

Diseño, construcción y costo de un sistema de colección de agua de lluvia cimbreada, para comunidades rurales excluidas

Design, construction and cost of a flexible rainwater collection system for excluded rural communities

—

Martín D. Mundo Molina
martin.mundo@unach.mx

Dulce Stefany Pérez Morales

Daniel Hernández Cruz

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS, MÉXICO



Para citar este artículo:

Mundo Molina, M. D. (2022)., Pérez Morales, D. S. ., & Hernández Cruz, D. . Diseño, construcción y costo de un sistema de colección de agua de lluvia cimbrente, para comunidades rurales excluidas. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 11(30). <https://doi.org/10.31644/IMASD.30.2022.a04>

RESUMEN

En México, el suministro de agua a pequeñas comunidades rurales es un problema no resuelto. Diversas fuentes reportan que en zonas rurales existen más de 5.7 millones de mexicanos que carecen de agua entubada y 12 millones en todo el territorio nacional. Solo en el estado de Chiapas existen alrededor de 18,160 pequeñas comunidades rurales menores de 500 habitantes, la inmensa mayoría con escasez de agua. Una alternativa para corregir este déficit es la colección de agua de lluvia. Se han reportado en la literatura diferentes tipos de colectores de agua de lluvia domiciliarios (CALLD): CALLD de ferrocemento, CALLD con ladrillo tipo capuchino, tanques de polietileno de alta densidad semirrígidos, tanques de ladrillo o concreto a cielo abierto. Todos los CALLD deben de construirse con una capacidad por encima de los 21000 litros como mínimo, para suministrar agua durante la época de estiaje (solo para consumo humano), para familias formadas por 4 o 6 personas con dotaciones mínimas aceptadas por organismos internacionales; sin embargo, estos sistemas siguen siendo onerosos para comunidades rurales, especialmente las excluidas. En este artículo se presenta la descripción, el diseño hidráulico (basado en la ecuación de conservación de masa o continuidad), construcción y costo de un sistema de colección de agua de lluvia cimbrente (CALLDC) para comunidades rurales excluidas, que representa una opción técnica fácil de construir y más económica que las enunciadas en la literatura especializada.

Palabras clave:

Colección de agua de lluvia; comunidades rurales; suministro de agua potable; diseño de colectores de agua de lluvia.

— Abstract—

In Mexico, water drinking supply for small rural communities remains an unsolved problem. Several sources report that more than 5.7 million Mexicans lack access to drinking water in rural areas (more than 12 million people in the country). In Chiapas exists 18,160 rural communities, each with a population below 500 people, and most of them without access to drinking water supply. Specialized literature details different water collector models designed for homes that could solve this problem: ferrocement water collectors, brick water collectors “capuchino” kind, semi-rigid HDPE tanks, brick tanks, or uncovered concrete tanks. All of these must have a capacity above 21,000 liters as a minimum to supply water destined only for human consumption. Yet, these solutions remain costly for these rural communities, especially those sidelined. This article presents the description, hydraulic design (based on the continuity equation), construction, and cost of a rainwater collector system for sidelined rural communities that is an easy technical option to build and much more economical than those described in specialized literature.

Keywords:

Rain water collection; rural communities; drinking water supply; rainwater collector design.

La colección de agua de lluvia es una técnica arcaica utilizada por los pueblos de las culturas andinas, caribes y mesoamericanas. Estos pueblos colectaban el agua de lluvia a través de sistemas comunitarios o domiciliarios para variados fines, entre otros, agrícolas, limpieza doméstica, consumo humano y variados usos, como lo evidencian distintos estudios arqueológicos y algunos trabajos como los de Grazioso *et al.*, (2003) y Rojas (2009). Los pueblos mesoamericanos asentados en zonas donde el agua era escasa utilizaban las depresiones naturales del terreno para coleccionar el agua de lluvia, construían depósitos superficiales para almacenar agua. Los Mayas de Tikal, por ejemplo, utilizaron un reservorio de 57 000 m³ para almacenarla (Grazioso *et al.*, 2013) durante el Formativo Tardío (400 a.C.-200 d.C.). Se han encontrado evidencias del uso de tanques de almacenamiento domiciliarios en los palacios de la ciudad y en algunos sitios de su periferia (Grazioso *et al.*, 2013). Por su parte, los mayas peninsulares (MP) de Yucatán crearon otros tipos de colectores de agua de lluvia (CALL), como las rejolladas (bóveda de un cenote derrumbado) y los chultunes (Rojas, 2009). En Dzibilchaltún, Uxmal, Edzná, Chichén Itzá, Kabah Tulum existen suficiente certeza de la utilización de estas técnicas. Los MP tenían tres tipos de captación: Chen haltun, Nohaltun y Tsóno haltún. El Chen haltun era una técnica de colección de agua de lluvia para consumo humano; las otras dos podían usarse para consumo animal o con propósitos agrícolas (Rojas, 2009). Así, el antecedente mesoamericano de los colectores de agua de lluvia domiciliarios contemporáneos son los chultunes que actualmente se pueden apreciar en Edzná y Chichén Itzá. Los chultunes son cámaras subterráneas con forma de botella, constituidos por un sistema de captación y otro de almacenamiento (Rojas, 2009), como el que se puede ver en la Figura 1.

