





EL TECHO ESCUDO COMO CAPTADOR PLUVIAL EN CIUDAD JUÁREZ, MÉXICO

THE DOUBLE ROOF AS A RAINWATER COLLECTOR IN CIUDAD JUÁREZ, MEXICO.

SALVADOR TOBIAS RAMÍREZ
Sustentante de Maestría en Arquitectura
Docente del programa de arquitectura de la Universidad
Autónoma de Ciudad Juárez
Juárez, México
<https://orcid.org/0000-0002-7382-3329>
stobias12@hotmail.com

JUDITH GABRIELA HERNÁNDEZ PÉREZ
Doctora en Arquitectura
Docente investigadora del programa de Arquitectura de la
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Juárez, México
<https://orcid.org/0000-0003-4841-7422>
juheman@uacj.mx

RESUMEN

El problema del abastecimiento de agua dulce existe en diversas partes del mundo, la escasez de dicho recurso es evidente, tal como evidencia el Foro Económico Mundial (WEF por sus siglas en inglés), en su reporte de riesgos globales del año 2018, donde se expresa que en la última década, la crisis del agua ha estado siempre dentro del top cinco de riesgos globales en términos de impacto social. Este problema no es ajeno a México y mucho menos a Ciudad Juárez donde se desarrolló esta investigación.

Visualizando desde la arquitectura, la necesidad de generar edificios sostenibles que puedan mitigar el sobre explotación de los mantos freáticos, se desarrolló la idea de utilizar el sistema del techo escudo como captador pluvial, creando así un modelo multifuncional que tuviera una captación pluvial eficiente y un mejor comportamiento térmico.

Para validar dicha primicia se desarrolló una investigación aplicada de corte cuantitativo, donde se elaboraron tres modelos experimentales con la capacidad de medir la cantidad de lluvia cosechada y el comportamiento térmico en el interior de los mismos, con la finalidad de comparar la combinación del techo escudo con la captación pluvial y su comportamiento por separado.

Palabras clave

Aguas pluviales, Techos, Cosecha lluvia, Ventilación

ABSTRACT

The fresh water supply is a problem in various parts of the world. The shortage of this resource is evident, as seen by the World Economic Forum's Global Risks Report (2018) which states that in the last decade the water crisis has always been one of the top five global risks in terms of social impact. This problem is not foreign to Mexico and much less so to Ciudad Juárez where this research was carried out.

Visualizing this problem from an architectural point of view, there is a need to create sustainable buildings that can mitigate the overexploitation of the water table. Therefore, the idea to use a double roof system as a rainwater collector was developed, and a multifunctional model with efficient rainwater catchment and better thermal behavior was created.

To validate these first steps, an applied quantitative study was carried out in which three experimental models were developed to measure the amount of rainwater harvested and the thermal behavior within the models, in order to compare the combination of the double roof with and without rainwater catchment.

Keywords

rainwater, roofs, rainwater harvesting, ventilation

INTRODUCCIÓN

Se estima que solo el 2.5% del recurso hídrico total es potable, el 70% está congelado en los glaciares, alrededor del 30% es subterráneo y solo el 1% es superficial Clarke y King (2004). Esto no significa que ese mínimo porcentaje de agua potable esté desapareciendo del planeta, pues se sabe que el agua es un recurso renovable. Ahora bien, la situación es mucho más compleja que afirmar, sin más, que se trata de un recurso ilimitado. Si bien el ciclo hidrológico es el encargado de mantener el agua en movimiento a través de la hidrósfera, dicho ciclo es mermado en los mantos freáticos de muchos países debido a cambios en los patrones climáticos de algunas regiones. Tal es el caso de las sequías, fenómeno que se ha prolongado a causa del calentamiento global, ya que “el cambio climático provoca cambios en la frecuencia, intensidad, extensión espacial, duración en los eventos climáticos y puede resultar en un clima extremo en el evento climático” (IPCC, 2012: 5). Otro factor que afecta la disponibilidad del agua es el bombeo excesivo, ya sea por desperdicio del recurso o por una gran demanda debido a la sobrepoblación; si se considera que en el año 2017 la población mundial era de 7,550 millones y se maneja una proyección de 9,771 millones de personas para el 2050 (Organización de las Naciones Unidas, ONU, 2017), es evidente que las ciudades seguirán creciendo cada vez más y con ello, la demanda del agua.

