

Proposal for the design of a rainwater collection and distribution system based on maritime containers in Santa Catalina Quierí, Oaxaca, Mexico

L. M. Flores Gabriel, Estudiante Ingeniería Civil1, J. R. Lorenzo Llarena, Estudiante Ingeniería Civil1 1Universidad Iberoamericana Puebla, México, lilia.flores.gabriel@gmail.com, joserralorenzollarena@gmail.com

Abstract– The project consisted in the elaboration of a design for the collection of rainwater in the rural community of Santa Catalina Quierí, Oaxaca, Mexico, for which a maritime container was proposed to be used as a cistern. The proposal covered, the bibliographic research on different water catchment systems, the selection of the elements that would be used, the elaboration of hydraulic calculations for the collection system, the design of project blueprints, budget estimation and the creation of a model. It was concluded that it is possible to build such a catchment system quickly, at low cost and be able to solve the problem of drinking water supply in the aforementioned population.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.280>
ISBN: 978-0-9993443-1-6
ISSN: 2414-6390

Propuesta de diseño de un sistema de captación y distribución de agua potable a base de contenedores marítimos en Santa Catalina Quierí

L. M. Flores Gabriel, Estudiante Ingeniería Civil¹, J. R. Lorenzo Llarena, Estudiante Ingeniería Civil¹

¹Universidad Iberoamericana Puebla, México, lilia.flores.gabriel@gmail.com, joserrallorenzollarena@gmail.com

Abstract– El proyecto consistió en la elaboración de un diseño para la recolección de agua pluvial en la comunidad de Santa Catalina Quierí, para el cual se utilizó un contenedor marítimo que fungió como aljibe. La propuesta abarcó, la investigación bibliográfica sobre distintos sistemas de captación de agua, la selección de los elementos que se usarían, la realización de cálculos hidráulicos para el sistema de captación, la elaboración de planos del proyecto, la estimación del presupuesto y la creación de una maqueta. Se concluyó que es posible construir dicho sistema de captación de manera rápida, de bajo costo y ser capaz de resolver el problema de abastecimiento de agua potable en la población mencionada.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La creciente amenaza mundial de falta de agua [1], aunada con la próxima aprobación de la Ley General de Aguas en México [2], ha aumentado la preocupación sobre los recursos hídricos y su distribución en este país.

En el 2010, según el reporte de la CONAGUA [3], el 91.3% de la población en México alcanzó la cobertura universal de agua potable. De acuerdo con este organismo, 3,925,000 habitantes no contaban para entonces con este servicio en zonas urbanas y 7,145,000, en zonas rurales. Considerando el crecimiento poblacional, para el 2030 la brecha alcanzará a 27,113,000 habitantes en las zonas urbanas y 9,695,000, en las rurales.

Dentro de las comunidades que presentan dificultades en la distribución de agua potable, se eligió la de Santa Catalina Quierí, ubicada en la Sierra Sur de Oaxaca, por las complicaciones que sufre para el abastecimiento del vital líquido, al encontrarse a una altura promedio de 350 m sobre el nivel del río más cercano, buscando una solución que pudiera ayudar a esta comunidad.

II. OBJETIVOS DEL PROYECTO, ALCANCES Y LIMITACIONES

El objetivo general del proyecto fue diseñar un sistema de captación y distribución de agua pluvial, a base de contenedores marítimos reciclados, para la comunidad antes mencionada.

Los objetivos específicos del proyecto consistieron en analizar los diferentes sistemas de captación de agua pluvial; realizar cálculos hidráulicos para el diseño del área de captación, cama de grava, filtro de arena y almacenamiento de

agua en el contenedor; dibujar los planos hidráulicos del sistema y, finalmente, hacer una estimación de los costos del proyecto. Además, se realizó una maqueta con fines ilustrativos.

Cabe aclarar que no se procedió a la implementación del proyecto por falta de recursos.

III. MARCO TEÓRICO

Actualmente existen sistemas de captación enfocados a la recolección de agua pluvial en comunidades rurales, que direccionan la escorrentía a tanques donde el líquido es posteriormente utilizado [4].