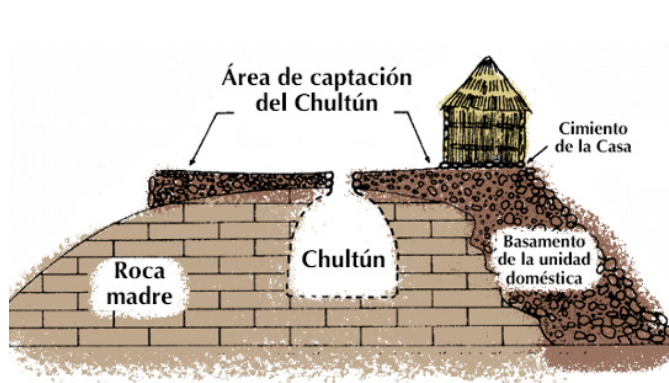


Figura 1. Chultún (Explore, 2020)

Desafortunadamente, las técnicas mayenses de colección de agua de lluvia de los MP no se sucedieron a los mayas continentales (MC) ni a sus descendientes (por ejemplo, las etnias mayenses contemporáneas de Chiapas). No

hay pruebas de técnicas similares en las ciudades mayas continentales de Guatemala y México, por ejemplo, en los palacios de Bonampak y Palenque, ni en las comunidades mayenses de Chiapas que se dispersaron por amplias zonas del Macizo Central, Montañas del Norte y la Selva Lacandona. Los grupos mayenses (o de otras etnias indígenas) desde su dispersión pos-hispánica y aún en la época moderna han colectado el agua de lluvia de forma rudimentaria, instalando recipientes de diversa geometría y volumen debajo de los techos de sus casas o utilizando las depresiones naturales. En el periodo pos-hispánico no se han encontrado evidencia de la construcción de jagueyes artificiales, en las comunidades indígenas ubicadas en la Depresión y Meseta Central del Estado de Chiapas; esta técnica rural ha sido introducida en la contemporaneidad. Conviene destacar que hay un vacío cronológico, histórico, antropológico e hidráulico sobre el tema. No existe un documento monográfico expofeso que narre el origen mesoamericano, caribe o andino de la colección de agua de lluvia desde la época prehispánica hasta nuestros días.

Por otra parte, los primeros CALL u hoyas colectoras de agua de lluvia (HCALL) a cielo abierto construidas en Chiapas con algunos fundamentos técnicos, los impulsó la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y posteriormente la extinta Comisión Estatal del Agua y Saneamiento (CEAS). Las HCALL en Chiapas se construyeron en las décadas de los 80's y 90's y cobraron relevancia porque fueron focos de contaminación y transmisión del cólera en la epidemia ocurrida al inicio de los años 90's. Las Se construyeron a cielo abierto y se contaminaron fácilmente con basura, acumulación de lodos, escurrimientos polutos (presencia de residuos de heces fecales). Se erigieron principalmente en pequeñas comunidades rurales (CR) de los Altos de Chiapas (AC), en zonas indígenas, con resultados desfavorables, porque facilitaron la trasmisión del cólera y de las denominadas enfermedades hídricas: diarrea, dermatitis, hepatitis A, gastroenteritis y fiebre tifoidea. Sin embargo, a pesar de ser fuentes de contaminación (Mundo, 2016b) en la actualidad se siguen construyendo, son parte de la política pública en el suministro de agua en las comunidades indígenas de los Altos de Chiapas. Así, de veinte HCALL estudiadas por Mundo *et al.*, (2016b) en los AC, todas se encontraron contaminadas con coliformes fecales (se sugiere ver la liga: <https://www.youtube.com/watch?v=MubN5zxytOw>). En este marco de estrechez (Mundo, 2016a), falta de agua y servicios públicos en los AC y en decenas de comunidades de la Selva Lacandona, se suscitó en 1994 el *levantamiento zapatista*, entre otros argumentos, por la pobreza extrema y centenaria de las comunidades indígenas de Chiapas y por las razones expuestas en De la Grange *et al.*, (1997); miseria aun no resuelta y expuesta al mundo en enero de 1994 por el Ejército Zapatista de Liberación Nacional (se sugiere ver la liga: <https://www.youtube.com/watch?v=w9PAV6jb9GM>).

Movidos por la situación de penuria extrema, falta de infraestructura, servicios médicos y la falta de agua (Mundo,2016c), las Organizaciones Internacionales Independientes (ONG) y los organismos internacionales intergubernamentales incrementaron su atención y asistencia a estas comunidades. Por tal razón, una comisión de la Food Agricultural Organization (FAO) arribó en mayo de 1994 a las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para celebrar una reunión técnica en la que se propuso un proyecto y recorrido técnico por las principales comunidades indígenas de la región de los AC, para observar de forma directa la problemática del agua, su relación con la pobreza extrema, el saneamiento básico y las enfermedades hídricas. Después del recorrido y de los estudios preliminares de gabinete el panorama resultante fue desalentador: más de 18,160 pequeñas CR de los AC menores de 500 habitantes se encontraban en condiciones de indigencia y la mayoría sin suministro de agua.

