requerimientos son mucho más exigentes que en A. Este comportamiento resulta importante, pues evidencia que entre más grande sea el suministro del sistema, más atención se debe prestar porque la elección del método ya no se limita a pequeños rangos (p. ej., 399 litros para A) sino que considera rangos mayores (p. ej., 1668 litros para B o incluso superiores) que podrían afectar innecesariamente el volumen y los costos del sistema. Por otra parte, si se consideran todos los métodos (p. ej., los que incluyen eficiencias y los que no) de la Tabla 4 se infiere que el coeficiente de variación y el rango son mayores en A que en B, esto se explica teniendo en cuenta que el método Rippl para el sitio A sobredimensiona innecesariamente el sistema, lo cual no ocurre en el sitio B. La Tabla 4 indica que al momento de cuantificar el volumen resulta importante discriminar los métodos que permiten elegir una eficiencia cualquiera y los que no, debido al orden de magnitud que tienen los rangos de los resultados.

Tabla 4.

Medidas de dispersión para los resultados de la Figura 9.

Métodos	Media [L]	Rango [L]	Desviación media [L]	Desviación estándar [L]	Coefficiente de variación [%]
Métodos para el sitio A (Ef. 40%)	542	399	93	118	22
Métodos para el sitio B (Ef. 60%)	2334	1668	461	551	24
Todos los métodos para el sitio A	1536	18970	1694	4086	266
Todos los métodos para el sitio B	3055	13516	1554	2877	94

Cualitativamente, se evidencia que las diferencias conceptuales entre las metodologías hacen que unas tengan ciertas ventajas sobre otras (ver Tabla 5). En general, la Tabla 5 muestra que de

ser posible se debe evitar el diseño por métodos simplificados. Por el contrario, en caso de contar con las herramientas y la información necesaria, se sugiere aplicar metodologías mejor calificadas, por ejemplo: los métodos estadísticos y el método de costos que además adoptan los balances de masa.

Tabla 5.

Comparación cualitativa de los métodos.

Método	Robustez conceptual	Potencial de incorporación a otros métodos	Resiliencia	Precisión	Nivel de información requerido	Dificultad de aplicación
Método ANQIP (M9)	++	+	++	++++	++	+
Método DIN (M10)	+	+	+	++++	++	+
Método EA (M11)	+	+	+	++++	++	+
Método IRC (M12)	+	+	++	++++	++	+
Método YAS (M1)	+++	+++++	+++	++++	+++	+++
Método YBS (M4)	+++	+++++	+++	++++	+++	+++
Método $\theta = 0.5$ (M3)	+++	+++++	+++	++++	+++	+++
Método Ghisi (M2)	+++	+++++	+++	++++	+++	+++
Método Rippl (M5)	+++	++	+++	++++	+++	+++
Método de costos (M8)	++++	+++++	++++	++++	++++	++++
Método no paramétrico (M6)	++++	+++	++++	++	+++	+++++
Método probabilístico (M7)	++++	++++	++++	++++	++++	++++

Nota: La simbología corresponde a muy alta (+++++), alta (++++), media (+++), baja (++) y muy baja (+).

4.2. Proposición de un método

A pesar de que Colombia es uno de los países con más cantidad de agua en el mundo, no es ajeno a las problemáticas que se presentan alrededor del recurso hídrico (Ramírez, 2003). La situación de este país en desarrollo no es la más favorable debido a los diferentes retos que afronta. La dinámica poblacional, el estándar de vida actual, la incidencia del cambio climático, la inadecuada gestión del recurso hídrico, y los fenómenos climáticos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), son algunos de los aspectos que alteran el ciclo hidrológico generando diversos impactos y riesgos (Carvajal-Escobar, 2011; WWAP, 2016; IPCC, 2014b). No obstante, en algunas partes del país no

se percibe una gran afectación debido a que las problemáticas varían a nivel espacial y temporal; sin embargo, a nivel general la vulnerabilidad a estos fenómenos en grandes zonas del país se ha incrementado (GBM, 2012). Un sondeo demostró que la mayoría de los encuestados considera que el cambio climático realmente está ocurriendo, que sus ciudades no están preparadas para afrontarlo y que las prácticas de adaptación deben corresponder a acciones en el manejo local del agua (IDEAM, 2016). Ante este panorama, varias investigaciones que se han adelantado en el país postulan a los SCALL como una alternativa resiliente que puede brindar la adaptación necesaria (Torres et al., 2013; Morales- Pinzón et al., 2011, 2015; Oviedo- Ocaña et al., 2017; Domínguez et al., 2017; Galarza-Molina et al., 2015; Peña-Guzmán et al., 2017; Molina-Prieto, 2016); en particular, algunos autores hacen énfasis en que el estudio y la aplicación de estos sistemas debe tecnificarse puesto que muchos casos se han basado en la experiencia (León et al., 2016).

Como ya se mencionó, Colombia cuenta con variabilidad climática a nivel espacial y temporal, siendo la precipitación determinada por la posición geográfica y la influencia de diversos factores. Se ha evidenciado que en algunos lugares del país el nivel precipitación es muy bajo, mientras que en otros se podría considerar excesivamente alto (MinAmbiente, 2005). El hecho de que se presenten situaciones tan variadas en todo el territorio plantea que cada uno de los problemas y necesidades deba abordarse de manera particular, considerando las diferentes ventajas y desventajas que cada solución ofrece. El dimensionado del tanque no es la excepción a esta consideración, y por lo tanto se debe tener en cuenta qué método es el más adecuado a la hora de cuantificar el volumen, por ejemplo: en situaciones donde se quiera implementar la captación de aguas lluvias a pequeña escala y solo se cuente con registros anuales de precipitación, probablemente los métodos más adecuados no son los procedimientos estadísticos o las simulaciones continuas que demandan información más detallada, sino que se debe pensar en la

aplicación de métodos más sencillos, como los métodos simplificados que funcionan a partir de información básica. Si se desea implementar un SCALL para un nivel de rendimiento determinado se debe considerar metodologías que permitan la autonomía necesaria para tomar una decisión adecuada, es decir; no se debe optar por métodos que arrojen un resultado único, sino que se debe estudiar los métodos que describan el desempeño del sistema en función de la capacidad del tanque, tales como: los métodos YAS, YBS, θ y Ghisi. En situaciones donde la oferta satisfaga ampliamente la demanda y se deba cumplir la totalidad de la misma, el método Rippl resulta más apropiado que los demás métodos porque calcula la capacidad adecuada sin llegar a sobredimensionar como lo harían los balances de masa. El contexto es el que plantea qué método es el más adecuado, por ejemplo: si se planea poner en práctica el aprovechamiento de aguas lluvias para obtener beneficios económicos por aliviar la dependencia de los prestadores de servicios públicos, es lógico incorporar una metodología que permita estimar el volumen del tanque que ofrezca la mejor alternativa financiera. De otro lado, para sistemas más especializados de los cuales se dependa en gran proporción, es relevante considerar factores de seguridad y capacidades proyectadas a futuro; por lo tanto, resultan más adecuados los métodos probabilísticos ya que incorporan la probabilidad de excedencia del déficit para un rango de capacidades y eficiencias, cuestión que otros métodos no consideran. Otra de las alternativas que resulta útil para hacer pronósticos acerca de las lluvias es el método basado en un generador de precipitación no paramétrica, el cual se ajusta bien a diferentes patrones de precipitación, pero puede tener dificultades en la precisión de los resultados.

