

DOI: 10.24850/j-tyca-13-06-04

Artículos

Dimensionamiento óptimo de tanques de sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico

Optimal sizing of rainwater harvesting tanks for domestic use

Gabriela Álvarez-Olguín¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7144-2426>

Corina Cisneros-Cisneros², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9667-3936>

Fidencio Sustaita-Rivera³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1151-1514>

René Morales-Luis⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0210-9814>

Iliana Herrera-Arellano⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4449-0553>

¹Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México, galvarez@mixteco.utm.mx

²Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México, cisneros@mixteco.utm.mx



³Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México, sustaita@mixteco.utm.mx

⁴Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México, rmluis@mixteco.utm.mx

⁵Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México, iliana@mixteco.utm.mx

Autora para correspondencia: Gabriela Álvarez-Olguín, galvarez@mixteco.utm.mx

Resumen

La captación de agua de lluvia es una alternativa que puede contribuir a la solución de los problemas de escasez de agua. Sin embargo, debido a que en el diseño de un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) influyen diversas variables, la selección correcta de la capacidad adecuada del tanque de almacenamiento puede ser una tarea difícil para las personas que no cuentan con conocimientos hidrológicos básicos, como los propietarios de una casa o los miembros de alguna organización no gubernamental. El objetivo de este estudio fue desarrollar modelos regionales para estimar el volumen óptimo de tanques de recolección de agua de lluvia en comunidades de la Cuenca Alta del Río Mixteco (CARM) en Oaxaca, México. Con base en el análisis de datos diarios de lluvia de 12 estaciones climatológicas y la aplicación del método de balance de

agua se realizaron simulaciones del funcionamiento de tanques de distintas capacidades para distintos números de usuarios, superficies de captación y fracciones de demanda. Como resultado se obtuvo la variación espacial de las capacidades óptimas de tanques que, junto con datos de lluvia media anual, se utilizaron para la obtención de ecuaciones de regresión exponencial. Se determinó que las capacidades de los tanques serán mayores en localidades del norte de la cuenca donde llueve menos; mientras que hacia el suroeste se requieren tanques de menor capacidad. Por otro lado, los modelos regionales permitirán cuantificar de manera práctica la capacidad del tanque para el diseño funcional de los SCALL en la CARM.

Palabras clave: Cuenca Alta del Río Mixteco, ciudad de Huajuapán de León, presa Lázaro Cárdenas, regresión exponencial, modelo de balance de agua, simulación del funcionamiento de tanques.

Abstract

Rainwater harvesting is an alternative that can contribute to solving water scarcity problems. However, since the design of a Rainwater Harvesting (RWH) system is influenced by several variables, the correct selection of the appropriate storage tank capacity could be a difficult task for people who do not have basic hydrological knowledge, like the proprietors of a house, or members of civil organizations. The objective of this study is to develop regional models to estimate the optimal volume of rainwater collection tanks in communities of the Upper Mixteco River Basin (UMRB)



in Oaxaca, Mexico. Based on the analysis of daily rainfall data from 12 weather stations, and the application of the water balance method, simulations of the tank operations of different capacities were carried out for a number of users, as well as catchment areas and demand fractions. As a result, the spatial variation of the optimal tank capacities was obtained, which, together with the annual mean rainfall data, were used to obtain exponential regression equations. It was determined that the capacities of the tanks will be greater in localities in the north of the basin, where it rains less, while, towards the southwest, smaller capacity tanks are required. On the other hand, the regional equations will allow to quantify in a practical way, the capacity of the tank for the functional design of the RWH system in the UMRB.

Keywords: Upper Mixteco River Basin, City of Huajuapán de León, Lázaro Cárdenas dam, regression analysis, water balance model, simulation of tank operation.

Recibido: 29/04/2021

Aceptado: 16/08/2021

Introducción

El agua es esencial para la vida y las actividades humanas, sin embargo, factores como contaminación, sobreexplotación de fuentes de agua, crecimiento demográfico acelerado, así como degradación de zonas de recarga de acuíferos han conducido a la disminución de la disponibilidad de este recurso. Dicha situación se presenta en diversas comunidades de la Cuenca Alta del Río Mixteco (CARM) del estado de Oaxaca, México, donde el grado de presión sobre los recursos hídricos es fuerte (Conagua, 2010). Además, en esta región el aprovechamiento de agua superficial está limitado debido a la veda declarada el 2 de febrero de 1966 para el otorgamiento de concesiones (Conagua, 2011), y aunque el 19 de marzo del 2011 se firmó el Decreto para Modificar la Veda de la Cuenca del Río Balsas, aún existen limitantes para el otorgamiento de concesiones. La situación más crítica se tiene en la ciudad de Huajuapán de León, donde la disponibilidad de agua es cada vez menor, principalmente por la contaminación del río Mixteco y azolvamiento de la presa Lázaro Cárdenas, de la cual se abastece aproximadamente 60 % de la población en esta localidad. Por lo anterior, abastecer de agua a las comunidades de la CARM representa un enorme reto.

El problema de la presión sobre los recursos hídricos en muchas regiones del mundo se puede abordar mediante la implementación de una

serie de políticas y prácticas que incluyen gestión de la demanda e identificación de fuentes de agua alternativas, como captación de agua de lluvia, reutilización de aguas grises y residuales, así como desalinización (Imteaz, Shanableh, Rahman, & Ahsan, 2011). El agua de lluvia captada sin tratar puede emplearse para usos no potables, como descarga de inodoros y riego de jardines; mientras que después de un tratamiento apropiado también se puede usar como agua potable (Londra, Theocharis, Baltas, & Tsihrintzis, 2015). Por otro lado, la recolección de agua de lluvia tiene un impacto a largo plazo en los recursos hídricos locales, al reducir demandas de extracción de agua superficial y subterránea (Abdulla, 2019); además, la recolección y el uso del agua de lluvia pueden reducir efectivamente el volumen de escurrimientos pluviales, sobre todo en áreas urbanas en rápida expansión (Guo & Baetz, 2007; Kim, Han, & Lee, 2012; Sample & Liu, 2014).

La captación de agua de lluvia es una tecnología utilizada para almacenar aguas pluviales captadas en techos u otras superficies impermeables (Abdulla, 2019; Fonseca, Hidalgo, Díaz-Delgado, Vilchis-Francés, & Gallego, 2017; Sample & Liu, 2014). Los componentes de los sistemas de captación de aguas pluviales en techos generalmente consisten en un área de recolección, un sistema de conducción, un filtro para remover una fracción inicial del escurrimiento, y una cisterna o tanque de almacenamiento (Abdulla, 2019; Sample & Liu, 2014; Vieritz, Neumann, & Cook, 2015). En la mayoría de los casos, la decisión de diseño más importante del sistema es la evaluación de la capacidad de

almacenamiento del tanque (Campisano & Modica, 2012; Abdulla 2019) y el enfoque más común para determinar el tamaño óptimo del mismo es usar el modelo de balance de agua (Campisano & Modica 2012; Fewkes & Butler, 2000; Ghisi & Ferreira, 2007; Londra *et al.*, 2015; Villarreal & Dixon, 2005). En este modelo se utilizan observaciones históricas de lluvia para estimar las afluencias, con una demanda asumida como flujo de salida, con lo cual se calcula el volumen de agua dentro del tanque en función del tiempo (Basinger, Montalto, & Lall, 2010).

La captación de agua de lluvia es una alternativa que puede contribuir a la solución de los problemas de suministro de agua en la CARM. Sin embargo, en esta zona es común que las construcciones de los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) estén a cargo de organizaciones no gubernamentales (ONG) o los propietarios de una casa, que no cuentan con conocimientos hidrológicos básicos, por lo que se suelen elegir capacidades de tanques inadecuadas, al no considerar la presencia de diversas variables que influyen en el diseño de los mismos, como el comportamiento de la lluvia local, el área de la superficie de captación y la demanda.