Así, en agosto de 1994, se formalizaron los primeros proyectos para suministrar agua por medios alternativos (no convencionales) a pequeñas CR de los AC (Mundo,2016d). En este marco se editó el libro *Tecnologías Alternativas en Hidráulica* (Mundo *et al.*, 1997). Este fue el primer libro en México sobre “Tecnologías Alternativas en hidráulica”, en el cual se describen 13 tecnologías apropiadas para la captación, conservación, saneamiento e impulsión de agua para las CR. Con base a esta obra se construyó el primer gran colector de agua de lluvia comunitario (CALLC) en México, único en su tipo en América Latina, que se le otorgó en el año 2010 El International Award for Best Practices concedido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y el Gobierno de Los Emiratos Árabes Unidos (se sugiere ver las siguientes ligas: <https://www.youtube.com/watch?v=zeIT2LobEqQ&t=137s> , <https://www.youtube.com/watch?v=MubN5zxytOw&t=114s>, <https://www.youtube.com/watch?v=dNhkPW2nYOU>). Así, en el año 2004 la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) creó el grupo de investigación “Hidráulica de ríos, cambio climático y tecnologías apropiadas”, quienes entre otras actividades se encargaron de dar seguimiento al CALLC construido en Yalentay, Zinacantán, Chiapas en 1999. Varios años después, en el año 2007 la FI de la UNACH construyó el primer colector de agua de lluvia domiciliario con ladrillo tipo capuchino en Chiapas, en el municipio de Zinacantán. Las adaptaciones técnicas al modelo del IMTA fueron en el campo de la mecánica de materiales y el análisis estructural, por ejemplo: se colocaron cinchos de varilla reforzando el primer tercio del colector considerando las aceleraciones sísmicas del estado de Chiapas, modelando el comportamiento de la estructura para empujes hidrostáticos, empujes hidrodinámicos y cargas externas transitorias. También se realizaron adaptaciones en la tapa del CALLD, se cambió el “arco bóveda” (constituido

en su forma original por dovelas) por una tapa horizontal. Por otra parte, se diseñó y colocó una columna (castillo) al centro del tanque para soportar el peso de la tapa para colectores de gran volumen (mayores a 40 000 litros).

Por otra parte, el Instituto Estatal del Agua (INESA) creado en diciembre de 2008 (nueve años después de haber sido construido el CALLC y uno año posterior a la construcción del CALLD en Yalentay), impulsó (varios años después de haber sido fundada) la construcción de CALLD de ferrocemento. Los tanques de ferrocemento se promovieron a finales de la década de los 80's e inicios de los 90's en Brasil y fueron reportados por FAO (2013). El INESA mal denominó a estos sistemas de colección "techos cuenca con ferrocemento". El término "techo cuenca" probablemente proviene de Anaya (1998) quien en el apartado 5.1.1.1 del documento "sistemas de captación de agua de lluvia" enuncia algunos sistemas de captación para zonas áridas y describe un techo de colección (techo cuenca) a dos aguas con la pendiente convergente hacia una canaleta central que colecta el flujo y lo conduce a una cisterna. Sin embargo, el término "techo cuenca" es un exceso, ya que la geomorfología de una cuenca, su tamaño, orden, densidad de corrientes, pendiente, entre otras variables, nada tienen que ver con la superficie, forma y pendientes de un techo colector como el que se describe en Anaya (1998). Así, los colectores de agua de lluvia que construyó y promovió el INESA en los AC en el primer lustro de la década de 2010 los denominó "techos cuenca con tanques de ferrocemento", los cuales ya se construían en el nordeste de Brasil donde son muy utilizados; la FAO (2013) los denomina "cisterna de placas de cemento", y consiste en un tanque o cisterna de forma cilíndrica recta, con la pared formada por malla electrosoldada o malla de piso y mezcla de cemento y arena previamente preparadas, como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Colector de agua de lluvia de ferrocemento (SEDEPAC, 2021)

Quizá la aplicación más extendida de los CALLD de ferrocemento lo realizó la extinta Secretaría de Infraestructura (SI) de Chiapas, con el fin de abastecer del vital líquido a la comunidad indígena de Jech-Chentic en Zinacantán. En esa comunidad se proyectó para construir 241 CALLD de ferrocemento (desde 5 hasta 30 m³) en el año 2013, para abastecer a 2148 personas, con una dotación de 20 l/hab/d.

2. PROBLEMÁTICA

En México, de acuerdo a datos de la CONAGUA (2016) la cobertura nacional de acceso al agua entubada en viviendas era de 97.2% en áreas urbanas y de 85.0% en áreas rurales. Si en el año 2015 vivían en el territorio nacional 95.08 millones de personas en zonas urbanas y 26.82 millones en zonas rurales, esto significa que 2,662,240 personas carecían de agua entubada en poblaciones urbanas y 4,023,000 en comunidades rurales. Sin embargo, esta información es dudosa. Por ejemplo, el informe del CONEVAL (2016) reportó que 5,629,600 personas que vivían en zonas rurales carecían de agua entubada, es decir, casi 30% más respecto a los datos de la CONAGUA (2016). Por otro lado, FES (2017) afirmó que 12 millones de mexicanos no tenían agua entubada en todo el territorio nacional. Estas cifras contrastan con los 6,685,240 que reportó la CONAGUA en el año 2016.