Los sistemas de captación y almacenamiento de agua se conforman de diversos elementos, que participan en la tarea de recolectar y resguardar el líquido. A continuación se presentan los que se definieron para este sistema en específico.

La cama de grava es un elemento diseñado para actuar como un filtro mecánico y un recolector de las primeras aguas. El vertedero de demasías sirve para evitar el aumento en la velocidad y saturación de la cama de grava. Los filtros de arena se introducen con el fin de eliminar, de manera física, las impurezas que arrastra el agua pluvial. El filtro de ósmosis inversa suele ser el último y servirá para purificar el agua y adecuarla para su consumo.

Entre los recolectores de agua más comunes, se encuentran los aljibes [5], también conocidos como ollas de agua o jagüeyes, que son depresiones sobre el terreno que permiten almacenar líquido proveniente de escurrimientos superficiales. Éstos pueden estar diseñados con o sin cubierta.

Otro tema de vital importancia son los materiales geosintéticos [6], que son textiles planos, permeables y poliméricos, que se usan en contacto con suelos y otros elementos para aplicaciones geotécnicas en ingeniería civil. De éstos, los relevantes para el diseño del proyecto son los geotextiles, que tienen la función de retener partículas, y las geomembranas, que se ocupan de aislar e impermeabilizar superficies.

Además de los conceptos mencionados anteriormente, para concretar las dimensiones en el proyecto es necesario calcular la demanda de agua de la comunidad y el volumen de almacenamiento permitido por el contenedor.

La demanda de agua potable que se calcula a partir de la siguiente ecuación:

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.280>
ISBN: 978-0-9993443-1-6
ISSN: 2414-6390

$$D = 2.5 P. \quad (1)$$

donde D es la demanda de agua potable (*litros*) y P es la población (*personas*) actual de Santa Catalina Quierí.

Para determinar el total de agua recolectada (m^3) se utiliza la ecuación ,

$$T_{ar} = L_g P_d L_{ac}. \quad (2)$$

donde T_{ar} es el agua total recolectada (m^3), L_g es el largo de la cama de grava (m), P_d es precipitación media por día (m) y L_{ac} es el largo del área de captación.

La escorrentía se define como el agua que corre libremente sobre la superficie después de una precipitación y que no se infiltra en el suelo [7]

El coeficiente de escorrentía se refiere al porcentaje de agua que permanece sin permean en una precipitación [8], y depende de numerosos factores: del tipo de precipitación (lluvia, nieve o granizo), de su cantidad, intensidad y distribución en el tiempo; de la humedad inicial del suelo; del tipo de terreno, del tipo de cobertura vegetal existente, de la intercepción que provoque; del lapso de tiempo a considerar y de la pendiente del terreno, entre otros. Puede tomar valores entre 0 y 1.

Para calcular la escorrentía efectiva se requiere la expresión

$$E_s = C_{es} P. \quad (3)$$

donde E_s se refiere a la escorrentía, es decir el agua aprovechable que no permea en el suelo, C_{es} es el coeficiente de escorrentía y P corresponde a la cantidad de agua pluvial neta sobre el área.

Para determinar el área necesaria para la conducción del agua de la cama de grava al filtro de arena, hecha a través de tubos de PVC, se utilizó la siguiente expresión

$$Q = V A. \quad (4)$$

donde Q es el caudal o flujo volumétrico (m^3/s), V es la velocidad del agua (m/s) y A es el área de la sección transversal de un tubo donde pasa el líquido (m^2).

Para realizar los cálculos para el filtro de arena, se requiere hacer uso de su capacidad de infiltración; los valores promedio para diferentes tipos de suelo se presentan en la Tabla I.

TABLA I
VALORES PROMEDIO DE INFILTRACIÓN

Tipo de Suelo	Capacidad de infiltración (mm/h)
Arena	50
Limo Arenoso	25
Limo Arcilloso	12

Fuente [9]

Finalmente, para presupuestar el sistema se utilizó el método de costos unitarios, el cual se usa comúnmente para presupuestos de proyectos de construcción, y consiste en un análisis valorativo detallado de los conceptos involucrados para su realización [10].

