

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**“LA CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA COMO UNA ALTERNATIVA DE
ABASTECIMIENTO EN EL ÁREA DEL ACUÍFERO SILAO-ROMITA,
GUANAJUATO”**

PRESENTA:

M.C. MARÍA LINA FUENTES GALVÁN

COMITÉ TUTELAR:

DIRECTOR: DR. HILARIO CHARCAS SALAZAR

CO-DIRECTORA: DRA. XITLALI VIRGINIA DELGADO GALVÁN

ASESOR: DR. JOSÉ LUIS FLORES FLORES

ASESOR: DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

San Luis Potosí, SLP., 31 de agosto de 2015.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“LA CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA COMO UNA ALTERNATIVA DE
ABASTECIMIENTO EN EL ÁREA DEL ACUÍFERO SILAO-ROMITA,
GUANAJUATO”

PRESENTA:

M.C. MARÍA LINA FUENTES GALVÁN

COMITÉ TUTELAR:

DIRECTOR: DR. HILARIO CHARCAS SALAZAR

Hilario Charcas Salazar

CO-DIRECTORA: DRA. XITLALI VIRGINIA DELGADO GALVÁN

Xitlali Virginia Delgado Galván

ASESOR: DR. JOSÉ LUIS FLORES FLORES

José Luis Flores Flores

ASESOR: DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

Antonio Cardona Benavides

SINODALES:

PRESIDENTE: DR. HILARIO CHARCAS SALAZAR

Hilario Charcas Salazar

SECRETARIO: DR. JOSÉ LUIS FLORES FLORES

José Luis Flores Flores

VOCAL: DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

Antonio Cardona Benavides

VOCAL: DR. LUIS ARMANDO BERNAL JÁCOME

Luis Armando Bernal Jácome

VOCAL: DR. DE JESÚS MORA RODRÍGUEZ

De Jesús Mora Rodríguez

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

PROYECTO REALIZADO EN:

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

Y

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

CON FINANCIAMIENTO DE:

PRODEP

A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:

**“DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA EL USO DE AGUA DE LLUVIA COMO ALTERNATIVA
DE ABASTECIMIENTO EN LA ZONA DEL ACUÍFERO SILAO-ROMITA, GUANAJUATO”**

RESPONSABLE: DRA. XITLALI VIRGINIA DELGADO GALVÁN

AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS

Becario No. 218758

**EL DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO A TRAVÉS
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**

Agradecimientos institucionales

Al CONACyT por las becas otorgadas durante la realización de mis estudios de doctorado.

Al CNRD, por la beca para la realización de la estancia académica realizada durante este proceso.

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por acogerme como alumna y permitir realizar mis estudios de Doctorado.

A la División de Ingenierías campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato por el apoyo y el espacio otorgado para la elaboración de esta tesis.

A los Programas Multidisciplinarios de Posgrado en Ciencias Ambientales y a la Agenda Ambiental por aceptarme como parte de su alumnado y por mostrarme la visión ambiental y multidisciplinar de la investigación. Y a su personal por el apoyo que en incontables ocasiones me han dado.

Al grupo Flulng de la Universitat Politècnica de València y al LAGEF de la Universidade Federal Fluminense por recibirme en estancia académica y brindarme un espacio en sus instalaciones.

Agradecimientos personales

A la Dra. Xitlali Delgado, por la confianza, por los momentos y experiencias compartidas. Por el apoyo y soporte brindado durante la realización de este proyecto y por las oportunidades que ha propiciado.

Al Dr. Hilario Charcas por la confianza y apoyo otorgado, por compartir su conocimiento, sus comentarios y consejos para la mejora y crecimiento de este trabajo.

Al Dr. José Luis Flores por su disposición durante la realización de esta tesis, por enriquecerla con sus aportes, por los comentarios y sugerencias dadas.

Al Dr. Antonio Cardona, por sus comentarios y consejos para la mejora de este proyecto.

Al Dr. José de Jesús Mora y al Dr. Luis Armando Bernal, por aceptar revisar este trabajo y por las aportaciones brindadas.

A los profesores de la Universidad de Guanajuato, a la M.I. Josefina Ortiz y al Dr. Francisco Martínez por el apoyo que me han ofrecido, en especial al Dr. Gilberto Carreño por su guía, consejos y el ánimo infundido durante estos años. Al Dr. Enrique Mendoza, por el apoyo recibido y a la Dra. Alma Serafín por los análisis químicos realizados.

Al Dr. Rafael Pérez por recibirme en estancia académica y al Dr. Manuel Herrera por aceptar compartir su conocimiento, trabajar en conjunto y recibirme en su casa. Al Dr. Flávio Rodrigues, al Dr. Raúl Vicens y al Dr. Guilherme Fernandez por recibirme en estancia académica y acogerme durante ese periodo.

A mis compañeros del PMPCA, en especial a Ángeles por abrazarme en un entorno nuevo y compartir las historias de este proceso, y mucho más por su amistad y por los momentos que gratamente hemos vivido. A Areli por recibirme y compartir reflexiones, visiones, té y más. A Angélica por sus palabras y abrazos en el momento indicado. A Lalo por su ayuda, apoyo y divertidas conversaciones. A Adrián y a Priscila por los momentos compartidos al inicio de este proceso.

Ale por la hermosa amistad y cariño que me brindas, y por todo el conocimiento y el apoyo que has compartido sin importar la ocasión. Por estar en los momentos indicados y alentarme, y por seguir unidas en un camino en el que aún nos falta por andar.

A Rosalba y al Inge José Luis, por los momentos compartidos a lo largo de estos años, por su compañía y por hacerme sentir su cariño y amistad. Además por su apoyo en la realización de este proyecto aportando su conocimiento y experiencia.

A José por los comentarios dirigidos a mejorar esta tesis. A Yuli por recibirme en su casa al inicio de este periodo. A los Tlaloques por su amistad.

A Felipe por compartir años de experiencias y grandes momentos, por seguir y luchar, por compartir lo bueno y lo malo, por lo alcanzado. Gracias por tu cariño y por acompañarme. Y gracias por contribuir para realizar este proyecto con tus conocimientos, ayuda y apoyo.

Dedicatoria

A mi familia, mi soporte y mi energía, por su amor y confianza, por la alegría que me suministran, por su apoyo en cada paso que doy y en cada decisión, por la seguridad que me brindan para seguir, y por iluminar mi vida. A mis padres por su cariño, comprensión y aliento, a mi hermano por su apoyo y cariño, a mi hermana por compartir altos y bajos, sostenerme y levantarme, por su atento oído y su paciencia.

A Felipe por acompañarme y apoyarme

A mi Tía Tita por ayudarme a alcanzar metas y sueños

**“LA CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA COMO UNA
ALTERNATIVA DE ABASTECIMIENTO EN EL ÁREA DEL
ACUÍFERO SILAO-ROMITA, GUANAJUATO”**

RESUMEN

La captación del agua de lluvia es una antigua práctica utilizada por diferentes culturas para obtener el suministro de agua necesario para usos domésticos y de riego. El origen del aprovechamiento de este recurso responde a diferentes razones, como el difícil acceso a otras fuentes de abastecimiento, la mala calidad del agua, escasez, entre otras. La captación del agua de lluvia brinda diferentes beneficios, tanto sociales, ambientales y económicos y recientemente ha sido considerada dentro del programa nacional hídrico como una estrategia para incrementar la cobertura de agua y mejorar las eficiencias de los sistemas de agua en los municipios.

El acuífero Silao-Romita, se localiza en el estado de Guanajuato, en el centro del país. En esta zona, el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento, su extracción ha prevalecido por más de 70 años generando impactos negativos, como el descenso en el nivel del acuífero, subsidencias, salinidad en el agua, entre otros. No obstante, la zona de estudio presenta un crecimiento demográfico debido al desarrollo agrícola e industrial, incrementando la presión sobre los recursos hídricos. Por tanto, es relevante generar las bases para el establecimiento de estrategias que contribuyan con el manejo del agua y proporcionar alternativas para cubrir con las necesidades de la población de acuerdo con sus características y con las del medio. Por tal motivo, se realiza un análisis de la precipitación que se presenta en la zona con el propósito de establecer la cantidad del agua de lluvia que ocurre con mayor probabilidad y que esto sea de utilidad para el aprovechamiento de este recurso y el diseño de sistemas de captación. De este análisis se obtiene que la distribución de la precipitación es marcadamente estacional, con una concentración trimestral, ocurriendo la mayor concentración de precipitación durante junio, julio y agosto, meses en los que llueve el 64% del total del año. Además de las características de la precipitación, para promover el uso del agua de lluvia, es importante considerar la disposición de la población a utilizarla y para qué propósito. Así pues, se presenta la disposición de la población hacia el uso del agua de lluvia, en las zonas urbanas de Guanajuato, Romita y Silao, evaluada a través de la aplicación directa de 504 cuestionarios a propietarios y usuarios de las viviendas de las localidades.

Finalmente, se establece el potencial de captación del agua de lluvia en estas zonas, considerando las características de la precipitación, de las viviendas, la aceptación de la población hacia su uso y las demandas de agua. Con la finalidad de generar fundamentos para impulsar la utilización de este recurso. Se obtiene un potencial alto para las tres zonas urbanas, durante los meses de junio a agosto, cuando la cantidad de lluvia puede abastecer un alto porcentaje del consumo de agua en las viviendas de las zonas. Los usos no potables (riego, lavado de auto, lavado de ropa y WC) son los mejores para destinar el aprovechamiento del agua de lluvia debido a la mayor aceptación de la población para usarla para tales fines y a la alta cobertura de consumo que se puede obtener facilitando así, el aprovechamiento de este recurso.

ABSTRACT

Rainwater harvesting is an ancient practice used for different cultures to obtain the water supply for domestic and irrigation uses. The origin of water harvesting responds to different reasons as the difficult access to another supply sources, the quality of water, scarcity, among other. The rainwater harvesting provides social, environmental and economic benefits. Recently this practice has been considered in the national water program as a strategy to increment the water supply coverage and improve the efficiency in the water supply systems of the municipalities.

The Silao-Romita aquifer is located in the state of Guanajuato. In this area, the groundwater is the main supply source. The groundwater extraction has prevailed for more than 70 years, causing negative impacts as the decrease in the water level of the aquifer, subsidence, water salinity, and others. However, the area of study experiment a demographic growth because of the agricultural and industrial development, increasing the pressure over the water resources. Hence, it is relevant generate the basis to establish the strategies that contribute with the water management and provides the alternatives to meet the population needs according their characteristics and taking into account the environment.

For this reason, an analysis of the precipitation in the area was developed, with the objective of establish the occurrence of rainfall and provide tools to taking advantage of this resource. Was obtained that the rainfall distribution is strongly seasonal, with a concentration of three months (June - August), when occurs the 64% of total year precipitation. The willingness to use rainwater was evaluated through the results obtained from 504 questionnaires directly applied to users and owners of dwellings in the urban areas of Guanajuato, Romita and Silao.

The rainwater harvesting potential of the studied areas was established taking into account the characteristics of precipitation and dwellings, the willingness to use rainwater of the population, and the water demands. Was obtained that the three localities have a high potential for taking advantage of rainwater during the months of June to August, when is possible to meet with a high percentage of water consumption. The non-potable uses (watering, car washing, laundry, and WC) are the best to direct the use of rainwater according the willingness to use of the population and considering the coverage that rainwater could provide.

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
ÍNDICE.....	9
ÍNDICE DE FIGURAS	12
ÍNDICE DE TABLAS	13
INTRODUCCIÓN GENERAL	14
REFERENCIAS.....	18
ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ACUÍFERO SILAO-ROMITA PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA	
RESUMEN.	20
ABSTRACT.....	20
INTRODUCCIÓN	21
<i>Captación de agua de lluvia.....</i>	21
<i>Área de estudio.....</i>	22
MATERIALES Y MÉTODOS	23
RESULTADOS	26
CONCLUSIONES	32
RECOMENDACIONES.....	33
REFERENCIAS.....	33
ROOFTOP RAINWATER HARVESTING ACCEPTANCE IN THREE LOCALITIES OF GUANAJUATO, CENTRAL MEXICO	
ABSTRACT	39
RESUMEN.....	39
RESUMO.....	40
INTRODUCTION	40
<i>Rainwater harvesting (RWH).....</i>	42
<i>Study area.....</i>	43
MATERIALS AND METHODS	44
RESULTS	45
<i>Identifying data</i>	45

<i>Water use from centralized supply</i>	46
<i>Centralized water quality</i>	46
<i>Willingness to use rainwater</i>	47
<i>Rainwater harvesting system (RWHS)</i>	48
<i>Water Storage</i>	49
<i>Rainwater harvesting potential (RWHP)</i>	50
DISCUSSION	52
CONCLUSIONS.....	53
<i>Acknowledgements</i>	54
REFERENCES	54
IDENTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA EN TRES LOCALIDADES DE GUANAJUATO	
RESUMEN.	63
ABSTRACT.....	63
INTRODUCCIÓN	64
<i>Captación del agua de lluvia</i>	64
<i>Área de estudio</i>	65
MATERIALES Y MÉTODOS	66
RESULTADOS	69
<i>Volumen medio mensual</i>	69
<i>Volumen máximo diario</i>	70
<i>Volumen medio diario</i>	72
<i>Potencial de cobertura del consumo de agua utilizando agua de lluvia</i>	73
CONCLUSIONES	76
RECOMENDACIONES.....	76
REFERENCIAS.....	77
DISCUSIÓN GENERAL	80
CONCLUSIONES GENERALES	83
ANEXOS	84
CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA EN EDIFICIOS DE LA UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO:	
POTENCIAL Y ACEPTACIÓN	85

POTENCIAL DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA COMO FUENTE DE ABASTECIMIENTO EN LA
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO, MÉXICO 92

ÍNDICE DE FIGURAS

ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ACUÍFERO SILO-ROMITA PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA

Figura 1. Ubicación de los puntos de estudio.....	22
Figura 2. Porcentaje de aportación de la precipitación máxima diaria a la precipitación anual.	28
Figura 3. Precipitación anual, máxima diaria y días con lluvia durante 1981-2010.	27
Figura 4. Porcentaje de aportación de la precipitación máxima diaria a la precipitación mensual.....	29
Figura 5. Índices de distribución de la precipitación <i>PCI</i> y <i>SI</i>	30
Figura 6. Precipitación media mensual según periodo de retorno.....	31
Figura 7. Precipitación máxima diaria según periodo de retorno.....	32

ROOFTOP RAINWATER HARVESTING ACCEPTANCE IN THREE LOCALITIES OF GUANAJUATO, CENTRAL MEXICO

Figure 1. Percentage of respondents willing to utilize rainwater per use.....	58
Figure 2. Actors that according to the respondents should participate in the investment of RWHS.....	59

IDENTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA EN TRES LOCALIDADES DE GUANAJUATO

Figura 1. Ubicación de las zonas de estudio.....	66
Figura 2. Probabilidad de ocurrencia de días con lluvia.....	67
Figura 3. Porcentaje de aporte de la precipitación máxima diaria en la precipitación mensual.	68
Figura 4. Volumen medio mensual de agua de lluvia que es posible captar para cada zona de estudio.....	70
Figura 5. Volumen máximo para las zonas de estudio.....	71
Figura 6. Volumen máximo para diferentes áreas techos.....	71
Figura 7. Precipitación media diaria, precipitación media mensual y días con lluvia.	72
Figura 8. Volumen medio diario para las zonas de estudio.....	72
Figura 9. Porcentaje de consumo que se puede cubrir con agua de lluvia.	74

ÍNDICE DE TABLAS

ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ACUÍFERO SILO-ROMITA PARA EL APROVECHAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA

Tabla 1. Estaciones climatológicas utilizadas.	26
---	----

ROOFTOP RAINWATER HARVESTING ACCEPTANCE IN THREE LOCALITIES OF GUANAJUATO, CENTRAL MEXICO

Table I. Components of the section 2 to 5 of the applied questionnaire	60
--	----

Table II. Calculation of daily water per capita consumption based on payment to centralized water distributor.....	61
--	----

Table III. Potential of rainwater use in three cities of guanajuato state	62
---	----

IDENTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA EN TRES LOCALIDADES DE GUANAJUATO

Tabla 1. Características de las localidades de estudio.....	65
---	----

Tabla 2. Aceptación hacia el agua de lluvia según su uso.....	67
---	----

Tabla 3. Área de techos.	69
-------------------------------	----

Tabla 4. Consumos de agua por localidad.....	73
--	----

Tabla 5. Días en los que se puede cubrir la demanda de agua según su uso con la precipitación media diaria.	75
--	----

INTRODUCCIÓN GENERAL

El estado de Guanajuato se localiza en el centro de México y está conformado por 46 municipios. En este estado se ha presentado un incremento en el uso del agua subterránea, de tal forma que el 64.2% del agua utilizada proviene de los acuíferos y se destina principalmente para el uso agrícola, hasta el punto de ser el estado que utiliza la mayor cantidad de energía eléctrica y de agua subterránea para tal fin (Scott & Shah, 2004).

En cuanto a las demandas de agua municipal e industrial en México, el agua subterránea las cubre de forma creciente (Scott, Silva-Ochoa, Florencio-Cruz & Wester, 2001). Particularmente en el estado de Guanajuato el suministro para abastecimiento público e industrial proviene en más del 80% de fuentes subterráneas (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2014a).

Según su disposición geográfica, en el estado de Guanajuato se localizan 20 acuíferos, de ellos 14 se encuentran sobreexplotados (CONAGUA, 2014b). Como es el caso del acuífero Silao-Romita, ubicado en el centro del estado, con una superficie de 1881 km² (CONAGUA, 2011), el cual abastece a las zonas urbanas de los municipios de Guanajuato, Romita y Silao. Esta zona, pertenece a una de las regiones hidrológicas más activas para la dinámica socioeconómica del país (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2003), lo cual propicia el crecimiento demográfico y el incremento en las demandas de agua.

La extracción del agua subterránea se ha practicado desde hace más de 70 años en la zona, principalmente para el abastecimiento de las actividades agrícolas. De modo, que en el valle agrícola y la planicie de Silao-Romita hay distribuidos cerca de 1600 pozos (Cortés, Durazo & Kralisch, 2007). Tan sólo, en el municipio de Silao se encuentran 587 pozos con profundidades mayores a los 100 m, y un volumen de extracción concesionado de más de 142 864 027 m³/año, sin embargo se estima que para pozos agrícolas la extracción es de 250 Mm³/año (CEASG, 1998; Scott & Shah, 2004, Cortés, Durazo & Kralisch, 2007).

A principios de 1970, el desarrollo en la zona, había impuesto un estrés considerable en los recursos de agua subterránea, manifestado en la aceleración de perforación de pozos (Foster, Garduño & Kemper, 2004), aunque la zona se encuentre en condiciones de veda por esta extracción desde años anteriores. La historia del vaciado de los acuíferos del estado de Guanajuato es muy larga y los niveles del agua subterránea todavía están abatiéndose a razón de 2 a 3 m/año (Cortés, Durazo & Kralisch, 2007; Foster & Garduño, 2009). Esto ha producido efectos negativos, como costos ascendentes de operación y reposición de las fuentes de abastecimiento de agua urbanas y rurales, deterioro de la calidad del agua y/o su salinización, y asentamientos del terreno con los consecuentes daños a la infraestructura pública y privada (Foster & Garduño, 2009).

Además, la extracción intensa del agua subterránea puede resultar en cambios en la hidrodinámica de los sistemas acuíferos, incluyendo direcciones y velocidades de flujo y en los patrones de recarga y descarga. Efectos perceptibles incluyen la disminución de rendimiento, cambios en la vegetación, o la desaparición de manantiales y arroyos. Para el caso del acuífero Silao-Romita, la tendencia del flujo de agua subterránea ha sido invertida por profundos conos de extracción afectando el área de Silao (Cortés, Durazo & Kralisch, 2007).

Estrategias reguladoras y participativas para controlar la expansión de la extracción del agua subterránea han sido adoptadas en el estado con poco éxito (Scott & Shah, 2004). Recientemente se han originado diferentes iniciativas para reducir los impactos al medio producidos por la extracción tanto subterránea como superficial de agua, se han preparado diagnósticos por zonas, y de ellos se derivan diferentes propuestas de abastecimiento. La Comisión Estatal del Agua, en un intento por realizar un manejo integral del agua, ha generado el proyecto de Sistema Integral de Manejo Sustentable de Acuíferos (SIMSA) donde se considera la captación del agua de lluvia para el abastecimiento de comunidades e industrias, el Centro Atmosférico de la Universidad de Guanajuato en el Diagnóstico Climatológico y Prospectiva sobre Vulnerabilidad al Cambio Climático en el Estado de Guanajuato, ha recurrido también a este recurso como estrategia para brindar abastecimiento y atenuar efectos en el ambiente por la extracción del líquido de otras fuentes. En el Programa Nacional Hídrico se ha considerado a la captación del agua de lluvia como una estrategia para incrementar la cobertura de los servicios de agua potable y mejorar las eficiencias de los servicios de agua en los municipios (CONAGUA, 2014c).

La práctica del aprovechamiento del agua de lluvia ha permanecido a lo largo del tiempo, sin embargo, en nuestro país no ha sido cultivada, esta práctica fue empleada por culturas ancestrales como los mayas y aztecas. Retomar esta forma de aprovechamiento, que propicia el conocimiento y entendimiento del ambiente, del ciclo hidrológico y las características sociales y fisiográficas de cada zona, representa una serie de alcances que pueden derivar en la preservación del medio, la generación de estrategias para el manejo de los recursos, la formación de organismos gestores de los mismos, incentivos para revalorar la condición del agua dentro de la sociedad y el medio, la generación y adaptación a las condiciones locales de tecnologías que sean la herramienta para llegar al recurso hídrico de forma sostenible, así como, la transferencia de conocimientos dentro y fuera de la región.

El aprovechamiento del agua de lluvia es una alternativa que puede reducir la presión que existe en la zona por el recurso hídrico y la cual ha mermado considerablemente la condición del acuífero. Fomentar la difusión de información sobre el manejo del agua es indispensable para conseguir un cambio en las tendencias que en la actualidad rigen el aprovechamiento del agua para abastecimiento de los sectores doméstico, industrial y agrícola. El uso planificado de la lluvia debería garantizar la soberanía alimentaria, la recarga de acuíferos, facilitar la reducción de desastres y la supervivencia de ecosistemas estratégicos. Tiene además una dimensión cultural que contribuye a preservar valores y símbolos locales y afianza la responsabilidad en la gestión del recurso (Pacheco, 2008).

Considerar al agua de lluvia como una fuente de abastecimiento depende de las estrategias de difusión de experiencias positivas y funcionales, generar y extender la información sobre la calidad y cantidad que puede ser obtenida con el agua de lluvia, considerar los costos iniciales que un sistema de captación representa, y aceptar los beneficios y responsabilidades de la captación *in situ*.

Los sistemas de captación del agua de lluvia tienen el beneficio de ser operados por la comunidad y ser a la vez los beneficiarios. Llevan el manejo de su abastecimiento, lo que crea una incorporación y aceptación al sistema, además de que generan conocimiento en la comunidad y mecanismos que facilitan la incorporación de estos sistemas en comunidades allegadas con condiciones similares.

Para llegar a un manejo adecuado del agua se deben considerar las características particulares de cada zona, aunado a que las políticas, reglamentos y leyes deben ser apropiados y coherentes al medio donde se apliquen.

Así pues, considerando el incremento en la demanda por los recursos hídricos y la subsecuente presión ejercida sobre estos, la búsqueda de fuentes alternativas es una tarea de importancia para abastecer las necesidades de agua en diferentes sectores. Recursos como el agua reciclada, el agua de lluvia y la desalinización son trascendentales para ampliar la oferta hídrica en diferentes zonas. Así, con el propósito de implementar un nuevo esquema de abastecimiento, es de interés primero consultar la opinión que la comunidad presenta hacia estos recursos, lo cual dictaminará si es factible la introducción de una nueva alternativa de abastecimiento, y la mejor forma para implementarla. Por ello, la percepción y la aceptación de la población hacia alternativas de abastecimiento han sido estudiadas en décadas recientes y relacionadas con otros aspectos, como las características de la población, edad, nivel académico, factores socioeconómicos, políticas locales, etc. Lo cual promueve la información para generar las herramientas necesarias para adaptar nuevos esquemas de abastecimiento a comunidades específicas.

Las actitudes hacia fuentes alternativas de abastecimiento, de acuerdo a estudios previos sobre las barreras y aceptación a su uso, dependen en gran medida de las características de las comunidades donde se intenta introducirlos. En India, la población de Dehradun mostraba disposición a adoptar sistemas de captación del agua de lluvia en sus viviendas, pero considerando los costos de instalación, los planes de apoyo gubernamentales para promover la adopción de estos sistemas resultaban de importancia (Barthwal, Chandola-Barthwal, Goyal, Nirmani & Awasthi, 2013). En Barcelona en la municipalidad de Sant Cugat del Vallès, Domènech y Saurí (2010) encontraron cuatro factores determinantes de aceptación hacia el agua gris: los riesgos percibidos para la salud humana, los costos percibidos, los regímenes de operación y el riesgo ambiental. Domènech y Saurí (2011) encontraron también que subsidios parciales aparecían como un medio efectivo para fomentar la instalación de sistemas de captación en edificios construidos, como también el reconocimiento de los ciudadanos hacia el valor del agua de lluvia y las regulaciones locales aparecían como mecanismos efectivos para promover el uso del agua de lluvia, especialmente en edificios nuevos. Ward, Butler y Memon, (2008) llevó a cabo un estudio en Reino Unido encontrando que el 100% de las personas que contestaron su cuestionario estaban dispuestos a considerar el uso de sistemas de captación del agua de lluvia en los techos de sus viviendas, e identificó que a los subsidios como un factor de importancia para motivar la instalación de sistemas de captación. Los factores comunes de interés que determinan la decisión de adoptar o no un sistema de captación del agua de lluvia de acuerdo a un estudio llevado a cabo en Queensland, Australia, fueron el costo y economía, el ambiente, la independencia de la vivienda, las ventajas del agua de lluvia como una fuente de abastecimiento, y la compatibilidad física de los sistemas de captación con las viviendas (White, 2010). En una comparativa entre dos cuestionarios aplicados a constructores de viviendas en el Reino Unido, Parsons, Goodhew, Fewkes y De Wilde (2010) encontraron las siguientes barreras como un determinante de la instalación de sistemas de captación: el pobre nivel técnico de conocimiento relacionado con los sistemas de captación, la escasez de un orientación imparcial relacionada con el diseño e instalación, la ausencia de legislación reguladora de sistemas de captación domésticos y como se mencionó en estudios previos, las presiones financieras y económicas.

Así pues, el estudio de la captación del agua de lluvia como una alternativa de abastecimiento en el área del acuífero Silao-Romita, Guanajuato, se aborda en forma de tres artículos, siguiendo el formato definido por la revista donde se envió o se aceptó para su publicación. El primer artículo consiste en un análisis de la precipitación en el área del acuífero Silao-Romita, encaminado a la determinación de las características con que la lluvia ocurre en la zona para facilitar el aprovechamiento de este recurso.

El segundo artículo tiene como propósito determinar las barreras que la población percibe con respecto al agua de lluvia, la aceptación y otras características de la población en las zonas urbanas de Guanajuato, Silao y Romita, para lograr lo anterior se evalúan los resultados de 504 encuestas aplicadas directamente a los propietarios y usuarios de las viviendas.

En el tercer artículo, con base en las preferencias de la población hacia el uso del agua de lluvia, las características de las viviendas considerando los techos como superficie de captación, la precipitación probable y la forma en que ocurre en el área de estudio se estima el potencial que la captación del agua de lluvia puede proporcionar para cubrir los consumos de agua a nivel doméstico en las zonas de interés.

Hipótesis

La captación del agua de lluvia en techos en zonas con limitaciones hídricas puede contribuir a la gestión del agua, a reducir las afectaciones en las fuentes de abastecimiento tradicionales y puede ser considerada como una fuente de abastecimiento tomando en cuenta las condiciones ambientales y sociales de la zona.

Objetivo

Establecer las bases para la formulación de estrategias que permitan propiciar la gestión del agua a través del uso del agua de lluvia como una alternativa de abastecimiento y promover el manejo sostenible del agua en el área del acuífero Silao-Romita, de acuerdo a las características de la zona y atendiendo a las demandas y necesidades de la población.