Por otra parte, solo en el estado de Chiapas la inmensa mayoría de las 18,160 pequeñas comunidades rurales menores de 500 habitantes que tiene la entidad, carece de agua. Este problema se magnifica en cientos de pequeñas comunidades indígenas dispersas, que se ubican en las zonas altas del Estado (Mundo, 2016c) y en miles de pequeñas comunidades rurales mestizas del país, especialmente aquellas que se encuentran alejadas de fuentes superficiales de agua o que están dispersas a través del territorio nacional. El suministro de agua por métodos convencionales a pequeñas comunidades rurales es un problema aún no resuelto, por las siguientes razones: 1. Ausencia de fuentes superficiales y/o subterráneas cercanas a las comunidades, 2. Dificultades técnicas como: falta de caudal suficiente o agua subterránea muy profunda con desconocimiento del gasto, 3. Problemas económicos: falta de recursos financieros para desarrollar la infraestructura de agua potable necesaria en miles de comunidades rurales del país, 4. Aspectos topográficos: muchas comunidades rurales se ubican en zonas con relieve de difícil acceso y casas muy dispersas. Así, una alternativa de solución que no requiere fuentes superficiales o subterráneas de agua, que puede construirse en comunidades con alta dispersión de los villorrios, que minimiza la contaminación del medio ambiente, no emite gases de invernadero, no es onerosa y puede instalarse en casi cualquier latitud donde llueva el promedio de la media nacional (incluso promedios menores) es la colección de agua de

lluvia domiciliaria a través de colectores cilíndricos cimbreantes (CALLDC). En los siguientes apartados se presenta el diseño hidráulico, el proceso construcción y el costo de un CALLDC para comunidades rurales excluidas.

3. COLECTORES DE AGUA DE LLUVIA DOMICILIARIO RÍGIDOS Y SEMIRRÍGIDOS

3.1 CALLD rígidos

El CALLD es una alternativa para minimizar la problemática de suministro de agua potable domiciliar a través de la colección de agua de lluvia en comunidades rurales (Mundo *et al.*, 2015; Mundo, 2018). En las figuras 2 y 3 se muestran dos CALLD cilíndricos rígidos. Éstos se pueden construir de ferrocemento (figura 2) o con ladrillo tipo capuchino, reforzado con malla de piso y repello de concreto (figura 3). El CALLD rígido de la figura 3 fue construido en una comunidad indígena de los AC (Mundo, 2017a) con una capacidad de 5,000 litros. Ambas son muy eficientes, durables y se pueden construir con capacidades superiores a los 50,000 litros. Sin embargo, sigue siendo una alternativa onerosa. Por esa razón se continúa investigando y ensayando diferentes tipos de materiales, con el fin de abaratar los costos, aumentar la durabilidad y el volumen de colección.



Figura 3. CALLD rígido tipo capuchino

3.2 CALLD semirrígidos

Los tanques semirrígidos de polietileno de alta densidad que se usan para almacenar agua y otro tipo de líquidos industriales, también pueden ser utilizados para colectar el agua de lluvia. Son tanques comercializados por diversos fabricantes. Son resistentes, pueden almacenar agua por un tiempo largo sin contaminarla y tiene una vida útil que en algunos casos rebasa los 20 años. Sin embargo, si se compara con los CALLC rígidos que tienen mayor durabilidad y pueden diseñarse para almacenar volúmenes superiores a los 25,000 litros, el costo de los CALLD semirrígidos sigue siendo elevado. En la tabla 1 se puede ver el valor económico de los diferentes tipos de colectores enunciados, tomando como referencia volúmenes entre 21000 y 25,000 litros.

Tabla 1

Costo en pesos mexicanos (con IVA incluido) de los colectores de agua de lluvia domiciliarios

Tanque semirrígido de polietileno de alta densidad, marca Rotoplas	CALLD tipo capuchino	CALLD de ferrocemento
93,242.00 ^a	96,750.68 ^b	111,263.37 ^b

a: El costo del Rotoplas de 25000 litros fue recuperado de: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-556949638-tanque-industrial-rotoplas-25000-l-cisterna-tinaco-_JM#position=6&type=item&tracking_id=4d91b326-f2d8-44e3-ac38-53776a473ea4. b: Los costos de los CALLD tipo capuchino y ferrocemento está asociados a un volumen de 21 000 litros; fueron elaborados por el primer autor, con precios de abril del año de 2020 e incluyen los siguientes conceptos: limpieza, trazo nivelación del terreno, construcción, materiales y mano de obra.

4. COLECTOR DE AGUA DE LLUVIA DOMICILIARIO CIMBREANTE

4.1 Descripción

Los CALLDC como los que se muestran en las figuras 4, 5 y 6 son una alternativa económica y sencilla para disminuir la problemática del suministro de agua a pequeñas comunidades rurales excluidas. El proceso constructivo de los CALLDC es más sencillo y económico que los CALLD rígidos. El CALLDC es un depósito cilíndrico que se construye con malla electrosoldada 66/4-4 con alambres laminados en frío (trefildados), recubierta de geomembrana de plástico flexible de 1.5 o 2 mm de espesor, que puede almacenar hasta 250,000 litros de agua sobre la superficie (figura 5) o de forma subterránea como se observa en la figura 6. El sistema cuenta con una bajada hidráulica que recibe el agua de la canaleta que pende del techo de la casa (figura 7).