El objetivo de este estudio fue desarrollar modelos regionales para cuantificar el volumen óptimo de tanques de recolección de agua de lluvia en la CARM en función de la precipitación anual, la demanda de agua de lluvia y el área de la superficie de captación. Los resultados obtenidos serán una herramienta que facilitará el diseño adecuado de los SCALL que se pretendan instalar en la cuenca.

Materiales y métodos

Área de estudio

La CARM abarca una superficie de 91 000 hectáreas y se localiza en la región Mixteca del estado de Oaxaca, México (Figura 1). El punto de salida natural de la cuenca es la presa Lázaro Cárdenas, conocida coloquialmente como presa Yosocuta, la cual es alimentada por el río Mixteco, tributario del río Balsas de la Región Hidrológica No. 18. En esta región, la disponibilidad natural media de agua es baja y el grado de presión sobre los recursos hídricos es fuerte (Conagua, 2010). La precipitación media anual correspondiente al periodo de 1980 a 2000 oscila entre 500 y 700 mm. La zona más lluviosa se localiza al suroeste de la cuenca, mientras que la menos lluviosa es la zona norte (Figura 1).

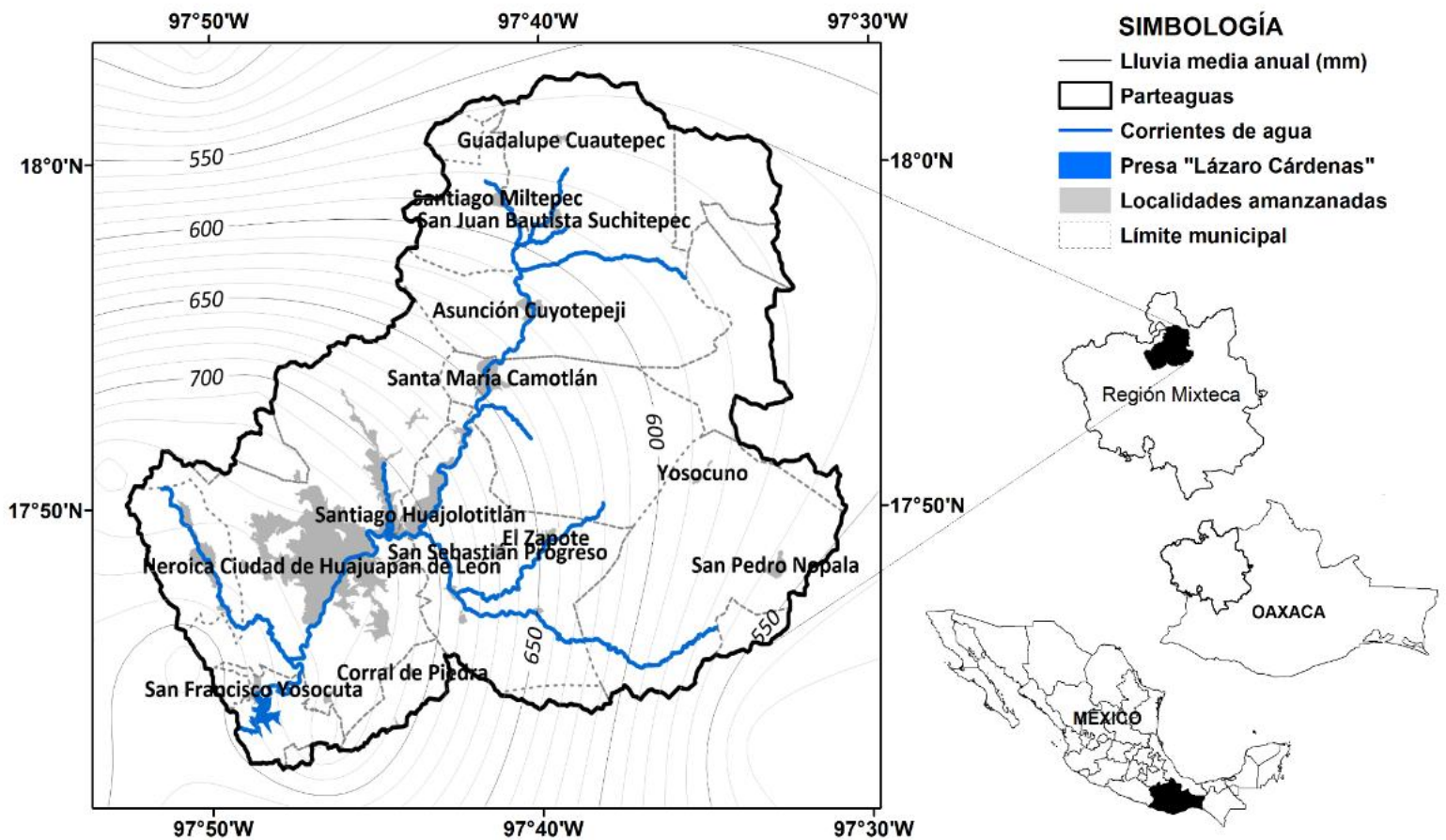


Figura 1. Localización de la Cuenca Alta del Río Mixteco y variación espacial de la lluvia media anual (1980-2000).

La CARM se ubica en el territorio de 20 municipios de Oaxaca y uno de Puebla; además contiene a 67 localidades urbanizadas, de las cuales, El Molino, Santiago Huajolotitlán, Vista Hermosa, La Estancia, Santa María

Camotlán, Acatlima, La Junta, Buena Vista y Asunción Cuyotepeji se destacan por tener más de mil habitantes (INEGI, 2020); sin embargo, la ciudad de Huajuapán de León es por mucho la localidad dentro de la CARM que tiene mayor población, con 56 163 habitantes (INEGI, 2020) y una de las tasas de crecimiento poblacionales (2.3 %) más altas del estado de Oaxaca (INEGI, 2015).

Datos de lluvia

Los datos utilizados corresponden a la lluvia diaria registrada en 12 estaciones climatológicas convencionales del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), extraídos de la base de datos CLICOM (*Climate Computing Project*). Las características de tales estaciones se muestran en la Tabla 1 y Figura 2; se observa que el periodo de registros de éstas oscila entre 1950 y 2016; sin embargo, se eligió el periodo de 1980 a 2000 por tener mayor cantidad de información. Todas las estaciones, a excepción de “San Francisco Yosocuta”, presentan ausencia de datos en algunos años. Para deducir la información faltante se aplicó el método de interpolación de la distancia

inversa ponderada (Shepard, 1968), considerando dos estaciones de apoyo y un exponente de distancia igual a dos.

Tabla 1. Características de las estaciones climatológicas seleccionadas.

Estación	Nombre	Altitud	Periodo de registros	Núm. de años con registros entre 1950 y 2016	Núm. de años con registros entre 1980 y 2000
20003	Astatla	2 121	1955-2016	51	10
20108	San Francisco Yosocuta	1 544	1970-2002	33	21
20125	Santa Catarina	1 349	1970-2001	30	19
20133	Santiago Chilixtlahuaca	2 099	1970-2004	33	20
20137	Santiago Teotongo	2 076	1969-2002	33	20
20163	Tezoatlán de Segura y Luna	1 527	1963-1996	34	17
20190	Zapotitlán Palmas (SMN)	1 913	1950-2004	52	19
20207	Magdalena Tetatepec	1 851	1971-2002	31	20
20275	Huajuapán de León (DGE)	1 584	1976-2002	26	20
20305	San Juan Nochixtlán	1 916	1980-2001	19	18

20306	San Lorenzo Vista Hermosa	1 527	1980-2002	22	20
21175	Santa Ana Tepejillo	1 450	1980-1995	16	16



Figura 2. Estaciones climatológicas seleccionadas.