Referencias

- Barthwal, S., Chandola-Barthwal, S., Goyal, H., Nirmani, B. & Awasthi, B. (2013). Socio-economic acceptance of rooftop rainwater harvesting – A case study, *Urban Water Journal*.
- CEASG, (1998). Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de Silao Romita, Gto. Report no. CEAS-APA-GTO-97-025. Querétaro, México. Lesser.
- CONAGUA, (2011). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Silao-Romita (1110), estado de Guanajuato. México, D.F.
- CONAGUA, (2014a). Estadísticas del Agua en México Edición 2014. D.F., México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA, (2014b). Atlas del Agua en México 2014. D.F., México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA, (2014c). Programa Nacional Hídrico 2014-2018. D.F., México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Cortés, A., Durazo, J. & Kralisch, S. (2007). Rapid isotopic changes in groundwater, upper Rio Guanajuato catchment, Mexico. *Geofísica Internacional*, 46(1), pp. 77-85.
- DOF, (2003). Poder Ejecutivo Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales acuerdo por el que se dan a conocer las denominaciones y la ubicación geográfica de las diecinueve cuencas localizadas en la zona hidrológica denominada Río Lerma-Chapala, así como la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas que comprende dicha zona hidrológica. *Diario Oficial de la Federación*.
- Domènech, L. & Saurí, D. (2011). A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multifamily buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): social experience, drinking water savings and economic costs. *Journal of Cleaner Production*, 19:598-608.
- Domènech, L. & Saurí, D. (2010). Socio-technical transitions in water scarcity contexts: Public acceptance of greywater reuse technologies in the Metropolitan Area of Barcelona. *Resources, Conservation and Recycling*, 55:53–62.
- Foster, S., Garduño, H., & Kemper, K. (2004). The “COTAS”: Progress with stakeholder participation in groundwater management in Guanajuato-Mexico. *GW-MATE Case Profile*, 10. World Bank, Washington, DC.
- Foster, S. & Garduño, H. (2009). Gestión apropiada el recurso hídrico subterráneo en América Latina. Lecciones de experiencias internacionales. *Revista Aqua-LAC - Año 1 - 1*, 5-17.
- Pacheco, M. (2008). Avances en la Gestión Integral del Agua Lluvia (GIALL): Contribuciones al consumo sostenible del agua, el caso de “Lluviatl” en México. *Revista Internacional Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*. 3, 39-57.
- Parsons, D., Goodhew, S., Fewkes, A., & De Wilde, P. (2010). The perceived barriers to the inclusion of rainwater harvesting systems by UK house building companies. *Urban Water Journal*; 7:257-265.

Scott, C. A. & Shah T. (2004). Groundwater Overdraft Reduction through Agricultural Energy Policy: Insights from India and Mexico. *Water Resources Development*, 20(2), 149-164.

Scott, C. A., Silva-Ochoa, P., Florencio-Cruz, V. & Wester, P. (2001) Competition for water in the Lerma–Chapala basin, in: A. Hansen & M. van Afferden (Eds) *The Lerma–Chapala Watershed: Evaluation and Management*, pp. 291–323 (London: Kluwer Academic/Plenum). En: Scott & Shah, 2004.

Ward, S., Barr, S., Memon, F. & Butler, D. (2013). Rainwater harvesting in the UK: exploring water-user perceptions, *Urban Water Journal*, 10:2, 112-126. doi.org/10.1080/1573062X.2012.709256

Ward, S., Butler, D., & Memon, F. (2008). A pilot study into attitudes towards and perceptions of rainwater harvesting in the UK. BHS 10th National Hydrology Symposium, Exeter, 2008.

White, I. (2010). Rainwater harvesting: theorising and modelling issues that influence household adoption. *Q IWA Publishing 2010. Water Science & Technology—WST*; 62.2.

“Análisis de la precipitación en el acuífero Silao-Romita para el aprovechamiento del agua de lluvia”

*María Lina Fuentes-Galván (1), Xitlali Delgado-Galván (2), Josefina Ortiz-Medel (3),
Hilario Charcas Salazar (4), José Luis Flores Flores (5)*

(1), (4), (5) Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Manuel Nava 201, San Luis Potosí, 78210, México, (1) fugalina@gmail.com, (4) hilario@uaslp.mx, (5) joseluis.flores@uaslp.mx

(2), (3) Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías campus Guanajuato, Av. Juárez 77, Centro, Guanajuato, 36000. México, (2) xdelgado@ugto.mx, (3) jomedel@ugto.mx.

RESUMEN. La planificación y gestión de los sistemas de abastecimiento de agua depende en gran medida del estudio de la precipitación. Con el propósito de generar información de interés para el mejor aprovechamiento y diseño de sistemas de captación del agua de lluvia en la zona, se realizó un análisis de la lluvia registrada en las estaciones ubicadas en el área del acuífero Silao-Romita para un periodo de 30 años, que incluye la distribución estacional y el análisis probabilístico de la precipitación máxima diaria y media mensual. Durante el periodo de lluvias (mayo-octubre) se presenta más del 89% de la precipitación anual con una concentración trimestral. La precipitación anual varía de 236-1171 mm, con un promedio de 663 mm. Lluvias máximas diarias mayores a 13 mm ocurren al menos una vez cada temporada de lluvias y los meses con mayor probabilidad de ocurrencia de días lluviosos son julio y agosto.

ABSTRACT. The effective plan, design and management of water supply systems depends on the study of rainfall. With the objective of generate the information to reach the appropriate use and design of rainwater harvesting system for the study area, an analysis of the records of precipitation of the climatological stations located in the area of the Silao-Romita aquifer was developed. The study includes the seasonal distribution and a probabilistic analysis of daily maximum and monthly rainfall. The 89% of the annual precipitation occurs during the rainy season (May-October) with a concentration index of three months. The annual rainfalls have values of 236-1171 mm, an average of 663 mm. Daily maximum rainfall of at least 13 mm occurs every rainy season, and the months with higher probability of rainy days are July and August.

Palabras clave: lluvia, probabilidad, diseño, captación de agua de lluvia.

Key words: rainfall, probability, design, rainwater harvesting.

INTRODUCCIÓN

Las estadísticas de precipitación son necesarias para planificar y administrar efectivamente los recursos hídricos, así como para diseñar las obras de ingeniería hidráulica, como los abastecimientos urbanos, hidroeléctricas, sistemas de riego, etc. Por ello es importante contar con información de variables climáticas que sea de calidad y con duración suficiente (Yue & Hashino, 2014; Feng, Wen, & Li, 2015).

En la zona de estudio el crecimiento demográfico, y el desarrollo agrícola e industrial han incrementado la presión sobre los recursos hídricos. Por tanto, con el decremento en la disponibilidad de agua es relevante generar las bases para el establecimiento de estrategias que contribuyan con el manejo del agua y proporcionar alternativas para el abasto de las necesidades de la población de acuerdo con sus características y con las del medio en donde se encuentren. Una variable fundamental en el abasto de agua es la precipitación, y particularmente en los sistemas de captación de agua de lluvia representa un factor primordial para conocer el potencial de esta clase de aprovechamientos. Se realiza un análisis de la precipitación que se presenta en la zona de estudio con el propósito de establecer la cantidad de agua de lluvia que ocurre con mayor probabilidad en la zona y cuantificar el potencial de aprovechamiento de este recurso y que esto sea de utilidad para el diseño de los sistemas de captación.

Captación de agua de lluvia

La captación del agua de lluvia es una práctica antigua, utilizada por diferentes culturas para obtener el suministro de agua necesario para usos domésticos y de riego. El origen del aprovechamiento de este recurso responde a diferentes razones, como el difícil acceso a otras fuentes de abasto, la mala calidad del agua, escasez, entre otras. Al-Adamat, Diabat, y Shatnawi (2010) hacen referencia a vestigios arqueológicos de estructuras que evidencian el uso del agua de lluvia en Jordania hace 9000 años, otros restos arqueológicos prueban la importancia de la captación de la lluvia en Israel, Iraq, China, Roma, Sudáfrica y México (Mbilinyi, Tumbo, Mahoo, Senkondo, & Hatibu, 2005; Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2009; Mwenge & Taigbenu, 2011).

Esta práctica es ampliamente utilizada alrededor del mundo y la disposición a utilizarla incrementa inclusive en zonas en donde se cuenta con servicios de agua entubada (Khastagir & Jayasuriya, 2010).

La captación de agua de lluvia es el proceso mediante el cual se acopia la precipitación que escurre sobre una superficie para ser conducida hasta un almacenamiento antes de su uso. Los componentes de un sistema de captación dependen del uso al que esté destinado. Sin embargo, algunos dispositivos pueden mejorar la eficiencia del sistema y la calidad del agua captada, como lo son filtros, sedimentadores e interceptores de las primeras lluvias.

En la actualidad, este recurso es utilizado en algunos estados del país como Michoacán, San Luis Potosí, Morelos, Guanajuato, Querétaro, Zacatecas, entre otros. Los usos son diversos pero predominan el riego, el uso doméstico y en algunos casos, el agua cosechada después de ser tratada es utilizada para beber.

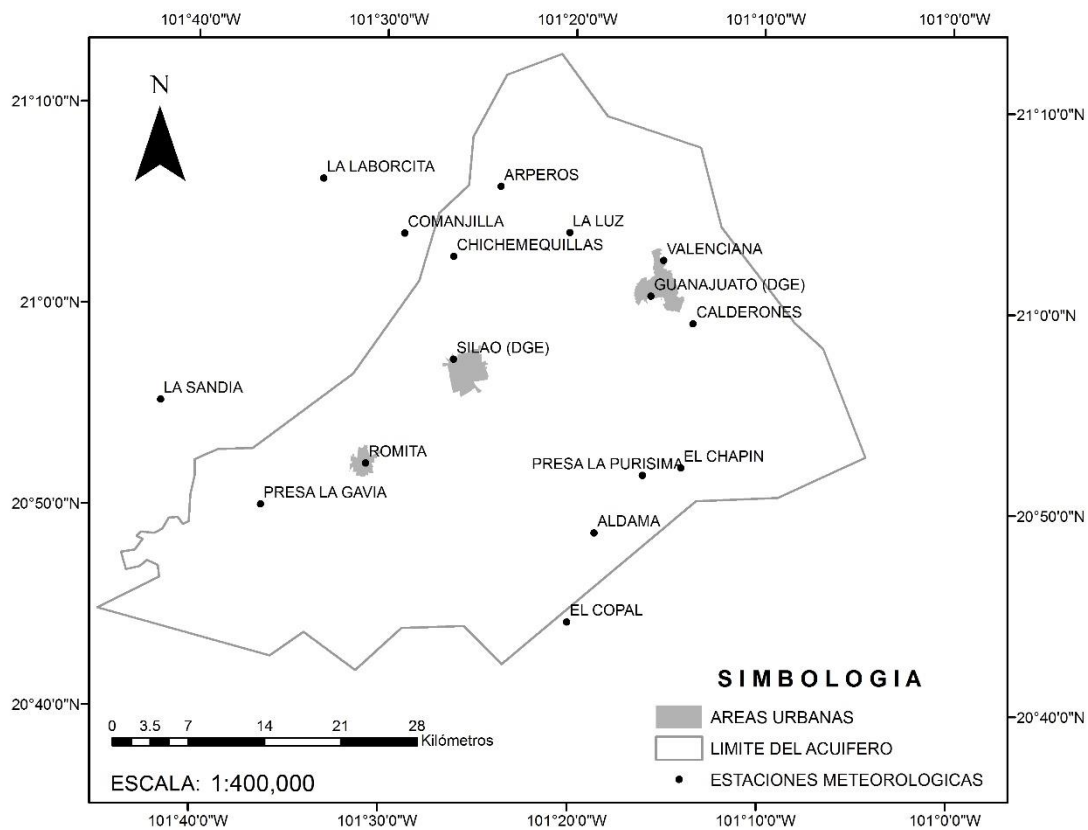
La captación del agua de lluvia brinda diferentes beneficios, tanto sociales, ambientales y económicos y recientemente ha sido considerada en el país como una estrategia para incrementar

la cobertura de los servicios de agua potable y mejorar las eficiencias de los servicios de agua en los municipios (CONAGUA, 2014).

Área de estudio

El estado de Guanajuato se localiza en el centro de México y está conformado por 46 municipios. En esta región el 64.2% del agua utilizada proviene de los acuíferos, el principal uso consuntivo es el agrícola. Sin embargo, el suministro para abastecimiento público e industrial proviene en más del 80% de fuentes subterráneas (CONAGUA, 2014a). Según su disposición geográfica, en el estado se localizan 20 acuíferos, de ellos 14 se encuentran sobreexplotados (CONAGUA, 2014b). Tal es el caso del acuífero Silao-Romita, zona de estudio del presente trabajo, donde desde la década de los 40's se hacía uso del agua subterránea a través de pozos someros y de baja capacidad de extracción. En la década de los 50's la demanda de agua incrementó debido al crecimiento poblacional y agrícola, en los 70's los efectos negativos de esta extracción se manifestaban, por lo cual se establecieron zonas de veda hasta que en los 80's no se permiten nuevos puntos de extracción para fines agrícolas (Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Guanajuato [CEASG], 1998; Foster, Garduño & Kemper, 2004).

Figura 1. Ubicación de los puntos de estudio.



Fuente: Fuentes-Galván M.L.

La localización geográfica del acuífero hace que las tres zonas urbanas de los municipios de Guanajuato, Romita y Silao se encuentren en su superficie. En la zona de Guanajuato se han observado históricamente diversos episodios de inundaciones y sequías. Silao es una zona con gran desarrollo industrial y por tanto poblacional, y Romita la menor demográficamente, es una zona agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

La confiabilidad en la cantidad de agua que es probable obtener en el área de estudio es de interés en la planificación y diseño de obras de captación del agua de lluvia. Esta cantidad de agua es importante para consideraciones como el diseño de cisternas y sistemas de conducción, también brinda una perspectiva confiable sobre el volumen potencial de captación en cada zona.

La variabilidad de la precipitación ha sido utilizada por diferentes autores (Khastagir & Jayasuriya, 2010; Mahmoud, Elagib, Gaese & Heinrich, 2014; Yue & Hashino, 2014) como una herramienta para asistir en el manejo apropiado de los recursos hídricos de acuerdo a las características locales. Sin embargo, debe considerarse la información disponible, la precipitación diaria total suele ser la información más detallada que se encuentra, y esto sólo para algunas regiones del mundo, siendo la mayoría de la información presentada como datos mensuales (Strangeways, 2007), otro aspecto a considerar es que para el diseño de sistemas de captación del agua de lluvia se prefiere el uso de series de datos amplias (Liaw & Chiang, 2014).

Para la zona de estudio se seleccionaron 16 estaciones (Figura 1) localizadas en el área de interés o en zonas cercanas con un radio máximo de 39 km de distancia entre ellas. La información disponible de precipitación diaria y mensual de estas estaciones se obtuvo de las bases de datos de la Comisión Nacional del Agua de México (Eric III y CLICOM) para el periodo de 1981-2010.

De acuerdo con la cantidad y calidad de la información, se seleccionaron aquellas estaciones que contaran con más del 80% de los datos dentro del periodo establecido. Y con no más del 20% de diferencia entre su precipitación media anual. De este proceso fueron eliminadas tres estaciones (Aldama, La Laborcita y La Luz) por la calidad de los datos que registran. Se distinguen siete estaciones con más del 80% de datos y una diferencia menor al 10% en su precipitación media anual (Calderones, La Sandía, Guanajuato, Valencia, El Chapín, Presa La Purísima, Comanjilla y Chichimequillas), considerándolas así, como estaciones principales. El nombre de las estaciones utilizadas, clave y porcentaje de datos de precipitación media mensual X_n , se presentan en la Tabla 1.

Los modelos ambientales típicamente requieren series de tiempo completas de información meteorológica, por ello, la reconstrucción de datos faltantes es un punto clave en la funcionalidad de estos modelos (Kim & Pachepsky, 2010). Así pues, la estimación confiable de datos faltantes es una importante tarea, que puede ser útil en diferentes áreas como la meteorología, hidrología y protección ambiental (Nkuna & Odiyo, 2011; Kashani & Dinpashoh, 2012). De tal forma, que el llenado de datos es necesario para permitir la realización de estudios viables, para el establecimiento de potencial y toma de decisiones, para evitar la incertidumbre y obtener rendimientos eficaces (Adeloye, 1996; Abebe, Solomatine & Venneker, 2000; Teegavarapu & Chandramoulia, 2005).

Los datos meteorológicos de las estaciones de estudio presentan ciertos periodos huecos o ausencia de datos. Con el propósito de construir series completas de los valores de precipitación mensual, las estaciones secundarias se emplearon como estaciones de soporte en el proceso de llenado de datos faltantes de las estaciones principales seleccionadas. Para ello se usaron el método del inverso de la distancia y el del radio normalizado, se emplearon los valores de las normales mensuales como valores de referencia.

El método ponderado del inverso de la distancia es uno de los métodos más utilizados para la estimación de los valores faltantes de precipitación, este método combina observaciones de un número de estaciones vecinas (World Meteorological Organization [WMO], 2011). De acuerdo, con Tabios y Salas (1985) las ponderaciones de la función de interpolación son una función de las distancias entre el punto de interés y los puntos muestreados. Los valores faltantes son obtenidos mediante la siguiente ecuación (1),

$$\theta_m = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i d_{mi}^{-k}}{\sum_{i=1}^n d_{mi}^{-k}} \quad (1)$$

donde θ_m es la observación en la estación base m ; n es el número de estaciones; θ_i es la observación en la estación i , d_{mi} es la distancia entre la localización i a la estación m , y k varía de 1.0 to 6.0, el valor más común es 2, el cual fue utilizado en el presente artículo (Teegavarapu, 2009; Teegavarapu, Tufail & Ormsbee, 2009). Xia, Fabian, Stohl & Winterhalter (1999) recomiendan el uso de estaciones localizadas dentro de un radio de influencia de 100 km a la estación base. Las estaciones usadas en el área de estudio se localizan dentro de un radio menor a 50 km.

El método del radio normalizado fue propuesto por Paulhus y Kohler (1952) para estimar datos faltantes y fue modificado por Young (1992). El método modificado usa una media ponderada para cada estación. El valor de ponderación está relacionado al coeficiente de correlación con la estación base, y el número de pares de datos en el cálculo del coeficiente de correlación (Ramos-Calzado, Gómez-Camacho, Pérez-Bernal & Pita-López, 2008).

Se recomienda la utilización de este método cuando la precipitación media anual de una o más de las estaciones adyacentes excede por más del 10% la precipitación media anual de la estación con la información faltante. Este método utiliza la normal de la precipitación anual de la estación bajo consideración y de las estaciones adyacentes sobre un periodo establecido de tiempo para pronosticar o estimar valores faltantes (Abebe, Solomatine & Venneker, 2000). La estimación del radio normalizado de un valor faltante está dada por la ecuación (2),

$$P_x = \frac{1}{n} \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \dots + \left(\frac{N_x}{N_n} \right) P_n \right] \quad (2)$$

donde P_x es la observación de la estación de estudio; n es el número de estaciones; P_i es la estación bajo observación i , N_x y N_i son los valores de precipitación media anual en la estación base y en la estación i , respectivamente.

Para conocer el error que existe de los valores estimados respecto de los registrados se hace uso del error mínimo cuadrático, que es la diferencia del valor registrado (g_i) y el valor estimado (h_i) elevados al cuadrado,

$$(g_i - h_i)^2 \quad (3)$$

donde $g_i, i = 1, \dots, n$ son los eventos registrados, $h_i, i = 1, \dots, n$ son las magnitudes calculadas de los eventos a partir de la distribución de probabilidad.

Así pues, tomando en consideración el error mínimo entre los valores llenados y las normales establecidas por la CONAGUA para el periodo de estudio, los datos faltantes de precipitación media mensual utilizados son los completados mediante el método del radio normalizado modificado, puesto que genera menores errores acumulados por estación que el método del inverso de la distancia.

Para establecer la distribución estacional/irregular de la precipitación se obtuvieron los índices de concentración de precipitación (PCI) y de estacionalidad (SI). Los valores del índice de concentración de precipitación desarrollado por Oliver (1980) fueron calculados mediante la ecuación 4. Este índice es utilizado para identificar el patrón de la precipitación en el área de estudio, indica la distribución de la precipitación y según la clasificación del autor, los valores más altos del índice representarán los casos donde la precipitación anual ocurre en un mes. Un PCI de menos de 10 sugiere una distribución uniforme y un valor de 11 a 20 denota una distribución estacional. Un índice por encima de 20 representa marcadas diferencias estacionales, con valores indicativos de concentraciones mensuales crecientes (Oliver, 1980).

$$PCI = 100 \sum_{N=1}^{12} \frac{X_n^2}{R^2} \quad (4)$$

El índice de estacionalidad (SI) fue desarrollado por Walsh y Lawler (1981) para establecer la estacionalidad de la precipitación mediante la ecuación (5).

$$SI = \frac{1}{R} \sum_{n=1}^{12} \left| \frac{X_n - R}{12} \right| \quad (5)$$

Donde X_n es la precipitación del mes n , R precipitación anual. Walsh y Lawler (1981) sugieren una clasificación del régimen de lluvia según el grado de estacionalidad, donde un $SI \leq 0.19$ indica un régimen de lluvia muy constante; un SI de 0.20-0.39 representa un régimen estable pero con una temporada húmeda definida; un SI de 0.40-0.59 indica un régimen estacional con una corta estación seca; de 0.60-0.79 el SI muestra un régimen de lluvia estacional; de 0.80-0.99 el SI representa un régimen marcadamente estacional con una larga estación seca; de 1-1.9 muestra la concentración de la lluvia en tres meses o menos, $SI \geq 1.20$ valores extremos, casi toda la lluvia se presenta en uno o dos meses.

Los valores de precipitación mediante los cuales se diseña son usualmente asignados a cierta probabilidad de ocurrencia o excedencia (Critchley & Siegert, 1991). Así, mediante el ajuste a

una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información probabilística en la muestra puede resumirse en forma compacta en la función (Suarez, 2011). Para el presente artículo se emplearon las distribuciones Normal, Log-Normal, Exponencial, Gamma, Gumbel y Doble Gumbel, para ajustar los datos de la precipitación media mensual y máxima diaria de las estaciones de estudio. La determinación de la función más adecuada para realizar el ajuste de los datos de precipitación se realizó mediante el error mínimo estándar.

Tabla 1. Estaciones climatológicas utilizadas.

Nombre	Clave	Porcentaje de datos de X_n	Rango
Romita	11058	98.1 %	1981-1993
El Copal	11164	97.6 %	1983-1996
La Sandía	11035	92.8 %	1981-2010
Guanajuato	11094	92.8 %	1981-2010
El Chapín	11124	92.5 %	1981-2010
Presa La Purísima	11137	91.9 %	1981-2010
Comanjilla	11162	91.7 %	1982-2010
Calderones	11007	90.6 %	1981-2010
Chichimequillas	11165	88.5 %	1981-2004
Valenciana	11103	87.8 %	1981-2010
Aldama	11004	76.7 %	1981-2010
Silao	11074	75.8 %	1981-2010
La Laborcita	11153	68.9 %	1981-2010
Arperos	11135	59.4 %	1981-2010
La Luz	11130	58.3 %	1981-2010

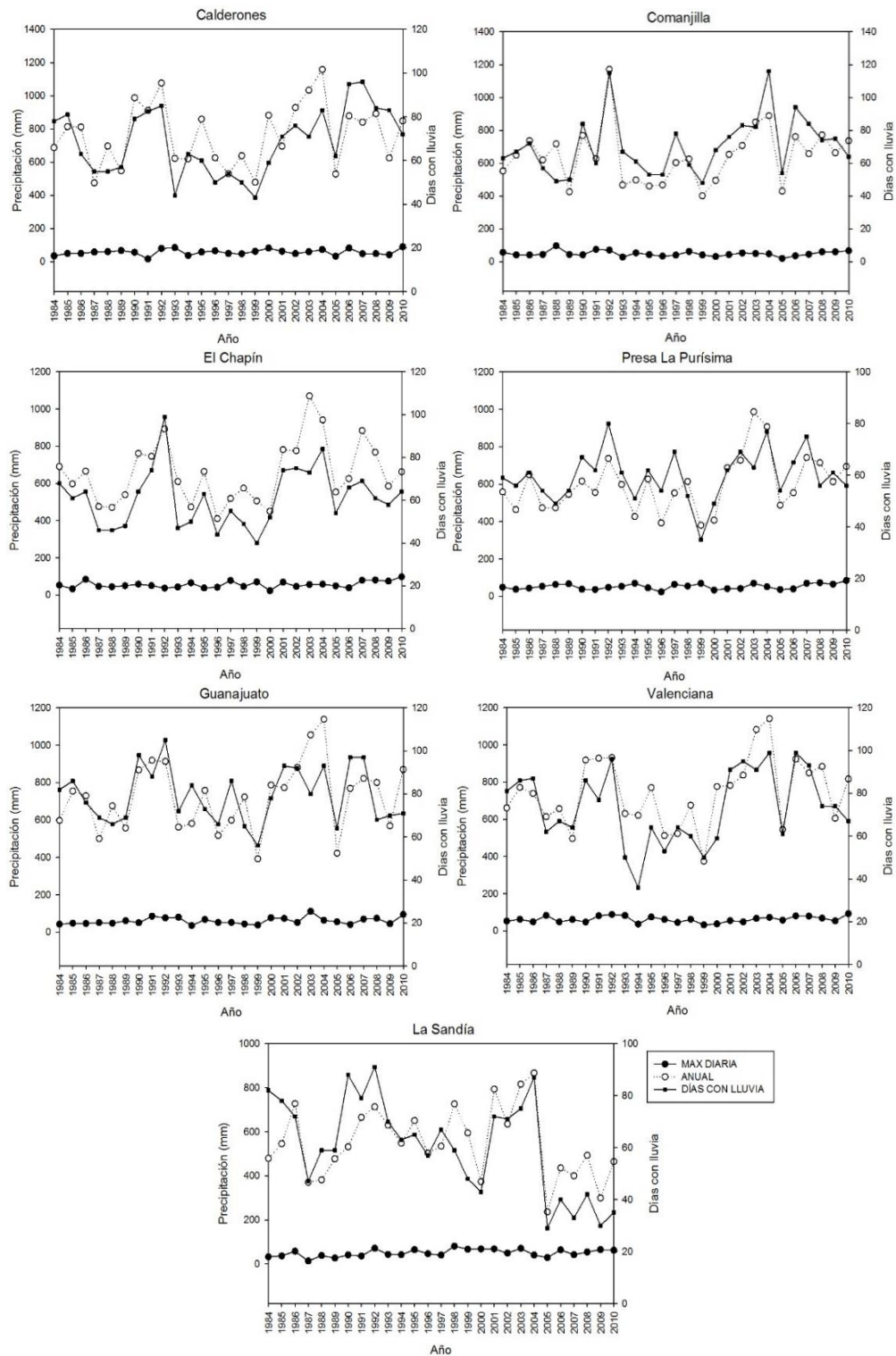
Fuente: Eric III y CLICLOM.

RESULTADOS

La precipitación anual varía de los 236 a los 1171 mm en las estaciones de estudio, con un promedio de 663 mm. Se distinguen periodos con años lluviosos como de 1990-1992 y de 2000-

2004, en donde la cantidad de lluvia anual y días con lluvia aparecen por encima de la media (Figura 2).

Figura 2. Precipitación anual, máxima diaria y días con lluvia durante 1981-2010.