Figura 4. Colector de agua de lluvia domiciliario cimbreado de 1,500 litros



Figura 5. Colector de agua de lluvia domiciliario cimbreado de 50,000 litros



Figura 6. Esquema del CALLD subterráneo, cimbreado de 50,000 litros

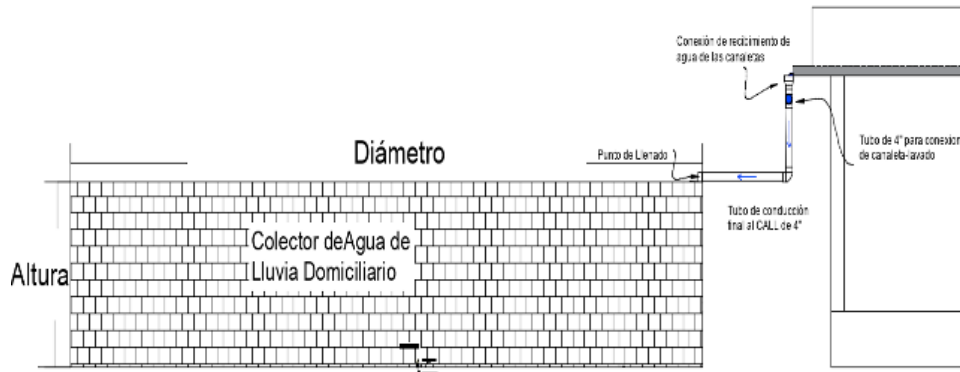


Figura 7. Esquema del CALLD cimbreado, canaleta y bajada de aguas pluviales

5. MATERIALES Y MÉTODO

5.1 Materiales

Los materiales que se utilizan en la construcción del CALLDC son los siguientes: geomembrana de alta densidad de 1.5 o 2 mm de espesor. La cantidad de geomembrana se estima con la suma de las áreas del cilindro. Por lo tanto, la superficie total de la geomembrana será un 10% superior a la suma de las siguientes áreas del CALLDC: a. Área de la base, b. Área toriesférica de la tapa (forma de casquete) y c. Área del cilindro. Los datos para estimar el área total de la geomembrana: D, h y L, se enuncian al final de este apartado. Así, r, D y h son el radio, el diámetro y la altura en metros del CALLDC, respectivamente. L es la jareta de la tapa en metros, como se observa en la figura 8. El área total de la geomembrana se estima con la siguiente ecuación:

$$A_t = \{\pi r^2 + [(0.31514)\pi D^2 + (\pi DL)] + (\pi D)(h)\}\{1.10\} \quad [1]$$

Donde, 0.31514 es una constante de la ecuación, r y D son el radio y el diámetro del CALLDC en metros, respectivamente. L en metros es la jareta de la tapa, como se observa en la figura 8.

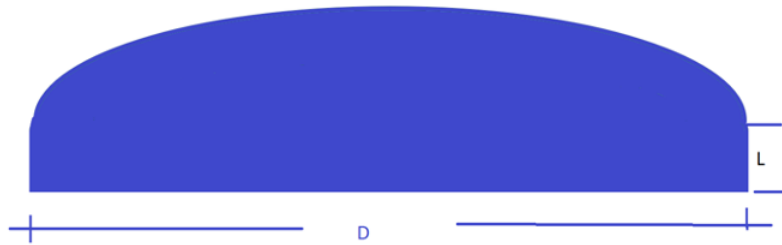


Figura 8. Tapa con superficie toriesférica

De acuerdo a la ecuación [1] la superficie total de geomembrana es 55.70 m². Una buena parte de la geomembrana cubrirá el cuerpo de cilindro, el cual se forma con la malla electrosoldada 66/4-4, cuyo perímetro (Per) se estima con la ecuación [2]:

$$P_{cr} = (\pi D)(1.05) \quad [2]$$

El valor de 1.05 representa el factor de traslape. La altura de la malla electrosoldada 66/4-4, para el caso bajo estudio es de 2 metros. El número de vástagos y varillas flexibles para formar la tapa del CALLDC se estiman dividiendo el resultado de la ecuación [2] entre dos, más uno, es decir:

$$\text{No de vástagos} = \frac{\pi D}{2} + 1 \quad [3]$$

En todo el perímetro del cilindro se colocan los vástagos de acero galvanizado de 3 m de longitud y una pulgada de diámetro, a cada 2 m, enterrados 0.5 m, amarrados a la malla electrosoldada 66/4-4. En cada vástago se coloca una varilla flexible para formar la tapa del CALLDC. A la geomembrana de la tapa deberá colocársele anillas metálicas de 0.5 a 1 pulgada de diámetro a cada 20 cm, con el fin de sujetarla al cuerpo del cilindro con alambre metálico flexible e inoxidable. Otras herramientas necesarias para las labores de limpieza y excavación del sitio del proyecto son: coas, machetes, rastrillos, picos, palas y carretilla, óxido de calcio, estacas, tramo de bramante de 2.5 m.

5.2 MÉTODO

5.2.1 Diseño hidráulico del CALLD cimbreado

5.2.1.1 Volumen máximo de almacenamiento

Supóngase que se desea suministrar agua para consumo humano, a una familia compuesta por 5 personas en una pequeña comunidad rural excluida, que tiene un promedio de precipitación anual normalizada P=800 mm. Después de

realizar una encuesta de consumo per cápita se determina que la dotación es de 23 l/hab/d. Se desea suministrar agua para consumo humano durante todo el periodo de estiaje que dura 6 meses. Para el diseño hidráulico del CALLDC se utiliza la ecuación de continuidad [4]. La notación diferencial de esta ecuación expresa que la tasa de cambio del volumen (V) del CALLDC respecto al tiempo es igual a la tasa de cambio del caudal (Q) respecto al tiempo, en un instante “t”:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt}Qt \quad [4]$$