IV. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Se comenzó por realizar una investigación sobre las diversas formas de captación de agua pluvial, de entre las cuales se eligieron los elementos que se expusieron en la sección anterior, eligiendo un sistema en el que el agua sea distribuida por gravedad.

Se decidió usar un contenedor marítimo para almacenar el agua porque, a diferencia de los aljibes a cielo abierto, éste permite que el líquido sea acopiado en un ambiente cerrado, evitando así su contaminación externa, además de tener costo menor, con una inversión recuperable a corto plazo, y ser adaptable a las condiciones particulares de cada sitio.

Existen diferentes medidas de contenedores marítimos; las dimensiones del contenedor seleccionado para este proyecto en específico se muestran en la Tabla II.

TABLA II
DIMENSIONES Y MEDIDAS DEL CONTENEDOR SELECCIONADO

Exterior L X W X H (pies)	Interior L X W X H (cm)
20' x 8' x 8' 6''	586 x 233 x 235
20' x 8' x 8' 6'' reforzado	586 x 233 x 235
40' x 8' x 8' 6''	1200 x 233 x 235
40' x 8' x 8' 6''	1200 x 233 x 265

Fuente [11]

Con los detalles del sistema de captación ya definidos, se dibujaron los planos del sistema a través de un software de diseño asistido por computadora, como se muestra en la Figura 1.

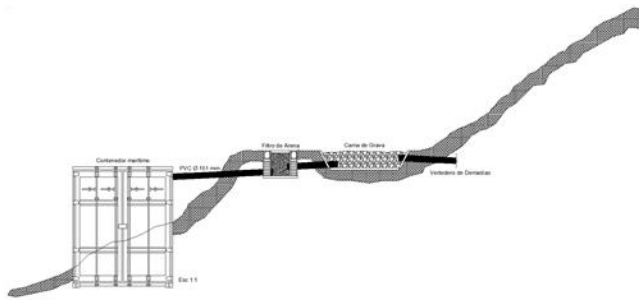


Fig. 1 Corte lateral del sistema.

Con la finalidad de permitir el paso del agua y evitar la transferencia de grava o arena, se decidió usar materiales geosintéticos. En particular, se eligió utilizar geotextiles en las tuberías, tanto de la cama de grava como del filtro de arena, y un recubrimiento completo del contenedor con geomembrana, el cual evitaría el contacto del agua con las paredes interiores del contenedor, previniendo fugas y corrosión.

En las Figuras 2 y 3 se puede ver el detalle de recubrimiento de las tuberías de la cama de grava y del filtro de arena respectivamente.

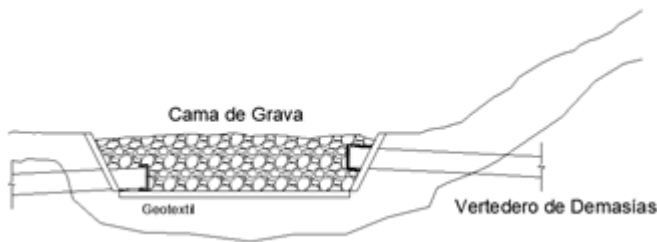


Fig. 2 Detalle de la cama de grava.

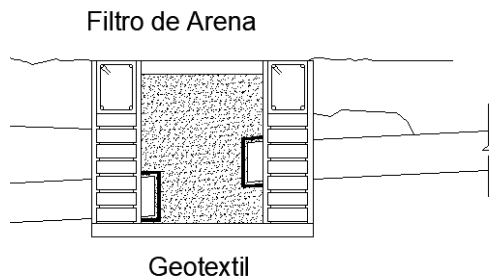


Fig. 3 Detalle del filtro de arena.

En la Figura 4 se muestra el sistema hidráulico del contenedor, donde se agrega el detalle del filtro de ósmosis inversa y la geomembrana.