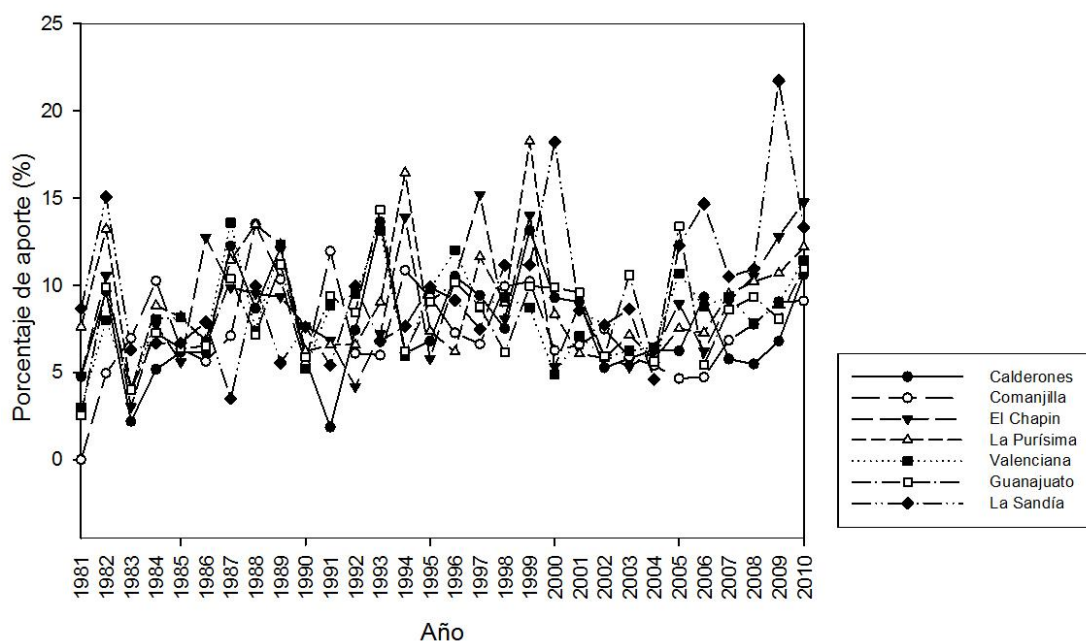
Fuente: Fuentes-Galván M.L.

Los picos de estos periodos ocurridos en 1992 y 2004, presentaron la máxima cantidad de días lluviosos para cada estación y en cuatro de ellas los valores máximos anuales del rango de datos en estudio. Sin embargo, en lo que respecta a los eventos máximos diarios, ninguno fue registrado durante estos periodos. Los valores de precipitación anual presentan una mayor correlación con la cantidad de días lluviosos (0.54), que con las precipitaciones máximas (0.38).

Los datos de precipitación diaria muestran que lluvias diarias de mínimo 13 mm ocurren al menos una vez cada temporada lluviosa, la precipitación máxima diaria registrada es de 111.8 mm en la estación Guanajuato (Figura 2). El 97.6% de las precipitaciones máximas diarias se presentan en la temporada de lluvias, julio es el mes con mayor ocurrencia con el 30% de las lluvias máximas, seguido por junio (23.8%) y agosto (20.4%).

La distribución a lo largo del año muestra que el periodo de lluvias ocurre de mayo a octubre. Durante este periodo se presenta más del 89% de la precipitación anual en todas las estaciones de estudio. Además, estos meses muestran las mayores probabilidades de ocurrencia de días con lluvia, que oscilan entre el 11 y el 50%, las probabilidades más altas se obtienen en los meses de julio (41-50%) y agosto (36-45%).

Figura 3. Porcentaje de aportación de la precipitación máxima diaria a la precipitación anual.



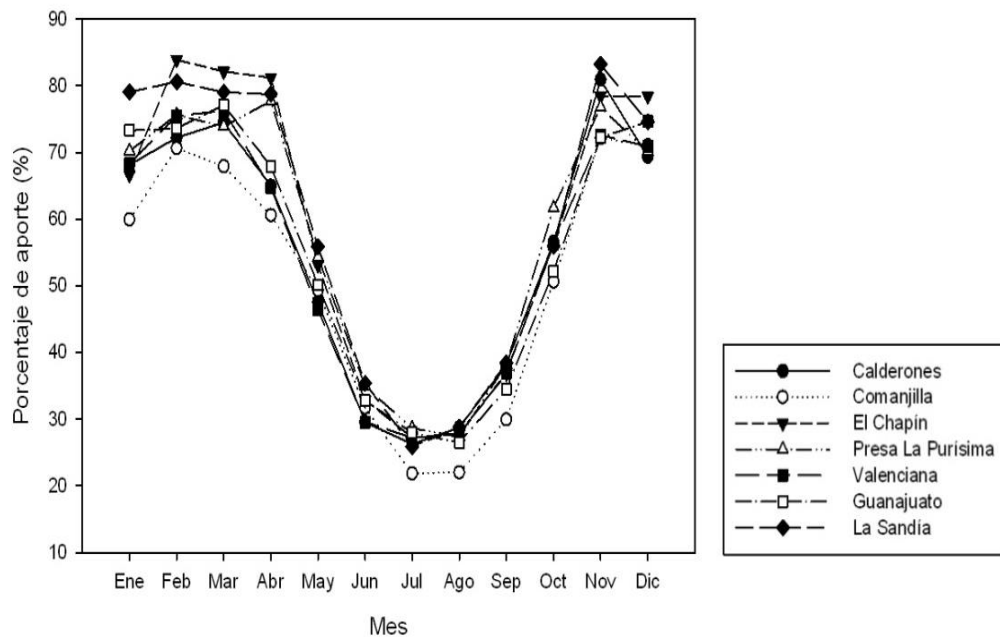
Fuente: Fuentes-Galván M.L.

La relación entre las precipitaciones máximas con la precipitación acumulada a lo largo del año es reducida, esto puede ser observado en la Figura 3 en donde se muestra el porcentaje de aporte a la precipitación anual de las precipitaciones máximas en 24 horas. Los eventos máximos diarios registrados en las estaciones de estudio aportan en promedio el 8.5% de la precipitación anual, no obstante, los aportes máximos en las estaciones van desde 13.5 al 21.7%.

En la Figura 4 puede observarse el aporte promedio que las precipitaciones máximas realizan en la precipitación mensual. De junio a septiembre los porcentajes de aporte se reducen, debido

al incremento en los días con lluvias. Sin embargo, para los meses de octubre a abril, las lluvias máximas diarias aportan altos porcentajes a la precipitación mensual, presentándose repetidamente años en los que la precipitación máxima diaria aporta la totalidad de la precipitación que ocurre durante estos meses.

Figura 4. Porcentaje de aportación de la precipitación máxima diaria a la precipitación mensual.

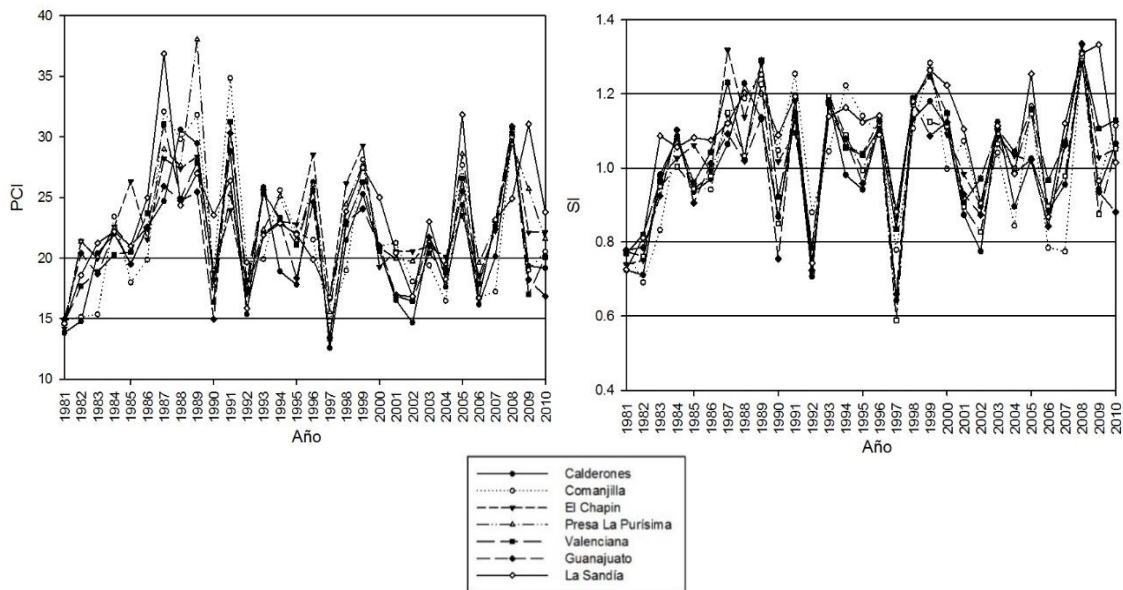


Fuente: Fuentes-Galván M.L.

En la Figura 5 se observa que el *PCI* calculado para las estaciones de estudio, se encuentra entre 15 o superior a 20, el valor promedio del *PCI* es 22. El 63.3% de los *PCI* obtenidos se encuentran dentro de la tercer categoría ($PCI > 20$), denotando precipitación altamente estacional e irregular (Manickam, Kotapati & Iyyanki, 2013; Oliver, 1980). La Sandía es la estación que muestra la mayor cantidad de valores de $PCI > 22$, seguido por la estación El Chapín.

Los valores de *SI* obtenidos para las estaciones de interés se encuentran entre 0.6 y 1.3, el promedio para el periodo de tiempo de estudio es un $SI = 1.0$. El 70% de los *SI* se encuentran en el rango de 1.0-1.9 lo que indica que la lluvia en la zona se presenta en tres meses o menos, un porcentaje menor de los *SI* obtenidos (25.2%), refleja un régimen marcadamente estacional con una larga estación seca.

Figura 5. Índices de distribución de la precipitación *PCI* y *SI*.



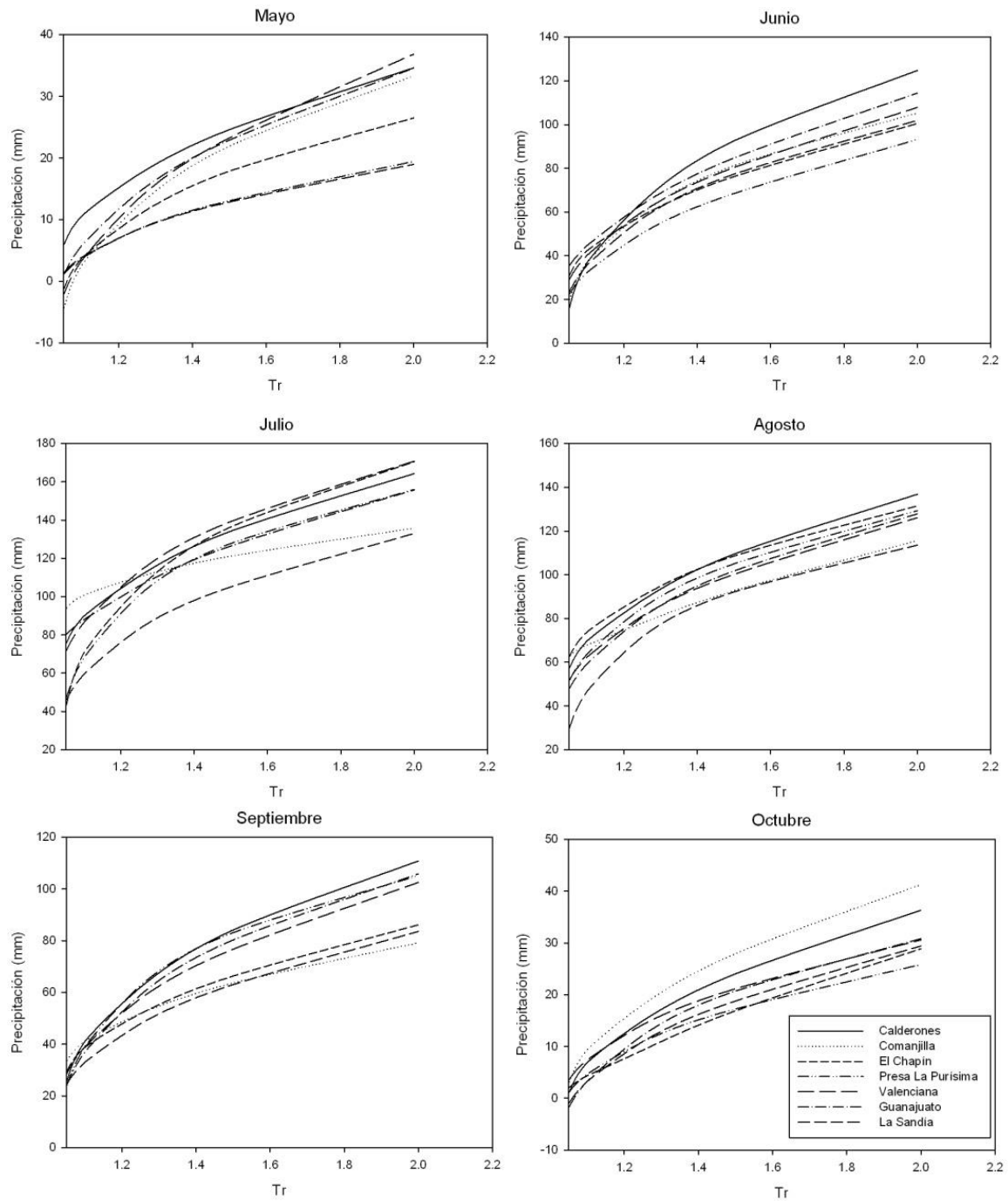
Fuente: Fuentes-Galván M.L.

En el diseño de sistemas de captación del agua de lluvia para usos de riego, se recomienda el uso de valores de precipitación con una probabilidad de ocurrencia mayor al 67% (Critchley & Siegert, 1991). Sin embargo, la probabilidad que se requiere para sistemas de uso doméstico es mayor. De este modo, el diseño de sistemas de captación está determinado por medio de análisis probabilístico, y considerando la importancia del nivel de confianza en la cantidad de agua que se puede captar, se seleccionaron periodos de retorno que reflejen una probabilidad de ocurrencia alta para ajustar la precipitación media mensual de las estaciones de estudio. El periodo de retorno Tr en años, puede ser fácilmente derivado una vez que la probabilidad de excedencia P (%) es conocida de la siguiente ecuación (3) (Critchley & Siegert, 1991).

$$Tr = \frac{100}{P} \quad (3)$$

Se realizó un ajuste probabilístico a los datos de precipitación media mensual de los meses de la temporada de lluvias (mayo-octubre). El modelo de mejor ajuste para estos datos es el Doble Gumbel, seguido por la distribución Gamma. Se estimaron los datos de precipitación media mensual para los periodos de retorno de 1.052, 1.1, 1.25, 1.5 y 2 años. La precipitación media mensual ajustada a cada periodo de retorno puede observarse en la Figura 6.

Figura 6. Precipitación media mensual según periodo de retorno.

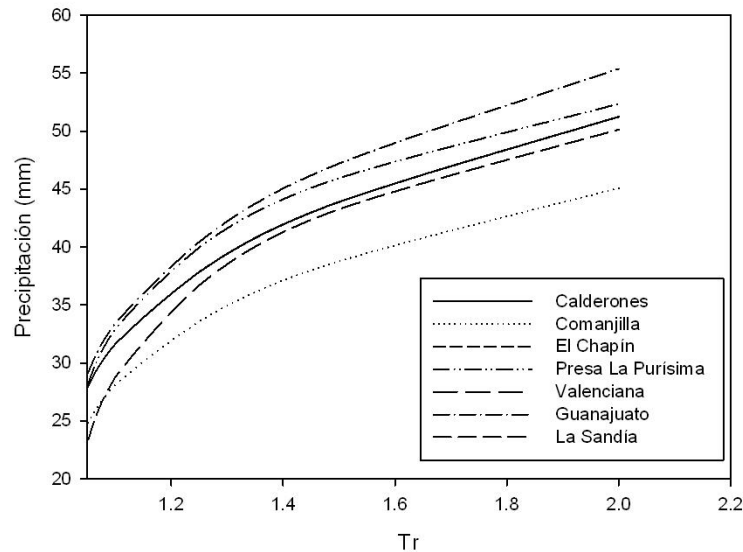


Fuente: Fuentes-Galván M.L.

En cuanto a la precipitación máxima diaria, se realizó el ajuste probabilístico para los años de estudio, esta precipitación puede ser utilizada en el diseño de sistemas de conducción. En la Figura 7, se presenta la precipitación máxima según su mejor ajuste para los periodos de retorno

de 1.052, 1.1, 1.25, 1.5 y 2 años. En el caso de la precipitación máxima las funciones con mejor ajuste fueron la Normal, Log-Normal y Gumbel.

Figura 7. Precipitación máxima diaria según periodo de retorno.



Fuente: Fuentes-Galván M.L.

CONCLUSIONES

Se seleccionaron las estaciones de la CONAGUA ubicadas en el área del acuífero Silao-Romita o en su cercanía para realizar un análisis de la precipitación registrada en ellas. El proceso de selección, redujo las estaciones que, por su calidad y cantidad, aporten información para ser utilizada en el manejo y diseño de sistemas de aprovechamiento de agua, particularmente sistemas de captación de agua de lluvia. De acuerdo a los criterios establecidos, solo es posible usar los datos de precipitación de siete estaciones, lo que hace que la información adecuada esté disponible para puntos específicos y la posible interpolación de variables meteorológicas para la obtención de valores para áreas definidas sea menos detallada.

La distribución de precipitación para la zona de estudio es marcadamente estacional, con una concentración trimestral. De forma que los más altos porcentajes de concentración de precipitación ocurren durante los meses de junio, julio y agosto, meses en los que llueve el 64% del total del año.

Así pues, la mayor cantidad de agua que es posible captar según la distribución estacional y mensual se dará durante los meses mencionados previamente. Tomando en consideración lo anterior, el diseño de sistemas de aprovechamiento de agua debe realizarse considerando las características de la precipitación que ocurre en estos meses. Las precipitaciones máximas diarias realizan aportes significativos en las precipitaciones mensuales, particularmente en los

meses fuera de la temporada de lluvias, por lo cual, la consideración de estas precipitaciones en el diseño de sistemas de aprovechamiento de agua es relevante.

La probabilidad de ocurrencia de días lluviosos se presenta más alta en los meses julio y agosto. Sin embargo el análisis probabilístico de lluvia definido para valores mensuales y máximos diarios, se realizó para todos los meses de la temporada de lluvias (mayo-octubre). Los datos de precipitación media se ajustaron mejor para la distribución Doble Gumbel y Gamma. Con una probabilidad del 80% de ocurrencia se estiman las precipitaciones más altas para el mes de julio (113.1 mm) y los valores más bajos para el mes de mayo (8.34 mm). Entre mayor sea la probabilidad de ocurrencia la precipitación ajustada se reduce, pero el nivel de confianza en el volumen potencial de captación se incrementa, lo cual debe ser considerado en la estimación de la cobertura de demandas específicas que es posible cubrir con la cantidad de lluvia en un periodo de tiempo determinado.

Las precipitaciones máximas diarias se ajustan mejor a las funciones Normal, Log-Normal y Gumbel. Y de su análisis se obtiene que con una probabilidad del 80% pueden presentarse lluvias de hasta 40.46 mm, y con una probabilidad del 90% lluvias máximas de 33.4 mm. Estos valores, son considerados usualmente en el diseño de sistemas de conducción considerando la máxima cantidad de escurrimiento que es necesario dirigir.

RECOMENDACIONES

El análisis de precipitación es una herramienta fundamental para el manejo y gestión de los recursos hídricos. Así, con el conocimiento del comportamiento de la precipitación en una región en específico es posible generar las alternativas adecuadas para el aprovechamiento de este recurso y cuantificar el potencial que presenta la localidad.

Con base en la variabilidad estacional de la lluvia en la zona de estudio, el periodo con mayor concentración de precipitación es de junio a agosto, lo cual deberá considerarse en el diseño y manejo de sistemas de aprovechamiento del agua de lluvia. Por ello, es recomendable preparar las superficies de captación y demás componentes de un sistema en los meses previos al inicio de la temporada de lluvias, con el fin de obtener una buena calidad de agua y, con esto, diversificar el aprovechamiento de este recurso.

La pertinencia del periodo de retorno seleccionado depende del nivel de confianza con que se desee diseñar el sistema de captación. Para sistemas de abastecimiento doméstico se recomienda un nivel de confianza alto ($Tr=1.05$ años y $Tr=1.1$ años), particularmente en la estimación del potencial de captación. Para sistemas de riego, limpieza o usos no potables, pueden seleccionarse periodos con un nivel de confianza menor.

Referencias

Abebe, A. J., Solomatine, D. P., & Venneker, R. G. W. (2000). Application of adaptive fuzzy rule-based models for reconstruction of missing precipitation events. *Hydrological Sciences Journal*, 45(3), 425-436. Doi: 10.1080/02626660009492339

Adeloye, A. J. (1996). An opportunity loss model for estimating the value of streamflow data for reservoir planning. *Water Resources Management* 10(1), 45-79

Al-Adamat, R., Diabat, A., & Shatnawi, G. (2010). Combining GIS with multicriteria decision making for siting water harvesting ponds in Northern Jordan. *Journal of Arid Environments*, 74(11), 1471-1477. doi: 10.1016/j.jaridenv.2010.07.001.

CEASG (Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Guanajuato) (1998) Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de Silao Romita, Gto. Report no. CEAS-APA-GTO-97-025, Lesser, Querétaro, Mexico.

CLICOM, Base de datos climatológica nacional (SISTEMA CLICOM). Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA Comisión Nacional del Agua, (2009). *Semblanza Histórica del Agua en México*. D.F., México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA, (2014). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. D.F., México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA, (2014a). *Estadísticas del Agua en México Edición 2014*. D.F., México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA, (2014b). *Atlas del Agua en México 2014*. D.F., México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Eric III extractor rápido de información climatológica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Critchley, W., Siegert, K., & Chapman C. (1991). *Water Harvesting, A Manual Guide for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production*. Recuperado de www.fao.org/docrep/u3160e/u3160e07.htm

Feng, Q., Wen, X., & Li, J. (2015). Wavelet analysis-support vector machine coupled models for monthly rainfall forecasting in arid regions. *Water Resources Management*, 29(4), 1049–1065. doi: 10.1007/s11269-014-0860-3

Foster, S., Garduño, H., & Kemper, K. (2004). The “COTAS”: Progress with stakeholder participation in groundwater management in Guanajuato-Mexico. *GW-MATE Case Profile*, 10. World Bank, Washington, DC.

Kashani, M. H. & Dinpashoh, K. (2012) Evaluation of efficiency of different estimation methods for missing climatological data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 26(1), 59–71.

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.2009.11.040.

Kim, J. W. & Pachepsky, Y. A. (2010). Reconstructing missing daily precipitation data using regression trees and artificial neural networks for SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 394(3-4), 305–314.

Liaw, C. H., & Chiang, Y. C. (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

- Manickam, V., Kotapati, S. S., Iyyanki, V. M. K. (2013). Analysis of Precipitation Concentration Index and Rainfall Prediction in various Agro-Climatic Zones of Andhra Pradesh, India. *International Research Journal of Environment Science*, 2(5), 53-61.
- Mwenge, K. J., & Taigbenu, A. (2011). Rainwater harvesting in South Africa: Challenges and opportunities. *Physics and Chemistry of the Earth*. 36(14-15), 968–976. doi: 10.1016/j.pce.2011.08.011.
- Mahmoud, W. H., Elagib, N. A., Gaese, H., & Heinrich, J. (2014). Rainfall conditions and rainwater harvesting potential in the urban area of Khartoum, *Resources, Conservation and Recycling*, 91, 89-99. doi: 10.1016/j.resconrec.2014.07.014.
- Mbilinyi, B. P., Tumbo, S. D., Mahoo, H. F., Senkondo, E. M., & Hatibu N. (2005). Indigenous knowledge as decision support tool in rainwater harvesting. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(11-16), 792-798. doi: 10.1016/j.pce.2005.08.022.
- Nkuna, T. R. & Odiyo, J. O. (2011). Filling of missing rainfall data in Luvuvhu River Catchment using artificial neural networks. *Physics and Chemistry of the Earth* 36(14-15) 830–835.
- Oliver, J. E., (1980). Monthly precipitation distribution: a comparative index. *The Professional Geographer*, 32(3), 300-309. doi: 10.1111/j.0033-0124.1980.00300.x
- Paulhus, J. L. H. & Kohler, M. A. (1952). Interpolation of missing precipitation records. *Monthly Weather Review*, 80(8), 129-133. doi: 10.1175/1520-0493(1952)080<0129:IOMPR>2.0.CO;2
- Ramos-Calzado, P., Gómez-Camacho, J., Pérez-Bernal, F. & Pita-López, M. F. (2008). A novel approach to precipitation series completion in climatological datasets: application to Andalusia. *International Journal of Climatology* 28(11), 1525–1534.
- Strangeways, I. (2007). *Precipitation, Theory, Measurement and Distribution*. United States of America. Cambridge University Press.
- Suarez, N. (2011). *Caracterización de eventos extremos de precipitación, empleando distribuciones mezcladas (Tesis)*. Querétaro, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Tabios, G. Q. & Salas, J. D. (1985). A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources Bulletin*. American Water Resources Association. 21(3), 365-380.
- Teegavarapu, R. S. V. & Chandramouli, V. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology* 312(1-4) 191–206.
- Teegavarapu, R. S. V. (2009) Estimation of missing precipitation records integrating surface interpolation techniques and spatio-temporal association rules. *Journal of Hydroinformatics* 11(2).
- Teegavarapu, R. S. V., Tufail, M. & Ormsbee, L. (2009). Optimal functional forms for estimation of missing precipitation data. *Journal of Hydrology* 374(1-2), 106–115.
- Walsh R. P. D., & Lawler D. M. (1981). Rainfall seasonality: Description, spatial patterns and change through time. *Weather*, 36(7), 201-208. doi: 10.1002/j.1477-8696.1981.tb05400.x

WMO, (2011). World Meteorological Organization, Guide to Climatological Practices. WMO-No.100.

Xia, Y., Fabian P., Stohl A. & Winterhalter M. (1999). Forest climatology: estimation of missing values for Bavaria, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 96(1-3), 131-144

Young, K. C. (1992). A three-way model for interpolating for monthly precipitation values. *Monthly Weather Review*, 120(11), 2561-2569. doi:10.1175/1520-0493(1992)120<2561:ATWMFI>2.0.CO;2

Yue, S., & Hashino, M. (2007). Probability distribution of annual, seasonal and monthly precipitation in Japan. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 863-877. DOI: 10.1623/hysj.52.5.863.

Manuscrito publicado en línea, Revista Interciencia, 4 (6), 403-408.

ISSN 0378-1844.

**ROOFTOP RAINWATER HARVESTING ACCEPTANCE IN THREE LOCALITIES
OF GUANAJUATO, CENTRAL MEXICO.**

ROOFTOP RAINWATER HARVESTING ACCEPTANCE IN THREE LOCALITIES OF GUANAJUATO,

CENTRAL MEXICO

ACEPTACIÓN DE LA CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA EN TECHOS, EN TRES LOCALIDADES

DE GUANAJUATO, MÉXICO

ACEITAÇÃO DA CAPTAÇÃO DA ÁGUA DA CHUVA PELOS TELHADOS EM TRÊS CIDADES NO

ESTADO DE GUANAJUATO, MÉXICO

MARÍA LINA FUENTES-GALVÁN, XITLALI DELGADO-GALVÁN, HILARIO CHARCAS-SALAZAR,

JESÚS MORA-RODRÍGUEZ, JOSÉ LUIS FLORES FLORES, ANTONIO CARDONA BENAVIDES

María Lina Fuentes-Galván. M.Sc. in Water, Universidad de Guanajuato and doctoral candidate in Environmental Sciences, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. e-mail: fugalina@gmail.com

Xitlali Delgado-Galván. Doctor in Hydraulics and Environment, Universidad Politécnica de Valencia. Professor, Universidad de Guanajuato, México. e-mail: xdelgado@ugto.mx

Hilario Charcas-Salazar. Doctor in Agricultural Science, Universidad Autónoma de Nuevo León. Professor, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. e-mail: hilario@uaslp.mx.

Jesús Mora-Rodríguez. Doctor in Hydraulics and Environment, Universidad Politécnica de Valencia. Professor, Universidad de Guanajuato, México. e-mail: jesusmora@ugto.mx

José Luis Flores Flores. Doctor in Science, Colegio de Postgraduados. Montecillo. Professor, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. e-mail: joseluis.flores@uaslp.mx

Antonio Cardona Benavides. Doctor in Earth Sciences, Universidad Nacional Autónoma de México. Professor, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. e-mail: acardona@uaslp.mx.