La ecuación 4 también se puede escribir como:

$$dV = Qdt \quad [5]$$

Por lo tanto, el volumen total del CALLD se obtiene integrando la ecuación [5]:

$$\int dV = \int Q dt \quad [6]$$

Es decir:

$$V = Qt_a \quad [7]$$

Al integrar [7]: V es el volumen máximo del CALLDC en m³, Q es el caudal promedio en m³/d durante el tiempo de almacenamiento t_a (en días). Sin embargo, el volumen total (V) de la ecuación [7] depende de la dotación diaria per cápita (D) en m³/hab/d, del número de personas que forman la familia (H) y del tiempo de almacenamiento máximo (t_a) en días, es decir:

$$V = DHt_a \quad [8]$$

Entonces, el volumen máximo de almacenamiento del CALLDC, para una familia de 5 personas, con una dotación de 23 l/hab/d para la época de estiaje es:

$$V = (23 \text{ l/hab/d}) (5 \text{ hab}) (180 \text{ d}) = 20.7 \text{ m}^3$$

Este volumen lo satisface un CALLD con una altura h igual a 2 m y un diámetro de 3.63 m. La altura L de la jareta es de 0.39 m.

5.2.1.2 Caudal promedio necesario para obtener el volumen máximo del CALLDC

Sustituyendo la ecuación [8] en [7] y despejando Q se tiene:

$$Q = DH \quad [9]$$

Por lo tanto, el caudal promedio diario (Q) necesario para satisfacer el volumen máximo del CALLDC es: 115 l/d. Para garantizar que la precipitación promedio anual normalizada (P) en la zona del proyecto y la superficie de colección del techo de la casa (A_c) son suficientes para satisfacer la demanda durante toda la época de estiaje, se tiene que cumplir la desigualdad asociada al caudal de escurrimiento promedio del techo (Q_{et}) respecto al caudal promedio diario (Q) requerido por la familia, considerando P , entonces:

$$Q_{et} > Q \quad [10]$$

5.2.1.3 Caudal promedio de escurrimiento del techo (Q_{et})

De la ecuación [7] se tiene que:

$$Q = \frac{dA_c}{t_a} \quad [11]$$

De la ecuación [11] se obtiene la ecuación de continuidad:

$$Q = vA_c \quad [12]$$

Donde v es la velocidad y A_c es la superficie de colección. Como se sabe, la tasa de precipitación anual normalizada (P) tiene unidades de velocidad, por lo tanto, se puede asumir que:

$$v \sim P \quad [13]$$

Y si además el caudal Q de la ecuación [12] asociado al A_c del techo colector se denota como Q_{et} , entonces sustituyendo [13] en [12] se tiene:

$$Q_{et} = F_s P A_c \quad [14]$$

Donde:

P = Precipitación media anual normalizada (m/a).

A_c = Área de colección en el techo de la casa (m²).

F_s = Factor de seguridad de P (el F_s es igual a 0.80).

Q_{et} = Caudal promedio de escurrimiento del techo (m³/a).

Sustituyendo los datos correspondientes en la ecuación [14] se tiene que:

$$Q_{et} = (0.80)(0.8 \text{ m/a})(200 \text{ m}^2) = 128 \text{ m}^3/\text{a}$$

Por lo tanto, el caudal promedio diario Qet es igual a 350.68 l/d. Retomando la desigualdad [10], se prueba que:

$$350.58 \text{ l/d} > 115 \text{ l/d}$$

Esto significa que la precipitación promedio anual normalizada y el área del techo colector de la casa son aptas para suministrar el volumen demandado por la familia compuesta por 5 personas.

5.2.1.4 Área mínima de colección del techo

El área mínima (A_{cm}) del techo colector se obtiene de las ecuaciones [9] y [14]:

$$A_{cm} = \frac{DH}{F_s P} \quad [15]$$

$$A_{cm} = \frac{(8.935 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1} \text{ hab}^{-1})(5 \text{ hab})}{(0.80)(0.8 \text{ ma}^{-1})} = 65.59 \text{ m}^2$$

Como se puede ver, los 200 m² de casa de la familia (del caso bajo estudio), son suficientes para garantizar el llenado del CALLDC.

Por otra parte, en la literatura especializada se le asigna un factor arbitrario de 0.80 a la constante F_s de la ecuación [15], que considera una posibilidad del 20% de reducción de la precipitación anual normalizada (P). Sin embargo, F_s es distinto en cada sitio de estudio y depende de la variabilidad climática (Mundo, 2018). Por lo tanto, la ecuación [15] se debe reescribir como:

$$A_c = \frac{DH}{F_c P} \quad [16]$$

Donde F_c es el factor de variabilidad climática de la zona de estudio. Se destaca que no se puede hablar de variabilidad climática de una zona (como muchos estudios lo hacen) sin antes comprobar que dicho cambio o variabilidad existe. Esta comprobación se debe realizar con datos de las estaciones meteorológicas de la zona (no basta con una o dos) y deben ejecutarse con los métodos que para el caso existen. Por lo tanto, la variabilidad climática o cambio climático (F_c) expuesto como “factor climático” en la ecuación [16] debe comprobarse mediante el análisis detallado de las series temporales de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio. De acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (OMM), para zonas montañosas deben tenerse registros diarios mínimos de 50 años de P y para valles 30 años. De igual modo deben rellenarse los datos faltantes de acuerdo a las sugerencias establecidas en Mundo (2017b). Es indispensable verificar

la homogeneidad de las estaciones meteorológicas utilizando el “Standar Normal Homogeneity Test” (SNHT), método de Von Neumann o método de Buishand. Es necesario realizar el análisis de las anomalías de P y las tendencias de incremento o decremento de P en las series temporales, antes de afirmar que existe cambio climático en la zona bajo estudio, como se muestra en Mundo (2017b). De este modo debe estimarse el valor de F_c de la ecuación [16].