Aunque México se cataloga como un país con baja presión sobre el recurso del agua¹, no se encuentra en excelentes condiciones en relación con el uso racional y sustentable de ella. Basta señalar, en ese sentido, que de los 653 acuíferos que existen en el país, 32 tienen suelos salinos o agua salobre, 18 cuentan con intrusión de agua salada marina y 105 están sobreexplotados (CONAGUA, 2016). El abatimiento de los acuíferos es un problema difícil de solucionar, si se considera que en México existe una huella hídrica de consumo de 1978 m³ de agua por habitante al año (*ibídem*). Además, la precipitación en México no da abasto a la recarga de los acuíferos, principalmente, en la zona del norte del país donde el grado de presión hídrica en promedio es de 63.76%, incluyendo las regiones hidrológico-administrativas de Península de Baja California, Noroeste y Balsas. Hay que recordar que, si el porcentaje de presión es mayor a 40%, se considera un grado de presión alto (CONAGUA, 2014). La infiltración del agua de lluvia por medios naturales es muy compleja, tal como se sostiene en el documento *Estadísticas del agua en México* (CONAGUA, 2013: 16): “Se estima que el 71.6% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.2% escurre por los ríos o arroyos y el 6.2% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos”, en zonas muy urbanizadas puede existir una impermeabilidad de suelo de entre 75 al 100% (Arnold, Chester y Gibbons, 1996). Es así, que la recarga de los mantos freáticos es un proceso lento y complicado donde el abastecimiento de agua puede ser mermado por el abuso de un bombeo exhaustivo y una mínima recarga de los acuíferos. A ello hay que añadir que, al igual que todo el planeta, el país tiende al crecimiento de población. En el año 2010, en México existía una población de 114,255,555 ciudadanos y se estima

que habrá un aumento para el año 2050 de 36,581,962 personas, con el que se llegará a un total de 150,837,517 (Consejo Nacional de Población, CONAPO, 2010). Esto se traduce en un mayor número de dependientes del recurso hídrico y, por consiguiente, una mayor demanda y una presión sobre el suministro del agua en el futuro próximo. Por su parte, Ciudad Juárez, cuya población es de 1,391,180 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, 2015) y proyección de crecimiento para el año 2050, de 1,593,238 personas (CONAPO, 2010), no es ajena a estas situaciones, pues aquí también la densidad de población tiende a aumentar y, de igual manera, la demanda del agua.

Ciudad Juárez está localizada en el Desierto Chihuahuense, (Figura 1) cuenta con una temperatura máxima promedio de 40.9°C en el mes de junio y una mínima promedio de -2.6°C en el mes de diciembre, según datos de las normales climatológicas (Servicio Meteorológico Nacional, SMN, 2010). Considerando que la oscilación térmica puede llegar hasta 14°C, este panorama se vuelve muy característico de un desierto; efectivamente, aquí las lluvias son escasas y existe una precipitación promedio anual de 251.69 mm anuales. Según la clasificación de Köppen de esta localidad se identifica con el tipo Bw_{kx}(e'), el cual se define de la siguiente manera:

Bw = Clima muy seco o desértico

k = Templado, con verano cálido, temperatura media anual entre 12° y 18°C; la temperatura del mes más frío oscila entre los -3 y 18°C, y la temperatura del mes más caliente es mayor a 18°C.

x' = Régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno

e' = Muy extremoso, oscilación de temperatura mayor de 14°C.

(IMIP, 2016)

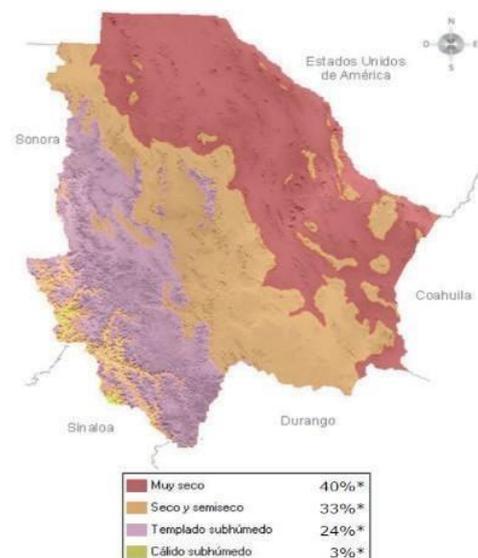


Figura 1. Mapa del clima del estado de Chihuahua y sus municipios. Fuente: INEGI (2010).