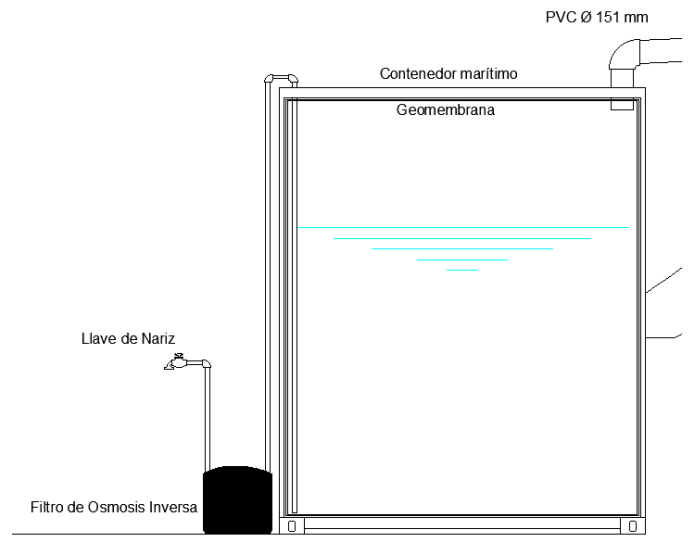


Fig. 4 Sistema hidráulico del contenedor.

El filtro de ósmosis inversa consiste de 6 componentes, que a continuación se describen. El filtro de sedimentos en polipropileno, que remueve partículas, polvo, tierra, etc.; el filtro de carbón activado granular (GAC) y el de carbón activado en bloque (CTO), que remueven cloro, sedimentos orgánicos, olores, sabores, etc.; el filtro de carbón activado en bloque (CTO); la membrana de ósmosis inversa, que remueve bacterias, metales pesados, sal, sustancias minerales y químicas dañinas disueltas en el agua; un último filtro de carbón activado, que mejora el sabor del agua y una fuente de luz ultravioleta, que contribuye a eliminar bacterias y virus presentes en el agua [12]. El filtro de ósmosis inversa cumple además con lo establecido en el estándar NSF/ANSI 58 [13].

A continuación, se identificó que el número de habitantes en la comunidad es de 922 *personas* [14] y la cantidad de agua potable que necesitaban diariamente de 2.5 *l/persona* [15]. A partir de estos datos se calculó la demanda de agua usando la ecuación 1, se encontró que se requerirían 2,305 *l* cada día para abastecer las necesidades de la comunidad.

Se procedió a georreferenciar la comunidad de Santa Catalina Quierí, con ayuda del software Google Earth, donde se trazaron varios polígonos de áreas que se identificaron como cerros, y se procesaron los archivos, con sus respectivas coordenadas, en el programa Global Mapper. En las Figuras 5 a 7 se muestran las imágenes satelitales de la comunidad y dichos polígonos.



Fig. 5 Vista satelital de Santa Catalina Quierí.
Fuente: Google Earth.

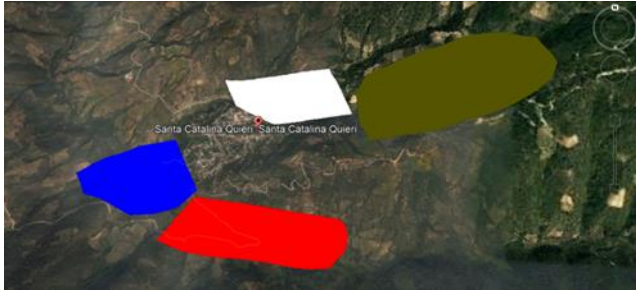


Fig. 6 Polígonos trazados sobre los cerros de Santa Catalina Quierí.
Fuente Google Earth.



Fig. 7 Polígono 1 con curvas generadas en Global Mapper.

Analizando los cuatro polígonos de la Figura 6, se llegó a la conclusión de que el polígono 1, que se muestra en la Figura 7, cumplía con las condiciones topográficas necesarias para el sistema de recolección, tanto por su pendiente como por su cercanía a la comunidad.