Abstract

Rainwater harvesting (RWH) provides various social, environmental, and economic benefits. It is important to first consider individual preferences and willingness to use harvested water for different purposes in order to encourage a community to use RWH and establish strategies that allow for the introduction of an alternative water supply, and additionally foster water management through sustainable practices. This paper presents the willingness of individuals to use RWH in three localities (Guanajuato, Romita, and Silao) of the state of Guanajuato, Mexico, evaluated through the acceptance of using the collected rainwater found in the results of 504 questionnaires directly applied to owners and dwelling users in urban areas of the localities studied. Other aspects related with RWH were included in the study, such as some characteristics of the population and their dwellings.

Keywords: Rainwater harvesting; acceptance; uses; willingness to use, potential.

Resumen

La captación de agua de lluvia (ALL) proporciona diferentes beneficios sociales, ambientales y económicos. Sin embargo, para promover el uso del ALL es importante considerar la disposición de la población a utilizarla y para qué propósitos, con el objeto de establecer estrategias que permitan la introducción de esa fuente alternativa de agua y fomentar el manejo del recurso a través de prácticas sostenibles. En este trabajo se presenta la disposición de la población hacia el uso del ALL en tres localidades (Guanajuato, Romita y Silao) del estado de Guanajuato, México, evaluada a través de la aplicación directa de 504 cuestionarios a propietarios y usuarios de las viviendas en las zonas urbanas de las localidades de estudio. Se

incluyen otros aspectos relacionados con la captación del ALL, tales como algunas características de la población y las construcciones.

Palabras clave: captación de agua de lluvia, aceptación, usos, disposición a usar.

Resumo

A captação de água da chuva (AC) fornece benefícios sociais, ambientais e econômicos. No entanto, para promover o uso da AC é importante considerar a vontade da população para sua utilização e para que propósitos, em ordem de estabelecer estratégias que permitam a introdução de uma nova fonte da água e promover a gestão da água de forma sustentável. Este artigo apresenta a vontade da população para usar a AC em três cidades (Guanajuato, Romita e Silao) no estado de Guanajuato, México. A aceitação foi avaliada através da aplicação direta de 504 questionários a proprietários e usuários das casas em áreas urbanas das localidades estudadas.

Palavras chave: captação de água da chuva, aceitação, usos, vontade.

Introduction

The increasing demand for water and subsequent strain on resources has propitiated the search for alternative sources, such as gray water, desalination and rainwater. Yet, in order to implement a new water supply scheme, it is very important to consult public opinion first. Public opinion will dictate the feasibility of introducing an alternative water supply and the best way of implementing it. Therefore, the perception and acceptance of the population towards alternative water sources has been studied in recent decades and related to aspects of individuals such as age, education, socioeconomic factors, and local policies, among others.

These characteristics provide information to generate the necessary tools that allow communities to adapt to new water supply sources.

Rainwater harvesting (RWH) is an important means of optimizing water resource use that simultaneously promotes sustainable development (Ghisi *et al.*, 2009) and is strategically implemented in different regions to solve and reduce the strain on water resources. However, regardless of how RWH is implemented, it requires the acceptance and willingness of individuals to use the water collected (Barthwal *et al.*, 2013). RWH has the potential to provide a considerable volume of water to contribute to the water supply in a given area, while at the same time generating savings and reducing extraction from current supply sources. Hence, in order to promote RWH as a water management strategy in the localities of interest, it is necessary to know the level of RWH acceptance and willingness to use the water collected.

According to previous studies on barriers and acceptance towards using them, attitudes towards alternative water sources depend largely on the particular characteristics of the communities where they are intended to be introduced (Ward *et al.*, 2008, 2012; Domènech and Saurí, 2010; Parsons, *et al.*, 2010; White, 2010; Barthwal *et al.*, 2013). Limited information about current attitudes and perceptions towards RWH exists in Mexico. In the State of Guanajuato, there is no available information concerning this topic. This study is focused on roof RWH, an underexploited resource in the location studied. RWH, can provide an important contribution to complement the current water supply, and could mitigate problems caused by intermittent service and water scarcity in the area.

Rainwater harvesting (RWH)

RWH is a technology used for collecting and storing rainwater from rooftops, land, roads, and rock surfaces (Abdulla and Al-Shareef, 2009; Helmreich and Horn, 2009). The components of rainwater harvesting systems (RWHS) depend on the final use of water. However, all harvesting processes imply a surface catchment, a delivery system, and a storage tank independent of the final use of the water (Abdulla and Al-Shareef, 2006). RWH provides different benefits, for instance, the collection and storage in situ has no cost related to distribution systems from centralized water sources and can be used for different purposes, taking into account the quantity and quality of the harvested water. Nowadays, rainwater is used at different levels around the world to supply domestic or non-potable uses, promote water savings, efficient strategies for water management, and environmental conservation (Herrmann and Schimda, 1999; Ghisi, 2006; Chiu *et al.*, 2009; Parsons *et al.*, 2010; Mankad and Tapsuwan, 2011).

In Mexico, RWH was a common practice and was used throughout different ancient civilizations. The runoff from roofs and courtyards was delivered through storage structures inside and outside dwellings, using different materials in the process; the final uses were domestic supply and irrigation (CONAGUA, 2009). During the colonial period, with the arrival of religious orders, the design of convents and monasteries included rainwater collection and storage. Hence, in colonial cities of Mexico, such as Guanajuato, it is common to find structures for harvesting rainwater in old buildings, cisterns for domestic supply and water boxes for irrigation. Currently, this resource is used in some Mexican states, generally receiving support from social programs, but private initiatives are also present.

Study area

The State of Guanajuato is located in central Mexico; it is comprised of 46 municipalities. Groundwater is the principal water supply source in the state and as a consequence the majority of aquifers in the area are overexploited, as is the case of the Silao-Romita aquifer in the center of the state. In this zone, the extraction of underground water has caused serious social, economic, and environmental impacts, such as the increasing cost of water extraction, high water salinity, and subsidence in some areas (Foster and Garduño, 2009). Recent demographic growth and agricultural and industrial development have resulted in increased pressure on the limited water resources to satisfy increasing demands. Thus, with decreasing water availability, it is highly relevant to generate the basis for establishing strategies that contribute to sustainable water management and provide alternatives to supply the needs of the population, according to individual characteristics. This study is focused on the urban areas of Guanajuato, Silao and Romita. Guanajuato is a historical mining city; the northernmost region of the city is located in a transition zone between two physiographical provinces (Cerca-Martínez *et al.*, 2000) causing variable weather which may include extreme events. There are records of floods since 1629 and droughts between 1710 and 1730 (Valles Septián *et al.*, 1983; Miranda-Avilés *et al.*, 2009). Thus, the population in this region has faced the kind of events that determine the hydraulic infrastructure of the city and may be why RWH became a common supply practice. Romita, the southernmost locality, is predominantly agricultural and faces regional pressure on water resources despite having the smaller population of the three localities; here, the use of rainwater is not documented. Silao is one of the most industrialized

cities in the state and is experiencing an important increase in its population; as in the case of Romita, the use of RWH is not documented.

Materials and Methods

The study was conducted using a questionnaire directly applied to the owners or users of dwellings in the urban areas of the localities of interest in the months of April and May 2013.

A total of 504 questionnaires were applied: 267 in Guanajuato, 146 in Romita and 91 in Silao.

The questionnaire is comprised of six sections designed to establish perceptions about public water supply and RWH, and some aspects of the characteristics of dwellings. Most of the questionnaire consists of yes or no questions. Table I summarizes the questions included in sections 2 to 5 of the questionnaire.

The first section of the questionnaire is focused on the identifying data of the dwelling such as; location, gender of the respondent, characteristics of the house including size, construction material, and whether the resident is the homeowner or a tenant. The second section considers water use from the centralized supply; the objective of this part of the questionnaire is to recognize priorities in the use of water and possible endowments. The next section of questions assesses the perspective of the respondent towards the quality of water received from the current supply; if the respondent drinks the piped water and whether or not they detect some odor or distinct color. The quantity of potable water used was also established.

The potential usage of rainwater was explored in the fourth section of the questionnaire to define the acceptance of the respondents to this resource for specific items, such as domestic and personal cleaning, watering plants, and washing the car, among others. Taking into account the implications and needs concerning a RWHS, the fifth section of the questionnaire

starts with a brief description of the RWHS and introduces the concept of RWH to the respondents. While describing the components of the system, the costs and requirements needed to install a RWHS are indicated and thus determine the willingness to invest in a RWHS and maintain it in good condition. An open question on who should provide the financial support for the implementation of a RWHS was also included.

The last section asks about water demand and payment for the supply service, providing information about the savings that may be obtained with rainwater. In this section the persons per household are inquired, as well as the capacity and type of the current storage tank. With the data obtained from the first and last sections, it is possible to estimate, for every locality, the rainwater harvesting potential (RWHP), a concept to be explained below.

Results

Identifying data

This section of the questionnaire provides information about the gender and dwellings' location of the sample the RWHP in the roofs of the study area for future research. The majority of respondents (62%) were women. Only 70.8% of the respondents answered the question concerning ownership or tenancy of dwellings; of those, 85.7% were homeowners, and 14.3% were tenants. Guanajuato had the highest percentage of leased residences (16.9%), but it should be considered that this city has a large student community and is also a tourist location due to being a colonial mining town and the state capital. Regarding the physical characteristics of the roofs, the houses studied in Silao had the largest mean area (131.1m²) followed by Romita (106.6m²); Guanajuato had the smallest mean area (89m²), which can be attributed to the topography of the city that generates an irregular spatial distribution. With

respect to rooftop materials, concrete is the most commonly used (88.2%), other materials were used but not in a representative quantity. All of the rooftops in Silao were concrete. Combinations of roof materials were reported in Guanajuato and Romita, mainly concrete with clay or metallic tiles. However, these roof characteristics were presented in a small percentage of dwellings (1.1% Guanajuato; 9.9% Romita).

Water use from centralized supply

The main source for the water supply in the study region is the aquifer, with a complementary volume of surface water. In particular, Guanajuato is supplied using surface water and in the southern part of the city with groundwater, while Silao and Romita take all of their water supply from the aquifer. According to questionnaire respondents, the centralized water supply is used by almost the entire study sample for personal hygiene (99.4%), followed by domestic cleaning (98.8%). The watering of gardens and plants is also an important use of water (66.2%); this usage was found to be reported more often by women (289) than men (195). Conversely, for car washing, which has the lowest rate of water use, men answered positively (44.4%) more often than women.

Centralized water quality

Taking into account the reliability of opinion on the quality of water received from the centralized system, two questions were asked: whether or not the household drinks tap water directly, and whether or not they have perceived some odor or color in the tap water. A high percentage of the respondents (78.9%) does not drink tap water and a higher percentage of female respondents answered negatively as compared to male respondents. Almost the entire Guanajuato respondents (90.9%) answered negatively to the question regarding drinking tap

water, which this can be an important incentive when considering new supply alternatives. Regarding the second question of this section, 53.4% of the study sample identified some odor or color in the tap water but most men did not find odor or color in water. The respondents of the city of Guanajuato, regardless of gender, exceed the 50% mark for identifying odor or color in water, while in Romita and Silao less than 40% answered yes to this question.

Mexico is a country with a high consumption of bottled water, and considering the low utilization of tap water as drinking water, the last question of this section is useful to establish the quantity of bottled water acquired per month and the economic spending thus derived. Silao is the place with the highest quantity of bottled water purchased (164.1 liters; USD 14.10), followed by Romita (135.7 liters; USD11.70) and Guanajuato (122.9 liters; USD 10.60). Thus, in Guanajuato the respondents identified odor and colors in water, yet they buy fewer bottles of water than in Romita and Silao, where the sample found fewer negative aspects in tap water.

Willingness to use rainwater

Hartley (2006) and Marks (2006) indicated that the level of acceptance for reused water is related to the degree of human contact. Ward *et al.* (2008) found that the perceived risk of use rainwater increases as the type of use becomes increasingly personal. For less contact there is a higher acceptance and for the present case study the behavior is the same. Rainwater is the less accepted for drinking and personal hygiene. Figure 1 shows the percentage of the respondents willing to use rainwater for different activities.

The first question of this section was: Would you use rainwater? In response, 91.5% of the sample responded affirmatively. The following questions are directed, however, to a specific use and the acceptance to use rainwater was lower. When asked about the consumption of

rainwater as drinking water positive answers were given by only 15.4% of respondents. Nevertheless, in the next question: Would you use treated rainwater as drinking water? (with four possible answers: Yes, Maybe, If I don't have any other option, No) the affirmative answers increased and reached 53.4%.

Rainwater harvesting system (RWHS)

The willingness to take advantage of rainwater through a RWHS is reviewed in this section, where 92.8% of respondents show a high disposition to implement a RWHS; women being more prone to install a system (95.2%) than men (89%). In order to benefit from this resource in an effective way, it is necessary to maintain the surface where the water will run off in good condition, and to administer regular maintenance to the system; thus, the majority of the sample (97%) would accept the need to undertake activities to maintain the RWHS in good condition.

Regarding financial support to take advantage of rainwater, 72.5% of respondents answered positively to provide the financial resources to install a RWHS. Nevertheless, in the open question about who should participate in the investment for RWHS in local dwellings, 41% answered that the government should contribute, without specifying the level of government. It is noteworthy that in the localities of interest, the municipality has the task of water supply, but only 7% of respondents chose it in their answers, which may denote a lack of information about this topic. A mixed participation between the owners and government obtained the second higher percentage with 25.9%. Figure 2 shows the percentage of the actors that, according to the respondents, should participate in the investment in a RWHS for their houses.

In the region, individuals commonly use the roof space for laundry activities. These activities were taken into consideration when calculating the availability of the potential roof catchment surface, and its conditions. Hence, it was asked whether or not they use their roofs, and if so, what they use it for. In a small percentage of dwellings the roof is used, only 3.1% of respondents use their roofs for housing pets, flowerpots, or storage; of the 119 houses where the roofs are used for a specific activity, 95 were for laundry and related activities. According to results, those current rooftop activities would not prevent RWHS installation.

Water Storage

The use of plastic barrels for water storage is a common practice in homes in the studied locations. In order to find the storage capacity of dwellings, questions about the kind of reservoirs used and the volume that may be stored were asked. Results show that 410 houses (81.3%) employed plastic tanks, the use of cisterns was lower (only 17.7% of total dwellings had this kind of reservoir), and only 7.7% had another type of deposit with lower volume, such as barrels and buckets. The use of more than one type of reservoir is higher in Guanajuato, as well as is the higher volume of storage; this may prevent the effects of the intermittent supply service in the area. The combination of plastic tanks with cisterns is present in the three localities, and in Guanajuato the use of plastic tanks together with barrels and buckets was also reported.

The diversity of storage volumes is high, but in accordance with the construction practices in the region, the plastic tanks mostly used have capacities of 450, 750, and 1100 liters. The most common ones in Silao and Romita were the 750 liter tanks, whereas in Guanajuato city were of 1100 liters. Regarding the volume of cisterns the most common capacity was 10,000 liters.

These results make clear the importance of storing water for the community because out of 504 visited dwellings 479 had at least one type of reservoir.

The number of persons per household and payment for the supply service were asked in the final two questions. The average household size per locality are: 4.1 in Guanajuato, 4.9 in Romita and 4.6 in Silao. The last question asks about the water demand and the payment for the supply service, but only 5.6% of respondents knew the quantity of water that they used. However, 91.5% of them knew their monthly payment to the centralized supply organization. More men knew this quantity than women and the same occurred with the small percentage of the sample that knew the cubic meters consumed. A relationship between payment and consumption could be established taking into account the service establishments of each locality. Regarding the amount paid for the supply services, the higher costs are presented in Silao, followed by Guanajuato. The smaller community, Romita, pays less, where the base fee included 10m³, a situation that does not occur in the other communities, where the base fee does not include a given volume. Table II shows the consumption and payment for the supply service and the calculated water consumption per person per day, according the results of the questionnaires. All this data can provide information about the savings that can be obtained using rainwater and about the water demands of the communities.

Rainwater harvesting potential (RWHP)

The RWHP is the quantity of rainwater that can be collected on a surface and, according to Farreny *et al.* (2011), it can be estimated based on the local precipitations, the roof area and the runoff coefficient. For the locations of study the RWHP was estimated taking into account the material and average roof area present in the results of the applied questionnaires and the

normal monthly precipitation from the locality stations obtained from the CONAGUA (2015) database.

The roof material influences collection efficiency and the losses for a given material are considered in a non-dimensional runoff coefficient (RC). For roofs, RC is within the range of 0.7-0.9 (Farreny *et al.*, 2011). The RC is used to estimate the RWHP at 0.8, based on a concrete roof, in accordance with the results of the questionnaires applied that shows that more than 80% of the roofs employed concrete in the three areas. In addition, according to the information in the population census (INEGI, 2000), more than 70% of the total rooftops in the localities of interest are made of concrete. The area (A) is a relevant factor that influences the volume of rainwater that can be collected and the abovementioned roof average surfaces for the three locations were considered. The volume of rainwater that is possible to harvest in each city is estimated using $V = (P \times RC \times A) / 1000$ (Ghisi, 2006; Abdulla and Al-Shareef, 2009), where V: annual volume of harvestable rainwater (m³), P: accumulated average monthly precipitation (mm), A: harvesting area (m²). RC is non-dimensional and 1000 is the factor used to convert P from mm to m.

Taking into account the quantity of water used by the population, it is possible to appraise the percentage of demand that rainwater could meet. Table III shows the accumulated average monthly precipitation (P) for each locality; the volume (V) of rainwater estimated according to the results of the questionnaires applied; and the coverage (C) is the percentage of the demands that could be met by rainwater. The average annual V per person in the study area is 12.8 m³.

Discussion

According to the results of the first section of the questionnaire, the majority of respondents were homeowners; this allows for the possible management of a RWHS. The uses of the centralized water supply at the domestic level are mainly for personal hygiene and domestic cleaning, followed by watering gardens and plants. Considering rainwater instead of piped water, the respondents would use rainwater less for personal hygiene, and almost the same percentage would use rainwater or piped water for domestic cleaning, car washing, and watering gardens and plants. The number of respondents that are willing to use rainwater is higher, which may be because these uses involve less human contact and because, currently, these uses represent unnecessary spending and if they use rainwater for them the cost will not be reflected in the payment for the supply service.

The willingness to use rainwater for domestic cleaning, car washing, and watering gardens and plants makes these activities ideal for the direct use of rainwater for the dwellings in the areas of study, given the more negative attitude of the respondents towards the use of rainwater for personal hygiene and as a drinking water resource. These facts can orient the strategies to foster rainwater use and the design of systems that can cover the needs of the population according their characteristics.

Considering the results of the third section, it may be stated that the respondents identify a risk in the use of piped water as drinking water, as 93.7% of them buy bottled drinking water. Regarding these respondents that buy bottled water, Guanajuato has the higher percentage (97.4%) followed by Silao and Romita, but by volume Silao and Romita buy a greater quantity of water.

It was found that the people in Guanajuato, Romita and Silao, present a high willingness to use rainwater by installing systems in their households, and they also indicated a willingness to undertake maintenance activities. Nevertheless, financial support for RWHS installation is a point of discussion. The roles of the water management institutions and councils are not clear, which was evident in the fourth section, where it was asked who should provide the support to adapt a RWHS. Hence, information is a relevant factor to establish for the community the actors in water management at different levels and the activities and responsibilities that correspond to each one. Another important factor is the need for financial support from the government to encourage the installation of RWHS.

RWH could propitiate savings of almost the 50% of the annual water consumption, at least 33% considering the characteristics of the locations. This information can be useful to promote the use of the RWH and encourage the population and the water authorities to take advantage of this resource to complement the water endowment and low the pressure over the groundwater in the area and propitiate the recovery of this source.

Conclusions

A strong determinant factor for RWH use is its cost, and specifically the investment needed to install and operate the systems. Thus, financial support from governmental institutions turns out to be one of the main factors to encourage respondents to implement a RWHS but, at the same time, where this support should come from was not identified. The information relating to water management is an important point to foster sustainable practices of use and management of this resource. Making available information about the management of water to different levels of community is an important factor to advance in this topic.

According to the results obtained from the questionnaires applied, rainwater is a source that the population in Guanajuato, Romita, and Silao are willing to use (91.5%); and the respondents show a high willingness to install and maintain a RWHS. Dwellings have the necessary characteristics for RWH and common activities conducted on rooftops, and rooftop materials are not an impediment. Water uses with less human contact such as domestic cleaning, watering gardens, and car washing are the most likely uses of rainwater in the locations of interest according to the level of acceptance of respondents.

The overview of the current water perception in the study locations is useful to encourage the use of rainwater as an alternative water supply and obtain the basis to generate water management strategies according the particular characteristics of each place.

Acknowledgements

The research was funded by the Faculty Improvement Program of the Secretary of Public Education of Mexico (project “Development of strategies for the use of rainwater as an alternative of supply in the area of the aquifer Silao-Romita, State of Guanajuato”). The authors thank the Research Support and Postgraduate Direction of the University of Guanajuato for the English revision.

References

- Abdulla FA, Al-Shareef A (2006) *Assessment of rainwater roof harvesting systems for household water supply in Jordan*. Integrated Urban Resources Management. Nato Security through Science Series, Springer Netherlands, pp 291-300.
- Abdulla FA, Al-Shareef A (2009) Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination* 243: 195–207.

Barthwal S, Chandola-Barthwal S, Goyal H, Nirmani B, Awasthi B (2013) Socio-economic acceptance of rooftop rainwater harvesting – A case study. *Urban Water J.* 11(3): 231-239.

Cerca-Martínez LM, Aguirre-Díaz GJ, López-Martínez M (2000) The Geologic Evolution of the Southern Sierra de Guanajuato, Mexico: A Documented Example of the Transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Int Geol Rev.* 42(2): 131-151.

Chiu YR, Liaw ChH, Hu ChY, Tsai YL, Chang HH (2009) Applying GIS-based rainwater harvesting design system in the water energy conservation scheme for large cities. *Computer Supported Cooperative Work in Design, 2009. CSCWD 2009. 13th International Conference*; 722-727.

CONAGUA, (2009) *Semblanza Histórica del Agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. D.F., México, 82pp.

CONAGUA, (2015) Normales climatológicas por estación. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75 Con. (10/02/2015).

Domènech L, Saurí D (2010) Socio-technical transitions in water scarcity contexts: Public acceptance of greywater reuse technologies in the Metropolitan Area of Barcelona. *Resour Conserv Recy.*

Farreny R, Morales-Pinzón T, Guisasaola A, Tayà C, Rieradevall J, Gabarrell X (2011) Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Res.* 45: 3245-3254.

Foster S, Garduño H (2009) Gestión apropiada el recurso hídrico subterráneo en América Latina. Lecciones de experiencias internacionales. *Revista Aqua-LAC* 1, 5-17.

Ghisi E, Tavares DF, Rocha VL (2009) Rainwater harvesting in petrol stations in Brasília: Potential for potable water savings and investment feasibility analysis. *Resour Conserv Recy.* 54: 79–85.

Ghisi E (2006) Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. *Build Environ.* 41(11): 1544–50.

Hartley TW (2006) Public perception and participation in water reuse. *Desalination* 187: 115–126.

Helmreich B, Horn H (2009) Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination* 248(1-3): 118–124.

Herrmann T, Schmida U (1999) Rainwater utilisation in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water* 1: 307-316.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2000) *Censo General de Población y Vivienda* 2000. In:
<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/cpv2000/default.aspx>

Mankad A, Tapsuwan S (2011) Review of socio-economic drivers of community acceptance and adoption of decentralised water systems. *J Environ Manage.* 92: 380-391.

Marks JS (2006) Taking the public seriously: the case of potable and non potable reuse. *Desalination* 187: 137–147.

Miranda-Avilés R, Puy-Alquiza MJ, Caudillo-González M (2009) Evidencias estratigráficas y geoquímicas de la variación temporal de sedimentos naturales y antropogénicos en la planicie aluvial del río Guanajuato. *Rev Mex Cienc Geol.* 26(3): 564-574.

Parsons D, Goodhew S, Fewkes A, De Wilde P (2010) The perceived barriers to the inclusion of rainwater harvesting systems by UK house building companies. *Urban Water J.* 7: 257-265.

Valles Septién JM, Torres Martínez G, Ojeda Flon LM (1983, Eds.) *El Agua en la Ciudad de Guanajuato, Problema de Siglos*. Secretaría de Programación. Gobierno del Estado de Guanajuato. Mexico 84 pp.

Ward S, Butler D, Memon F (2008) A pilot study into attitudes towards and perceptions of rainwater harvesting in the UK. *BHS 10th National Hydrology Symposium*, Exeter. 7pp.

Ward S, Barr S, Memon F, Butler D (2012) Rainwater harvesting in the UK: exploring water user perceptions. *Urban Water Journal*. 10(2): 112-126.

White I (2010) Rainwater harvesting: theorising and modelling issues that influence household adoption. *Water Sci Technol*. 62(2): 370-377.

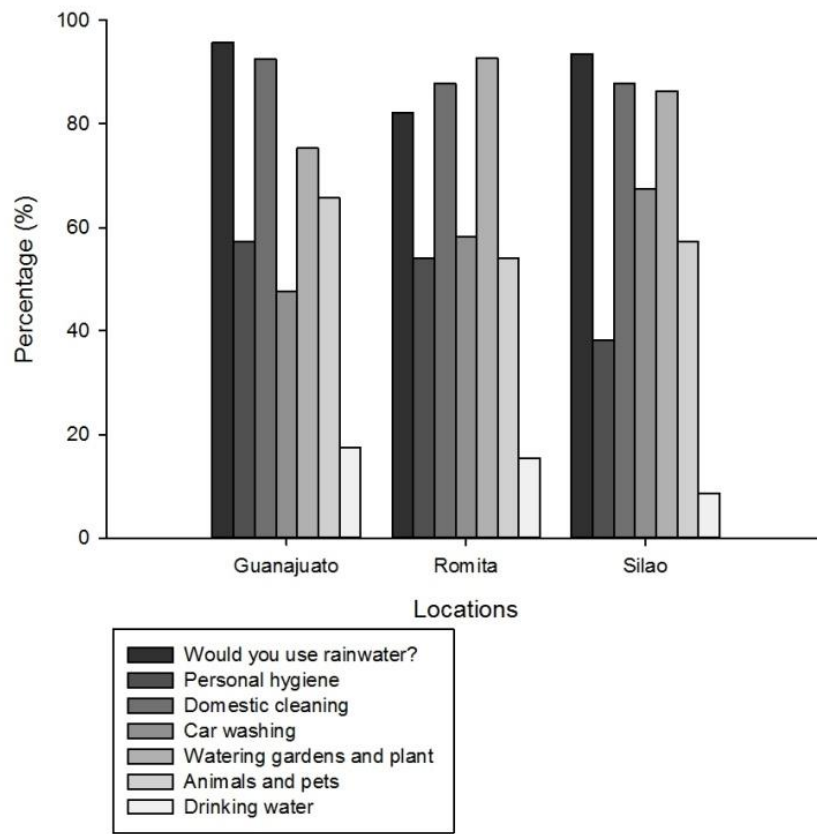


Figure 1. Percentage of respondents willing to utilize rainwater per use.