En general, existen diferentes tipos de métodos con ciertas ventajas y desventajas, esto conlleva a que para un problema en particular unos sean más adecuados que otros. Aunque cada situación debe ser evaluada de manera específica, la Tabla 5 puede dar indicaciones acerca de cuál de los

procedimientos considerados es el más adecuado. Asumiendo que la información de entrada no es un factor limitante, se propone que de los doce métodos considerados el procedimiento más adecuado es una combinación entre los balances de masa, el dimensionado de costos y el método probabilístico. El método probabilístico (Su et al., 2009) y el dimensionado de costos se adaptan perfectamente a las propiedades de los métodos de simulaciones continuas (YAS, YBS, θ y Ghisi), esto permite que los tres métodos sean compatibles e incorporen una gran cantidad de ventajas (ver Tabla 5), por ejemplo: la robustez conceptual se garantiza usando tres de los métodos más robustos; el potencial de incorporación muestra altos niveles para estos métodos; la resiliencia se adopta mediante pronósticos de precipitación y análisis de costos; no existen problemas de precisión, y la dificultad no debería suponer un reto. Esta combinación de métodos tiene en cuenta aspectos claves del diseño y del contexto de estudio, lo cual la sitúa como una propuesta con alto potencial de aplicación al entorno considerado, un país que puede proveer con relativa facilidad la información demandada.

En síntesis, considerando el panorama de Colombia como un país en desarrollo con los privilegios e inconvenientes descritos, se propone que el método más adecuado para dimensionar el tanque de un SCALL es una combinación de planteamientos; sin embargo, el punto está en caracterizar e identificar cada problema evaluando la mejor opción para el dimensionamiento (que puede ser un método o la combinación de algunos) teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que dicha solución ofrece. También se debe prestar atención a la tendencia de incorporar el concepto de resiliencia; es decir, contemplar variables adaptativas para sortear los retos y las amenazas del futuro (p. ej., el cambio climático), tal como lo han planteado diversos autores en los últimos años (Lash et al., 2014; Youn et al., 2012; Wang y Blackmore, 2012; Mwenge Kahinda et al., 2010; Almazroui et al., 2017; Han y Mun, 2011; Haque et al., 2016).

5. Conclusiones

Este estudio se enfocó en la problemática relativa al dimensionamiento del tanque de un SCALL teniendo en cuenta el contexto colombiano como representante de un país en desarrollo. Los resultados indican que, aunque los métodos simplificados tienen la ventaja de permitir dimensionamientos rápidos y sencillos usando información básica, no son procedimientos realistas, lo cual restringe su uso a proyectos de pequeña envergadura. Se encontró que los métodos de balance de masa son procedimientos versátiles y más realistas, porque brindan al usuario la autonomía necesaria para la selección del tamaño del tanque en función de la eficiencia. También se identificó que las ecuaciones más conservadoras corresponden al algoritmo YAS y al planteamiento de Ghisi, siendo esta última menos conservadora que la primera. En cuanto al método basado en funciones de costos, se concluye que el procedimiento selecciona el volumen correspondiente a un punto detrás del crecimiento asintótico, lo cual evita el sobredimensionamiento. Este procedimiento resulta adecuado para estudiar la viabilidad financiera de la implementación del proyecto; sin embargo, debe hacerse mejores esfuerzos en definir la función amortizada de inversión para encontrar resultados más exactos. Por otra parte, los resultados muestran que los métodos de carácter estadístico son metodologías más robustas y adaptativas ya que realizan predicciones sobre el problema. Ambos métodos probabilísticos mostraron comportamientos más conservadores que las simulaciones continuas de balance de masa, con la característica de presentar particularidades cuando el tamaño del tanque tiende a alcanzar la eficiencia máxima.

De la comparación cualitativa y cuantitativa se encontró que existen diferentes tipos de métodos con distintas características, ventajas y desventajas; sin embargo, los resultados de la comparación

indican que la combinación entre los métodos de simulaciones continuas, el dimensionado de costos y el modelo probabilístico, constituye la alternativa más adecuada entre los métodos considerados para el contexto de estudio.

Finalmente, se concluye que se debe prestar atención especial a algunos aspectos. El primero consiste en caracterizar y analizar minuciosamente cada caso de estudio para identificar cuáles son las condiciones particulares que serán el argumento de la elección del método más adecuado. En segunda instancia, se identifica la importancia de que los procedimientos para dimensionar el tanque involucren las variaciones producidas por el cambio climático y las demás que el entorno plantea, ya que de esta manera los sistemas serán más resilientes. También, se hace énfasis en que este estudio abordó una comparación entre métodos, no una comparación con resultados de simulaciones a partir de modelos reales; el monitoreo de sistemas piloto seguramente aportará más a esta problemática.

Referencias bibliográficas

- Aberra, Y. (2014). Rainwater harvesting for climate change adaptation in Ethiopia: Policy and Institutional Analysis. Institute of Developing Economies, Japan External Trade Organization. Recuperado a partir de <http://www.ide.go.jp/library/English/Publish/Download/Vrf/pdf/488.pdf>.
- Almazroui, M., Islam, M., Balkhair, K., Şen, Z., & Masood, A. (2017). Rainwater harvesting possibility under climate change: A basin-scale case study over western province of Saudi Arabia. *Atmospheric Research*, 189, 11-23. doi: 10.1016/j.atmosres.2017.01.004.
- Andrade, L., Maia, A., & Lucio, P. (2017). Relevance of hydrological variables in water-saving efficiency of domestic rainwater tanks: Multivariate statistical analysis. *Journal Of Hydrology*, 545, 163-171. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.12.027.
- Ángel, J., Rozo, J., Hernández, L., & Valderrama, D. (2001). Estimación del consumo básico de agua potable en Colombia. *Rev Regul-CRA*, 7, 15-41.
- ANQIP. (2015). ETA 0701 - Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais em Edifícios (SAAP) (en portugués) (9th ed.). Asociación Nacional para la Calidad en las Instalaciones Prediales. Recuperado a partir de http://www.anqip.com/images/stories/ETA_0701_v.9_novo.2.1.pdf.
- Ariyananda, T. (2015). Manual for Operation and Maintenance of Rainwater Harvesting System in Schools in Sri Lanka (1st ed.). Rural Water & Sanitation Section of National Water Supply & Drainage Board. Recuperado a partir de http://nwsdbrws.org/downloads/RWS_in_Schools_Eng.pdf.