Con el área de captación ya definida, se procedió a dibujar las curvas de nivel, en un programa de diseño asistido por computadora, donde a cada curva se le dieron los valores de altura correspondientes, obteniendo como resultado un modelo en tres dimensiones del cerro, como se muestra en la Figura 8.

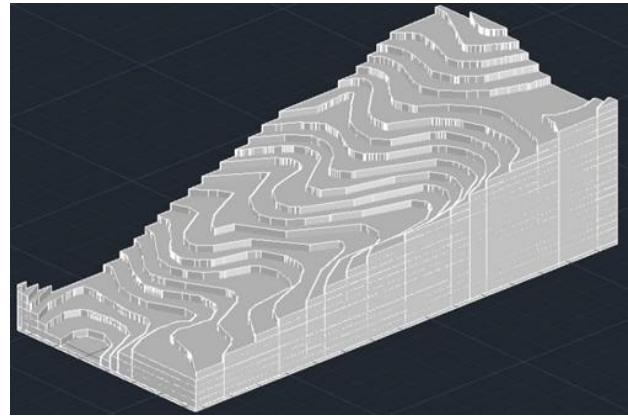


Fig. 8 Visualización del cerro en 3 dimensiones.

Para que el sistema de captación y almacenamiento aprovisionara el agua de una manera adecuada, se decidió que ésta pasara por tres distintos procesos de filtración: la cama de grava, un filtro mecánico que actúa como recolector de las primeras aguas; el filtro de arena que elimina de manera física las impurezas que arrastre el agua pluvial; el filtro de ósmosis inversa, el cual le da potabilidad al líquido.

Para el cálculo del largo de la cama de grava se tomó en cuenta la precipitación anual, la permeabilidad del suelo en la zona y el área de captación obtenida a través de Google Earth y el archivo de Global Mapper.

Se obtuvieron los datos de precipitación promedio anual de la zona con ayuda del Catálogo de Microrregiones del Gobierno de México [16]. El rango de precipitación media anual resultó ser de $800-1000 \text{ mm}$; sin embargo, para el proyecto se optó por usar la media (900 mm) y dividirla entre 365 días, para obtener una precipitación media diaria de 2.47 mm .

A partir del volumen del contenedor que se usaría (85.61 m^3), y empleando los datos de precipitación anual de la zona [16], se calculó el área de recolección que se requeriría para recaudar dicha cantidad de agua. Para tal fin, se propuso ubicar al contenedor en la base del cerro y se tomó como constante, basándose en la topografía del lugar, una altura de 700 m para la longitud del área de recolección de la cuenca. Posteriormente se tomó el ancho de dicha área como variable, el cual coincidiría con la longitud de la cama de grava que recolectaría la escorrentía dirigida a su base por la pendiente del cerro.

El siguiente paso fue calcular el volumen de agua pluvial sobre el área total de la cuenca recolectada por día, que fue de 25.89 m^3 , al cual se le aplicó una reducción utilizando el coeficiente de escorrentía para suelos con cobertura vegetal de pastos de tipo permeable obtenida del “Método de los Coeficientes de Escorrentía” [8]. Con el coeficiente de escorrentía definido, se realizó la reducción del agua recolectada con la ecuación 3 y se obtuvo una recolección de agua efectiva de $7,767.12 \text{ l}$ por día. Además, fue necesario establecer la cantidad recolectada en el mes crítico, que resultó

ser 4,064.5 l diarios, ya que este mes presenta precipitaciones únicamente del orden de 40 mm [16], suficiente para cubrir la demanda diaria.

Para calcular el volumen de la zanja, se utilizaron la corona, el largo y la altura de la cama de grava, cuyos datos se muestran en la Tabla III.

TABLA III
CÁLCULO DE LA ZANJA DE LA CAMA DE GRAVA

Total Agua Efectiva Recolectada por Día (m ³)	3.77
Largo Base Trapecio Zanja (m)	0.5
Largo Corona Trapecio Zanja (m)	0.6
Altura Zanja (m)	0.5
Largo Cama de Grava (m)	15
Volumen de la Zanja (m ³)	4.125

Fuente elaboración propia.