Componentes del sistema

Los componentes de los sistemas de captación de aguas pluviales en techos por lo común consisten en un área de recolección, un sistema de conducción, un dispositivo para remover una fracción inicial del escurrimiento, y una cisterna o tanque de almacenamiento (Abdulla, 2019; Sample & Liu, 2014; Vieritz *et al.*, 2015); además pueden incluir una bomba y cuando el agua es para uso doméstico también se incluyen dispositivos para mejorar la calidad del agua, como filtros y dosificadores de cloro. En el ejemplo mostrado en la Figura 3 se incluye un primer dispositivo de descarga, conocido como interceptor de primeras aguas, el cual se instala para descartar la primera cantidad de escurrimientos del techo como medida de mitigación de contaminantes, tales como polvo, sedimentos, excrementos de animales, hojas y escombros acumulados en las azoteas antes de las primeras lluvias. Al tanque de almacenamiento corresponde un volumen activo (V), que excluye el volumen de almacenamiento muerto debajo de la tubería de suministro y el volumen sobre la tubería de desbordamiento. En este sistema cerrado, la salida de agua es a través de la extracción al hogar (E) y el derrame del tanque (S) (Vieritz *et al.*, 2015).

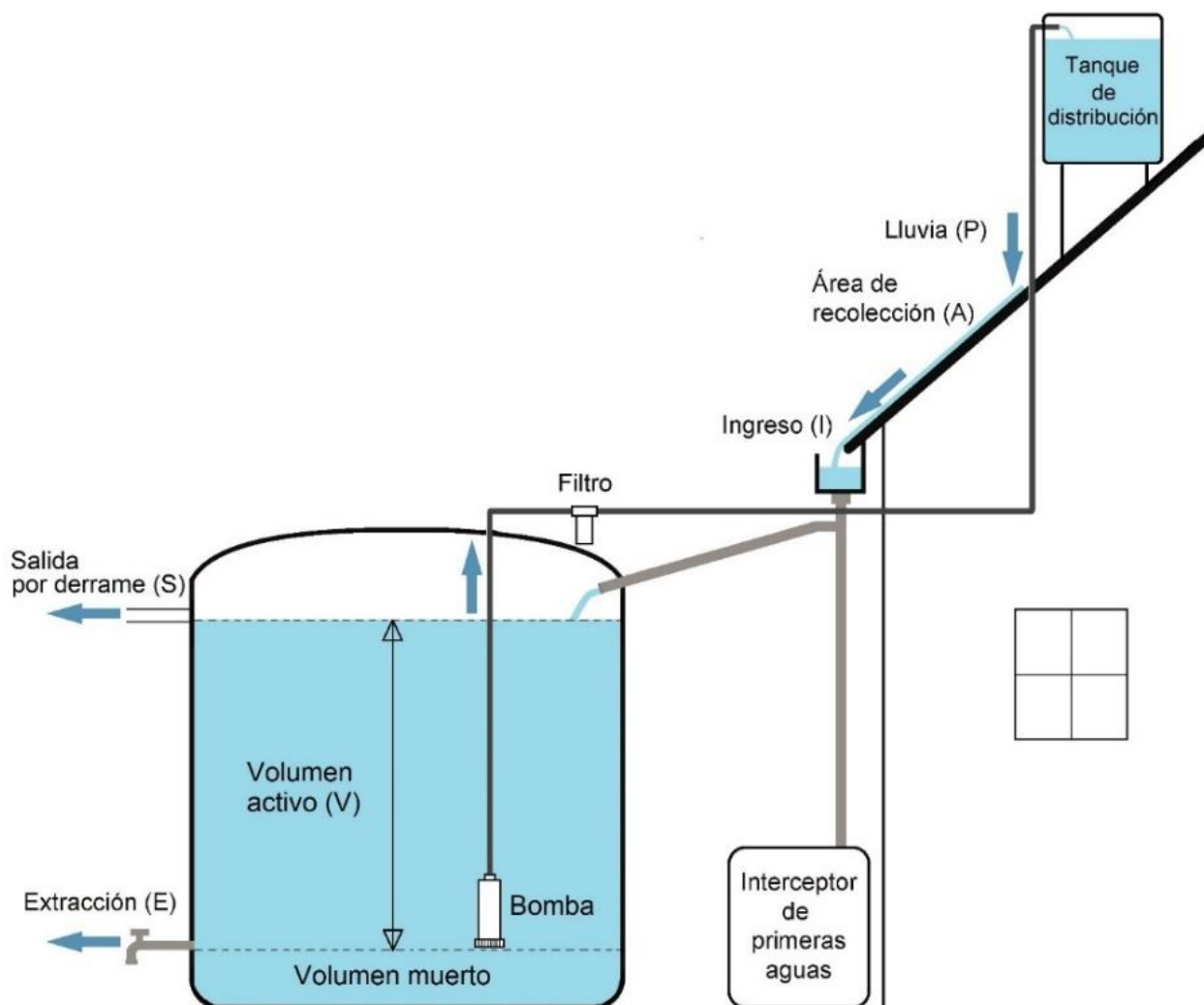


Figura 3. Componentes de un sistema de captación de agua de lluvia en techos.

Dimensionamiento del tanque

Por lo general, la decisión de diseño más importante es dimensionar correctamente el tanque para contar con una adecuada capacidad de almacenamiento (Abdulla, 2019; Campisano & Modica, 2012). El volumen de diseño del tanque se determina con base en diversos factores interrelacionados, como lluvia local, área de la superficie de captación, coeficiente de escorrentía, dotación de agua y número de usuarios (Eroksuz & Rahman, 2010; Ghisi, 2010; Palla, Gnecco, Lanza, & La Barbera, 2012). El enfoque más común para determinar el volumen óptimo es a partir del modelo de balance de agua (Campisano & Modica, 2012; Fewkes & Butler, 2000; Londra *et al.*, 2015), donde se utilizan observaciones históricas de lluvia para calcular las afluencias, con una demanda asumida (dotación) como flujo de salida, con lo cual se calcula el volumen de agua dentro del tanque en función del tiempo (Basinger *et al.*, 2010).

La simulación de la cantidad de agua almacenada en el tanque se realizó con el modelo de balance de agua definido por la Ecuación (1):

$$V_t = V_{t-1} + I_t - S_t - E_t, \quad (1)$$

donde V_t y V_{t-1} son los volúmenes de agua en el tanque al final del día actual y al final del día anterior, respectivamente (m^3); S_t , el volumen de agua que sale del tanque por derrame (m^3); E_t , el volumen de agua extraído para uso doméstico (m^3), e I_t es el volumen de agua de lluvia que ingresa al tanque (m^3), el cual se estimó a partir de la Ecuación (2):

$$I_t = CA P_{et}, \quad (2)$$

donde I_t es el volumen de agua de lluvia captada del techo (m^3) en el día t ; C , el coeficiente de escurrimiento; A , el área de la superficie de captación (m^2), y P_{et} es la lámina de lluvia efectiva ocurrida en el día t (m).

La lluvia efectiva se estableció igual a la lluvia diaria menos la primera descarga. De acuerdo con Londra *et al.* (2015), se supuso que la primera descarga es igual a 0.33 mm. Por otro lado, debido a que el tanque suele ser un contenedor cerrado, se consideraron insignificantes las pérdidas por evaporación y fugas.

Para resolver la Ecuación (1) fue necesario elegir el orden de ocurrencia de los procesos de derrame y extracción de agua del tanque. En el algoritmo utilizado (ecuaciones (3) a (5)) se asumió que el derrame ocurre antes de la extracción (Vieritz *et al.*, 2015):

$$E_t = \min[D_t, V_{t-1}], \quad (3)$$

$$V_t = \min[V_{tan} - E_t, V_{t-1} + I_t - E_t], \quad (4)$$

$$S_t = \max[(V_{t-1} + I_t) - V_{tan}, 0], \quad (5)$$

donde D_t es la demanda de agua (m^3) en el día t , obtenida con la Ecuación (6) y V_{tan} es el volumen de almacenamiento activo (m^3) que excluye al volumen muerto por debajo del nivel del agua del que se extrae agua (Figura 3):

$$D_t = h \cdot d \cdot p, \quad (6)$$

donde h es el número de habitantes o usuarios que se abastecerán del sistema; d , la dotación de agua considerada por persona al día, y p es la fracción de demanda que se pretende suministrar, la cual es de 0.5 cuando se suministra 50 % del total.