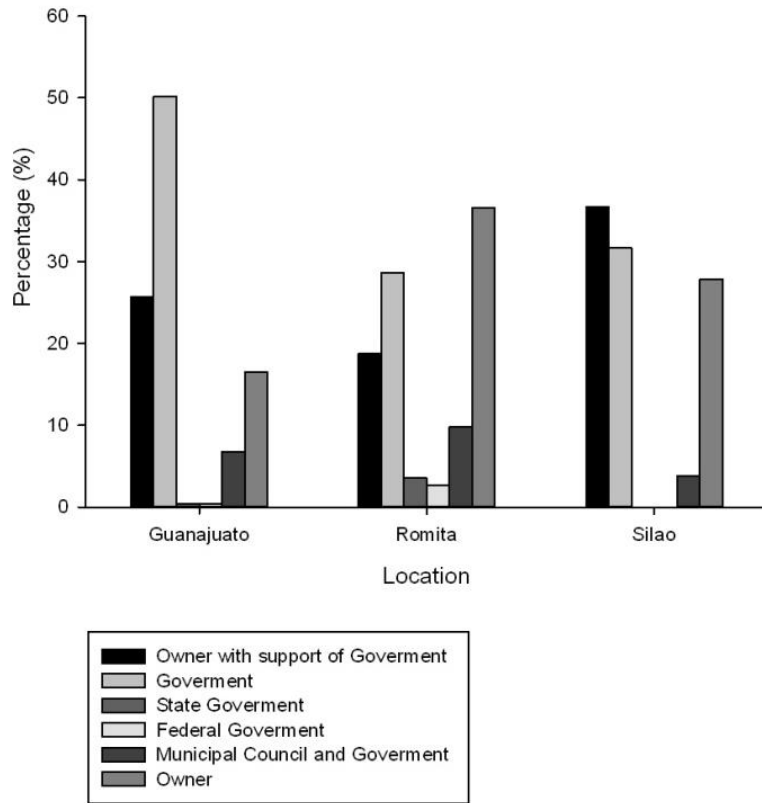


Figure 2. Actors that according to the respondents should participate in the investment of RWHS.

TABLE I

COMPONENTS OF THE SECTION 2 TO 5 OF THE APPLIED QUESTIONNAIRE

Water uses

Do you use the water for...?

Personal Hygiene

Domestic cleaning

Car washing

Watering gardens and plants

Centralized water quality

Do you drink tap water?

Have you identified some odor or color in piped water?

How many bottle water do you buy per month?

Rainwater use

Would you use rainwater for....?

Personal Hygiene

Domestic cleaning

Car washing

Watering gardens and plant

Supplying animals and pets

Drinking water

Drinking water if is treated before

RWHS

Would you install a RWHS in your house?

Would you maintain it in good conditions?

Would you provide economic resources for a RWHS?

Who should provide the economic resources for the installation?

What for do you utilize the roof of your house?

Is the roof of your house in good conditions?

TABLE II

CALCULATION OF DAILY WATER per capita CONSUMPTION BASED ON PAYMENT TO

CENTRALIZED WATER DISTRIBUTOR

Locality	Payment (US\$/month)	Volume (m ³ /month)	Consumption (liter/person/day)
Guanajuato	15.1	12	97.56
Romita	10.1	10	68.03
Silao	24.6	16	115.94

TABLE III

POTENTIAL OF RAINWATER USE IN THREE CITIES OF GUANAJUATO STATE

Locality	P (mm)	V (m ³)	C %
Guanajuato	732.8	52.18	36.2
Romita	669	57.05	47.5
Silao	618.2	64.84	33.8

“Identificación del potencial de captación del agua de lluvia en tres localidades de Guanajuato”

María Lina Fuentes-Galván (1), Xitlali Delgado-Galván (2), Hilario Charcas Salazar (3), Jesús Mora-Rodríguez (4), Gilberto Carreño-Aguilera (5)

(1), (3) Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Manuel Nava 201, San Luis Potosí, 78210, México, fugalina@gmail.com; hilario@uaslp.mx

(2), (4), (5) Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías campus Guanajuato, Av. Juárez 77, Centro, Guanajuato, 36000. México, (2) xdelgado@ugto.mx, (4) jesusmora@ugto.mx, (5) gcarreno@ugto.mx.

RESUMEN. Identificar el potencial de captación del agua de lluvia de acuerdo a las características sociales, ambientales y físicas de una zona, permite promover el uso de esta fuente como alternativa de abastecimiento. En este trabajo se estima el potencial de captación de los techos de las viviendas en las zonas urbanas de Guanajuato, Romita y Silao. Considerando la aceptación hacia este recurso, la precipitación probable, las características de las viviendas y las demandas de agua. Como resultado se obtiene que el potencial de captación durante la temporada de lluvias en las tres zonas urbanas es alto, particularmente para los meses de junio a agosto, cuando la cantidad de lluvia puede abastecer el total de los consumos no potables. El riego de plantas y jardines y el lavado de autos son los usos con mayor potencial de cobertura. Silao es el área con mayor potencial de captación seguido por Romita.

ABSTRACT. Identifying the rainwater harvesting potential taking into account social, environmental and physics characteristics allows the promotion of the use of the rainwater as an alternative water supply. The potential of the roof rainwater harvesting is estimated for the urban areas of Guanajuato, Romita and Silao. The acceptance, the probable precipitation, the characteristics of dwellings and the water demands were considered in the process. Thus, was obtained a high potential of harvesting during the rainy season for the three areas, in particular for June to August, when the quantity of precipitation can supply the total non-potable water consumption. The watering of plants and gardens and the car washing are the uses with the higher potential of supply. Silao is the area with the higher harvesting potential followed by Romita.

Palabras clave: captación de agua de lluvia, potencial, aceptación, usos.

Key words: rainfall harvesting, potential, acceptance, uses.

INTRODUCCIÓN

La tarea de identificar el potencial de captación del agua de lluvia según los principales usos a los cuales pueda ser destinada, las características socioeconómicas de la población, la cantidad de precipitación en la zona y las características físicas del medio se ha llevado a cabo alrededor del mundo con la finalidad de proporcionar alternativas y soporte en el manejo del agua, principalmente en zonas con escasez, sequías y servicios de abastecimiento deficientes o inexistentes. De este modo, el potencial de captación para diferentes países ha sido estimando, mediante diversos métodos, para diferentes países de África, Arabia Saudita, India, Egipto, entre otros (Mahmoud & Alazba, 2014; Kumar, Agarwal & Bali, 2008; Yousif & Bubenzer, 2015).

Las diferentes actividades para la identificación del potencial de captación del agua de lluvia se han considerado base en la toma de decisiones, pues al incluir los aspectos relacionados para zonas específicas se limita la posibilidad de fallo al promover el uso del agua de lluvia como fuente de abastecimiento.

En este trabajo se estudia el potencial de captación del agua de lluvia en los techos de las viviendas de las zonas urbanas de Guanajuato, Romita y Silao. Considerando la aceptación hacia este recurso, la precipitación probable que puede ocurrir en los puntos de interés, las características de las viviendas y las demandas de agua. El potencial que la captación del agua de lluvia presenta en la zona constituye un gran aporte en su promoción, generando fundamentos para impulsar la utilización de un recurso que no es aprovechado en el área.

Captación del agua de lluvia

La captación del agua de lluvia es una tecnología usada para recolectar y almacenar el escurrimiento producido por la lluvia en techos, rocas, vialidades, y otras superficies (Abdulla & Al-Shareef, 2009; Helmreich & Horn, 2009). Cada sistema se conforma de una superficie de captación preferentemente impermeable, sistemas de distribución para transportar el agua de la superficie de captación hacia tanques de almacenamiento y la estructura para almacenar (Sturm, Zimmermann, Schütz, Urbana, & Hartung, 2009).

Con el incremento en la demanda de agua debido a diferentes necesidades de abastecimiento, la captación de agua de lluvia se ha convertido en una forma importante para optimizar el uso de los recursos hídricos y promover el desarrollo sostenible (Ghisi, Tavares & Rocha, 2009). Así como, una forma de obtener ahorros económicos y en la extracción del recurso, mejorar la productividad agrícola, recargar acuíferos y controlar procesos erosivos e inundaciones (Ajaykumar, Sanjay, Nagesh, Pawar & Sankhua, 2012; Aladenola & Adeboye, 2010; Basinger, Montalto & Lall, 2010; Abdulla & Al-Shareef, 2009; Sazakli, Alexopoulos & Leotsinidis, 2007). Asimismo, en ciertas zonas la captación del agua de lluvia se vuelve imprescindible para satisfacer la insuficiencia en el suministro de agua para diferentes fines (Mahmoud & Alazba, 2014; Ajaykumar *et al.*, 2012).

Los sistemas de captación del agua de lluvia pueden ser encontrados en diferentes regiones, con adaptaciones adecuadas a las condiciones climáticas locales (Amin & Alazba, 2011). Actualmente, la captación del agua de lluvia se promueve gubernamentalmente como una

alternativa para evitar las condiciones de sequías severas y como una fuente de abastecimiento en zonas como Arabia Saudita, Australia y África (Mahmoud & Alazba, 2014; Khastagir & Jayasuriya, 2010; Mati *et al.*, 2006).

La captación del agua de lluvia en techos es una de las formas más sencillas para proporcionar agua a nivel doméstico, ya que es un proceso *in situ* y su operación depende generalmente de los usuarios. La aceptación y disposición a utilizar el agua de lluvia ha incrementado, inclusive en zonas en donde el abastecimiento es suficiente para cubrir con las demandas diarias (Khastagir & Jayasuriya, 2010). Particularmente, para las zonas de interés la aceptación para instalar y mantener en buenas condiciones un sistema de captación es muy alta (Fuentes-Galván *et al.*, 2015), lo cual debe ser considerado con la finalidad de fomentar el uso de este recurso.

Área de estudio

El estado de Guanajuato se localiza en el centro de la República Mexicana, representa el 1.6% de la superficie del país con un área de 30,589 km² y se conforma por 46 municipios. El acuífero Silao-Romita se localiza en el centro del estado, y es una sub-área de la cuenca del Río Guanajuato, el límite del acuífero es igual al de la cuenca superficial (Horst, Mahlkecht & Merkel, 2007). De tal forma, que según su disposición geográfica, las áreas urbanas de los municipios de Guanajuato, Romita y Silao son abastecidas por este acuífero.

El abastecimiento de agua en esta región, se ha efectuado a través de la extracción de agua subterránea desde hace más de 70 años, principalmente para impulsar las actividades agrícolas en la zona. El aumento en el riego mediante aguas subterráneas ha causado el agotamiento de dicho recurso (Wester, Sandoval & Hoogesteger, 2011) y actualmente, el acuífero Silao-Romita es uno de los 14 acuíferos sobreexplotados del estado (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2014; Horst, Mahlkecht & Merkel, 2007). Según la Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Guanajuato (CEASG, 1998), aproximadamente 2000 pozos se encuentran en la zona, y son utilizados con fines de riego (87%), consumo doméstico (11%) y un pequeño porcentaje para industria y ganadería. En cuanto al nivel del acuífero, este ha decrecido anualmente de 2-4 m y se presenta un déficit de aproximadamente 33×10⁶ m³/año (CEASG, 1998).

Tabla 1. Características de las localidades de estudio.

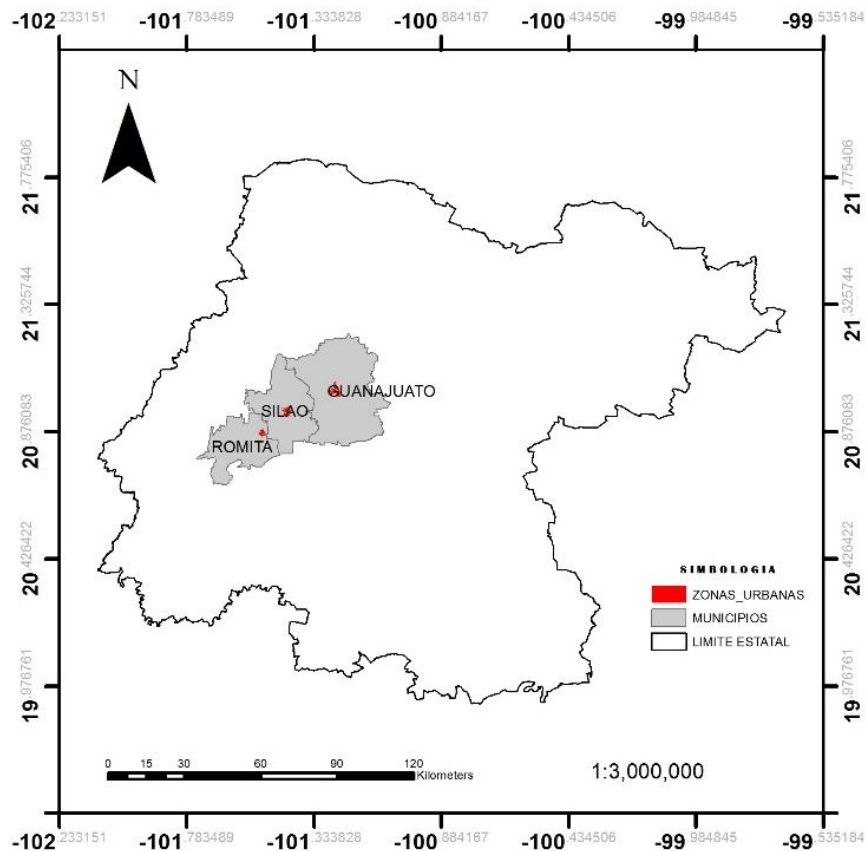
Uso	Guanajuato	Romita	Silao
Ámbito	Urbano	Urbano	Urbano
Longitud	21°1'N	20°52'N	20°56'N
Latitud	101°15'W	101°31'W	101°26'W
Altitud (msnm)	2,054	1,757	1,780
Población (hab)	72,237	21,176	74,242

Cobertura de agua entubada	98%	94%	90%
----------------------------	-----	-----	-----

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015).

Dentro de esta zona, se consideran las áreas urbanas de los municipios de Guanajuato, Romita y Silao como las localidades de interés en este artículo. Sus características se presentan en la Tabla 1, y su localización en la Figura 1.

Figura 1. Ubicación de las zonas de estudio.



Fuente: Fuentes-Galván, M. L.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se estima el potencial de captación para la zona tomando en cuenta la aceptación hacia este recurso, la precipitación probable que puede ocurrir en los puntos de interés, las características de las viviendas y el consumo de agua.

Se considera la aceptación hacia el uso del agua de lluvia de los resultados obtenidos en Fuentes-Galván *et al.* (2015), con la finalidad de incorporar las preferencias y disposición de la

comunidad para usar la precipitación como fuente de abastecimiento. En la Tabla 2 se puede observar el nivel de aceptación hacia el agua de lluvia para diferentes usos, de éstos, los de mayor aceptación son la limpieza doméstica y el riego de plantas y jardines. Beber el agua de lluvia es el uso con menor aprobación por lo cual, no será considerado como una alternativa en el aprovechamiento de este recurso.

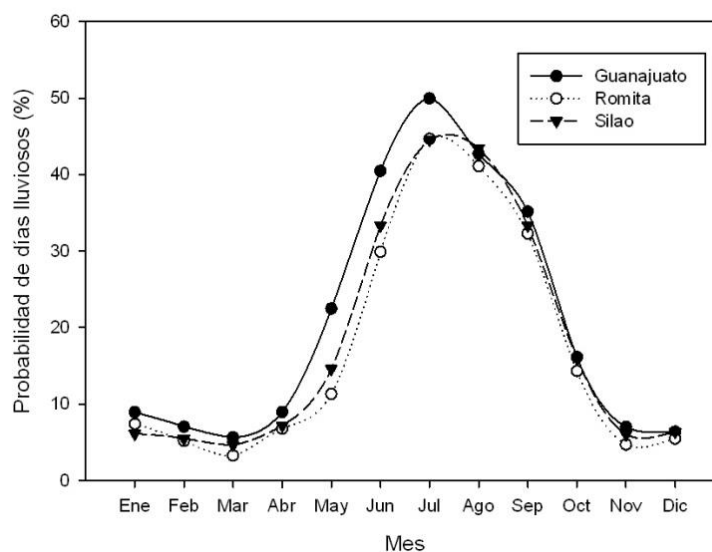
Tabla 2. Aceptación hacia el agua de lluvia según su uso.

Uso	Guanajuato	Romita	Silao
Aseo personal	57 %	54 %	38 %
Limpieza doméstica	92 %	88 %	88 %
Lavado de auto	48 %	58 %	67 %
Riego de plantas y jardines	75 %	93 %	86 %
Beber	18 %	15 %	9 %

Fuente: Fuentes-Galván *et al.*, 2015.

Los meses con mayor probabilidad de ocurrencia de días con lluvia son julio y agosto como se puede ver en la Figura 2. Guanajuato presenta mayor probabilidad de días lluviosos al inicio de la temporada que Romita y Silao, sin embargo, al término de la misma el comportamiento es similar en los tres puntos. De acuerdo a estas probabilidades, se considerara una temporada propicia para la captación de junio a septiembre.

Figura 2. Probabilidad de ocurrencia de días con lluvia.



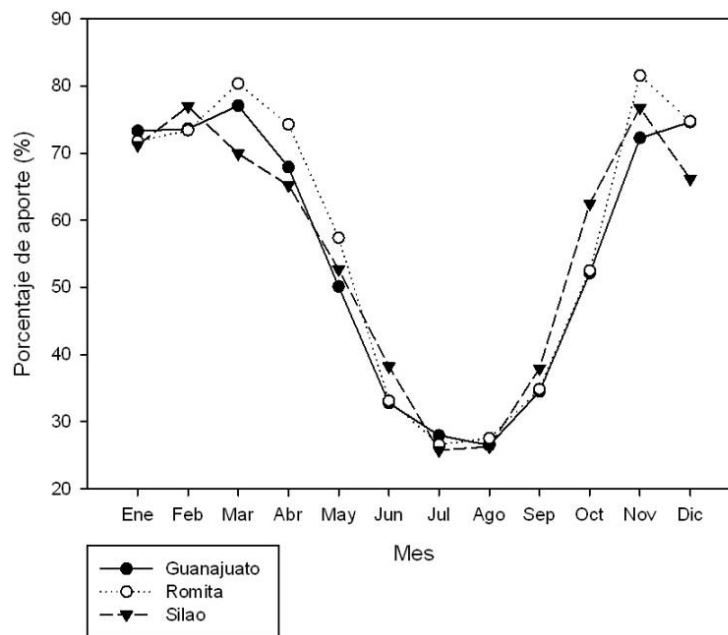
Fuente: Fuentes-Galván M.L.

En el diseño hidrológico de la infraestructura hidráulica es fundamental la relación gasto máximo período de retorno, la cual se establece a través de análisis probabilístico (Campos, 2008). De esta forma, con el fin de realizar una estimación confiable del volumen máximo de captación y considerando los fines domésticos propuestos, se empleó información de precipitación proveniente de las estaciones localizadas en los puntos de estudio para un periodo de 30 años, ajustada a diferentes periodos de retorno (Tr).

El periodo de retorno se define como al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada, el período de retorno para el que se debe dimensionar una obra varía en función de la importancia de la misma (interés económico, socio-económico, estratégico, turístico, etc.) (Martínez, Fernández & Salas, 2010). Tomando en cuenta el nivel de captación considerado en el presente, los periodos de retorno utilizados son de 1.052, 1.1, 1.25, 1.5 y 2.0 años.

En este trabajo son consideradas las precipitaciones medias mensuales, máximas diarias y medias diarias. En la Figura 3 puede observarse el aporte promedio que las precipitaciones máximas realizan en la precipitación mensual. De junio a septiembre los porcentajes de aporte se reducen, debido al incremento en los días con lluvias, sin embargo, para los meses de octubre a abril, las lluvias máximas diarias aportan altos porcentajes a la precipitación mensual, presentándose repetidamente años en los que la precipitación máxima diaria aporta la totalidad de la precipitación que ocurre durante estos meses.

Figura 3. Porcentaje de aporte de la precipitación máxima diaria en la precipitación mensual.



Fuente: Fuentes-Galván M.L.

Para calcular el volumen potencial que es posible obtener en los techos de las zonas de estudio se empleó el método racional (ecuación 1), el cual ha sido empleado en diversos trabajos para la estimación del escurrimiento en techos considerando su área (Mahmoud, Elagib, Gaese &

Heinrich, 2014). En donde Q (m^3/s) es el caudal producido por una lluvia de intensidad i (mm/hr) sobre un área de drenaje A (m^2) con un coeficiente de escurrimiento C .

$$Q = C * i * A \quad (1)$$

El tamaño de la superficie de captación es un factor que repercute en la cantidad de agua de lluvia que es posible aprovechar. Se han considerado las áreas promedio de los techos de los puntos de estudio como superficies de captación (Tabla 3), así como, diversas áreas que pudieran presentarse en la zona, considerando algunas características establecidas por los reglamentos oficiales. El coeficiente de escurrimiento es un factor relacionado con el material sobre el cual la lluvia ocurre, considerando la proporción de la lluvia que efectivamente fluye sobre la superficie. Estimaciones consideran que los coeficientes de escurrimiento de techos se encuentran dentro del rango de 0.7-0.95 (Farreny *et al.*, 2011). Para las tres zonas de estudio el material de techos más empleado es el concreto impermeabilizado (INEGI, 2000), por lo que, el coeficiente de escurrimiento utilizado es de 0.8.

Tabla 3. Área de techos.

Uso	Guanajuato	Romita	Silao
Área promedio de techos	89 m ²	106.6 m ²	131.1 m ²

Fuente: Fuentes-Galván *et al.*, 2015.

Con la finalidad de obtener el volumen medio diario V (m^3) que puede cosecharse en los techos de las viviendas de las áreas urbanas de interés, se realiza una estimación de esta variable, considerando el área de la superficie A (m^2), la precipitación media diaria P (mm) y el coeficiente de escurrimiento C (adimensional) mediante la ecuación 2 (Ghisi, 2006; Abdulla and Al-Shareef, 2009; Farreny *et al.*, 2011).

$$V = \frac{P * C * A}{1000} \quad (2)$$

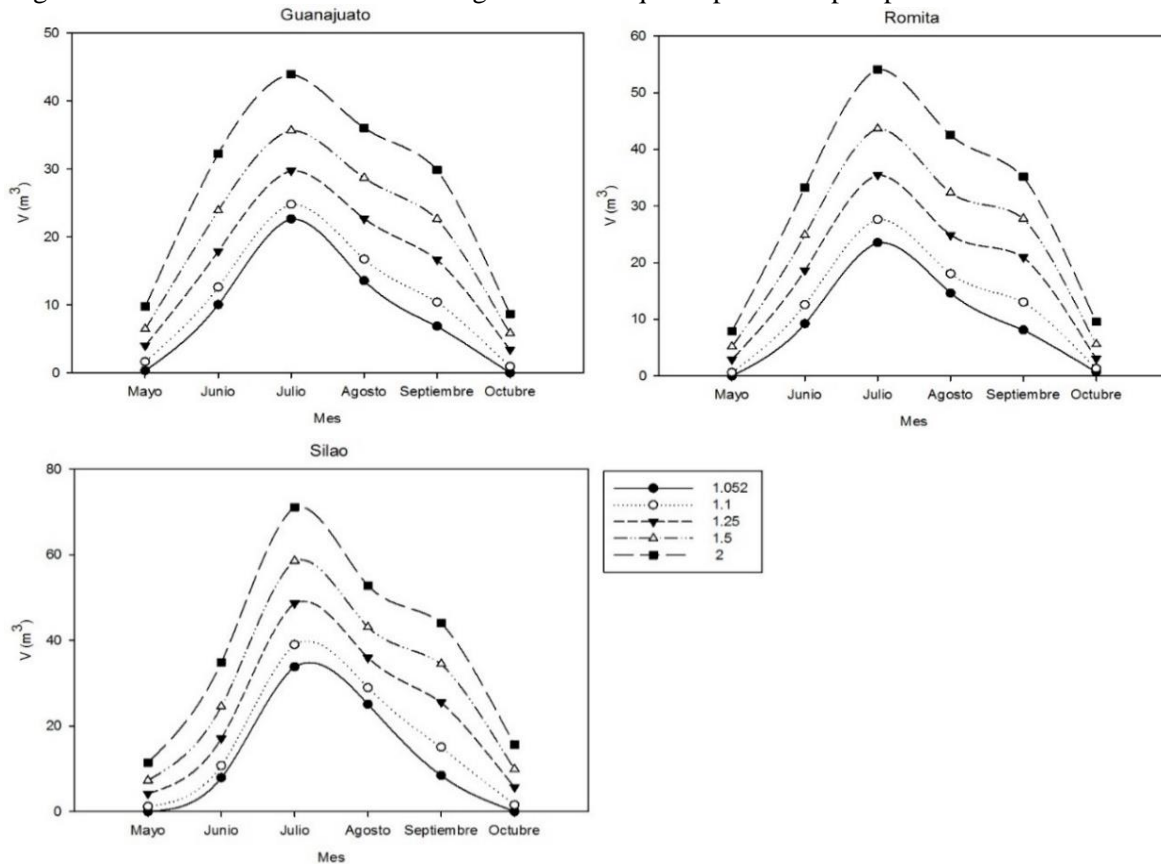
RESULTADOS

Volumen medio mensual

Se emplearon las precipitaciones medias mensuales ajustadas a los periodos de retorno establecidos para estimar el volumen medio probable para cada mes de la temporada lluviosa. En la Figura 4 se observa el volumen potencial mensual que es posible captar en las áreas promedio de los techos en las zonas urbanas de interés. En la zona de Silao se obtienen los

volúmenes más altos para todos los periodos de retorno, teniendo como máximo 71.1 m³ para el mayor periodo de retorno establecido.

Figura 4. Volumen medio mensual de agua de lluvia que es posible captar para cada zona de estudio.



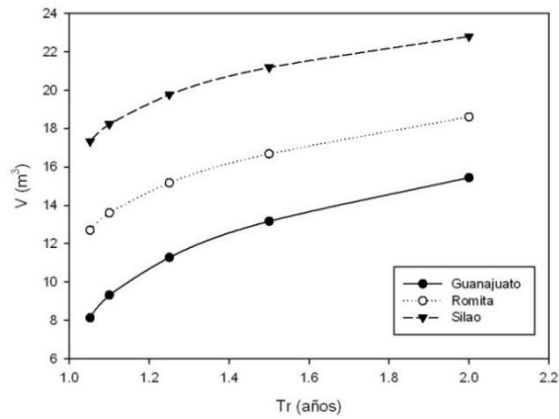
Fuente: Fuentes-Galván M.L.

Tomando en cuenta el mínimo periodo de retorno utilizado, el volumen medio mensual más alto que es posible obtener es de 33.8 m³ para la zona de Silao, 23.5 m³ en Romita y 22.7 m³ en Guanajuato. Los volúmenes más altos se presentan en el mes de julio para las tres zonas. La precipitación media que ocurre durante los meses de mayo y octubre para 1.052 años genera para cada zona, volúmenes menores a 0.7 m³, siendo así, los meses con menor potencial de captación.

Volumen máximo diario

Los volúmenes obtenidos de los gastos máximos estimados mediante el método racional se presentan en la Figura 5, considerando las áreas promedio de las viviendas, y la precipitación máxima diaria ajustada a los periodos de retorno establecidos. En la Figura 5, se observa que las lluvias máximas diarias anuales pueden generar de 8 hasta 22 m³, en las superficies de los techos, Guanajuato es la zona que presenta el menor potencial en cuanto al volumen que es posible captar.