- Basinger, M., Montalto, F., & Lall, U. (2010). A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. *Journal Of Hydrology*, 392(3-4), 105-118. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.039.
- Campisano, A., & Modica, C. (2012). Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. *Resources, Conservation And Recycling*, 63, 9-16. doi: 10.1016/j.resconrec.2012.03.007.
- Campisano, A., & Modica, C. (2014). Selecting Time Scale Resolution to Evaluate Water Saving and Retention Potential of Rainwater Harvesting Tanks. *Procedia Engineering*, 70, 218-227. doi: 10.1016/j.proeng.2014.02.025.
- Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M., Friedler, E., & DeBusk, K. et al. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research*, 115, 195-209. doi: 10.1016/j.watres.2017.02.056.
- Carvajal-Escobar, Yesid (2011), "Inundaciones en Colombia. ¿Estamos preparados para enfrentar la variabilidad y el cambio climático?", en *Revista Memorias*, vol. 9, núm. 16, pp. 105-119.
- Chilton, J., Maidment, G., Marriott, D., Francis, A., & Tobias, G. (2000). Case study of a rainwater recovery system in a commercial building with a large roof. *Urban Water*, 1(4), 345-354. doi:10.1016/s1462-0758(00)00032-7.
- Chiu, Y., Tsai, Y., & Chiang, Y. (2015). Designing Rainwater Harvesting Systems Cost-Effectively in a Urban Water-Energy Saving Scheme by Using a GIS-Simulation Based Design System. *Water*, 7(11), 6285-6300. doi:10.3390/w7116285.

- DIN. (2002). Rainwater harvesting systems- Part 1: Planning, installation, operation and maintenance. Darmstadt: Deutsches Institut für Normung. Recuperado a partir de <http://www.ecoagua.pt/sbo/files/DIN1989.pdf>.
- Domínguez, I., Ward, S., Mendoza, J., Rincón, C., & Oviedo-Ocaña, E. (2017). End-User Cost-Benefit Prioritization for Selecting Rainwater Harvesting and Greywater Reuse in Social Housing. *Water*, 9(7), 516. doi:10.3390/w9070516.
- EA. (2010). Harvesting rainwater for domestic uses: an information guide. Bristol: Environment Agency. Recuperado a partir de <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20140329083319/http://cdn.environment-agency.gov.uk/geho1110bten-e-e.pdf>.
- Ferrand, E. (2014). Rainwater Harvesting as an Effective Climate Change Adaptation Strategy in Rural and Urban Settings. *Managing Water Resources Under Climate Uncertainty*, 405-420. doi:10.1007/978-3-319-10467-6_19.
- Fewkes, A., & Butler, D. (1999). The sizing of rainwater stores using behavioural models. In *Proceedings of Rainwater Catchment Systems Conference- "Rainwater Catchment: An Answer to the Water Scarcity of the Next Millennium."* Petrolina, Brazil.
- Fewkes, A. (1999a). The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system. *Building And Environment*, 34(6), 765-772. doi:10.1016/s0360-1323(98)00063-8.
- Fewkes, A. (1999b). Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. *Urban Water*, 1(4), 323-333. doi:10.1016/s1462-0758(00)00026-1.
- Fewkes, A. (2012). A review of rainwater harvesting in the UK. *Structural Survey*, 30(2), 174-194. doi:10.1108/0263080 1211228761.
- Galarza Molina, S., Torres, A., Lara-Borrero, J., Méndez-Fajardo, S., Solarte, L., González, L., & León, S. (2015). Towards a Constructed Wetland/Reservoir- Tank System for Rainwater

- Harvesting in an Experimental Catchment in Colombia. *Ingeniería Y Universidad*, 19(2), 169. doi: 10.11144/javeriana.iyu19-2.tcws.
- GBM. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas* (1st ed.). Bogotá, Colombia: Banco Mundial.
- Ghisi, E., & Trés, A. C. R. (2004). Netuno: aproveitamento de águas pluviais no setor residencial. (Neptune—a computer programme to evaluate potable water savings and rainwater tank capacity in the residential sector) (in Portuguese).
- Ghisi, E., Bressan, D., & Martini, M. (2007). Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil. *Building And Environment*, 42(4), 1654-1666. doi: 10.1016/j.buildenv. 2006.02.007.
- Ghisi, E., Tavares, D., & Rocha, V. (2009). Rainwater harvesting in petrol stations in Brasília: Potential for potable water savings and investment feasibility analysis. *Resources, Conservation And Recycling*, 54(2), 79-85. doi: 10.1016/j.resconrec.2009. 06.010.
- Ghisi, E. (2010). Parameters Influencing the Sizing of Rainwater Tanks for Use in Houses. *Water Resources Management*, 24(10), 2381-2403. doi:10.1007/s11269-009-9557-4.
- Ghisi, E., & Schondermark, P. (2013). Investment Feasibility Analysis of Rainwater Use in Residences. *Water Resources Management*, 27(7), 2555-2576. doi:10.1007/s11269-013-0303-6.
- Ghisi, E., & Marcel Cordova, M. (2014). *Neptuno 4 - Manual de usuario*. Florianópolis: Universidad Federal de Santa Catarina – UFSC. Recuperado a partir de http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/Manual-Netuno-4_Junho2014.pdf.
- Ghisi, E., Thives, L., & Meinheim, D. (2017). Potential for potable water savings by using rainwater in a house in southern Brazil.

- Guo, Y., & Baetz, B. (2007). Sizing of Rainwater Storage Units for Green Building Applications. *Journal Of Hydrologic Engineering*, 12(2), 197-205. doi:10.1061/(asce)1084-0699(2007)12:2(197).
- Hajani, E., & Rahman, A. (2014). Reliability and Cost Analysis of a Rainwater Harvesting System in Peri-Urban Regions of Greater Sydney, Australia. *Water*, 6(4), 945-960. doi:10.3390/w6040945.
- Han, M., & Mun, J. (2011). Operational data of the Star City rainwater harvesting system and its role as a climate change adaptation and a social influence. *Water Science & Technology*, 63(12), 2796. doi:10.2166/wst.2011.597.
- Hanson, L., & Vogel, R. (2014). Generalized storage–reliability–yield relationships for rainwater harvesting systems. *Environmental Research Letters*, 9(7), 075007. doi:10.1088/1748-9326/9/7/075007.
- Haque, M., Rahman, A., & Samali, B. (2016). Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. *Journal Of Cleaner Production*, 137, 60-69. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.038.
- IDEAM. (2016). Tercera comunicación nacional de cambio climático: ¿Qué piensan los colombianos sobre el cambio climático? Primera encuesta nacional de percepción pública del cambio climático en Colombia. Bogotá D.C., Colombia: Colciencias.
- Imteaz, M., Shanableh, A., Rahman, A., & Ahsan, A. (2011a). Optimisation of rainwater tank design from large roofs: A case study in Melbourne, Australia. *Resources, Conservation And Recycling*, 55(11), 1022-1029. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.05.013.
- Imteaz, M., Ahsan, A., Naser, J., & Rahman, A. (2011b). Reliability analysis of rainwater tanks in Melbourne using daily water balance model. *Resources, Conservation And Recycling*, 56(1), 80-86. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.09.008.