Se propuso usar un filtro de arena con una capacidad de 1,000 l de agua, y utilizando el coeficiente de permeabilidad de arena y estimando el tiempo de vaciado, se confirmó que este dispositivo sería adecuado.

Para calcular el diámetro de los tubos, fue considerada una velocidad máxima del líquido de 1.5 m/s según las recomendaciones de la SAGARPA¹ [5], lo que sirvió de base para estimar caudales, tanto de entrada como de salida, obteniendo así el área ideal de las tuberías. Con base en ello, se definieron 3 tuberías de 151 mm de la cama de grava al filtro de arena y una tubería de 151 mm del filtro de arena al contenedor.

Se calcularon los días de reserva de suministro del contenedor, al dividir el contenedor lleno a su máximo nivel entre la demanda de la población de litros de agua al día. Este cálculo es indispensable, especialmente en época de sequía. Se encontró que el contenedor lleno es capaz de suministrar el vital líquido a la población durante una sequía de hasta 37 días.

Con las dimensiones estimadas del proyecto, se procedió a realizar un presupuesto preliminar a través del método de costos unitarios [10], cuyo resumen se muestra en la Tabla IV. Es importante mencionar que este presupuesto fue realizado en pesos mexicanos MXN en el mes de octubre del 2017².

TABLA IV
RESUMEN DEL PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Total Filtro de Arena	\$ 10,230.12
Total Cama de Grava	\$ 961.97

¹ Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación

² El cambio de dólar americano a peso mexicano era de 20.71

Total Tubería	\$ 6,886.58
Total Contenedor	\$ 86,201.20
Total Conexiones	\$ 224.14
Total Filtro de Osmosis Inversa	\$ 16,638.00
Total	\$ 121,142.00
I.V.A.	\$ 19,382.72
Subtotal	\$ 140,524.70
Gastos Indirectos	\$ 11,241.98
Total	\$ 151,766.70

Fuente elaboración propia.

Finalmente, para fines ilustrativos, se realizó una maqueta a escala 1:30 del sistema de recolección de agua con MDF de 3 mm y tecnología de corte en laser como se muestra en la Figura 9.



Fig. 9 Maqueta del contenedor en ladera.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del diseño elaborado en este trabajo, se concluye que el problema de abastecimiento de agua pluvial de la comunidad de Santa Catalina Quierí, Oaxaca, México, se podría resolver con la construcción de un sistema de recolección de agua pluvial a base de contenedores marítimos reutilizados, ya que su construcción es factible y de bajo costo.

El costo de implementación del sistema sería de \$151,766.70 MXN (\$7,329 USD).

Se calcularon las dimensiones necesarias del área de captación y la cama de grava para abastecer a esta comunidad, expuestas en la Sección IV, y se verificó que la precipitación mensual promedio permitiría que se cumpliera con la demanda del líquido, incluso en los meses más secos, y que la capacidad del contenedor fuera suficiente para almacenar un volumen de agua necesario para cubrir la demanda hasta por 37 días.

Debido a que el trabajo pretende impactar socialmente y busca inspirar futuros proyectos, se ponen al alcance del

público general los planos constructivos del sistema, esperando que sean del mayor provecho posible para cualquier persona, organismo u empresa que busque el desarrollo de las comunidades rurales en el mundo. Los planos se pueden descargar gratuitamente en el siguiente enlace: <https://joserralorenzollar.wixsite.com/aguacontenedores>

AGRADECIMIENTOS

Se desea agradecer por su paciencia y dedicación en la edición del artículo a la Doctora Belinka González Fernández, quien aportó valiosas observaciones que fueron indispensables para la realización del artículo y al Maestro Ramiro Bernal Cuevas por revisar el artículo.