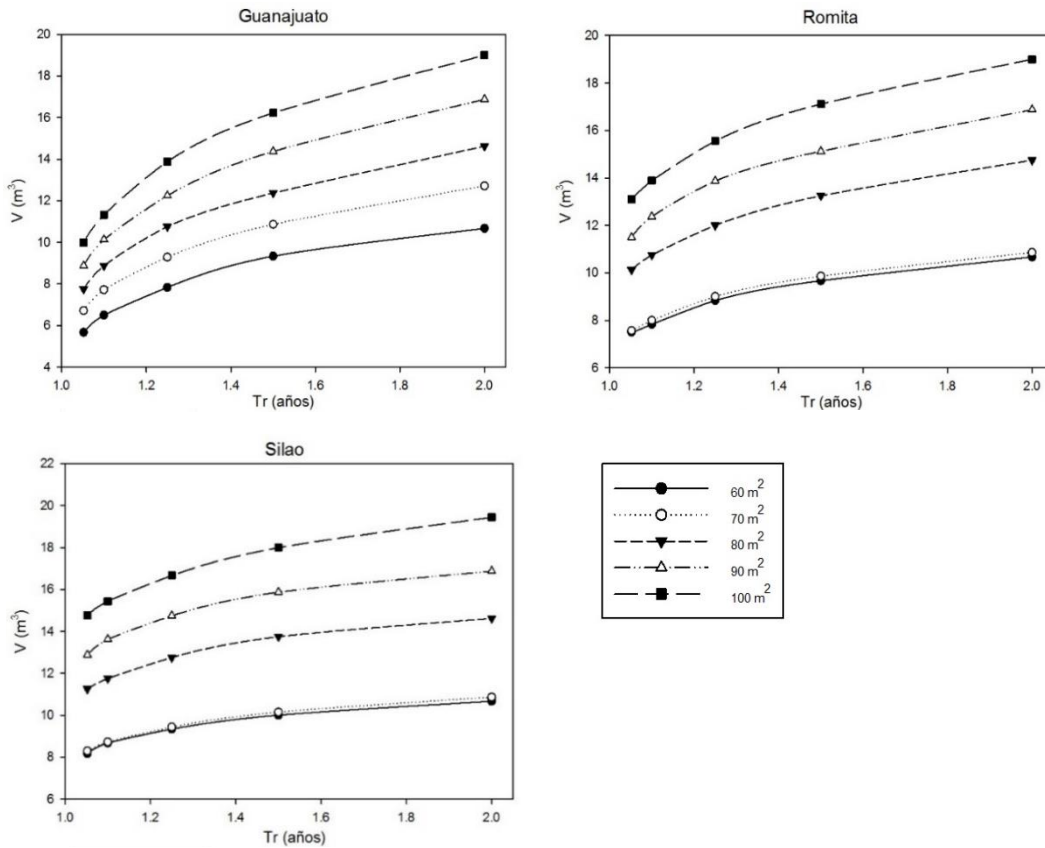
Figura 5. Volumen máximo para las zonas de estudio.



Fuente: Fuentes-Galván M.L.

En la Figura 6, se observan los volúmenes máximos para diferentes superficies, considerando el promedio de estos para diferentes longitudes de techo. Romita y Silao muestran los mayores volúmenes, sin embargo, se observa la influencia que el área de captación y sus características generan en el escurrimiento en techos de 60 y 70 m².

Figura 6. Volumen máximo para diferentes áreas techos.

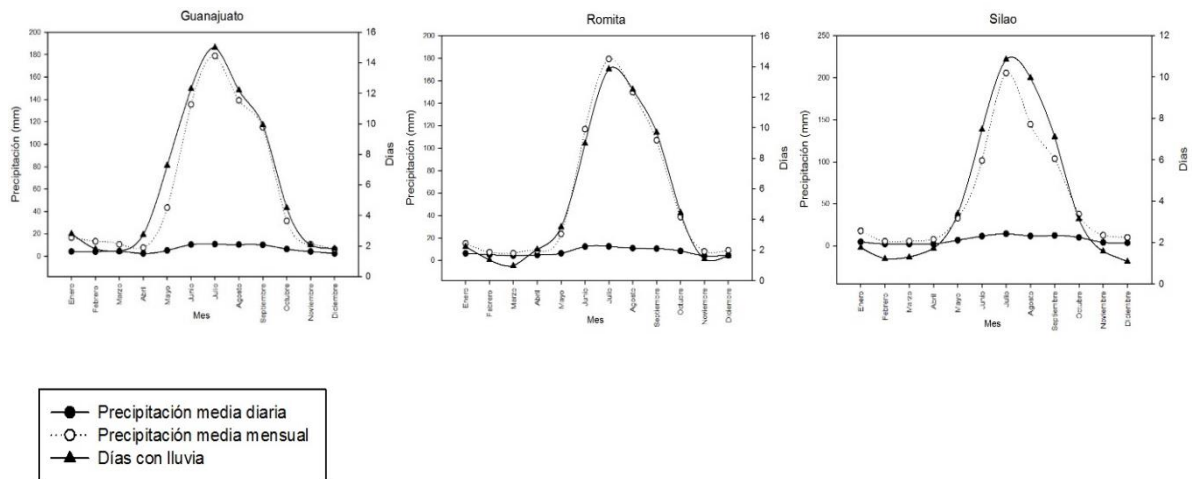


Fuente: Fuentes-Galván M.L.

Volumen medio diario

Considerando el número de días lluviosos y la precipitación media mensual se obtuvo la precipitación media diaria para las zonas de estudio. En la Figura 7 se presentan los valores de precipitación media diaria, la precipitación media mensual y los días con lluvia registrados en las estaciones localizadas en los puntos de estudio.

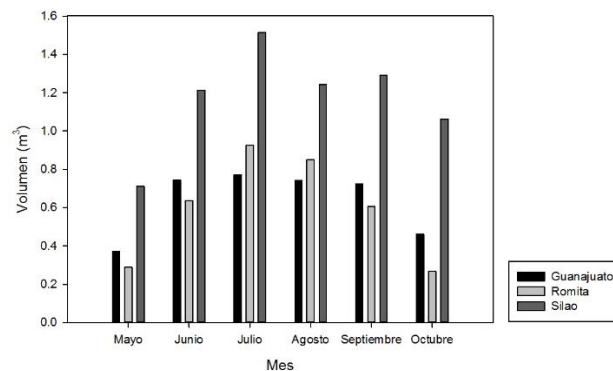
Figura 7. Precipitación media diaria, precipitación media mensual y días con lluvia.



Fuente: Fuentes-Galván M.L.

Considerando la lluvia media diaria y las áreas promedio de los techos, es posible obtener volúmenes mínimos de 0.3 m^3 (Romita) a 0.7 m^3 (Silao), durante los meses de la temporada de lluvias. En Silao, se estiman los volúmenes diarios más altos de captación, llegando hasta 1.5 m^3 , se debe considerar que el área media de los techos es mayor en esta área. En Guanajuato y Romita se obtienen los valores más bajos, sin embargo, Guanajuato presenta la mayor ocurrencia de días con lluvia (61.2 días para toda la temporada lluviosa), Silao y Romita registran precipitaciones más altas y menor cantidad de días con lluvia. En la Figura 8, se muestran los valores de volumen medio diario que para las zonas de interés se pueden captar.

Figura 8. Volumen medio diario para las zonas de estudio.



Fuente: Fuentes-Galván M.L.

Potencial de cobertura del consumo de agua utilizando agua de lluvia

Se consideran los volúmenes medios mensuales ($Tr = 1.052$ años) y los volúmenes diarios para estimar la capacidad del agua de lluvia para cubrir los consumos en las zonas de interés. En la Tabla 4, se presentan los consumos registrados en cada área de estudio, para obtener el consumo diario por uso, se considera que el 30% del consumo total se utiliza en el baño (ducha), el 40% en el WC, 15% se destina al lavado de ropa, 4% al riego de plantas y jardines, y el 2% al lavado de auto.

Tabla 4. Consumos de agua por localidad.

Uso	Guanajuato	Romita	Silao
Consumo (litros/persona/día)	86.48	109	93.73
Habitantes por vivienda	4.2	4.5	4.7

Fuente: Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [PIGOO], 2015; INEGI, 2015.

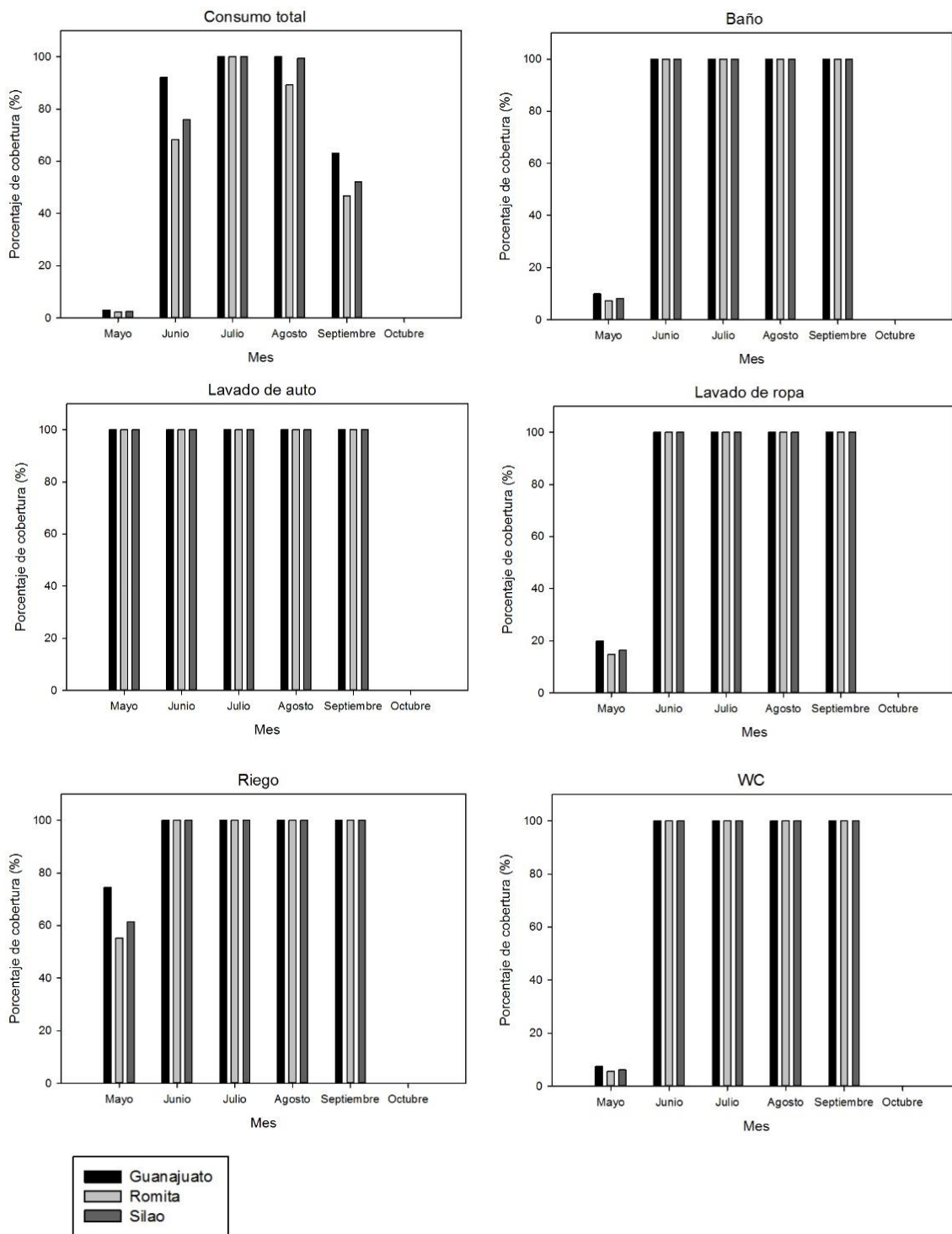
Los volúmenes mínimos que se estiman para el periodo de retorno de 1.052 años son de 0.3 m^3 en mayo y 0 m^3 en octubre. En la zona de Guanajuato, en el mes de julio se obtiene el volumen más alto de captación, y con este es posible cubrir la totalidad de los consumos, al igual que en agosto. En Romita y Silao, el consumo mensual podría cubrirse en su totalidad en el mes de julio. En la Figura 9, se presenta el porcentaje del consumo que es posible abastecer con agua de lluvia para los meses de la temporada lluviosa. De estos meses se recomienda contemplar de junio a septiembre como los meses propicios para la captación del agua de lluvia de acuerdo a la probabilidad de que ocurran días con lluvia y tomando en cuenta la cantidad de agua que es posible recolectar.

El lavado de auto es el uso que podría abastecerse en su totalidad para toda la temporada de lluvias en las tres zonas. El consumo destinado al baño, WC, lavado de ropa, riego y lavado de auto se puede cubrir totalmente con el agua de lluvia para los meses de junio a septiembre para las tres áreas. Considerando el volumen total de consumo en una vivienda, solo en el mes de julio es posible cubrir la totalidad del consumo.

Las precipitaciones medias diarias generan valores de volumen que pueden cubrir completamente con los consumos diarios totales en las tres zonas de estudio durante la temporada de lluvia. Sin embargo, los días con lluvias se presentan en menos de la mitad de los días de julio, el mes con mayor cantidad de eventos lluviosos. Durante los meses de junio y agosto, la cantidad de días con lluvia permite que el aprovechamiento del recurso se realice en aproximadamente diez días para las tres zonas. Los días en los que puede cubrirse con una lluvia media el consumo de agua diario se presentan en la Tabla 5. En donde se observa que el lavado de autos, es el uso con mayor potencial de cobertura junto con el riego, debido a que la

cantidad de agua requerida para la realización de estas actividades es menor a la de los otros usos establecidos, el lavado de ropa puede ser cubierto en una cantidad considerable de días.

Figura 9. Porcentaje del consumo que se pudo cubrir con agua de lluvia.



Fuente: Fuentes-Galván M.L.

Tabla 5. Días en los que se puede cubrir la demanda de agua según su uso con la precipitación media diaria.

Uso	Consumo total	Ducha	WC	Lavado de ropa	Riego	Lavado de auto
Mes	Días	Días	Días	Días	Días	Días
Guanajuato						
Mayo	1	3	1	6	25	51
Junio	2	6	2	13	51	>60
Julio	2	7	2	14	53	>60
Agosto	2	6	2	13	51	>60
Septiembre	1	6	2	13	49	>60
Octubre	1	4	1	8	31	>60
Romita						
Mayo	0	1	1	3	14	29
Junio	1	4	3	8	32	>60
Julio	1	6	4	12	47	>60
Agosto	1	5	4	11	43	>60
Septiembre	1	4	3	8	30	>60
Octubre	0	1	1	3	13	27
Silao						
Mayo	1	5	4	10	40	>60
Junio	2	9	6	18	>60	>60
Julio	3	11	8	22	>60	>60
Agosto	2	9	7	18	>60	>60
Septiembre	2	9	7	19	>60	>60
Octubre	2	8	6	16	>60	>60

Fuente: Fuentes-Galván M.L.

CONCLUSIONES

El área resulta un factor determinante en el volumen potencial de captación. Para eventos máximos en Guanajuato, el volumen presenta un crecimiento lineal; para Silao y Romita se comporta de esta forma a partir de los 70 m². Se observa que como volúmenes máximos se pueden alcanzar poco menos de 20 m³, considerando las precipitaciones medias es posible alcanzar 22 m³ mensuales.

La ocurrencia de días lluviosos en Guanajuato inicia en el mes de mayo, en Silao y Romita los días con lluvias inician en junio, por lo que el mes con menor potencial de captación para estas últimas sea mayo y para Guanajuato octubre sea el mes con menor potencial de captación, tomando en cuenta la temporada de lluvias.

En cuanto al volumen potencial de captación independientemente del tipo de evento y periodo de retorno, se estima mayor en la zona urbana de Silao, seguido por Romita. Guanajuato, aunque presenta la mayor probabilidad de ocurrencia de días lluviosos, es la localidad con menor potencial de captación.

El riego de plantas y jardines y el lavado de autos son los usos con mayor potencial de cobertura, el primero presenta un alto nivel de aceptación. El aseo personal es el uso racional con menor aceptación y cobertura para las zonas de estudio. Los usos que no implican contacto humano son los más propicios para aprovechar el agua de lluvia ya sea por la aceptación de la comunidad o por el consumo que es posible cubrir con este recurso.

En un diseño conservador para garantizar un volumen medio confiable, el periodo de retorno a seleccionar será de 1.052 o 1.1 años. Tomando en cuenta estos periodos, el volumen que es posible captar se reduce para los meses de mayo, septiembre y octubre, el inicio y fin de la temporada de lluvias. Los meses de junio, julio y agosto de acuerdo a las características de precipitación, son en los que se obtendrá la mayor cantidad de agua de lluvia independientemente del nivel de confianza que se seleccione.

RECOMENDACIONES

Con base en lo anterior, los sistemas de captación del agua de lluvia a nivel doméstico en las localidades de interés, deben considerar en su diseño, lo siguiente: enfoque para usos no potables (riego, lavado de auto, lavado de ropa y WC), pues la calidad del agua para estos usos es adecuada; ubicación de instalaciones y adecuaciones en el exterior de las viviendas, con lo que se simplifica el proceso de construcción y se reduce la inversión para los usuarios; seleccionar periodos de retorno de 1.052 y 1.1 años.

Asimismo, tomando en cuenta la poca capacidad de almacenamiento del agua de lluvia en las viviendas, se recomienda utilizar otros espacios donde pueda almacenarse una mayor cantidad de precipitación.

REFERENCIAS

- Abdulla, F. A. & Al-Shareef, A.W. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243(1-3), 195-207. doi: 10.1016/j.desal.2008.05.013.
- Ajaykumar, K. K., Sanjay, S. K., Nagesh, N. P., Pawar, N. J., Sankhua, R. N. (2012) Identifying Potential Rainwater Harvesting Sites of a Semi-arid, Basaltic Region of Western India, Using SCS-CN Method. *Water Resources Management*, 26(9), 2537-2554. doi: 10.1007/s11269-012-0031-3.
- Aladenola, O. O. & Adeboye, O. B. (2009). Assessing the Potential for Rainwater Harvesting. *Water Resources Management*. 24 (10), 2129-2137. doi: 10.1007/s11269-009-9542-y
- Amin, M. T. & Alazba, A. A. (2011). Probable sources of rainwater contamination in a rainwater harvesting system and remedial options. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(12): 1054-1064, 2011.
- Basinger, M., Montalto, F., Lall, U. (2010). A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. *Journal of Hydrology* 392; 105–118
- Campos A. D. F. (2008). Estudio de la precipitación máxima diaria anual en la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), con base en Distancias Euclidianas. *Investigaciones geográficas*, (65), 56-67. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000100005&lng=es&tlng=es.
- CEASG, (1998). Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de Silao Romita, Gto. Reporte no. CEAS-APA-GTO-97-025, Lesser, Querétaro, México.
- CONAGUA, (2014). Atlas del Agua en México 2014. D.F., México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Farreny, R., Morales-Pinzón, T., Guisasola, A., Tayà, C., Rieradevall J. & Gabarrell X. (2011) Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Research*, 45, 3245-3254. doi:10.1016/j.watres.2011.03.036.
- Fuentes-Galván, M. L., Delgado-Galván, X., Charcas-Salazar, H., Mora-Rodríguez, J., Flores F. J. L. & Cardona B. A. (2015). Rooftop rainwater harvesting acceptance in three localities of Guanajuato, Central Mexico. *Interciencia*, 40(6), 403-408.
- Ghisi, E. (2006). Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. *Building and Environment*, 41(11), 1544–50.
- Ghisi, E., Tavares, D. F. & Rocha, V. L. (2009). Rainwater harvesting in petrol stations in Brasilia: Potential for potable water savings and investment feasibility analysis. *Resources, Conservation and Recycling*. 54, 79–85.
- Helmreich, B. & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248(1–3), 118-124. doi:10.1016/j.desal.2008.05.046.
- Horst, A., Mahlknecht, J. & Merkel, B. J. (2007). Estimating groundwater mixing and origin in an overexploited aquifer in Guanajuato, Mexico, using stable isotopes (strontium-87, carbon-

13, deuterium and oxygen-18). *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 43(4), 323-338. doi: 10.1080/10256010701701756

INEGI (2000) Censo General de Población y Vivienda 2000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Recuperado de: www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/cpv2000/default.aspx

INEGI (2015). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Consulta Interactiva de Datos. Recuperado de: http://www.inegi.org.mx/est/lista_cubos/

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.

Kumar, G. M., Agarwal, A. K. & Bali, R. (2008). Delineation of Potential Sites for Water Harvesting Structures using Remote Sensing and GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 36(4), 323–334. doi: 10.1007/s12524-008-0033-z

Mahmoud, H. & Alazba, A. A. (2014). The potential of in situ rainwater harvesting in arid regions: developing a methodology to identify suitable areas using GIS-based decision support system. *Arabian Journal of Geosciences*. doi: 10.1007/s12517-014-1535-3

Mahmoud, W. H., Elagib, N. A., Gaese, H., & Heinrich, J. (2014). Rainfall conditions and rainwater harvesting potential in the urban area of Khartoum, Resources, Conservation and Recycling, 91, 89-99. doi: 10.1016/j.resconrec.2014.07.014.

Martínez, M., D. Fernández, R. R. & Salas, M. (2010). Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. SAGARPA.

Mati, B., De Bock, T., Malesu, M., Khaka, E., Oduor, A., Nyabenge, M. & Oduor, V. (2006). Mapping the potentials for Rainwater Harvesting technologies in Africa: A GIS overview on development domains for the continent and ten selected countries. Technical Manual No. 6 Nairobi, Kenya: World Agroforestry Centre (ICRAF), Netherlands Ministry of Foreign Affairs.

PIGOO (2015). Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado de: <http://www.pigoo.gob.mx/>

Sazakli, E., Alexopoulos, A., Leotsinidis, M., (2007). Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece, *Water Research*. 41(9), 2039-2047. doi:10.1016/j.watres.2007.01.037.

Sturm, M., Zimmermann, M., Schütz, K., Urbana, W. & Hartung, H. (2009). Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34(13-19), 776–785. doi:10.1016/j.pce.2009.07.004.

UNESCO, 2006. Evaluación de los Recursos Hídricos. Elaboración del balance hídrico integral por cuencas hidrográficas. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°4.

Wester, P., Sandoval M. R. & Hoogesteger, J. (2011). Assessment of the development of aquifer management councils (COTAS) for sustainable groundwater management in Guanajuato, Mexico. *Hydrogeology Journal Official Journal of the International Association of Hydrogeologists* 201119:733. doi: 10.1007/s10040-011-0733-2

Yousif, M. & Bubenzer, O. (2015). Geoinformatics application for assessing the potential of rainwater harvesting in arid regions. Case study: El Daba'a area, Northwestern Coast of Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*. doi: 10.1007/s12517-015-1837-0

DISCUSIÓN GENERAL

La captación del agua de lluvia es una alternativa de abastecimiento factible para la zona de estudio, si bien, se limita a los meses de la temporada de lluvia, los beneficios que puede proporcionar son altos, en diferentes aspectos. Sin embargo, este recurso que antaño fue utilizado ampliamente en la zona, en la actualidad no recibe la atención debida para propiciar su uso nuevamente.

El abastecimiento en las zonas de interés se da principalmente mediante la extracción del agua subterránea de un acuífero en estado de déficit. Así pues, alternativas que involucren a la población en el proceso de captación para abastecer los consumos de agua, representan también una opción para introducir información no solo del ciclo hidrológico sino del manejo del recurso hídrico en diferentes niveles.

Las preferencias respecto al uso del agua de lluvia resultan relevantes al momento de establecer estrategias para fomentar y difundir este recurso como una alternativa de abastecimiento con la finalidad de obtener la aprobación de la población y garantizar su uso. Los resultados de las encuestas realizadas muestran una alta aceptación (91.5%) de la población al uso del agua de lluvia, sin embargo, lo usos con menor contacto humano son los más aceptados, entre mayor sea el contacto (agua para beber y aseo personal) la aceptación decrece.

El agua de lluvia no es aceptada como un recurso para beber por la población, sin embargo, el agua que se recibe de los sistemas de abastecimiento tampoco recibe la aceptación de la comunidad para beberla. No obstante, esta percepción respecto a la calidad del agua para beber, puede ser cambiada considerando las experiencias de comunidades en las que el agua de lluvia recibe la aceptación de la población para beberla, y profundizando en las causas que propician la actual percepción hacia las características del agua potable y su consumo.

Por otro lado, la alta aceptación que se manifiesta para utilizar el agua de lluvia para aseo doméstico, lavado de autos y riego de plantas y jardines hacen de estas actividades las ideales para dirigir las estrategias para el manejo de esta fuente y obtener las bases para la selección de los sistemas más apropiados de acuerdo a las preferencias de la población.

Las características de la precipitación en la zona muestran que es posible recolectar en los techos de las viviendas la cantidad suficiente de agua para cubrir un alto porcentaje de las demandas totales en los meses de mayor concentración de la precipitación (junio-agosto) y que los usos a los cuales debe dirigirse de forma inicial el aprovechamiento del agua de lluvia, son los usos no potables, debido a que la aceptación mencionada y considerando también el potencial de cobertura que puede obtenerse para estos fines.

Las condiciones de las zonas de estudio muestran que la captación del agua de lluvia a nivel doméstico, considerando los techos de las viviendas como superficie de captación es una alternativa complementaria de abastecimiento, tanto por la cantidad de precipitación que puede cosecharse, como por las características de las viviendas y de la población. El soporte económico necesario para instalar sistemas que permitan la colecta del agua de lluvia se reconoce como un factor de peso en la promoción del aprovechamiento de este recurso. Por ello, la creación de programas que proporcionen el apoyo técnico y económico es fundamental, además del necesario reconocimiento hacia este recurso por parte de los organismos dedicados al manejo y gestión del agua.

En lo que se refiere al potencial de captación, en la zona de Silao, el volumen que es posible cosechar es más alto que en las otras zonas de interés. Esta zona ha experimentado el crecimiento poblacional más alto de las tres zonas de estudio debido al desarrollo industrial de la región, de tal forma, que la captación del agua de lluvia puede ser una alternativa en los desarrollos habitacionales para obtener y manejar de forma directa un volumen de agua que permita abastecer ciertos fines, y considerar el proceso de captación en el diseño de las viviendas y edificios.

Se observa la influencia del tamaño del área de captación en el volumen que es posible coleccionar, contemplando exclusivamente los techos de las viviendas, se estiman volúmenes de agua que pueden complementar el abastecimiento actual, pero si el tamaño de las áreas de captación incrementa el volumen potencial de ser recolectado también. De forma, que la captación de agua de lluvia representan una fuente importante de agua en zonas con superficies mayores para recolectar el escurrimiento de la precipitación, como industrias, vialidades, estacionamientos, etc.

Como forma introductoria, la captación del agua de lluvia puede responder a las necesidades de agua para usos no potables, y con esto se facilita su aprovechamiento, pues la calidad del agua coleccionada no presenta una restricción y las estructuras de aprovechamiento se simplifican. No obstante, el potencial de captación en las zonas es alto, y en condiciones favorables pueden obtenerse volúmenes que cubran totalmente con las demandas de los meses más lluviosos, sin embargo, a nivel doméstico, las estructuras de almacenamiento representan una limitante, ya sea por el espacio requerido o por la capacidad de almacenamiento, sin embargo, considerando los resultados obtenidos la captación del agua de lluvia puede extenderse para su aprovechamiento a mayores escalas, por ejemplo el uso industrial, agrícola o comunitario. En donde las restricciones de almacenamiento sean superadas y se maximice el uso de este recurso.

Tomando en cuenta que el agua de lluvia además de proporcionar una alternativa para abastecimiento de usos no potables, puede ser una alternativa para proporcionar agua para consumo humano considerando su calidad, la cual depende de diversos factores, como las características fisiográficas de la región donde se precipite, las actividades humanas que se desarrollen, los materiales de los componentes de los sistemas de captación, el manejo de los mismos, entre otros. Sin embargo, suele presentar una buena calidad, en muchas ocasiones con menor cantidad de elementos objetables que la de las fuentes subterráneas y superficiales. Así pues, para que el agua de lluvia se destine al consumo humano el diseño y el manejo de los sistemas de captación de este recurso debe ser cuidadoso. Ya que estos factores son de relevancia para obtener y conservar la calidad del agua de lluvia. Componentes como derivadores de las primeras lluvias, almacenamientos cerrados, filtros y la incorporación de elementos de desinfección, son determinantes en la calidad final del agua cosechada. Así como, el manejo de dichos elementos y apropiadas prácticas de limpieza e higiene que minimicen la contaminación del agua. De acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, el agua para uso y consumo humano es aquella que no contiene contaminantes objetables, químicos o agentes infecciosos y que no cause efectos nocivos para la salud. Esta norma establece los límites permisibles de calidad (físicos y organolépticos, microbiológicos, químicos y radioactivos) y es aplicable a todos los sistemas de abastecimiento públicos, privados, y a cualquier persona física o moral que distribuye agua potable. De tal forma, que para que un sistema de captación del agua de lluvia sea destinado para usos potables, el agua cosechada deberá cumplir con las características establecidas en esta norma, y considerar el manejo y prácticas de higiene como

herramientas para alcanzar la calidad deseada. Lo cual depende en gran medida de la información que disponga el usuario de un sistema de captación, esto

La captación del agua de lluvia no es contemplada de forma legislativa o normativa para su aprovechamiento. De tal modo, que esta alternativa representa una forma de abastecimiento con menores limitantes para ser aprovechada que otras fuentes de agua, y que genera impactos negativos reducidos en su proceso de aprovechamiento.