De acuerdo con Tsihrintzis y Baltas (2013), se consideró que el volumen medio anual de agua de lluvia captada es igual a la demanda media anual, entonces el área mínima requerida de recolección de agua de lluvia, A_{min} , para satisfacer el porcentaje p de la demanda total de agua se calculó como:

$$A_{min} = \frac{365 \cdot h \cdot d \cdot p}{C \bar{P}_e}, \quad (7)$$

donde $\bar{P}_e$ es la lluvia efectiva media anual en m.

Para cada estación seleccionada se estimó A_{min} y se realizaron distintas simulaciones del funcionamiento del tanque a nivel diario, con diferentes valores de volumen activo (V_{tan}) y bajo la suposición de que el tanque en el primer día de simulación se encuentra lleno. Además, se consideraron diferentes áreas de captación, números de usuarios y fracciones de demanda. Las áreas de captación oscilaron entre 30 y 200 m², con incrementos de cinco unidades; mientras que los números de usuarios fueron 3, 4, 5 y 6. Las fracciones de demanda fueron de 0.3, 0.4 y 0.5. Se eligió una dotación única de 50 litros por persona al día, dotación mínima recomendada por la Organización Mundial de la Salud (Howard, Bartram, Water, & World Health Organization, 2003) a nivel domiciliario, para satisfacer las necesidades de higiene básica y de consumo, y posiblemente de lavandería y baño. El coeficiente de escurrimiento (C) utilizado fue de 0.8, es decir, se consideró que solo ingresa al tanque 80 % del volumen de agua de lluvia que cae sobre la superficie de captación. El volumen activo óptimo del tanque (V_{opt}) se eligió como el volumen activo mínimo, con el cual no se tuvieron días con tanque vacío durante el periodo de simulación.

Modelos regionales para la estimación del volumen óptimo

Previamente a la obtención de los modelos regionales se aplicaron de manera individual regresiones exponenciales a los datos obtenidos de las simulaciones de cada estación. La forma estándar de las curvas ajustadas se indica en la Ecuación (8), en la cual se incluyeron los coeficientes $\frac{V_{opt}}{A}$ y $\frac{hp}{A}$ adaptados de los números adimensionales utilizados por Khastagir y Jayasurita (2010):

$$\frac{V_{opt}}{A} = ae^{b\frac{hp}{A}}, \quad (8)$$

donde a y b son constantes empíricas.

Posteriormente, los valores obtenidos del parámetro b fueron utilizados para construir un mapa de la configuración espacial del mismo, que sirvió de base para la delimitación de regiones con formas de curvas ajustadas similares.

Debido a que se identificaron dos regiones homogéneas dentro de la CARM se obtuvieron dos modelos regionales para la estimación del

volumen óptimo. El primer modelo se obtuvo tras realizar una regresión exponencial con los datos combinados de cinco estaciones ubicadas al sur de la zona de estudio (región 1); mientras que el segundo modelo se encontró a partir de la regresión aplicada a los datos combinados de cuatro estaciones ubicadas al norte (región 2). La forma de las curvas regionales ajustadas se indicada en la Ecuación (9), en la cual se incluyó a la precipitación efectiva media anual:

$$\frac{V_{opt}}{A} = me^{n \frac{hp}{A\bar{P}_e}}, \quad (9)$$

donde $\bar{P}_e$ es la precipitación efectiva media anual en m.

De las regresiones grupales se excluyeron dos estaciones (una de cada región), con el fin de utilizar sus datos para validar los modelos regionales. La validación consistió en comparar los volúmenes estimados contra los volúmenes óptimos obtenidos de las simulaciones. Finalmente, como ejemplo de aplicación de los modelos obtenidos, se determinaron las capacidades recomendadas para los tanques de sistemas de captación de agua de lluvia para las localidades del Zapote del municipio de Santiago Huajolotitlán, de Asunción Cuyoteji, del municipio del mismo nombre y de San Francisco Yosocuta, del municipio de San Marcos Arteaga.

Resultados y discusión

Tamaño óptimo de tanques

La aplicación de la ecuación de balance permitió determinar las capacidades óptimas de los tanques para diferentes áreas de captación, número de usuarios y fracciones de demanda. Es importante resaltar que de acuerdo con las fracciones de demanda seleccionadas (0.3, 0.4 y 0.5), con el volumen activo óptimo del tanque solamente se podrá cubrir un porcentaje de la dotación de agua. Por ejemplo, con una fracción de demanda de 0.4 se podrán suministrar 20 litros por persona al día; es decir, 40 % de la dotación de 50 litros.

En la Figura 4 se muestra parte de los resultados de la simulación realizada para la estación 20275 de Huajuapán de León, en la cual se determinó que para suministrar 40 % de la dotación de agua de tres usuarios, con una superficie de captación de 120 m², la capacidad del tanque es de 12.5 m³. Se consideró que ésta es la capacidad óptima debido a que tal es el volumen activo mínimo con el cual no se tuvieron días con tanque vacío durante el periodo de 1980 a 2000. Se observa que

en el año de 1989 antes de iniciar la época de lluvias se tuvo un periodo crítico en el mes de abril, cuando se tuvieron los volúmenes en el tanque más bajos; no obstante, el tanque no se quedó vacío. Por otro lado, a finales de junio el tanque comenzó a llenarse y se tuvieron derrames que fueron persistentes hasta mediados de octubre.