REFERENCIAS

- [1] Onishi, Norimitsu. 2018. Esta ciudad sudafricana está cerca de su 'día cero' por la escasez del agua. The new york times. [En línea] 31 de enero de 2018. [Citado el: 4 de febrero de 2018.] <https://www.nytimes.com/es/2018/01/31/ciudad-del-cabo-sudafrica-sequia-agua/https://www.nytimes.com/es/2018/01/31/ciudad-del-cabo-sudafrica-sequia-agua/>.
- [2] Garduño, Roberto. 2017. Nueva ley prevé concesionar explotación de agua y permitir a IP descargas residuales. Ciudad de México: La Jornada, 2017.
- [3] CONAGUA. 2015. CONAGUA. Estadísticas del agua en México. [En línea] Diciembre de 2015. [Citado el: 4 de febrero de 2018.] <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf>.
- [4] FAO. 2013. Fondo Internacional de desarrollo agrícola. Captación y almacenamiento de agua de lluvia. [En línea] 2013. [Citado el: 4 de febrero de 2018.] <http://www.fao.org/docrep/019/i3247s/i3247s.pdf>.
- [5] SAGARPA. 2013. SAGARPA.Ollas de agua, Jagüeyes, cajas de agua o aljibes. [En línea] 2013. [Citado el: 4 de febrero de 2018.] <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Ollas%20de%20agua.pdf>
- [6] Muñoz, Francisco Bellester. 2000. GITECO UNICAN. Definición, función y clasificación de los geotextiles. [En línea] 2000. [Citado el: 4 de febrero de 2018.] <https://www.giteco.unican.es/pdf/publicaciones/AYC30-X-2000.pdf>
- [7] Agua de escorrentía. Toro, Carmen González. 2009. Mayagüez: Universidad de Puerto Rico, 2009. [Citado el: 24 de noviembre del 2017]
- [8] Paredes, Andrés Martínez de Azagra. 2006. Osificación. Método de los coeficientes de escorrentía. [En línea] 2006. [Citado el: 4 de febrero de 2018.] <http://www.oasification.com/archivos/Coeficientes%20de%20escorrentia.pdf>.
- [9] Velázquez, Neftali. 2015. UDAEP. Infiltracion, Ensayos de Hidrología. Universitat Politècnica de Catalunya. BarcelonaTech (UPC). [En línea] 2015. http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_136_147_89_1258.pdf
- [10] Razura, Álvaro Beltrán. 2012. Libro de Texto: Costos y Presupuestos. Tepic: Instituto Tecnológico de Tepic, 2012. [Citado el: 21 de enero de 2018] <https://icittepic.wikispaces.com/file/view/COSTOS+Y+PRESUPUESTO+S.pdf>
- [11] Bustillo, Adolfo López. 2013. COMUNIDAD ANDINA. Manual sobre control de contenedores. [En línea] Enero de 2013. [Citado el: 4 de febrero de 2018.] <http://www.comunidadandina.org/DS/Manual%20Contenedores.pdf>.
- [12] Villareal División Equipos. 2017. Sistema de ósmosis inversa POU marca PURIKOR de 6 etapas con luz UV y filtración de 5 micras para flujo de 400 GPD [En línea] 2017. [Citado el: 18 de junio de 2018.] <https://www.vde.com.mx/pkro400-6uvp.html>
- [13] NSF. 2018. Estándares para sistemas de tratamiento de agua. [En línea] 2018. [Citado el: 18 de junio de 2018.] <http://www.nsf.org/es/recursos-del-consumidor/estandares-para-sistemas-de-tratamiento-de-agua>
- [14] INAFED. 2012. Santa Catalina Quierí, Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. [En línea] 2012. [Citado el 29 de enero de 2018.] <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM20oaxaca/municipios/20361a.html>
- [15] NATGEO. 2015. ¿Cuántos vasos de agua se deben beber al día? NATGEO. [En línea] 21 de mayo de 2015. [Citado el: 4 de febrero de 2018.] <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/cuantos-vasos-de-agua-se-deben-beber-al-dia>.
- [16] CIBCEC. 2003. Microrregiones. Santa Catalina Quierí. [En línea] 2003. [Citado el: 4 de febrero de 2018.] <http://www.microrregiones.gob.mx/cedulas/localidadesDin/ubicacion/reli eve.asp?micro=YAUTEPEC&clave=203610001&nomloc=SANTA%20CATALINA%20QUIERI>.