CONCLUSIONES GENERALES

La captación del agua de lluvia es una alternativa complementaria de abastecimiento para la zona de estudio, y que en la actualidad no es utilizada. Su aprovechamiento puede generar beneficios, sociales, ambientales y económicos. Pues es posible suplir una parte del consumo de agua que comúnmente se da mediante la extracción de fuentes subterráneas o superficiales, y el manejo depende del usuario.

En zonas en donde las fuentes tradicionales de abastecimiento han sido utilizadas hasta el punto de generar efectos adversos de diferente índole, la captación del agua de lluvia representa una opción para fomentar no solo el manejo del agua, sino de generar conocimiento y cuidado sobre este recurso. Y que de acuerdo con la presión y escasez que se experimenta en relación al recurso hídrico, puede ser una herramienta estratégica.

En los temas desarrollados dentro de este trabajo, se genera la información necesaria, para aprovechar el agua de lluvia como fuente alternativa de abastecimiento a nivel doméstico. El diseño de los sistemas requeridos para tal fin, se basa en la cantidad de precipitación que es posible recolectar de acuerdo a las áreas de captación y los usos a los cuales se pretenda destinar. La información generada puede ser empleada para diseñar no solo sistemas domésticos, sino para sistemas a diferentes escalas.

Considerar la perspectiva de la población hacia el recurso permite formular las estrategias apropiadas para introducir el aprovechamiento del agua de lluvia en la zona, pero no limita, que para usos posteriores la captación del agua de lluvia pueda dirigirse hacia usos potables también. Para alcanzar este nivel de aceptación, la introducción del agua de lluvia dentro de las comunidades debe basarse en las características tanto de la población como de la zona, y la calidad del agua deberá ser considerada como un factor primordial para conseguir la ampliación en la utilización del agua de lluvia, así como la formulación de estrategias y la generación de herramientas que permitan presentar y difundir los beneficios que ofrece esta alternativa de abastecimiento y aumentar su aceptación dentro de la comunidad.

Aunque, la captación del agua de lluvia en la zona ofrezca beneficios y la cantidad y calidad del agua necesaria para su uso, se requiere del apoyo y soporte de los organismos e instituciones dedicados al manejo del agua para la propagación y extensión de este recurso.

ANEXOS

“Captación del agua de lluvia en edificios de la Universidad de Guanajuato: potencial y aceptación”

Introducción

Diversas son las causas por las cuales se ha empleado a lo largo de la historia el agua de lluvia, ya sea la escasez en algunas zonas, la falta de fuentes confiables de abastecimiento, contaminación, entre otras. Sin duda, la necesidad del recurso hídrico ya sea para aprovechamiento doméstico, pecuario o de riego, ha movido diferentes iniciativas que dan como resultado sistemas adaptados a las necesidades y características de cada población.

Vestigios de las adaptaciones y estructuras de aprovechamiento demuestran la relevancia de este recurso en lugares como centro y sur de México, Centroamérica, el Caribe, Asia, entre otros. Los mecanismos que desarrollaron coincidían en dirigir las aguas de escorrentía, de patios y techos mediante canales, zanjas y canaletas hacia almacenamientos subterráneos o superficiales, para aprovechar el agua en la agricultura o usos domésticos (Al-Aldamat, Diabat & Shatnawi, 2010; Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2009; Ballén, Galarza & Ortiz, 2006). En el México colonial era común el aprovechamiento del agua de lluvia, en conventos y casas-habitación, muestras de ello aún se observan en zonas de Oaxaca, Estado de México, Zacatecas y Guanajuato, Hidalgo, Puebla, entre otros.

Los componentes de los sistemas son diseñados en respuesta a las necesidades y características de la zona y de las poblaciones. Según el Texas Water Development Board sin importar la complejidad del sistema, un sistema para fines domésticos y de consumo humano consiste en seis componentes básicos: captación en techos, recolección por canaletas y bajantes, interceptor de primeras aguas, almacenamiento en tanques, sistema de distribución y tratamiento. Pero independientemente del uso que se vaya a dar al agua de lluvia, todo sistema debe tener al menos tres componentes básicos: captación, interceptor y almacenamiento (Abdulla & Al-Shareef, 2006).

La captación del agua de lluvia como fuente de abastecimiento total o complementaria es una alternativa que brinda diversos beneficios como la calidad del agua que se obtiene, la amplia gama de usos a los que se puede destinar, ahorro energético, beneficios económicos y ahorro en el uso de agua de fuentes tradicionales, ampliación de la oferta hídrica, apoyo a los medios de subsistencia de la población en zonas rurales, propicia el conocimiento sobre los recursos en las comunidades, entre otros (Chiu, Liaw, Hu, Tsai & Chang, 2009; Ouessar *et al.*, 2009; Fewkes, 2000). La captación del agua de lluvia puede ser considerada como una alternativa de abastecimiento y subsistencia o como una estrategia de ahorro, según el medio en el que se establezca (Ouessar *et al.*, 2009; Campisano & Modica, 2012). Su uso es variado, desde consumo humano hasta usos no potables como descargas sanitarias y riego en jardines, adicionalmente, las características químicas y físicas del agua permiten que sea utilizada de manera confiable para diversos fines.

Sin embargo, para que estos sistemas generen resultados positivos, se deben considerar las características socioeconómicas y ambientales de la zona, además de las necesidades y perspectiva hacia el agua de la población en donde se inserten esta clase de sistemas. Según Chávez (2007) conociendo la percepción del ambiente natural que rodea a individuos pueden identificarse alternativas para un mejor uso y aprovechamiento de sus recursos naturales,

implementar acciones concretas que les permitan un mejor manejo de los que tienen en su comunidad. Así pues, con el propósito de propiciar el uso del agua de lluvia como una alternativa de abastecimiento en edificios de la Universidad de Guanajuato, se presenta la disposición y aceptación de la población estudiantil a utilizar este recurso, el potencial de captación en techos de dos edificios de esta Universidad y el impacto que la captación del agua de lluvia podría causar en la hidrología dentro de una cuenca definida.

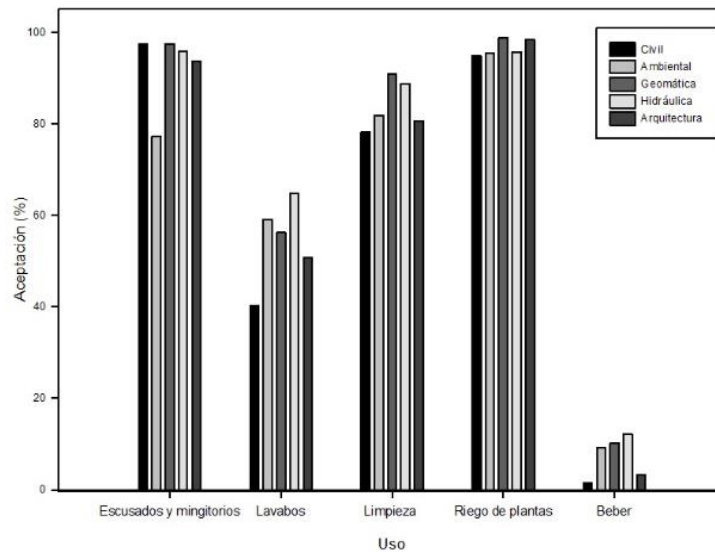
Los edificios considerados son la Sede Belén y el Laboratorio de Hidráulica localizados en la zona urbana del municipio de Guanajuato.

Disposición a utilizar el agua de lluvia

Se aplicó un cuestionario a la población estudiantil y administrativos de la Sede Belén de la Universidad de Guanajuato conformado por seis secciones. La primera aborda los datos identificativos del entrevistado, programa académico, inscripción y género. La segunda sección se enfoca en la disposición para utilizar el agua de lluvia, esto permite definir posibles usos, la perspectiva hacia este recurso, y proporciona información para establecer el sistema de captación apropiado de acuerdo al uso final. El consumo de agua embotellada se aborda en la tercera sección, para conocer la cantidad de agua utilizada por los entrevistados y las prácticas relacionadas con el consumo de agua potable. En la cuarta sección, se cuestiona si beberían agua de lluvia tratada si se instalaran bebederos en el edificio de la Universidad, además de su disposición a mantener en buenas condiciones las instalaciones, si es considerada una alternativa sostenible, y si se obtendrían beneficios para la comunidad universitaria de su aprovechamiento. Para definir la demanda de agua dentro de las instalaciones sanitarias y determinar el porcentaje que puede ser cubierto con agua de lluvia, se cuestiona sobre los usos sanitarios dentro de las instalaciones de la Unidad Belén. Se aplicó el cuestionario a 322 estudiantes y administrativos, mayor cantidad de alumnos del programa de ingeniería civil respondieron el cuestionario (83), seguido por estudiantes del programa de geomática (82), hidráulica (72), arquitectura (63) y ambiental (22).

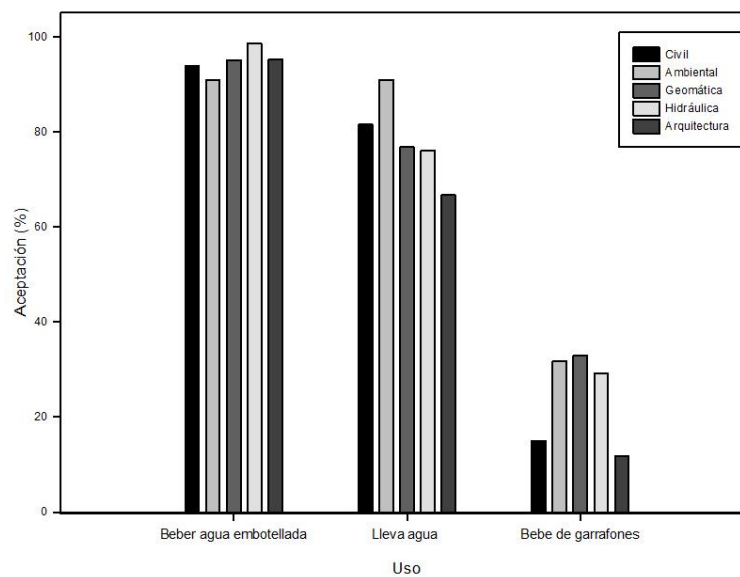
En la Figura 1 se presentan los porcentajes de aceptación para utilizar el agua de lluvia en la Sede Belén, el uso con mayor aceptación es el riego de plantas con el 96.7% del total de las respuestas positivas, seguido por el uso en excusados y mingitorios con 94.9% de aceptación, 84.5% contestaron positivamente a la limpieza de instalaciones, de lavabos el 53.4%. El uso del agua de lluvia para beber es el que presenta la menor aceptación con 7% del total de las respuestas afirmativas.

Figura 1. Porcentaje de aceptación para utilizar agua de lluvia según su uso.



Con respecto a las practicas relacionadas con el uso del agua embotellada y el consumo de agua potable de los usuarios de la Sede Belén, las respuestas obtenidas del cuestionario aplicado muestran que el 94.8% de los entrevistados beben agua embotellada, y el 78.4% lleva agua para beber durante su estancia en el edificio de la Universidad, mientras que el 24.1% bebe agua potable de los garrafones instalados dentro del edificio (Figura 2). En lo que respecta al gasto que el consumo de agua embotellada representa, se obtiene que \$10.0 es el gasto diario que realizan los entrevistados para estos fines, y que el consumo más frecuente de agua es de dos litros al día.

Figura 2. Prácticas y consumo de agua potable.



En la Tabla 1 se presenta la disposición de los usuarios del edificio hacia el uso del agua de lluvia para beber con un tratamiento previo a través de bebederos. En esta tabla se puede ver

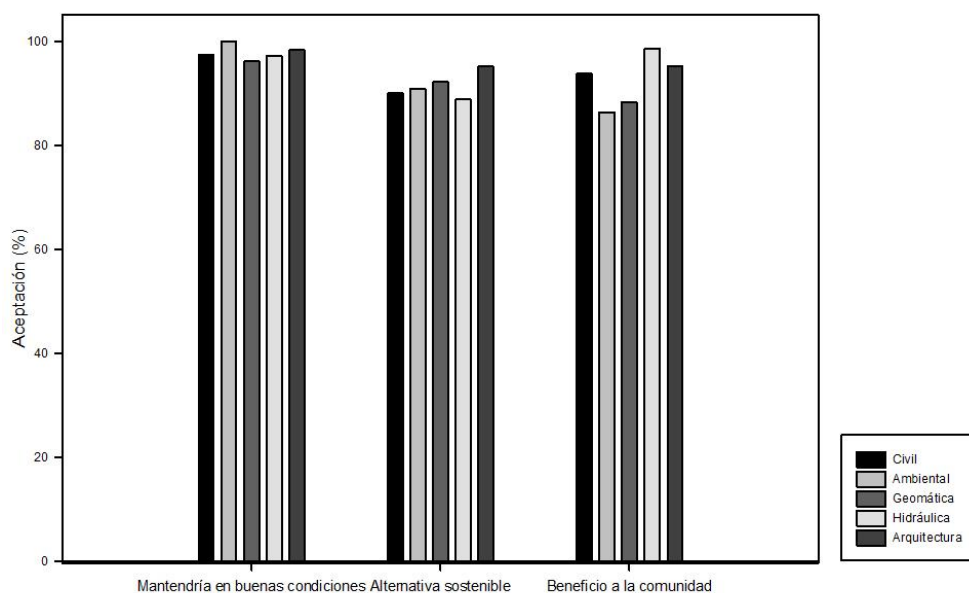
que el 55.3% estaría dispuesto a beber agua de lluvia en la el edificio, 33.4% tal vez lo harían y un 11.3% manifestó su negativa a utilizar esta opción si se contará con ella en el edificio.

Tabla 1. Disposición a usar bebederos alimentados con agua de lluvia.

Programa	Sí	Tal vez	No
Civil	44.6 %	37.3 %	18.1 %
Ambiental	72.7 %	22.7 %	4.5 %
Geomática	46.7 %	38.7 %	14.7 %
Hidráulica	66.7 %	22.2 %	11.1 %
Arquitectura	45.9 %	45.9 %	8.2 %

En lo que se refiere a la disposición a mantener en buenas condiciones un sistema de captación del agua de lluvia en el edificio, y la opinión hacia esta alternativa de abastecimiento, se obtiene que el 97.4% de los entrevistados mantendría en buenas condiciones el sistema, el 91.4% cree que el aprovechamiento del agua de lluvia es una alternativa sostenible, y el 93.3% opina que puede generar un beneficio a la comunidad (Figura 3).

Figura 3. Disposición a mantener en buenas condiciones y opinión acerca de los sistemas de captación del agua de lluvia.



Potencial de captación del agua de lluvia

Se estima el potencial de captación para dos edificios del Laboratorio de Hidráulica La Perlita y la Sede Belén de la Universidad de Guanajuato, la precipitación probable que puede ocurrir en los puntos de interés y las características los techos.

De acuerdo a los resultados presentados previamente se tiene que los meses con mayor probabilidad de ocurrencia de días con lluvia son junio, julio y agosto, septiembre. Se realiza la estimación considerando la precipitación probable de ocurrir durante los periodos de retorno de 1.052, 1.1, 1.25, 1.5 y 2 años.

Para estimar el gasto que es posible obtener con las lluvias máximas en 24 horas en los techos de las zonas de estudio se empleó el método racional (ecuación 1). En donde Q (m^3/s) es el caudal producido por una lluvia de intensidad i (mm/hr) sobre un área de drenaje A (m^2) con un coeficiente de escurrimiento C .

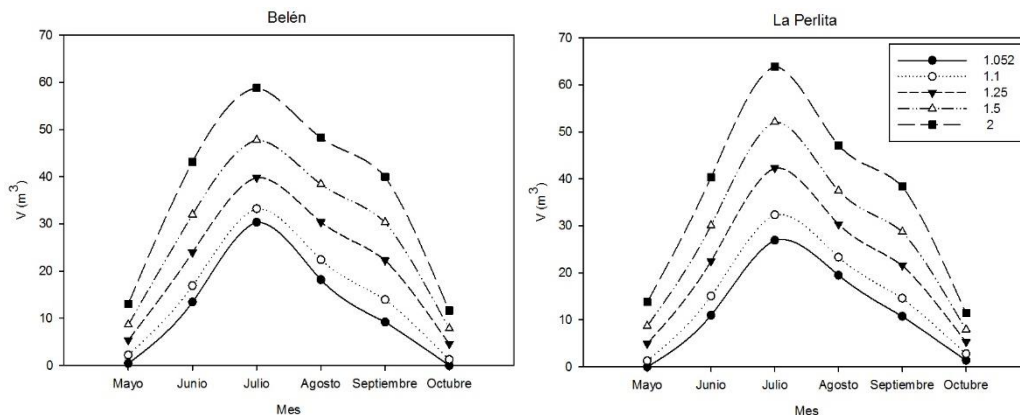
$$Q = C * i * A \quad (1)$$

Con la finalidad de obtener el volumen medio mensual y diario V (m^3) que puede cosecharse en los techos de las viviendas de las áreas urbanas de interés, se realiza una estimación de esta variable, considerando el área de la superficie A (m^2), la precipitación media mensual y la precipitación media diaria P (mm) y el coeficiente de escurrimiento C (adimensional) utilizando la ecuación 2 (Ghisi, 2006; Abdulla and Al-Shareef, 2009; Farreny *et al.*, 2011).

$$V = \frac{P * C * A}{1000} \quad (2)$$

De acuerdo con las características de los techos de los edificios, el área aprovechable es de $415.66 m^2$ para el techo del laboratorio La Perlita y de $472.01 m^2$ para el techo de la sede Belén. El volumen medio mensual para las áreas de los techos se muestra en la Figura 4.

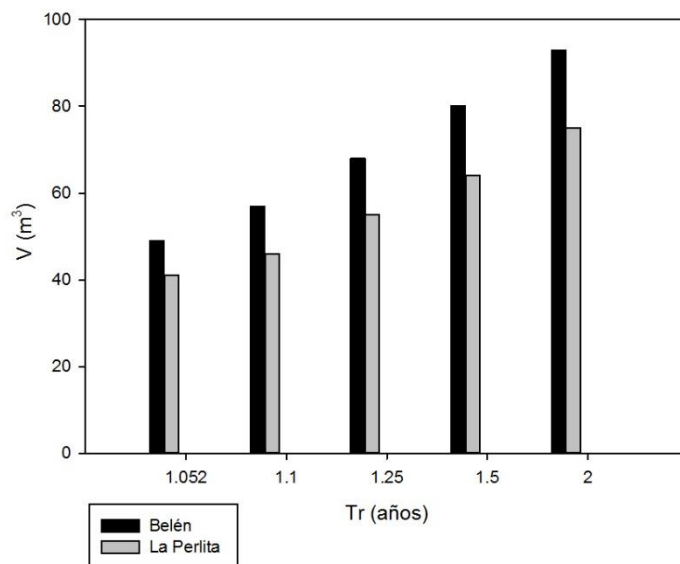
Figura 4. Volumen medio mensual potencial de captar en los edificios de la Universidad de Guanajuato.



Con la superficie de los techos y considerando un C de 0.8 para Belén debido a que el material del techo es concreto impermeabilizado y para La Perlita un $C=0.9$ que corresponde al coeficiente de escurrimiento para laminas metálicas, como es el caso del techo de este laboratorio, se obtienen volúmenes medios mensuales de hasta 63 m^3 para un periodo de retorno de 2 años. Para periodos de retorno de 1.052 años, se obtiene como máximo un volumen de 30.34 m^3 para la sede Belén, y de 26.94 m^3 . Durante el mes de julio se obtienen los mayores volúmenes de captación para los dos edificios. Durante los meses de mayo y octubre el potencial de captación es mínimo.

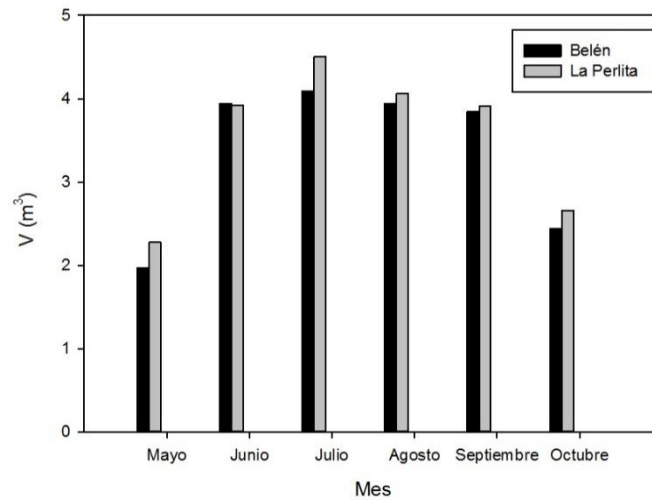
El gasto máximo que es posible obtener del escurrimiento de las lluvias máximas diarias para el periodo de 1981-2010 se presenta en la Figura 5. Se observa que en el techo de Belén se obtienen los volúmenes más elevados, pero para ambos edificios el volumen generado por los gastos máximos supera los 40 m^3 .

Figura 5. Volumen de escurrimiento estimado para lluvias máximas en 24 horas.



En cuanto al volumen medio diario que es posible captar en cada edificio (Figura 6), se observa que con considerando la lluvia media diaria, el potencial de captación estimado es de máximo 4.5 m^3 para el mes de julio en el techo de La Perlita y de 4 m^3 para Belén durante el mismo mes, como mínimo para la temporada de lluvias se estima un volumen medio diario de 1.97 m^3 en Guanajuato y 2.2 m^3 . Se debe considerar que los meses con mayor de probabilidad de días lluviosos son julio y agosto durante los cuales los volúmenes diarios estimados se pueden presentar con mayor probabilidad.

Figura 6. Volumen de escurrimiento estimado para lluvias máximas en 24 horas.



Características del agua de lluvia

Se instaló un sistema de captación del agua de lluvia en el Laboratorio de Hidráulica (La Perlita) de la División de Ingenierías de la Universidad (Figura 7). Con el propósito de emplear el agua que escurre sobre el techo para las actividades desempeñadas en el lugar. Sin embargo, para definir el uso al cual puede ser destinado el agua recolectada es necesario conocer sus características. La calidad del agua de cualquier fuente, depende en gran medida del medio por el cual circula. Considerando esto, la calidad del agua de lluvia antes de precipitarse sobre alguna superficie está relacionada con las partículas y contenido que se encuentren presentes en la atmósfera. Las fuentes que aportan componentes a la atmósfera pueden ser antropogénicas o naturales, la influencia de estas sobre la calidad del agua depende de las características fisiográficas, las dinámicas del medio y las actividades que se desarrollen en la zona.

Figura 7. Sistema de captación del agua de lluvia instalado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Guanajuato.



El agua de lluvia de acuerdo a sus características puede ser usada como agua para consumo humano o para fines no potables (Amin & Alazba, 2011; Chiu, Liaw, Hu, Tsai & Chang, 2009). Para ser empleada como agua potable debe cumplir con la normativa establecida para este efecto, sin embargo, el agua puede ser contaminada en el aire, en la superficie de captación o en el almacenamiento, ya sea por agentes patógenos o por químicos disueltos (Thomas, 1998).

Así, la calidad del agua de lluvia en sistemas de captación y aprovechamiento varía en las diferentes etapas del proceso. La precipitación depende de factores atmosféricos derivados de diversas fuentes, la calidad del escurrimiento sobre la superficie de captación está relacionada con el agua de lluvia y los componentes depositados en la superficie y finalmente en el almacenamiento y transporte se relacionan los anteriores y las diversas calidades de agua que se almacenan, el tiempo de almacenamiento, las condiciones en las cuales se presente y los procesos químicos que se lleven a cabo.

Se recolectó y analizó el agua del escurrimiento producido por el primer evento de precipitación (15 de mayo de 2013) en el Laboratorio de Hidráulica. Los resultados obtenidos comparándolos con los límites máximos permitidos que establece la NOM-127-SSA1-1994, muestran que el escurrimiento del agua de lluvia en el techo del Laboratorio de Hidráulica se encuentra dentro de los límites máximos permisibles a excepción de los valores registrados para nitrógeno amoniacal y microorganismos.

El agua de las primeras lluvias o que se presenta entre periodos de secas contiene mayor cantidad de contaminantes debido a la acumulación de polvos y elementos en la atmósfera y techos, que con el barrido durante el periodo de lluvias disminuye, es por ello que la desviación del primer enjuague de la superficie de captación al tanque de almacenamiento es recomendada para mejorar la calidad del agua de lluvia cosechada. Así pues, los resultados del análisis del agua de la primera lluvia muestran que las concentraciones no sobrepasan los límites establecidos por la normativa para uso y consumo humano, y puede esperarse que el agua durante el periodo de lluvias presente menores concentraciones a las obtenidas en esta muestra. No obstante, el nitrógeno amoniacal y los coliformes totales y fecales no cumplen con lo establecido por la norma, por ello, estos parámetros serán considerados a detalle.

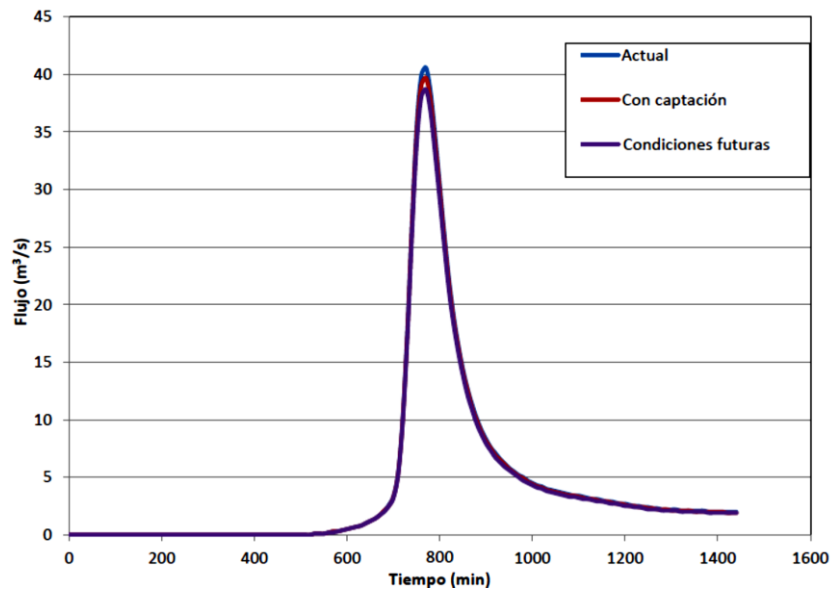
Posibles impactos de la captación del agua de lluvia.

Los beneficios e impactos de la captación del agua de lluvia para fines agrícolas y como una fuente para la recarga subterránea han sido estudiados (Dile, Karlberg, Temesgen & Rockström, 2013; Glendenninga, Van Ogtropb, Mishrac & Vervoort, 2012; Glendenninga & Vervoort 2011). Sin embargo, la evaluación de los impactos hidrológicos producidos por estos sistemas a nivel doméstico es reducida. Lo cual es importante considerando a este recurso como una alternativa sostenible y una estrategia para el manejo de los recursos hídricos. Según Ghimire y Johnston (2013), los impactos producidos por una proporción alta (75-100%) de captación del agua de lluvia en los techos de las cuencas del río Albermarle-Pamlico en el sureste de USA, reducen el flujo medio mensual aguas abajo hasta en un 16%. Mientras que, con una baja proporción de techos captando el agua de lluvia (25%) se reduce en aproximadamente un 6% el flujo.

La captación del agua de lluvia es una alternativa de abastecimiento que puede reducir la presión que se presenta sobre fuentes como las subterráneas y superficiales en regiones con escasez, sobreexplotación, deficiencia o carencia de servicios de abastecimiento. Así pues, con el propósito de identificar los impactos que el uso de esta fuente puede generar, se modeló el flujo a través de la cuenca Jolula, utilizando los softwares Watershed Modeling System (WMS) y Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). Se consideraron tres condiciones en la simulación: la condición actual de la cuenca, la condición de la cuenca si en los techos de las viviendas se encontraran instalados sistemas de captación del agua de lluvia y la tercer condición corresponde a la colecta del agua de lluvia en los techos contemplando el crecimiento poblacional para el área de interés.