- Imteaz, M., Rahman, A., & Ahsan, A. (2012). Reliability analysis of rainwater tanks: A comparison between South-East and Central Melbourne. *Resources, Conservation And Recycling*, 66, 1-7. doi: 10.1016/j.resconrec.2012.05.009.
- IPCC. (2001). Cambio climático 2001: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes del Grupo de Trabajo II (pp. 14-15). Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Recuperado a partir de <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/vol4/spanish/pdf/wg2sum.pdf>.
- IPCC, 2014a: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC, 2014b: Adaptation needs and options. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 833-868.
- IRC. (2007). Roofwater Harvesting: A Handbook for Practitioners. Delft, The Netherlands: IRC International Water and Sanitation Centre. Recuperado a partir de <https://www.ircwash.org/sites/default/files/Thomas-2007-Roofwater.pdf>.
- Jenkins, D., Pearson, F., Moore, E., Sun, J. K., & Valentine, R. (1978). Feasibility of rainwater collection systems in California. Contribution No. 173. Californian Water Resources Centre, University of California.

- Jung, K., Lee, T., Choi, B., & Hong, S. (2015). Rainwater Harvesting System for Continuous Water Supply to the Regions with High Seasonal Rainfall Variations. *Water Resources Management*, 29(3), 961-972. doi:10.1007/s11269-014-0854-1.
- Karim, M., Bashir, M., & Imteaz, M. (2015). Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting in a megacity in Bangladesh. *Resources, Conservation And Recycling*, 104, 61-67. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.09.010.
- Khastagir, A., & Jayasuriya, N. (2010). Optimal sizing of rain water tanks for domestic water conservation. *Journal Of Hydrology*, 381(3-4), 181-188. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.1-1.040.
- Lash, D., Ward, S., Kershaw, T., Butler, D., & Eames, M. (2014). Robust rainwater harvesting: probabilistic tank sizing for climate change adaptation. *Journal Of Water And Climate Change*, 5(4), 526. doi:10.2166/wcc.2014.080.
- Latham, B. G. (1983). The design of single-purpose reservoirs. MASc thesis, University of Canada.
- Lee, K., Lee, C., Yang, M., & Yu, C. (2000). Probabilistic Design of Storage Capacity for Rainwater Cistern Systems. *Journal Of Agricultural Engineering Research*, 77(3), 343-348. doi:10.1006/jaer.2000.0597.
- León Agatón, A., Córdoba Ruiz, J., & Carreño Sayago, U. (2016). Revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos. *Tecnura*, 20(50), 141-153.
- Liaw, C., & Tsai, Y. (2004). Optimum storage volume of rooftop rainwater harvesting systems for domestic use. *Journal Of The American Water Resources Association*, 40(4), 901-912. doi:10.1111/j.1752-1688.2004.tb01054. x.

- Liaw, C., & Chiang, Y. (2014). Dimensionless Analysis for Designing Domestic Rainwater Harvesting Systems at the Regional Level in Northern Taiwan. *Water*, 6(12), 3913-3933. doi:10.3390/w6123913.
- Liuzzo, L., Notaro, V., & Freni, G. (2016). A Reliability Analysis of a Rainfall Harvesting System in Southern Italy. *Water*, 8(1), 18. doi:10.3390/w8010018.
- Londra, P., Theocharis, A., Baltas, E., & Tsihrintzis, V. (2015). Optimal Sizing of Rainwater Harvesting Tanks for Domestic Use in Greece. *Water Resources Management*, 29(12), 4357-4377. doi:10.1007/s11269-015-1064-1.
- Lopes, A., Rupp, R., & Ghisi, E. (2016). Assessment of the potential for potable water savings by using rainwater in houses in southern Brazil. *Water Science And Technology: Water Supply*, 16(2), 533-541. doi:10.2166/ws.2015.166.
- López- Patiño, G., Martínez-Solano, F., Fuertes-Miquel, V., & López-Jiménez, P. (2011). Dimensionado de depósitos domésticos de aguas pluviales utilizando series temporales de datos. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 2(1), 51-64.
- Matos, C., Santos, C., Pereira, S., Bentes, I., & Imteaz, M. (2013). Rainwater storage tank sizing: Case study of a commercial building. *International Journal Of Sustainable Built Environment*, 2(2), 109-118. doi: 10.1016/j.ijjsbe.2014.04.004.
- MinAmbiente. (2005). Plan de acción nacional lucha contra la desertificación y la sequía en Colombia. Bogotá, D.C.: Dirección de Ecosistemas del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Mitchell, V. (2007). How important is the selection of computational analysis method to the accuracy of rainwater tank behaviour modelling? *Hydrological Processes*, 21(21), 2850-2861. doi:10.1002/hyp.6499.

- Molina-Prieto, L. (2016). Resiliencia a inundaciones: nuevo paradigma para el diseño urbano. *Revista de Arquitectura*, 18(2), 82-94. doi:10.14718/ RevArq.2016.18.2.8.
- Morales-Pinzón, T., Angrill, S., Rieradevall, J., Gabarrell, X., Gasol, C., & Josa, A. (2011). LCM of Rainwater Harvesting Systems in Emerging Neighbourhoods in Colombia. *Towards Life Cycle Sustainability Management*, 277-288. doi:10.1007/978-94-007-1899-9_27.
- Morales-Pinzón, T., García-Serna, M., & Flórez-Calderón, M. (2015). Quality of rainwater harvesting in urban systems: case study in Colombia. *Water Practice & Technology*, 10(3), 424. doi:10.2166/wpt.2015.043.
- Mwenge Kahinda, J., Taigbenu, A., & Boroto, R. (2010). Domestic rainwater harvesting as an adaptation measure to climate change in South Africa. *Physics And Chemistry Of The Earth, Parts A/B/C*, 35(13-14), 742-751. doi: 10.1016/j.pce.2010.07.004.
- Okoye, C., Solyalı, O., & Akıntuğ, B. (2015). Optimal sizing of storage tanks in domestic rainwater harvesting systems: A linear programming approach. *Resources, Conservation And Recycling*, 104, 131-140. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.08.015.
- Oviedo-Ocaña, E., Dominguez, I., Ward, S., Rivera-Sanchez, M., & Zaraza-Peña, J. (2017). Financial feasibility of end-user designed rainwater harvesting and greywater reuse systems for high water use households. *Environmental Science And Pollution Research*. doi:10.1007/s11356-017-8710-5.
- Pelak, N., & Porporato, A. (2016). Sizing a rainwater harvesting cistern by minimizing costs. *Journal Of Hydrology*, 541, 1340-1347. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.08.036.
- Peña-Guzmán, C., Melgarejo, J., Lopez-Ortiz, I., & Mesa, D. (2017). Simulation of Infrastructure Options for Urban Water Management in Two Urban Catchments in Bogotá, Colombia. *Water*, 9(11), 858. doi:10.3390/w9110858.