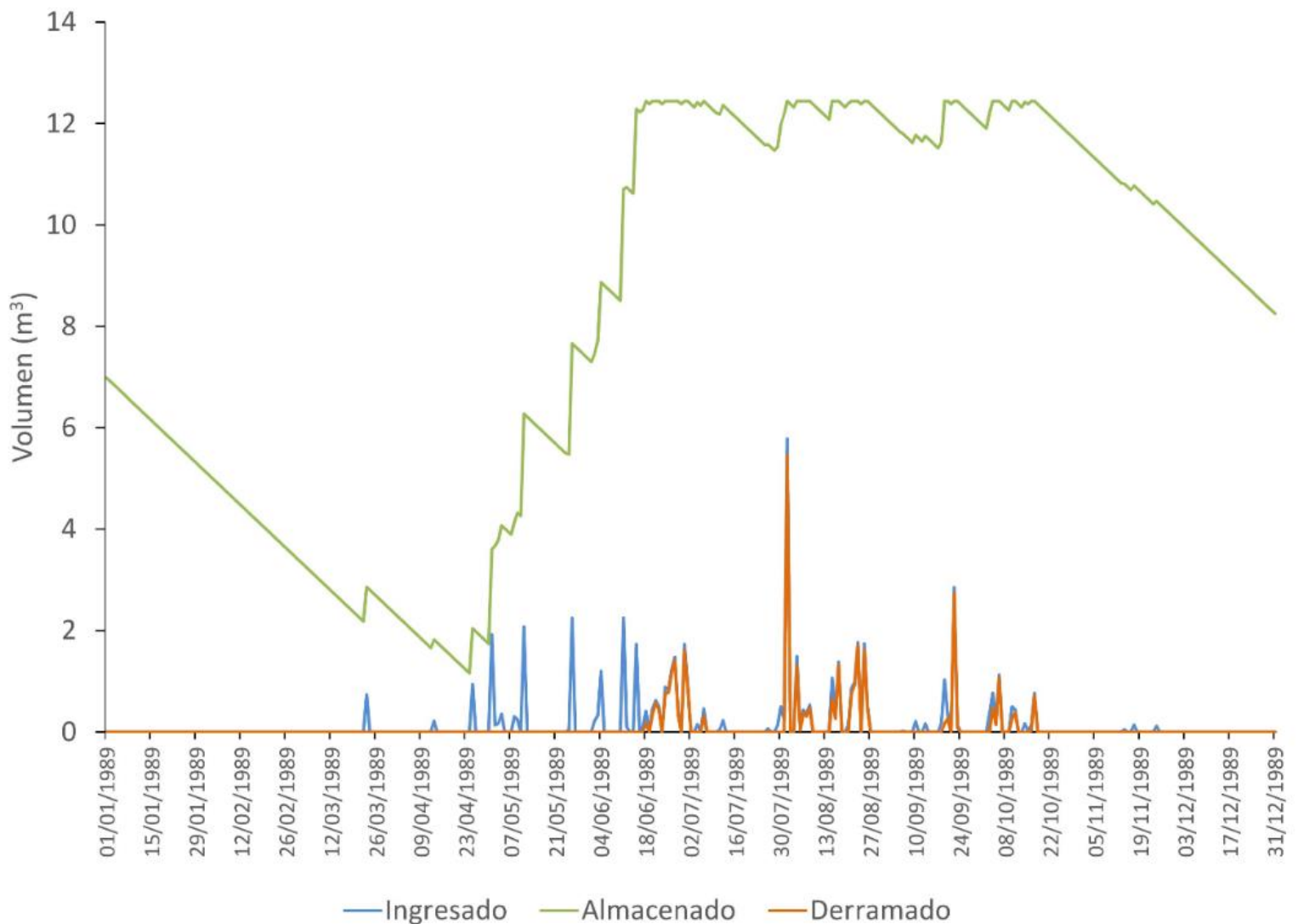


Figura 4. Simulación de balance de agua para la estación 20275 de Huajuapán de León, Oaxaca, bajo las siguientes condiciones: $V_{opt} = 12.5 \text{ m}^3$, $A = 120 \text{ m}^2$, $h = 3$, $d = 50$ litros per cápita al día y $p = 0.4$.

Por otro lado, con los resultados de las simulaciones de las 12 estaciones se construyeron mapas de la variación espacial de las capacidades de tanques en la CARM. En la Figura 5 se muestran las configuraciones obtenidas para suministrar agua a 3 y 4 usuarios, con áreas de captación de 120 m² y fracciones de demanda de 0.4. Se aprecia que los volúmenes serán mayores en localidades ubicadas al norte de la cuenca, donde llueve menos; mientras que hacia el suroeste, donde la acumulación de lluvia anual es mayor, se requieren tanques de menor capacidad. Los volúmenes podrían ser considerablemente altos en las zonas del norte de la cuenca, con valores superiores a los 25 m³. No obstante, en diversos países (incluido México) se están utilizando diferentes tecnologías para almacenar grandes volúmenes de agua de lluvia, entre las que están los tanques de ferrocemento (Ocampo-Fletes, 2020; Caballero, 2006; Carrasco, 2016; Limaylla, 2008) y de placas prefabricadas (Mamani, 2015), los cuales son fáciles de construir, pues no requieren mano de obra especializada y tienen un costo relativamente bajo, además pueden tener capacidades de más de 50 m³.

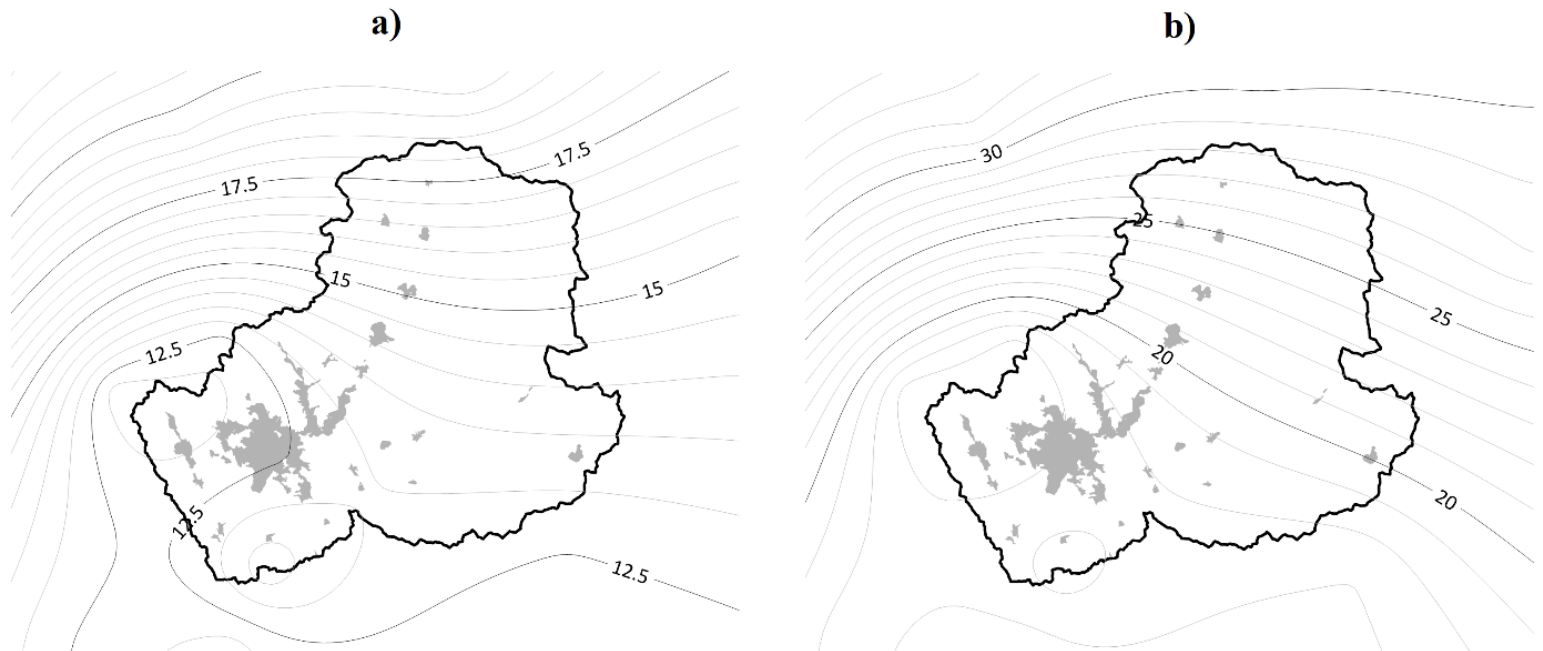


Figura 5. Variación del volumen óptimo (m^3) de tanques de sistemas con superficie de captación de 120 m^2 , que abastecerán 40 % de la demanda de 3 (a) y 4 (b) usuarios. La dotación asignada por persona es de 50 litros al día.

En la Figura 6 se muestra la relación entre las áreas de captación (A) y los volúmenes óptimos (V_{opt}) de dos estaciones del área de estudio. Se observa que la forma de las curvas es convexa, tal como se ha encontrado en las investigaciones de Sample y Liu (2014), y Londra *et al.* (2015), las cuales indican que a mayor superficie de captación se requiere menor capacidad de almacenamiento del tanque. Para la estación de Huajuapán de León, con tres usuarios y una fracción de demanda de 0.4

(40 %), el área mínima recomendada para un sistema de captación de agua de lluvia es de 38 m^2 (obtenida con la Ecuación (7)), a la cual corresponde un volumen de 22 m^3 . Para un determinado número de usuarios y fracción de demanda, existe un valor mínimo, a partir de cual se tiene un volumen óptimo casi constante (pendiente cercana a cero). Por ejemplo, con un volumen del tanque de 13.5 m^3 , el área de captación requerida es de 55 m^2 ; a partir de esta superficie el volumen varía poco y se mantiene cercano a 13 m^3 (Figura 6a), por lo cual se considera que es el volumen mínimo (área máxima) recomendado para tres usuarios y una fracción de demanda de 0.4; entonces, si la superficie disponible es mayor a 55 m^2 , el volumen mínimo recomendado es de 13 m^3 .