5.3 Proceso constructivo

Considerando que la altura a la que se encuentra la canaleta es de 2 m (desde el piso) y que el volumen de agua que debe almacenarse es de 20 700 litros, el diámetro del CALLDC se estimará con la siguiente ecuación:

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi h}} \quad [17]$$

Por lo tanto, el diámetro del CALLDC resulta 3.63 m. El área correspondiente a ese diámetro es de 10.34 m². Con base en este dato se debe de realizar una limpieza exhaustiva en el sitio del proyecto en una superficie circular superior a 10.34 m², desbrozando, quitando lajas, piedras, cantos y guijarros en la zona del proyecto. Luego se debe colocar en el centro del área una estaca amarrada a un bramante de 2.5 m. Se tensa el bramante una longitud de 1.815 m. Luego se amarra una segunda estaca y con la punta (en contacto con el piso) se marca en el suelo la circunferencia del CALLDC. Posteriormente se debe esparcir óxido de calcio sobre la marca para destacar el perímetro. Si el suelo es arcilloso se recomienda realizar una excavación en el área marcada, con una profundidad mínima de 0.30 m. Con el fin de mejorar la resistencia del suelo, se rellena la excavación con una capa de caliche de 0.20 m de espesor y se apisona con una “bailarina”. Después se coloca una capa de 5 cm de arena fina sin compactar. Sobre esa superficie se extiende la geomembrana de polietileno de alta densidad de 1.5 o 2 mm de espesor. Sobre la geomembrana colocada en el piso y en uno de los extremos más accesibles para la disposición de agua, se coloca un tramo de tubería de Fo.Go de media pulgada de diámetro, con sus accesorios correspondientes para construir un grifo y disponer del agua del CALLDC. Se recomienda que la altura del grifo en el exterior del cilindro sea de 1 m (para la comodidad del usuario en la disposición del agua). Justo en el perímetro de la excavación del CALLDC se coloca la malla electrosoldada de 66/4-4, formando un cilindro de 3.63 m de diámetro por 2 m de altura. Se amarra de manera correcta el traslape (al cuerpo del cilindro), utilizando alambre flexible galvanizado. Se colocan los vástagos de 1 pulgada de diámetro a cada 2 m, en posición vertical

(enterrándolo 0.5 m), utilizando un nivel de mano para garantizar su verticalidad, sujetando cada vástago, con alambre flexible al cuerpo del CALLDC (malla de contención de acero galvanizado). Luego, se colocan las varillas flexibles, en forma de dovelas, para formar la tapa toriesférica, sujetando las varillas a cada vástago y tendiéndolas hacia el centro de la circunferencia de dicha tapa, atando las puntas de forma rígida para formar la cubierta. Se cubre el cuerpo del cilindro al interior del mismo, con la geomembrana, estirándola, para evitar arrugas, sujetando dicha geomembrana a los bordes del cilindro con alambre flexible galvanizado, utilizando las anillas metálicas expofeso. Se cubre la tapa con la geomembrana, amarrando la jareta a través de las anillas metálicas al cuerpo del cilindro.

6. COSTO DEL CALLDC

El costo de construcción para una CALLDC se desglosa a continuación.

Tabla 2

Costo del CALLDC, con precios cotizados en mayo de 2020

CONCEPTO	Unidad	Costo parcial (\$)	COSTO (\$)
Limpieza, trazo, nivelación del área del proyecto.	3.63 m ²	12.65	45.91
Suministro y colocación de la malla electrosoldada 66/4-4, considerando 5% de traslape.	$(\pi)(3.63 \text{ m})(1.05)$ (2 m de h) = 23.95 m ²	66.41	1590.52
Suministro y colocación de la geomembrana de 1.5 mm de espesor.	65.59 m ²	66.41	1665.60
Costo de 65.59 m ² de geomembrana de 1.5 mm de espesor.	65.59 m ²	130	8526.70
Rollo de malla electrosoldada 66/4-4 (40 m x 2.50 m).	1	6790	6790
6 vástagos de tubería galvanizada 2 pulgadas (3 M/cal-22/10).	1 paquete de 10	2780	2780
Costo de varillas flexibles para la tapa del CALLDC.	1 paquete de 10	1789	1789
TOTAL			23,187.73

El costo de CALLDC es casi 3.5 veces más económico que el más barato de los CALLD mostrados en la tabla 1.

7. CONCLUSIONES

En México existen más de 5.7 millones de mexicanos en zonas rurales que carecen de agua entubada y más de 12 millones en todo el territorio nacional. Solo en el estado de Chiapas hay más de 18,160 pequeñas CR menores de 500 habitantes, la inmensa mayoría con escasez de agua. Una opción para disminuir el problema de la insuficiencia de agua en éstas CR excluidas es la

colección de agua de lluvia. En este trabajo se presentó el diseño hidráulico de un colector de agua de lluvia domiciliario cimbreante, de gran capacidad, sencillo de construir y económico, con el fin de coadyuvar a la solución del suministro de agua en las comunidades rurales del país. La fundamentación física del diseño hidráulico es el principio de continuidad en su versión cinemática y volumétrica. Se presenta además, de forma sucinta, el proceso constructivo del CALLDC y un análisis de costo, demostrando que con el CALLDC se pueden almacenar grandes volúmenes a un costo bajo (3.5 veces menor que los colectores semirrígidos y rígidos, descrito en este documento). A modo de reflexión final se detectó la necesidad de evaluar en campo la durabilidad de la geomembrana expuesta de forma casi permanente al deterioro que produce la radiación solar. De acuerdo a LG (2017), la garantía estándar de la geomembrana Enviro Liner® 6000x es de 10 años (extendida a 25 años en algunas aplicaciones aprobadas). Este tipo de geomembrana ha sido creada para ofrecer buena resistencia contra los rayos UV. Sin embargo, debe destacarse que la descripción anterior es la que el proveedor arguye. Habrá que realizar los experimentos de campo correspondientes, tanto para los CALLDC construidos sobre la superficie como para los subterráneos, con el fin de comprobar lo afirmado en la ficha técnica correspondiente.