- Quadros, C., 2010. Rainwater harvesting. Case Study: FCT/UNL Campus (MSc thesis). Faculty of Science and Technology, Universidade Nova de Lisboa. Lisbon, Portugal.
- Rahman, A., Keane, J., & Imteaz, M. (2012). Rainwater harvesting in Greater Sydney: Water savings, reliability and economic benefits. *Resources, Conservation And Recycling*, 61, 16-21. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.12.002.
- Raimondi, A., & Becciu, G. (2014). Probabilistic Modeling of Rainwater Tanks. *Procedia Engineering*, 89, 1493-1499. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.437.
- Ramírez, R. M. (2003). Colombia: potencia hídrica. *Sociedad Geográfica de Colombia*, 46, 135.
- Sanches Fernandes, L., Terêncio, D., & Pacheco, F. (2015). Rainwater harvesting systems for low demanding applications. *Science Of The Total Environment*, 529, 91-100. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.061.
- Santos, C., & Taveira-Pinto, F. (2013). Analysis of different criteria to size rainwater storage tanks using detailed methods. *Resources, Conservation And Recycling*, 71, 1-6. doi: 10.1016/j.resconrec.2012.11.004.
- Sample, D., & Liu, J. (2014). Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture. *Journal Of Cleaner Production*, 75, 174-194. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.03.075.
- Schuetze, T., & Chelleri, L. (2013). Integrating Decentralized Rainwater Management in Urban Planning and Design: Flood Resilient and Sustainable Water Management Using the Example of Coastal Cities in The Netherlands and Taiwan. *Water*, 5(2), 593-616. doi:10.3390/w5020593.

- Silva, A., & Ghisi, E. (2016). Uncertainty analysis of daily potable water demand on the performance evaluation of rainwater harvesting systems in residential buildings. *Journal Of Environmental Management*, 180, 82-93. doi: 10.1016/j.jenvman. 2016.05.028.
- Soni, A., Aggarwal, R., & Khullar, N. K. (2008). Potential of rainwater harvesting for an Urban area. *Journal of Research*, 45(3 & 4), 196-199.
- Souza, E., & Ghisi, E. (2012). Potable Water Savings by Using Rainwater for Non-Potable Uses in Houses. *Water*, 4(4), 607-628. doi:10.3390/w4030607.
- Su, M., Lin, C., Chang, L., Kang, J., & Lin, M. (2009). A probabilistic approach to rainwater harvesting systems design and evaluation. *Resources, Conservation And Recycling*, 53(7), 393-399. doi: 10.1016/j.resconrec.2009.03.005.
- Tomaz, P., 2005. Aproveitamento de água da chuva para áreas urbanas e fins não potáveis. Navegar, São Paulo, Brazil (in Portuguese).
- Torres, A., Méndez-Fajardo, S., Gutiérrez Torres, Á., & Sandoval, S. (2013). Quality of Rainwater Runoff on Roofs and Its Relation to Uses and Rain Characteristics in the Villa Alexandra and Acacias Neighborhoods of Kennedy, Bogota, Colombia. *Journal Of Environmental Engineering*, 139(10), 1273-1278. doi:10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000746.
- TWDB. (2005). *The Texas Manual on Rainwater Harvesting* (3rd ed.). Austin: Texas Water Development Board. Recuperado a partir de http://www.twdb.texas.gov/publications/brochures/conservation/doc/RainwaterHarvestingManual_3rdedition.pdf.
- UN, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables*. Working Paper No. ESA/P/WP/248.

- UNEP. (2009). *Rainwater Catch it While You Can: A Handbook on Rainwater Harvesting in the Caribbean*. The Caribbean Environmental Health Institute.
- Villarreal, E., & Dixon, A. (2005). Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrkoping, Sweden. *Building And Environment*, 40(9), 1174-1184. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.10.018.
- Wang, C., & Blackmore, J. (2012). Supply–Demand Risk and Resilience Assessment for Household Rainwater Harvesting in Melbourne, Australia. *Water Resources Management*, 26(15), 4381-4396. doi:10.1007/s11269-012-0150-x.
- Ward, S., Memon, F., & Butler, D. (2010). Rainwater harvesting: model-based design evaluation. *Water Science & Technology*, 61(1), 85. doi:10.2166/wst.2010.783.
- WHO. (2009). *Vision 2030: The resilience of water supply and sanitation in the face of climate change*. Geneva: World Health Organization.
- Wilk, J., & Wittgren, H. (2009). *Adapting Water Management to Climate Change*. Swedish Water House.
- WWAP, U. (2003). *United Nations World Water Assessment Programme. The World Water Development Report 1: Water for People, Water for Life*.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2015. *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Paris, UNESCO.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2016. *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo*. París, UNESCO.

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas).

2017. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. París.

Youn, S., Chung, E., Kang, W., & Sung, J. (2012). Probabilistic estimation of the storage capacity of a rainwater harvesting system considering climate change. *Resources, Conservation And Recycling*, 65, 136-144. doi: 10.1016/j.resconrec.2012.05.005.

Apéndices

Apéndice A. Configuración y elementos típicos de un SCALL

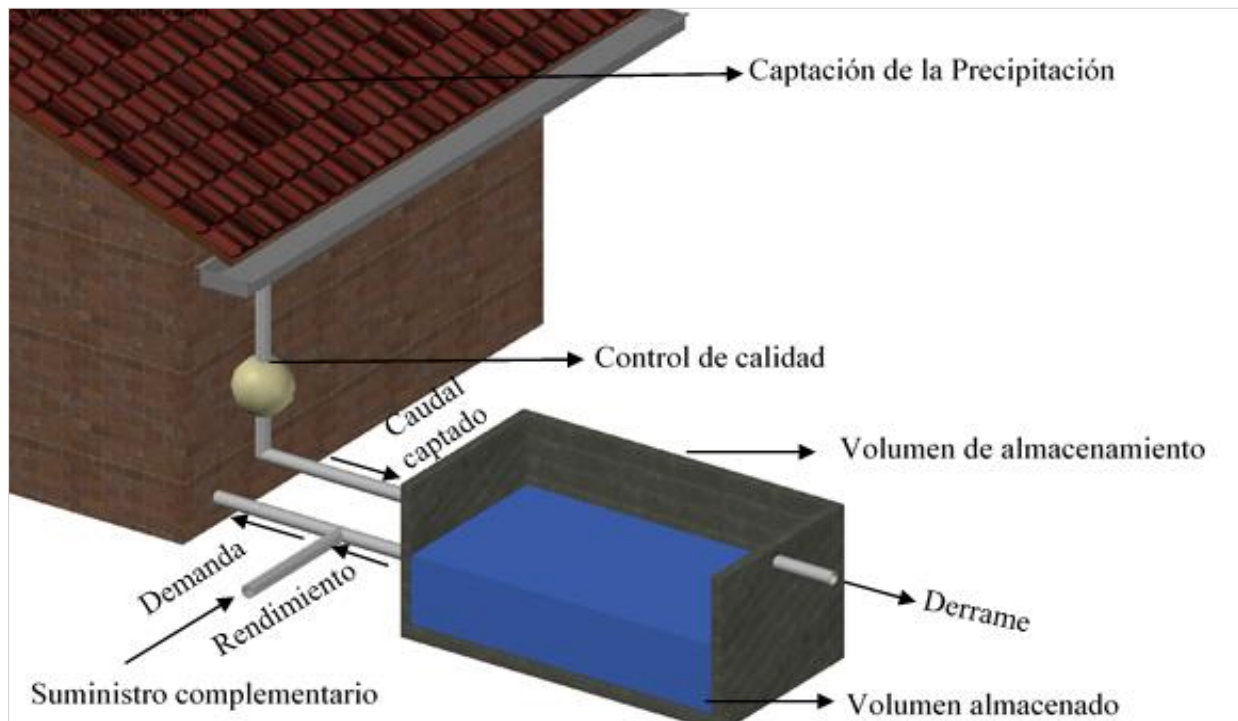


Figura 1. Funcionamiento básico de un sistema convencional.