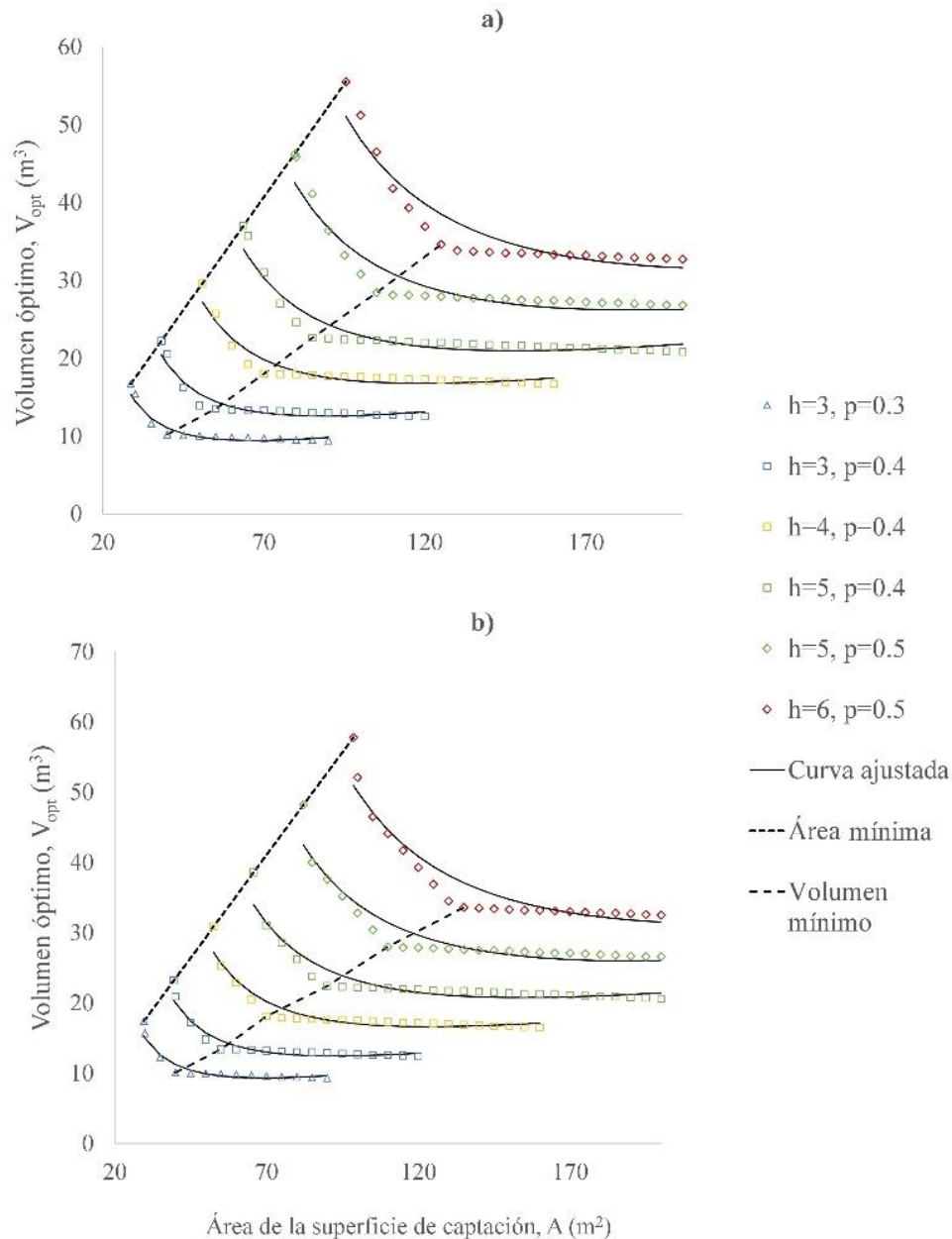


Figura 6. Volúmenes óptimos de tanques para las estaciones de: a) Huajuapán de León (20275) y b) Magdalena Tetatepec (20207); en

función de área de captación (A), número de usuarios (h) y fracción de demanda (p) obtenidos a partir del modelo de balance de agua.

Regionalización de la cuenca

Los resultados de los análisis de regresión exponencial realizados a cada estación se describen en la Tabla 2; en todos los casos, los valores del coeficiente de determinación son mayores a 0.98, lo cual indica que las funciones se ajustaron bien a los datos. Para la estación de Huajauapan de León y Magdalena Tetatepec, la representación gráfica de los volúmenes óptimos estimados a partir de las funciones exponenciales corresponde a las líneas continuas de las Figuras 6a y 6b, respectivamente. Se aprecia que las diferencias entre las curvas ajustadas y los puntos son mayores cuando el número de usuarios es igual o mayor a 5 y cerca de las líneas de áreas máximas, no obstante las curvas están por arriba de los datos, por lo cual el volumen estimado es ligeramente superior al volumen requerido.

Tabla 2. Coeficiente de determinación R^2 , y parámetros a y b de la función exponencial de la forma $\frac{V_{opt}}{A} = ae^{b\frac{hp}{A}}$.

Estación	A	B	Coeficiente de determinación R^2	Error típico de estimación
20003	0.051	110.502	0.982	2.213
20108	0.065	63.751	0.991	0.728
20125	0.054	73.194	0.992	0.735
20133	0.055	66.472	0.981	0.970
20137	0.040	95.508	0.999	0.264
20163	0.049	74.594	0.988	0.817
20190	0.033	105.129	0.984	2.888
20207	0.050	77.047	0.990	1.295
20275	0.052	74.152	0.991	1.213
20305	0.045	129.799	0.985	2.693
20306	0.056	122.382	0.992	2.980
21175	0.049	124.989	0.990	1.293

Con la configuración espacial del parámetro b se pudieron identificar dos regiones con similitudes en las formas de las curvas exponenciales ajustadas (Figura 7a). La primera región, denominada Región Sur, abarca las estaciones: 20108 (San Francisco Yosocuta), 20125 (Santa Catarina), 20133 (Santigao Chilixtlahuaca), 20163 (Tezoatlán de Segura y Luna),

20207 (Magdalena Tetatepec) y 20275 (Huajuapán de León). La Región Norte comprende a las estaciones: 20003 (Astatla), 20190 (Zapotitlán Palmas), 20305 (San Juan Nochixtlán), 20306 (San Lorenzo Vista Hermosa) y 21175 (San Ana Tepejillo). La relación entre este parámetro y la lluvia media es inversa, ya que al sur, donde llueve más, los valores de b son más bajos; mientras que al norte de la cuenca, donde llueve menos, los valores del parámetro son más elevados. Por otro lado, existe una relación directa entre el número máximo de días sin lluvia y el parámetro b . En la Figura 7b se puede observar que al suroeste de la cuenca, donde se tienen menores números de días sin lluvia, los valores de b son inferiores a 85. En la región norte se tienen hasta 338 días sin lluvia en las zonas donde el valor de b supera el valor de 120. Este fuerte efecto del periodo seco en el tamaño del tanque se ha confirmado por otros investigadores, entre los que están Palla *et al.* (2012), y Souza y Ghisi (2012). Lo anterior indica que, en la forma de la curva ajustada, influyen tanto la lluvia media anual como el número de días sin lluvia; no obstante, de estos dos, solo se incluyó a la lluvia media en la obtención de los modelos regionales para la estimación del volumen óptimo, con el fin de reducir el número de variables involucradas.



Figura 7. Variación espacial de a) parámetro b ; b) lluvia media anual (1980-2000), y c) número máximo anual de días sin lluvia (1980-2000). La línea discontinua representa el límite entre las regiones con formas similares de curvas exponenciales ajustadas.

Modelos regionales para la estimación del volumen de tanques

En las ecuaciones (10) y (11) se muestran los modelos obtenidos para las regiones sur y norte, respectivamente. Para ambos casos, el coeficiente de determinación (R^2) obtenido es cercano a 1 (Figura 8), lo cual indica que las curvas ajustadas representan adecuadamente la variabilidad de los datos. La estimación del volumen activo óptimo está en función del número de usuarios (h), de la fracción de demanda (p), del área de captación disponible (A) y de la lluvia media anual ($\bar{P}_e$).