REFERENCIAS

- Anaya, G. M.** (1998). *Sistemas de colección de agua de lluvia para uso doméstico en América Latina y el Caribe. Manual Técnico*. Agencia de Cooperación Técnica IICA-México. México.
- CONAGUA.** (2016). *Estadísticas del agua en México*. Comisión Nacional del Agua. México, D.F.
- CONEVAL** (2016). La carencia por acceso a los servicios básicos en la vivienda: evolución 2010-2016 y apuntes sobre el acceso al agua en el medio rural. *Informe del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL)*. https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Documents/Pobreza_16/Notas_Pobreza_2016/Documento_servicios_basicos_2010-2016.pdf
- De la Grange, B., Rico, M.** (1997). *Marcos, la genial impostura*. Ed. Nuevo Siglo Aguilar. Ciudad de México, México.
- Explore.** (2020). *Cisternas mayas para recolectar agua: Chultunes*. <http://www.explore.mx/cisternas-mayas-para-recolectar-agua-chultunes/>
- Friedrich- Ebert-Stiftung.** (2017). El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica. Friedrich-Ebert-Stiftung (FES). *Proyecto Regional Transformación Social-Ecológica*. Ciudad de México. México.
- Grazioso, S.L., Scarborough, L.V.** (2013). Control del agua por los antiguos Mayas: El sistema hidráulico de la ciudad de Tikal. *Contributions in New World Archaeology*. Vol.5: 39-56.
- LG.** (2017). Geomembrana fortificada Enviro Liner 6000x. Datos técnicos y especificaciones. LayField Group (LG). *Environmental Containment*. https://www.layfieldgroup.com/Content_Files/Files/Brochures/EL-6000-Technical-Booklet-SP-2017-Version-2-0-Low-Res-Electronic.pdf?ext=.pdf
- Mundo, M.M., Martínez, A.P., Barrios, H.L., Delgado, B.J.A.** (1997). *Tecnología Alternativas en Hidráulica. Guía técnica para la selección*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Mundo, M, M; Oseguera Solórzano, L. M.** (2015). Casa sustentable y tecnologías apropiadas asociadas, para minimizar la pobreza elevar el nivel de vida de las comunidades indígenas y conservar el medio ambiente en México. *ESPACIO I+D, INNOVACIÓN MÁS DESARROLLO*, 4(7). <https://doi.org/10.31644/IMASD.7.2015.a03>
- Mundo- Molina, M.** (2016a). [UNACH Facultad de Ingeniería]. (10 de mayo de 2016). *Una reflexión sobre la pobreza*. [Archivo de video]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=w9PAV6jb9GM&t=123s>

- Mundo-** Molina, M. (2016b). [UNACH Facultad de Ingeniería]. (10 de mayo de 2016). *Sistema alternativo para la dotación de agua potable*. [Archivo de video]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=MubN5zxytOw&t=114s>
- Mundo-** Molina, M. (2016c). Supplying System for Drinking Water to Small Rural Communities with Zero Greenhouse Gasses: Sixteen Years of Experiences in Mexico. *Journal of Water Resource and Protection*, 8, 1044-1052.
- Mundo-** Molina, M. (2016d). Aspectos ontológicos de la tecnología y método de transferencia, casos de estudio: El colector de agua de lluvia y la casa sustentable para comunidades indígenas. *Espacio I+D Innovación y Desarrollo*, Vol. V, Núm. 10.
- Mundo**, M.M. (2017a). *Cisterna tipo capuchino: para suministrar agua potable a comunidades indígenas*. Informe interno inédito. Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Mundo**, M.M. (2017b). Análisis de los procesos cíclicos de enfriamiento-calentamiento y anomalías de las temperaturas máximas y mínimas de la estación meteorológica 07205 ubicada en la meseta comiteca de la RH Grijalva Usumacinta, en el marco de la inestabilidad climática global. *La cuenca del río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático*. (pp. 33-55). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Mundo-** Molina, M. (2018). Diseño y estimación del área de colección mínima de un colector de agua de lluvia flexible para comunidades marginadas. *Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Buenos Aires, Argentina.
- Organización de las Naciones unidas para la Alimentación y la Agricultura**. (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones unidas para la Alimentación y la Agricultura oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, Chile.
- Rojas**, R.T. (2009). *Cultura hidráulica y simbolismo mesoamericano del agua en el México prehispánico*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua/ Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología. Jiutepec, Morelos, México.
- SEDEPAC**. (2021). *Cosecha de agua de lluvia. Servicio Desarrollo y Paz Huasteca Potosina (SEDEPAC)*. SEDEPAC Huasteca, A.C. Recuperado de: <https://www.sedepachuasteca.org/que-hacemos/tanques-de-ferrocemento/>