Apéndice B. Imágenes alusivas a los casos de estudio



Figura 2. Conjunto residencial Toscana.

Fuente: Fénix Construcciones S.A.



Figura 3. Ciudadela Nuevo Girón.

Fuente: www.vanguardia.com.

Apéndice C. Descripción de los métodos simplificados

Tabla 1.

Métodos simplificados empleados para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento.

Guía	Descripción	Ecuaciones	Variables
ANQIP	Se emplea para el dimensionamiento de tanques asociados a pequeños sistemas, donde los consumos sean más o menos uniformes y los tiempos de retención oscilen entre 20 y 30 días, salvo cuando se quiera usar el agua para riego (hasta 90 días).	$V = \text{Min} \{V_1 \text{ o } V_2\}$ $V_1 = (0.0015 * N) * P * A$ $V_1 = (Z_1) * P * A$ $V_2 = (0.003 * N) * U * C_{AE}$ $V_2 = (Z_2) * U * C_{AE}$	<p>V = Volumen del tanque de almacenamiento [L]</p> <p>V₁ = Volumen captable anual [L]</p> <p>V₂ = Volumen de demanda anual [L]</p>
DIN	Se aplica para el dimensionamiento de tanques asociados a sistemas de pequeña envergadura.	$V = \text{Min} \{V_1 \text{ o } V_2\}$ $V_1 = (C * \eta * 0.06) * P * A$ $V_1 = (Z_3) * P * A$ $V_2 = (0.06) * U * C_{AE}$ $V_2 = (Z_4) * U * C_{AE}$	<p>N = Número máximo de días en retención (recomendado entre 20 a 30 días)</p> <p>A = Área de captación [m²]</p> <p>U = Habitantes por vivienda</p>
EA	Emplea un método similar al sugerido por la guía DIN (2002), con una excepción en el porcentaje de cálculo.	$V = \text{Min} \{V_1 \text{ o } V_2\}$ $V_1 = (C * \eta * 0.05) * P * A$ $V_1 = (Z_5) * P * A$ $V_2 = (0.05) * U * C_{AE}$ $V_2 = (Z_6) * U * C_{AE}$	<p>P = Precipitación promedio anual (multianual)[mm]</p> <p>C_{AE} = Demanda anual por habitante [L]</p>
IRC	Aplica para sistemas de menor cuantía. Asume que el diseño se realiza para el 80% de la cantidad captada y que el usuario adopta una estrategia de demanda adaptativa; es decir, que toma un tercio más de agua al día cuando el tanque está cerca de desbordarse, y demanda un tercio menos al día cuando está casi vacío.	$V = \left(C * k * \eta * \frac{1}{365} \right) * P * A$ $V = (Z_7) * P * A$	<p>η = Coeficiente hidráulico asociado a la eficiencia del filtro</p> <p>C = Coeficiente de escurrentía</p> <p>k = Factor que depende de la zona climática y el objetivo de diseño (se fijó en 8 días)</p> <p>Z_i = Constante empírica propia de cada método</p>

Adaptado de: ANQIP (2015), DIN (2002), EA (2010) e IRC (2007).

Apéndice D. Descripción de las simulaciones continuas de balance de masa YAS, YBS y θ

Tabla 2.

Ecuaciones de balance de masa para las simulaciones continuas YAS, YBS y θ .

Método	Expresiones	Variables
YAS	$Q_t = P_t * A * C$ $Y_t = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} D_t, \\ V_{t-1}, \end{array} \right\}$ $V_t = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} V_{t-1} + Q_t - Y_t, \\ S - Y_t, \end{array} \right\}$	Q_t = Cantidad de agua captada en el intervalo de tiempo t [L] P_t = Precipitación en t [mm] A = Área de captación [m ²] C = Coeficiente de escorrentía V_t = Volumen en almacenamiento durante el intervalo de tiempo t [L]
YBS	$Q_t = P_t * A * C$ $Y_t = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} D_t, \\ V_{t-1} + Q_t, \end{array} \right\}$ $V_t = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} V_{t-1} + Q_t - Y_t, \\ S, \end{array} \right\}$	Y_t = Agua lluvia que entregó el tanque durante el intervalo de tiempo t [L] D_t = Demanda de agua lluvia durante el intervalo de tiempo t [L]
Theta (θ)	$Q_t = P_t * A * C$ $Y_t = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} D_t, \\ V_{t-1} + \theta * Q_t, \end{array} \right\}$ $V_t = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} (V_{t-1} + Q_t - \theta * Y_t) - (1 - \theta) * Y_t, \\ S - (1 - \theta) * Y_t. \end{array} \right\}$	S = Capacidad de almacenamiento del tanque [L] V_{t-1} = Volumen en almacenamiento al final del intervalo de tiempo previo [L]
Eficiencia [%]	$E(\%) = 100 * \frac{\sum Y_t}{\sum D_t}$	θ = Parámetro cuyo valor oscila entre 0 y 1 (YAS = 0, YBS = 1) $E(\%)$ = Eficiencia en el ahorro de agua

Adaptado de: Fewkes (1999b).

Apéndice E. Descripción de las simulaciones continuas de balance de masa según E. Ghisi

Tabla 3.

Ecuaciones de balance de masa para el método de simulación continua Ghisi.

Método	Expresiones	Variables
Ghisi	$V_{ac}^i = P_i * A * C$ $V_{inf\ in}^i = Min \left\{ V_{inf}, V_{inf\ fim}^{i-1} + V_{ac}^i \right\}$ $V_c^i = Min \left\{ D_{pluv}^i, V_{inf\ in}^i \right\}$ $V_{inf\ fim}^i = Min \left\{ V_{inf\ in}^i - V_c^i, V_{inf} - V_c^i \right\}$	<p>V_{ac}^i = Volumen de agua que escurre por el área de captación en un tiempo dado i [L]</p> <p>P_i = Precipitación pluviométrica en un intervalo de tiempo dado i [mm]</p> <p>A = Área de captación [m²]</p> <p>C = Coeficiente de escorrentía, valor adimensional entre cero y uno</p> <p>$V_{inf\ in}^i$ = Volumen disponible en el tanque al inicio del intervalo de tiempo i [L]</p> <p>V_{inf} = Volumen del tanque [L]</p> <p>$V_{inf\ fim}^{i-1}$ = Volumen disponible al final del intervalo de tiempo anterior i – 1 [L]</p> <p>V_c^i = Volumen de agua lluvia consumido en el intervalo de tiempo dado i [L]</p> <p>D_{pluv}^i = Demanda de agua lluvia para el intervalo de tiempo i [L]</p> <p>$V_{inf\ fim}^i$ = Volumen disponible al final del intervalo de tiempo i [L]</p> <p>$E(\%)$ = Eficiencia en el ahorro de agua</p>
Eficiencia [%]	$E(\%) = 100 * \frac{\sum V_c^i}{\sum D_{tot}^i}$	

Adaptado de: Ghisi y Marcel (2014).

Apéndice F. Descripción de las simulaciones continuas de balance de masa para el método**Rippl**

Tabla 4.

Ecuaciones de balance de masa para el método Rippl.