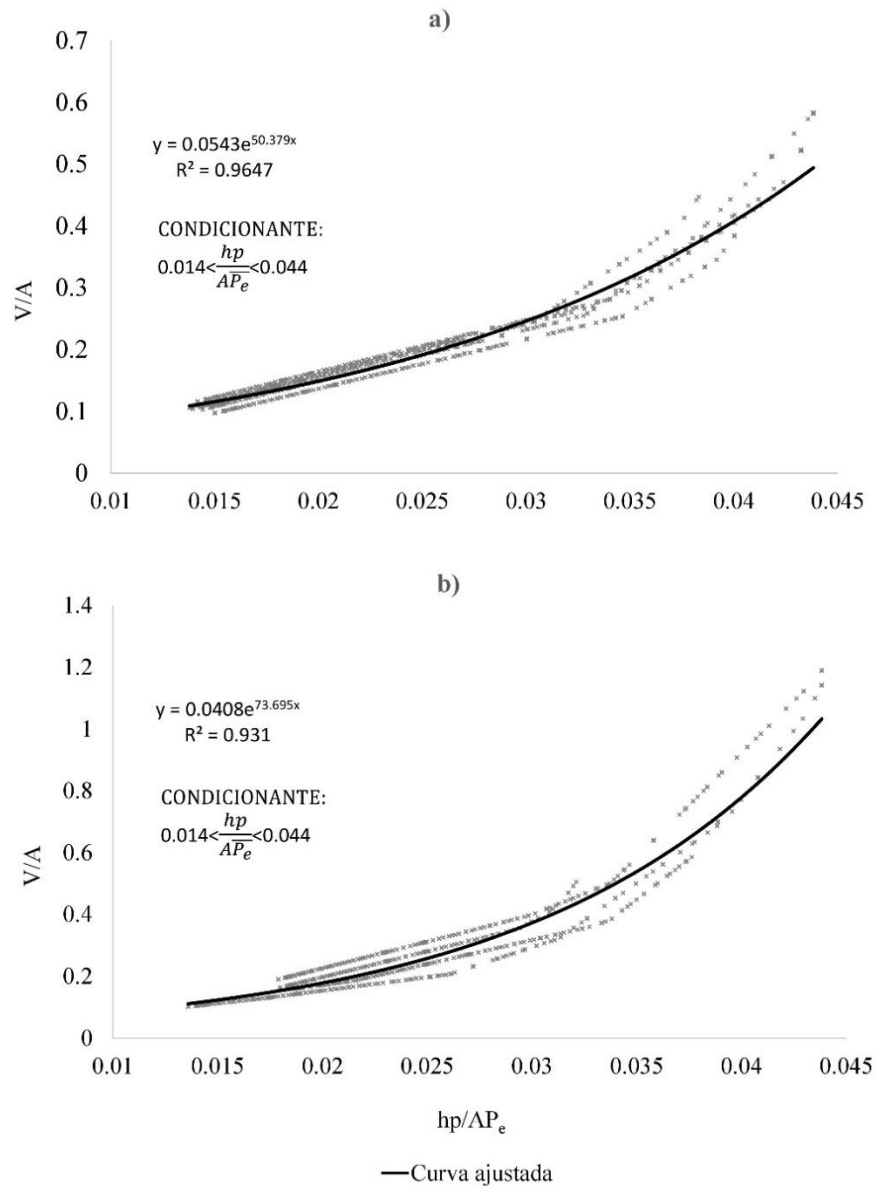


Figura 8. Regresion exponencial realizada a los datos de las regiones identificadas en la CARM: a) región sur, b) región norte.

La validación de estos modelos se hizo con los datos de las estaciones 20003 y 20133, que no fueron incluidas en los análisis mostrados en la Figura 8. Los datos correspondientes al volumen óptimo se distribuyen de forma similar a la curva de datos estimados con los modelos regionales (Figura 9); además, los errores típicos de ajuste fueron relativamente bajos: 0.98 para la estación 20003 y 3.4 para la estación 20133, por lo cual se considera que los modelos son adecuados:

$$\frac{V_{opt}}{A} = 0.0543e^{50.379 \frac{hp}{AP_e}}, \quad (10)$$

$$\frac{V_{opt}}{A} = 0.0408e^{73.695 \frac{hp}{AP_e}}, \quad (11)$$

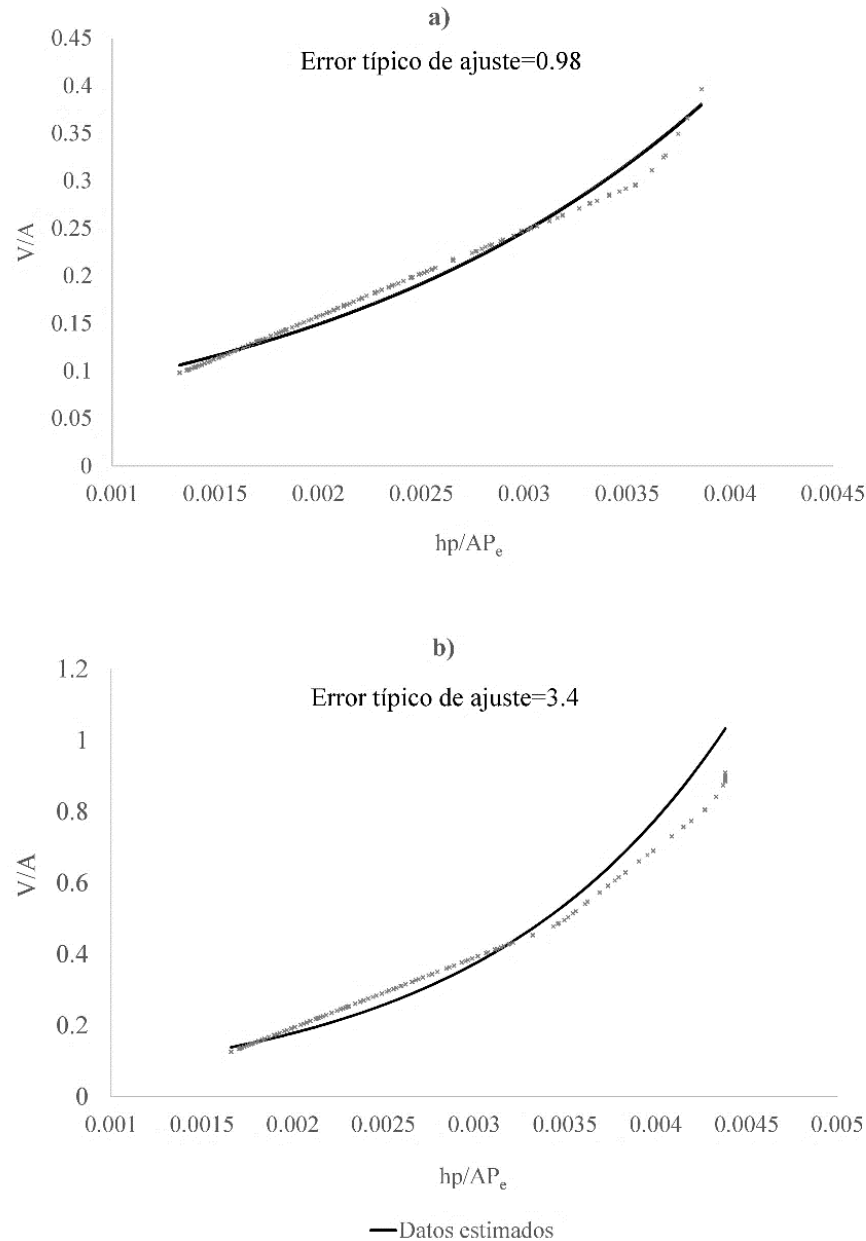


Figura 9. Comparación de los datos obtenidos de las simulaciones contra los datos estimados con los modelos regionales: a) estación

20133 (Santigao Chilixtlahuaca) y b) estación 20003 (Astatla).