La modelación se realizó para la cuenca Jolula, localizada en la parte noreste de la zona urbana del municipio de Guanajuato. Esta cuenca fue seleccionada debido a que el sistema de captación del agua de lluvia del Laboratorio de la Perlita se localiza dentro de esta cuenca, y esto puede permitir la cuantificación real del volumen que es posible captar en un sistema de captación y escalarlo para las viviendas. Así pues, se simuló el flujo en las condiciones actuales de la cuenca, considerando el uso de suelo, tipo de suelo, el modelo digital de elevación e información de precipitación para la zona de interés. Se obtiene como resultado una pequeña diferencia entre los flujos simulados para cada caso, se puede observar en la Figura 8 el reducido impacto que la captación del agua de lluvia produciría en la hidrología superficial considerando las condiciones actuales de la cuenca.

Figura 8. Flujo modelado a través de la cuenca Jolula para las tres condiciones establecidas.



La captación del agua de lluvia no presenta un cambio significativo en el flujo para la cuenca Jolula. Por lo que la captación del agua de lluvia puede considerarse como una alternativa de abastecimiento de bajo impacto para la hidrología superficial de esta cuenca.

Conclusiones

Los usuarios de las instalaciones de los edificios de la Universidad de Guanajuato, presentan una alta disposición a utilizar el agua de lluvia para fines no domésticos, lo cual coincide con los resultados mostrados para zonas urbanas. En este caso, el uso con mayor aceptación es el riego de plantas y el uso en escusados y mingitorios. No se identifican marcadas diferencias entre las preferencias hacia el uso del agua de lluvia entre programas académicos, a excepción de la disposición para utilizar agua de lluvia para beber mediante bebederos en donde los alumnos del programa de ingeniería ambiental presentan un porcentaje de casi el 20% por encima de la media. En cuanto a la opinión que los encuestados muestran hacia la captación del agua de lluvia como una alternativa sostenible es positiva, prácticamente el total de los entrevistados considera al agua de lluvia como una alternativa sostenible y considera que podría generar un beneficio a la comunidad, esto reafirma los beneficios que esta fuente puede generar dentro de la comunidad.

La captación del agua de lluvia en los edificios mostrados, es una alternativa que puede proporcionar beneficios sociales, y que particularmente para el edificio de La Perlita no genera impactos negativos, por lo que debe ser considerada como alternativa de abastecimiento para propiciar el manejo del agua en la zona.

La calidad del agua de los escurrimientos en los puntos de interés permite que esta agua pueda ser destinada a usos no potables como el riego y los usos sanitarios. El volumen potencial de captación de acuerdo a las áreas disponibles en los techos de los edificios es de mínimo 2 m³ para un día de lluvias considerando la lluvia media diaria, al mes para un periodo de retorno de 1.052 años es posible captar durante el mes más lluvioso 26.94 m³ (La Perlita) y 30.34 m³ (Belén). Los meses de mayo y octubre presentan el menor potencial de captación de acuerdo con la lluvia que ocurre en estos meses.

REFERENCIAS

Abdulla F.A., Al-Shareef A., 2006. Assessment of rainwater roof harvesting systems for household water supply in Jordan. *Integrated Urban Resources Management*, October, (2006), 291-300.

Al-Aldamat R., Diabat A., Shatnawi G., 2010. Combining GIS with multicriteria decision making for siting water harvesting ponds in Northern Jordan. *Journal of Arid Environments* 74 (2010) 1471 e 1477.

Amin, M. T. & Alazba, A. A. (2011). Probable sources of rainwater contamination in a rainwater harvesting system and remedial options. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(12): 1054-1064.

Campisano, A.; Modica, C.; (2012). Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. *Resources, Conservation and Recycling* 63(2012) 9-16.

- Chávez, B.G., (2007). Percepción del ecosistema por la comunidad de San Crisanto en Yucatán de acuerdo con su actividad. Cuicuilco, Escuela Nacional de Antropología e Historia, México. Vol. 14, Núm. 39, enero-abril, 2007.
- Chiu, Y. R., Liaw, C. H., Hu, C. Y., Tsai, Y.L. & Chang H.H. (2009) Applying GIS-based rainwater harvesting design system in the water energy conservation scheme for large cities. Computer Supported Cooperative Work in Design, 2009. CSCWD 2009. 13th International Conference; 722-727.
- CONAGUA, (2009). Semblanza Histórica del Agua en México. D.F., México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Ballén S.J., Galarza G.M., Ortiz M.R., 2006. Historia de los Sistemas de -Aprovechamiento de Agua Lluvia. VISEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua.
- Dile Y.T., Karlberg L., Temesgen M., Rockström J. (2013). The role of water harvesting to achieve sustainable agricultural intensification and resilience against water related shocks in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 181:69–79.
- Ghimire S.R., Johnston J.M. (2013). Impacts of domestic and agricultural rainwater harvesting systems on watershed hydrology: A case study in the Albemarle-Pamlico river basins (USA). *Ecohydrology & Hydrobiology* 13 (2013) 159–171.
- Glendenning C.J., Vervoort R.W. (2011). Hydrological impacts of rainwater harvesting (RWH) in a case study catchment: The Arvari River, Rajasthan, India. Part 2. Catchment-scale impacts. *Agricultural Water Management* 98:715–730.
- Glendenning C.J., Van Ogtropb F.F., Mishrac A.K., Vervoort R.W. (2012). Balancing watershed and local scale impacts of rain water harvesting in India—A review. *Agricultural Water Management* 107:1–13.
- Ouessar, M.A; Bruggeman, F.; Abdelli, R.H.; Mohtar, D.; Gabriels and W.M. Cornelis, (2009). Modelling water-harvesting systems in the arid South of Tunisia using SWAT. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13: 2003-2021.
- Texas Water Development Board, (2005). The Texas Manual on Rainwater Harvesting, Third Edition. 2005, Austin, Texas.
- Thomas, T. (1998). Domestic water supply using rainwater harvesting. Development Technology Unit, Department of Engineering, University of Warwick, Coventry CV4 7AL, UK. 1998. E & FN Spon.

Capítulo de libro

“Potencial de captación de lluvia como fuente de abastecimiento en la Universidad de Guanajuato, México”

III Jornadas de Ingeniería del agua, La protección contra los riesgos hídricos (2013).

Ed. Marcombo, Vol. 1. 1ª ed, pp. 273-280. España.

Potencial de captación de agua de lluvia como fuente de abastecimiento en la Universidad de Guanajuato, México

Fuentes-Galván, M.L.

Programas Multidisciplinarios en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Manuel Nava 201, San Luis Potosí, 78210, México.

Delgado-Galván, X.V., Mora-Rodríguez, J., Ortiz Medel, J.

Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez 77, Centro, Guanajuato, 36000. México.

Gutiérrez-Pérez, J. A.

FluIng-IMM, Universitat Politècnica de València. Cno. Vera s/n, Valencia, 46022. España.

1. Introducción

En este trabajo se calcula el potencial de captación del agua de lluvia en dos edificios de la Universidad de Guanajuato: el edificio de Ingenierías (EI) y el laboratorio de Hidráulica (LH). Se presenta una estimación de la cantidad del agua de lluvia aprovechable de acuerdo a tres parámetros: las precipitaciones locales, el área y el material de los techos, con el propósito de establecer al agua de lluvia como una fuente de abastecimiento en una zona con graves problemas de escasez y suministro del recurso, y en lo particular para los puntos de interés, con una fuerte demanda. El EI y el LH se localizan en el municipio de Guanajuato en el centro de México, región que ha sido históricamente azotada por eventos extremos de sequías e inundaciones. Además a ésta variabilidad, se le suma la sobreexplotación del agua subterránea, la contaminación y el manejo del agua en la zona, que dan como resultado la reducción de la disponibilidad del agua y conflictos por el mismo. El objetivo de este trabajo es aprovechar el agua de lluvia dentro de los edificios de la Universidad de Guanajuato como alternativa de abastecimiento, con la finalidad de generar estrategias ambientales y económicas de manejo y aprovechamiento del agua, para difundirlas dentro de la comunidad universitaria y la sociedad.

2. Antecedentes

2.1 Zona de estudio

El agua representa el recurso natural con mayor abundancia en el planeta, lo cual no significa que su disponibilidad sea de igual magnitud. La extensión territorial de los Estados Unidos Mexicanos comprende 1,964 millones de km², de los cuales 1,959 millones de km² corresponden a la superficie continental y el resto a las áreas insulares (CONAGUA, 2011). El clima del país está determinado principalmente por su ubicación geográfica y relieve, que a la vez delimitan la distribución del agua, considerada como restrictiva e irregular. Es restrictiva porque aproximadamente la mitad norte del país experimenta un déficit constante de precipitaciones, mientras en el sur y sureste, éstas son abundantes. Y se considera irregular debido a que los niveles de concentración demográfica y por ende la actividad económica no se encuentran en estas zonas (INEGI, 1998). En cifras, el 69% de la disponibilidad natural de agua se encuentra en la zona sur y sureste del país, mientras que en el centro y norte se asienta el 77% de la población total (CONAGUA, 2010).

El estado de Guanajuato se localiza en el centro de la República Mexicana (Figura 1) y está conformado por 46 municipios. La capital del estado, el municipio de Guanajuato en donde se ubican los puntos de estudio, se localiza entre los paralelos 21°14' y 20°49' de latitud norte y los meridianos 101°03' y 101°27' de latitud oeste, con una altitud que oscila entre los 1700 y los 3000 msnm. Guanajuato es conocido por su actividad minera, la cual tiene su inicio en 1548 (Ramos-Arroyo *et al.*, 2004), con el descubrimiento de minas en años posteriores se fomentó el crecimiento del lugar (Gobierno del Estado de Guanajuato, 1983), tal es la importancia de la minería, que dicha actividad continúa en la actualidad. Por su belleza arquitectónica y actividades culturales, es también un centro turístico de importancia en la zona, lo cual genera una demanda alta de agua en los puntos representativos de la ciudad.

La población de dicho municipio, que en la actualidad asciende a 171 709 habitantes (INEGI, 2013), ha enfrentado históricamente una serie de dificultades relacionadas con el agua. Debido a la transición fisiográfica de la región en donde se asienta la ciudad de Guanajuato, el clima es variable y se presentan eventos climatológicos extremos. Se preservan registros de sequías en la zona desde 1629 (Gobierno del Estado de Guanajuato, 1983), y entre 1710 y 1730 sequías extremas afectaron de forma grave a la población y a la minería (Martínez-Arredondo *et al.*, 2012). Así como las sequías son frecuentes en la historia de esta ciudad, lo son también los eventos extraordinarios de precipitaciones, desbordamientos de ríos e inundaciones, con fuertes afectaciones sociales y económicas. Algunos autores señalan la importancia que el vertido de los residuos mineros tuvo en las inundaciones que durante los siglos XVIII, XIX e inicios del XX azotaron a la ciudad, producto del azolvamiento del río Guanajuato, principal afluente de la zona (Miranda-Avilés *et al.*, 2009). En la actualidad, el abastecimiento del vital recurso es un tema cotidiano y crítico para todos los sectores de la comunidad. Las fuentes de extracción son subterráneas y superficiales, sin embargo, con la escasez y calidad del agua, así como, con las particularidades topográficas de la zona resulta complicado el suministro. A lo anterior, se le suma la contaminación que la industria minera propicia en el entorno y la constante demanda de la sociedad. Dentro de este contexto, se busca la ampliación de la oferta hídrica de forma sustentable en la zona de estudio aprovechando para ello el agua de lluvia en puntos con un gran número de usuarios.

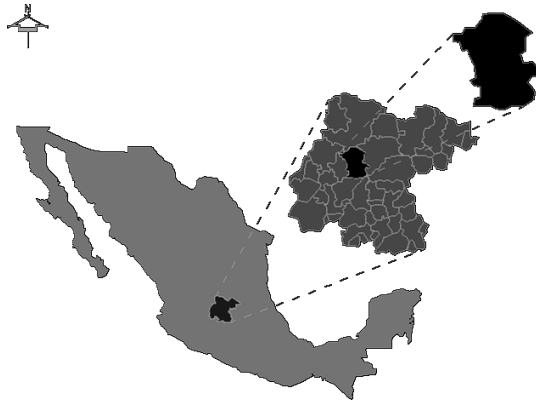


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

2.2 Captación del agua de lluvia

Diversas son las causas por las cuales se ha empleado a lo largo de la historia el agua de lluvia, ya sea la escasez en algunas zonas, la falta de fuentes confiables de abastecimiento, contaminación, sequías, entre otras. Sin duda, la necesidad del recurso hídrico ya sea para aprovechamiento doméstico, pecuario o de riego, ha movido diferentes iniciativas que dan como resultado sistemas adaptados a las necesidades y características de cada población (Fuentes *et al.*, 2013). La captación del agua de lluvia es una práctica que en la actualidad puede ser vista en los cinco continentes. Sin embargo, su historia, según los vestigios arqueológicos más antiguos de estructuras de aprovechamiento, se remonta a Jordania (Al-Aldamat, *et al.*, 2010) y otros sitios de Asia (Ballén, *et al.*, 2006). No obstante, en América latina y el Caribe era una práctica común, en donde los mecanismos de aprovechamiento coincidían en dirigir escurrimientos de techos y patios hacia almacenamientos superficiales o subterráneos (CIDECALLI, 2007; CONAGUA, 2009). Particularmente para la zona de estudio, el empleo del agua de lluvia tenía una gran importancia para uso doméstico y agrícola. Muchos de los edificios de Guanajuato aún conservan sus aljibes, donde se depositaba el agua dirigida de los techos y la superficie de los patios, o en su defecto este almacenamiento se daba en tanques de menor capacidad. A mediados del siglo XIX con el abastecimiento de agua superficial a través de tuberías a la ciudad, las prácticas de acopiamiento del agua de lluvia reducen hasta casi desaparecer.

Los principales componentes de un sistema de captación de agua de lluvia son: superficie de captación, recolección, interceptor y almacenamiento. De estos, los elementos básicos son tres: captación, interceptor y almacenamiento (Abdulla y Al-Shareef, 2006). La superficie de captación es el área por donde escurre el agua de lluvia para posteriormente ser recolectada y conducida por canales, canaletas y bajantes hacia el almacenamiento, que puede ser subterráneo o superficial y de diversos materiales, en donde se conserva el agua hasta su uso final. Debido a que las primeras lluvias contienen una mayor cantidad de contaminantes y elementos tanto atmosféricos, como aquellos que se han depositado en la superficie de

captación (polvos, guano, materia orgánica, etc.), se deriva el agua de estas lluvias hacia un tanque de almacenamiento previo, conocido como interceptor, con la finalidad de obtener la mejor calidad posible del recurso. Para el presente estudio se ha considerado la captación en techos a razón del espacio y de la adaptación de las condiciones actuales de los sitios de estudio.

3. Metodología

Considerando las precipitaciones locales, el área de captación y el coeficiente de escurrimiento de los techos, con lo cual según Farreny (2011) es posible obtener el potencial de captación del agua de lluvia en un punto dado, se realizó la estimación de la precipitación del EI y LH empleando los datos de lluvia de las estaciones climatológicas más influyentes a cada uno de los puntos. Para el EI se utilizó la estación Guanajuato con información correspondiente a un periodo de 37 años (1969-2005), la información del LH se obtuvo de la estación Valenciana con un rango de datos de 31 años (1973-2003). El material de las superficies de captación es un factor que juega un papel importante dentro de la cantidad de escurrimiento que se puede producir y en la calidad del agua aprovechable, en el EI la superficie del techo está conformada por concreto impermeabilizado con un coeficiente de escurrimiento (C_e) de 0,8, en el LH el material de la techumbre es lámina metálica acanalada con un $C_e=0,9$. Con la información de la precipitación media mensual (P) en mm (Figura 2) se obtiene la precipitación neta (PN) en mm, la cual es la cantidad del agua de lluvia que queda a disposición del sistema de captación, una vez que se han considerado las pérdidas por factores como salpicamiento, velocidad del viento, evaporación, fricción y tamaño de la gota (Indhri 2010). Estas pérdidas son representadas por el C_e y la probabilidad de precipitación en la zona, que se ha considerado de un 85% según la experiencia de diversos autores (CIDECALLI, 2007; Martínez, 2011). Considerando lo anterior el agua de lluvia susceptible de ser aprovechada se obtiene del producto de la eficiencia de la captación ($\eta_{captación}$, dada por el C_e y la probabilidad de precipitación), por la P en el sitio de interés, $\eta_{captación}$ y C_e son factores adimensionales. De la siguiente expresión se obtiene $\eta_{captación}$:

$$\eta_{captación} = C_e * 0,85 \quad [1]$$

Una vez conocida la $\eta_{captación}$ es posible estimar la PN de cada punto, utilizando la ecuación [2]:

$$PN = P * \eta_{captación} \quad [2]$$

El valor de PN a considerar para que el agua obtenida tenga las cualidades para ser usada se determina mediante la suma de los meses cuya precipitación es mayor o igual a 40 mm (CIDECALLI, 2007; Indhri, 2010; Martínez, 2011). Una vez conocidos los valores de PN (Figura 2) se estima la cantidad de agua que puede ser obtenida con las áreas de techo con las que se dispone. Para ello, de la expresión [3] utilizada para conocer el área de captación A_{ec} (m^2) necesaria para conseguir el abasto de una demanda anual D_{anual} (m^3) de agua con la PN del lugar, es posible conocer volumen V (m^3) que puede obtenerse con una superficie establecida y la PN (m) en un año, como es el caso de los puntos de interés.

$$A_{ec} = D_{anual} / PN \quad [3]$$

[3]

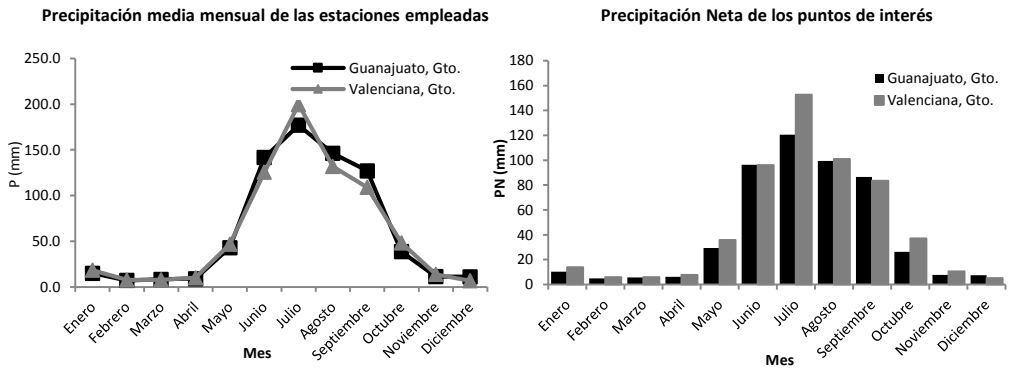


Figura 2. Precipitaciones de diseño, para los puntos de interés.

4. Aplicación

La recolección del agua de lluvia de techos, su almacenamiento y uso posterior, generan un ahorro significativo en el uso del agua potable (Fewkes, 2000). Algunas prácticas de ahorro de agua involucran la instalación de sistemas que hacen posible reducir el consumo de agua y la adopción de programas educacionales para difundir conceptos de sustentabilidad dentro de la población (Campisano y Modica, 2012). Con la instalación de sistemas de captación se pretende reducir el consumo de agua entubada dentro de las instalaciones independientemente del uso al que se destine y garantizar un volumen del recurso en donde se carece comúnmente de él, así como, fomentar la práctica del uso del agua de lluvia como una alternativa sostenible y factible dentro de la población estudiantil, además de difundirla en la comunidad.

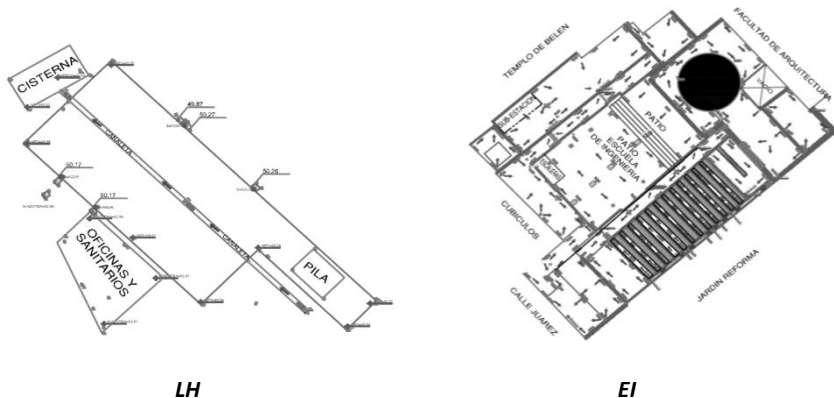


Figura 3. Planos de los sitios de estudio.

El LH se ubica en la parte norte del municipio de Guanajuato, en sus instalaciones se pretende aprovechar la techumbre que cubre la red hidráulica experimental, con el fin de emplearla para usos sanitarios y abasteciendo a la red experimental. En el centro de la ciudad se localiza el EI, que alberga una mayor población estudiantil, administrativa y académica, en este edificio se pretende utilizar el ala derecha del techo en una primera etapa, realizando adaptaciones para su aprovechamiento. En la Figura 3 se pueden ver los planos de los edificios, en el LH se almacenará en la cisterna, mientras que el almacenamiento en el EI se realizará en el patio.

5. Resultados

Considerando las superficies de captación de los edificios y la PN , se obtiene el V por año que puede ser aprovechado (Tabla 1). Se aprecia que la PN es similar y el claro efecto del material del techo en la cantidad de agua disponible por sistema. La superficie de captación en el EI es más del doble que la del LH, sin embargo, debido a la C_e y a la PN , el V obtenido en relación con la superficie utilizable por sistema, es mayor en el LH.

SCAALL	C_e	PN (mm)	A_{ec} (m ²)	V (m ³)
EI	0,8	402,56	1108,25	446,14
LH	0,9	432,99	543,72	235,43

Tabla 1. Volumen aprovechable por sistema de captación

La población estudiantil en el EI es de aproximadamente 640 estudiantes que pasan alrededor de 4,4 hr/día en el edificio, sin embargo, en el LH transcurren 0,6 hr/día alrededor de 200 estudiantes. Así, la demanda del recurso es mayor en el EI tanto por el número de alumnos, como por el tiempo de su estadía. Se realizó una encuesta a los alumnos a cerca de los usos que dan al agua dentro de los edificios, de esta información se obtuvo la D_{anual} presentada en la Tabla 2.

SCAALL	Alumnos	Estadía (hr/día)	Beber (l)	Sanitario (l)	Total (l)	D_{anual} (m ³ /año)
EI	640	4,4	0,37	21,8	22,17	5107,97
LH	200	0,6	0,05	2,97	3,02	217,44

Tabla 2. Demanda de agua de los alumnos en el EI y LH

La Tabla 2 nos muestra la demanda total de agua en el EI y el LH, considerando el tiempo que los alumnos se encuentran en estos lugares. Con el agua que puede obtenerse de la lluvia se cubre el total de la D_{anual} del LH, y 17,99 m³/año pueden ser destinados a otros usos, como riego de áreas verdes o limpieza del edificio. En el EI, debido a la alta demanda del recurso, sólo es posible cubrir el 8,73% de la D_{anual} , la superficie de captación requerida para satisfacer las necesidades hídricas del alumnado es once veces más que el área disponible (Tabla 3). Sin

embargo, con el A_c del EI es posible dar abasto a las necesidades de agua para beber, si esta es tratada previamente y aceptada por los alumnos, pues se requieren $85,25 \text{ m}^3/\text{año}$ para este fin, o cubrir la demanda de un mes de los usos sanitarios. Así, el agua de lluvia puede ser considerada como una fuente de abastecimiento total o complementaria según sea el caso, pero indudablemente en zonas con problemáticas de abastecimiento es una alternativa importante, pues los sistemas de captación del agua de lluvia brindan seguridad e independencia, además pueden ser vistos como estrategia de ahorro y promover el uso eficiente y sostenible del agua sin importar el uso a la que se destine.

SCAALL	$A_c \text{ (m}^2\text{)}$	$V \text{ (m}^3\text{)}$	$D_{\text{anual}} \text{ (m}^3\text{/año)}$	$D_{\text{anual}} \text{ cubierta \%}$	$A_{\text{ec}} \text{ (m}^2\text{)}$
EI	1108,25	446,14	5107,97	8,73	12688,71
LH	543,72	235,43	217,44	108,27	502,18

Tabla 3. Porcentaje de la demanda posible de cubrir con agua de lluvia

6. Conclusiones

Considerando que en la zona el agua es un recurso escaso e históricamente relacionado con el bienestar socioeconómico de la población, es importante generar estrategias basadas en la práctica, que además de fortalecer el desarrollo sostenible sean un ejemplo que pueda ser extendido dentro de la comunidad. Retomar las prácticas de captación que en algún momento se realizaron en la ciudad y aplicarlas en un centro educativo, puede incidir en la formación de los alumnos y fomentar el uso sostenible del recurso hídrico. Además, según las estimaciones realizadas puede ser una fuente de abastecimiento total o complementaria, según las condiciones del sitio.

Referencias

- Abdulla F.A., Al-Shareef A., 2006. *Assessment of rainwater roof harvesting systems for household water supply in Jordan*. Integrated Urban Resources Management, October, (2006), 291-300.
- Al-Aldamat R., Diabat A., Shatnawi G., 2010. *Combining GIS with multicriteria decision making for siting water harvesting ponds in Northern Jordan*. Journal of Arid Environments 74 (2010) 1471 e 1477.
- Ballén S.J., Galarza G.M., Ortiz M.R., 2006. *Historia de los Sistemas de -Aprovechamiento de Agua Lluvia*. VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua.
- Campisano A., Modica C., 2012. *Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily*. Resources, Conservation and Recycling 63(2012) 9-16.
- CIDECALLI, 2007. *Manual sobre Sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia para Uso Doméstico y Consumo Humano*. Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento de Agua de Lluvia, México.
- CONAGUA, 2009. *Semblanza Histórica del Agua en México*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

- CONAGUA, 2010. *Estadísticas del Agua en México, edición 2010*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- CONAGUA, 2011. *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Farreny R., Morales-Pinzón T., Guisasaola A., Tayà C., Rieradevall J., Gabarrell X., 2011. *Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain*. Water Research 45, p.p. 3245-3254, 2011.
- Fewkes A., 2000. *Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalized approach*. Urban Water, Vol 1, Issue 4, p. 323-333.
- Fuentes-Galván M.L., Delgado-Galván X., Charcas-Salazar H., 2013. *Evaluación del potencial de aprovechamiento del agua de lluvia en la zona del acuífero Silao-Romita, Guanajuato*. Intekhnia, ISSN 1900-7612, Bogotá, D.C., Colombia, 2013.
- Gobierno del Estado de Guanajuato, 1983. *El agua en la ciudad de Guanajuato, problema de siglos*. Secretaría de Programación, Guanajuato, Gto., México.
- Indhri, 2010. *Aumento de la oferta hídrica*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (Indhri), Primera Edición, República Dominicana, Agosto.
- INEGI, 1998. Estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato. México.
- INEGI, 2013. Información nacional, por entidad federativa y municipios. Guanajuato, Gto. Consultado julio 2013 en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=11>
- Martínez-Arredondo J.C., Mora-Rodríguez J.J., Ramos-Arroyo Y.R., Dzul-García O., Hotchkiss R., 2012 *Perspectiva de memoria histórica de los riesgos hidrometeorológicos en Guanajuato capital*. XXII Congreso Nacional de Hidráulica, Acapulco, Guerrero, México, Noviembre 2012.
- Martínez J.J., 2011. *Estrategias para el abastecimiento de agua a comunidades marginadas y urbanas*. Tesis Doctoral, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Miranda-Avilés R., Puy-Alquiza M.J., Caudillo-González M., 2009 *Evidencias estratigráficas y geoquímicas de la variación temporal de sedimentos naturales y antropogénicos en la planicie aluvial del río Guanajuato*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 26, núm. 3, 2009, p. 564-574.
- Ramos-Arroyo Y.R., Prol-Ledesma R.M., Siebe-Grabach C., 2004 *Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 21, núm. 2, 2004, p. 268-284.