Método	Expresiones	Variables
Rippl	$V_t = C * P_t * A$ $\left\{ \begin{array}{l} S_t = 0, \quad C_t - V_t \leq 0 \\ S_t = C_t - V_t, \quad C_t - V_t > 0 \end{array} \right., t = 1$ $\left\{ \begin{array}{l} S_t = 0, \quad S_{t-1} + C_t - V_t \leq 0 \\ S_t = S_{t-1} + C_t - V_t, \quad S_{t-1} + C_t - V_t > 0 \end{array} \right., t > 1$ $V_r = \text{Max}\{S_t\}, \quad 1 \leq t \leq n$	<p>t = Intervalo de tiempo en consideración (ver diferencia entre t = 1 y t > 1)</p> <p>V_t = Volumen de agua lluvia captada [L]</p> <p>A = Área de captación [m²]</p> <p>P_t = Precipitación en el intervalo de tiempo en consideración [mm]</p> <p>C = Coeficiente de escorrentía</p> <p>S_t = Volumen en almacenamiento para el intervalo de tiempo t [L]</p> <p>C_t = Consumo de agua lluvia planteado para el intervalo de tiempo t [L]</p> <p>n = Número total de intervalos considerados</p> <p>V_r = Volumen de respuesta, asociado al tamaño del tanque que debería instalarse [L]</p>

Adaptado de: Sanches et al. (2015).

Apéndice G. Descripción de las funciones para el dimensionado económico

Tabla 5.

Funciones de costos para el dimensionado económico.

Expresión	Ecuación	Variables
Función de costos amortizados de inversión (CI(V))	$CI(V) = \alpha * C(V) \rightarrow$ $CI(V) = \left(\frac{(1+r)^N * r}{(1+r)^N - 1} \right) * C(V)$	α = Coeficiente de amortización C(V) = Función de costos de inversión sin amortizar [COP] r = Tasa de interés real [%] N = Período de amortización (vida útil) [Años] V = Volumen del tanque [L]
Función de costos de ahorro de agua potable (WS(V))	$WS(V) = P_w * D * E(V)$	P_w = Precio unitario del agua que incluye abastecimiento, saneamiento y vertido [COP/L] D = Demanda anual [L] E(V) = Eficiencia en función del volumen V = Volumen del tanque [L]

Adaptado de: López- Patiño et al. (2011).

El resultado de comparar las dos funciones descritas puede conducir a tres situaciones (ver Figura 4), siendo la más deseada cuando la construcción de un volumen de tanque permite obtener una ganancia máxima (línea amarilla). El volumen óptimo corresponde al tamaño asociado a la máxima ganancia (en anaranjado), la cual es la distancia entre las curvas de coste de ahorro de agua potable (en verde) y la inversión en la construcción del sistema (línea amarilla).

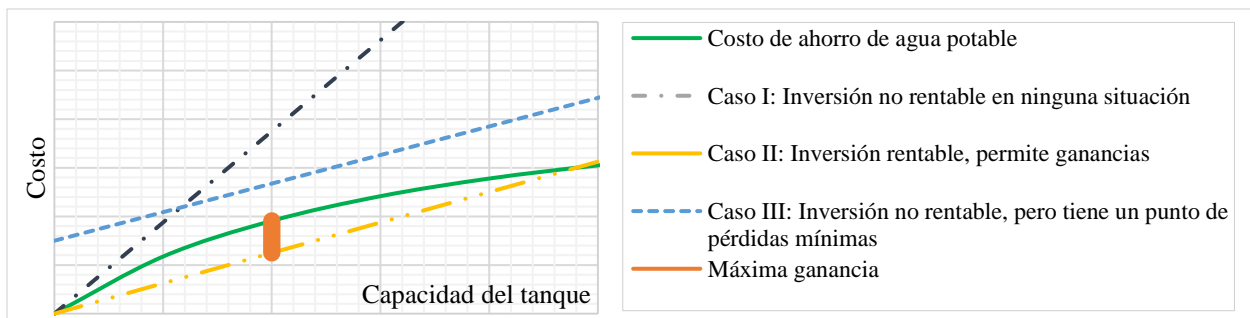


Figura 4. Posibles resultados del método económico sugerido por López- Patiño et al. (2011).

Apéndice H. Procedimiento aplicado por SARET para el método no paramétrico

Tabla 6.

Pasos usados por SARET para dimensionar el tanque a partir de precipitaciones estocásticas.

Paso	Descripción
Paso 1	Se debe contar con registros de precipitación diaria por varios años sin incluir los días bisiestos.
Paso 2	Se recomienda ordenar los datos en una tabla de tal manera que las etiquetas de las filas correspondan a los días del año, mientras que las etiquetas de las columnas a los años. Se utilizan ventanas móviles, estas son arreglos que contienen la información de los 15 registros previos y los 14 posteriores al día objetivo a través de los años (p. ej., si se tienen 25 años entonces existirán 365 ventanas móviles de tamaño 30 días x 25 años). Para considerar las ventanas móviles de los días iniciales y finales del año, se hace necesario usar la información de los años adyacentes (se debe tener en cuenta que los años de los extremos se consideran contiguos).
Paso 3	Cada día de registro se debe clasificar como húmedo (W) o seco (D), siendo húmedo cuando se tuvo una precipitación mayor a cero, y seco cuando no se presentó la lluvia.
Paso 4	Para cada ventana móvil, se debe contar la cantidad de eventos de la manera: W (día húmedo), D (día seco), WW (día húmedo tras un día húmedo), WD (día seco tras un día húmedo), DD (día seco tras un día seco) y DW (día húmedo tras un día seco).
Paso 5	Se completa el modelo de cadenas de Markov de primer orden para cada uno de los 365 días. Esto se logra mediante el cálculo de las siguientes probabilidades: $P_i(W) = \frac{\text{Cant. Días } W}{\text{Cant. Días } W + \text{Cant. Días } D}; P_i(D) = 1 - P_i(W);$ $P_i(WW) = \frac{\text{Cant. Días } WW}{\text{Cant. Días } WW + \text{Cant. Días } WD}; P_i(WD) = 1 - P_i(WW);$ $P_i(DD) = \frac{\text{Cant. Días } DD}{\text{Cant. Días } DD + \text{Cant. Días } DW} \text{ y } P_i(DW) = 1 - P_i(DD).$
Paso 6	Se inicia la creación de la precipitación estocástica mediante la asignación de día seco (D) o húmedo (W) para cada uno de los días (p. ej., para 25 años serían 9125 días). La asignación se realiza según el siguiente criterio: $\zeta B > P.1(W)? \left\{ \begin{array}{l} \text{SÍ} \rightarrow \text{Día. 1} = D \\ \text{NO} \rightarrow \text{Día. 1} = W \end{array} \right\} \leftarrow \text{Formato para el primer día}$ $\zeta \text{Día. } i - 1 = W? \left\{ \begin{array}{l} \text{SÍ} \rightarrow \zeta B > P.i(WW)? \left\{ \begin{array}{l} \text{SÍ} \rightarrow \text{Día. } i = D \\ \text{NO} \rightarrow \text{Día. } i = W \end{array} \right\} \\ \text{NO} \rightarrow \zeta B > P.i(DD)? \left\{ \begin{array}{l} \text{SÍ} \rightarrow \text{Día. } i = W \\ \text{NO} \rightarrow \text{Día. } i = D \end{array} \right\} \end{array} \right\} \leftarrow \text{Formato para el resto de días}$ <p style="text-align: center;">Donde B corresponde a un número aleatorio entre 0 y 1.</p>
Paso 7	Si el día fue definido como día seco se le asignará una precipitación nula, pero si el día fue definido como un día húmedo, deberá elegirse de la ventana móvil asociada al día objetivo, el k-ésimo mayor valor de precipitación del conjunto de datos; es decir, se elige una de las 750 precipitaciones (p. ej., para ventanas de 25 años) que en realidad ocurrieron. El k-ésimo valor corresponde a la aproximación al número entero inferior del valor calculado como sigue: $k - \text{ésimo} = (\text{Aleatorio entre } 0 \text{ y } 1) * (\text{Cantidad de } W \text{ en la ventana móvil}) + 1$
Paso 8	Se aplican por lo menos 100 simulaciones estocásticas bajo cualquier método de balance de masa. De los 100 tamaños de tanque, se recomienda elegir de manera conservadora el de mayor volumen.