Los modelos regionales se aplicaron para determinar el volumen activo óptimo de dos tanques en las localidades El Zapote, Asunción Cuyoteji y San Francisco Yosocuta, donde la lluvia media anual es 645, 616 y 715 mm, respectivamente. Cuyotepeji se ubica al norte de la cuenca; mientras que El Zapote se ubica al centro-sur y San Francisco Yosocuta al sur. Se consideró que los tanques en los tres casos serán utilizados por una familia de cuatro integrantes, que cuenta con un techo de 120 m² y que podrá disponer de 20 litros de agua de lluvia por persona al día para uso doméstico. Para Asunción Cuyotepeji, localizada al norte de la cuenca, la capacidad obtenida del tanque es de 24.2 m³. Para El Zapote y San Francisco Yosocuta se estimó un volumen de 18.5 y 16.7 m³, respectivamente (Tabla 3). Estos resultados confirman que en localidades ubicadas al norte de la cuenca, donde llueve menos, las capacidades de los tanques serán mayores en comparación de las localidades ubicadas al sur.

Tabla 3. Volumen óptimo estimado de dos tanques para las localidades El Zapote, San Francisco Yosocuta y Asunción Cuyotepeji.

Localidad	Variable	Valor
	Número de usuarios, <i>h</i>	4
	Fracción de demanda, <i>p</i>	0.4

	Area de captación disponible (m²), A	120
	Suministro diario (l/persona)	20
El Zapote (región sur)	Lluvia media anual (m), $\bar{P}_e$	0.645
	$hp/A\bar{P}_e$	0.021
	$\frac{V_{opt}}{A} = 0.0543 e^{50.379 \frac{hp}{A\bar{P}_e}}$	0.154
	V_{opt} (m ³)	18.5
San Francisco Yosocuta (región sur)	Lluvia media anual (m), $\bar{P}_e$	0.715
	$hp/A\bar{P}_e$	0.019
	$\frac{V_{opt}}{A} = 0.0543 e^{50.379 \frac{hp}{A\bar{P}_e}}$	0.139
	V_{opt} (m ³)	16.7
Asunción Cuyotepeji (región norte)	Lluvia media anual (m), $\bar{P}_e$	0.616
	$hp/A\bar{P}_e$	0.022
	$\frac{V_{opt}}{A} = 0.0408 e^{73.695 \frac{hp}{A\bar{P}_e}}$	0.201
	V_{opt} (m ³)	24.2

Conclusiones

Los resultados obtenidos han permitido establecer que los volúmenes de los tanques para almacenar agua de lluvia serán mayores en localidades ubicadas al norte de la cuenca donde llueve menos; mientras que hacia el suroeste, donde la acumulación de lluvia anual es mayor, se requieren tanques de menor capacidad. Con un número de usuarios igual a cuatro, las capacidades de los tanques podrían ser mayores a 25 m³ para cubrir 40 % de la demanda en las zonas del norte de la cuenca. Sin embargo, en zonas del centro y sur, las capacidades oscilan entre 16 y 20 m³. Por otro lado, la variabilidad temporal y espacial de la lluvia condiciona el dimensionamiento de los tanques, por lo cual está claro que las características de un sistema de captación de agua de lluvia serán distintas para cada localidad y hogar, y no es posible estandarizarlas.

Las ecuaciones regionales obtenidas permiten cuantificar el volumen óptimo de los tanques a partir del número de usuarios, de la fracción de demanda, del área de captación y de la lluvia media anual. De acuerdo con las características de una vivienda en particular, se puede variar el porcentaje de la demanda que se desea cubrir para obtener de manera práctica el volumen adecuado para un sistema de captación de agua de lluvia en cualquier sitio de la cuenca.

Referencias

Abdulla, F. (2019). Rainwater harvesting in Jordan: Potential water saving, optimal tank sizing and economic analysis. *Urban Water*



Journal, 1-11. DOI: 10.1080/1573062X.2019.1648530

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

Caballero, A. T. (2006). *Captación de agua de lluvia y almacenamiento en tanques de ferrocemento, Manual Técnico*. México, DF, México: Instituto Politécnico Nacional.

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

Carrasco, J. (ed.). (2016). *Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias (Boletín INIA No. 321)*. Rengo, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2011). *Modificación al Decreto de Veda en la Cuenca del Río Balsas*. México, DF, México: Comisión Nacional del Agua, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2010). *Estadísticas del agua en la cuenca del río Balsas*. México, DF, México: Comisión Nacional del Agua, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Eroksuz, E., & Rahman, A. (2010). Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities. *Resources*,

Conservation and Recycling, 54(12), 1449-1452. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.06.010

Fewkes, A., & Butler, D. (2000). Simulating the performance of rainwater collection and reuse systems using behavioral models. *Building Services Engineering Research and Technology*, 21(2), 99-106. DOI: 10.1177/014362440002100204

Fonseca, C. R., Hidalgo, V., Díaz-Delgado, C., Vilchis-Francés, A. Y., & Gallego, I. (2017). Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns. *Journal of Cleaner Production*, 145, 323-335. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.057

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., & Ferreira, D. F. (2007). Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. *Building and Environment*, 42(7), 2512-2522. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.07.019

Guo, Y., & Baetz, B. W. (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)

Howard, G., Bartram, J., Water, S., & World Health Organization. (2003). *Domestic water quantity, service level and health* (No.

- WHO/SDE/WSH/03.02). Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- Imteaz, M. A., Shanableh, A., Rahman, A., & Ahsan, A. (2011). Optimisation of rainwatertank 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
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). *Principales resultados Encuesta Intercensal 2015, Oaxaca*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <http://www.migrantes.oaxaca.gob.mx/wp-content/uploads/2016/02/ENCUESTA-INTERCENSAL-2015.pdf>
- Khastagir, A., & Jayasuriya, N. (2010). Optimal sizing of rainwater tanks for domestic water conservation. *Journal of Hydrology*, 381(3-4), 181-188. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.11.040
- Kim, H., Han, M., & Lee, J. Y. (2012). The application of an analytical probabilistic model for estimating the rainfall-runoff reductions achieved using a rainwater harvesting system. *Science of the Total Environment*, 424, 213-218. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.02.021

- Limaylla, A. Q. (2008). Captación de agua de lluvia para la agricultura familiar, una experiencia en comunidades rurales de Tlaxcala. *Boletín del Archivo Histórico del Agua*, (40), 82-91. Recuperado de <https://biblat.unam.mx/hevila/Boletindelarchivohistoricodelagua/2008/vol13/noesp/9.pdf>.
- Londra, P. A., Theocharis, A. T., Baltas, E., & Tsihrintzis, V. A. (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. DOI: 10.1007/s11269-015-1064-1
- Mamani, G. J. (2015). *Construcción de cisterna de placas prefabricadas para almacenamiento de agua de lluvia*. La Paz, Bolivia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Ocampo-Fletes, I. (2020). Innovación social y aportaciones al derecho humano al agua en hogares de la mixteca poblana/Social innovation and contributions to the water human right in the Mixteca Poblana households. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(2), 56-104. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-02>
- Palla, A., Gnecco, I., Lanza, L. G., & La Barbera, P. (2012). Performance analysis of domestic rainwater harvesting systems under various European climate zones. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 71-80. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.02.006

- Sample, D. J., & 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
- Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, New York, USA* (pp. 517-524). DOI: 10.1145/800186.810616
- Souza, E. L., & Ghisi, E. (2012). Potable watersavings by using rainwater for non-potable uses in houses. *Water*, 4(3), 607-628. DOI: 10.3390/w4030607
- Tsihrintzis, V., & Baltas, E. (2013). Sizing of rainwater harvesting tank for in-house water supply. In: *13th International Conference on Environmental Science and Technology* (pp. 5-7), Athens, Greece.
- Vieritz, A., Neumann, L., & Cook, S. (2015). Rainwater tank modelling. In: Sharma, A., Begbie, D., & Gardner, T. *Rainwater Tank Systems for Urban Water Supply: Design, Yield, Energy, Health Risks, Economics and Social Perceptions* (pp. 19-46). London, UK: IWA Publishing.
- Villarreal, E. L., & Dixon, A. (2005). Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. *Building and Environment*, 40(9), 1174-1184. DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.10.018