Adaptado de: Basinger et al. (2010).

Apéndice I. Descripción de los componentes del método probabilístico

Tabla 7.

Descripción del dimensionado basado en un tratamiento probabilístico.

Componente	Descripción
<p>Simulación continua de balance de masa</p>	<p>Puede ser cualquiera que permita calcular el déficit en el suministro a partir de un volumen asignado. El déficit se define como el inverso de la eficiencia; es decir, como el porcentaje restante (p. ej., si la eficiencia es de 79% el déficit corresponde a 21%). Cada tamaño de tanque deberá tener asociado una cantidad de déficits anuales igual a la cantidad de años del registro.</p>
<p>Modelo probabilístico de función de densidad de probabilidad</p>	<p>La cantidad de déficits anuales asociados a cada tamaño de tanque constituye una muestra que se modela a partir de la aplicación de funciones de densidad de probabilidad (p. ej., la distribución normal). Los eventos que en realidad resultan preocupantes, son aquellos en los que las tasas de déficit pueden ser superadas. Por lo tanto, se calcula la probabilidad de que en cierto período de tiempo se presente cierta excedencia. Se calcula el valor de déficit asociado a la probabilidad de excedencia para un período de retorno, mediante la integración de la curva de densidad de probabilidad. El resultado permite la elección de un volumen de tanque a partir de la selección de un déficit bajo una condición de excedencia en cierto período de tiempo (ver Figura 5).</p>

Adaptado de: Su et al. (2009).

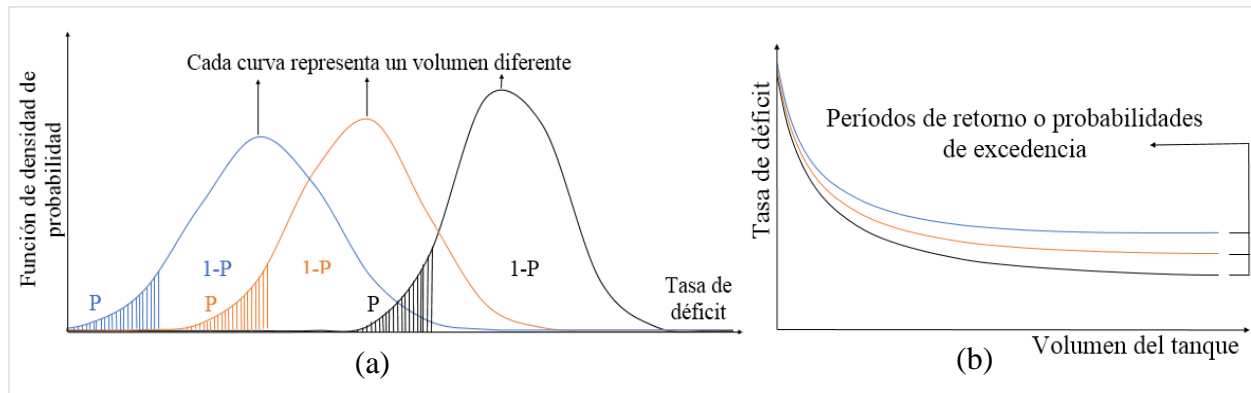


Figura 5. Método probabilístico. (a) Funciones de densidad de probabilidad. (b) Relaciones para el déficit y el volumen de almacenamiento según la probabilidad de excedencia.

Apéndice J. Definición de las variables para la comparación cualitativa

a) Robustez conceptual:

Para los efectos de este documento, la robustez conceptual de los métodos debe entenderse como la capacidad de las metodologías de albergar conceptos y variables que consoliden un argumento avanzado y desarrollado. Se considera que un método es conceptualmente poco robusto cuando en su planteamiento apenas considera un pequeño conjunto de variables que se relacionan de manera básica. En contraste, un método robusto tiene un desarrollo conceptual más complejo en el que se incluye un conjunto de variables y consideraciones que se relacionan bajo un argumento más avanzado.

b) Potencial de incorporación a otros métodos:

El potencial de incorporación a otros métodos debe entenderse como la propiedad que tienen los procedimientos para acoplarse a otros planteamientos. Un método cuyo potencial de incorporación sea alto, se considera como un procedimiento que puede hacer parte de otros métodos distintos. De otro lado, un método con potencial bajo se considera como un procedimiento poco transformable ya que no permite adherirse a otras consideraciones más avanzadas.

c) Resiliencia:

La resiliencia de los métodos debe entenderse como la capacidad que tienen de prever y adaptarse a los distintos retos que el entorno plantea (financieros, climáticos, sociales, etc.). Un método cuya resiliencia se considera alta es un procedimiento que tiene validez en el tiempo debido a su adaptabilidad, mientras que un método poco resiliente es un procedimiento que tiene limitado el campo de aplicación ya que solo aplica a ciertos casos.

d) Precisión:

Para este estudio, la precisión se consideró como un criterio que mide la capacidad de un método de entregar el mismo resultado en simulaciones distintas llevadas a cabo para las mismas condiciones. Se dice que un método es preciso cuando sus resultados no cambian para las distintas simulaciones. Por el contrario, un método será impreciso si para las mismas condiciones del problema sus resultados difieren en las progresivas simulaciones.

e) Nivel de información requerido:

El nivel de información requerido por los métodos tiene que ver con la complejidad de los datos de entrada que estos demandan. Un método con un alto nivel de información requerido es un planteamiento que necesita información compleja para entregar una respuesta, mientras que un método con bajo nivel de información requerido corresponde a un procedimiento que simula bajo información básica.

f) Dificultad en la aplicación del método:

La dificultad para aplicar un método corresponde a la probabilidad de encontrar obstáculos o inconvenientes para realizar la simulación. Debe entenderse como un método con alta dificultad de aplicación si para lograr un resultado se debe superar un procedimiento más complejo y difícil. Por el contrario, un método con baja dificultad en la aplicación es un procedimiento de fácil simulación para el cual no se presentan muchos inconvenientes.