[1] Cabe indicar que “la presión sobre los recursos hídricos se cuantifica al dividir la extracción del recurso entre el agua renovable o disponibilidad” (Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, 2016: 128).

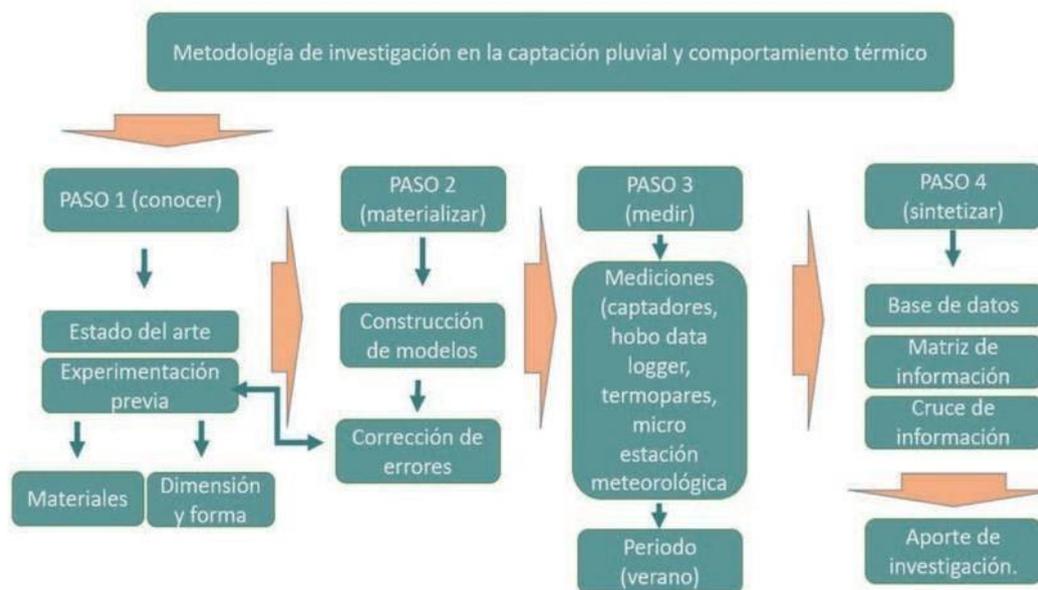


Figura 2. Mapa mental de metodología. Fuente: Tobías (2019: 48).

Como menciona Salas, “se estima que para el año 2013 el agua utilizable del manto acuífero estará agotada” (2006:11). Si se extrae más recurso hídrico de lo que se infiltra, tarde o temprano se llegará al límite extraíble, lo cual es un problema latente en ciudad Juárez. Por ello, desde 2009 entró en funcionamiento el acueducto Conejos Médanos que extrae del acuífero Bolsón de Mesilla 1000 litros por segundo, el equivalente al 20 por ciento del suministro total de la ciudad.

La crisis en el abastecimiento de agua dulce a la que se enfrentan los juarenses se vuelve notoria con el acueducto Conejos-Médanos, ya que este bombea dicho líquido aproximadamente a cuarenta kilómetros de distancia al poniente de la mancha urbana, con el fin de suministrar a la ciudad, propiciando una inversión insostenible para futuras generaciones, por su costo elevado, mantenimiento, consumo energético y su daño al ecosistema.

En ese contexto, se vuelve vital, tal como sostiene Serrano, “reutilizar el recurso pluvial ofrece una doble solución, por un lado, se evitan inundaciones y, por el otro, se ahorra agua y proporciona un aumento en las reservas de este líquido vital” (2014: 26). Estas acciones contribuirían a mitigar el abatimiento de los mantos freáticos y a mejorar el uso del recurso hídrico.

La lluvia, siendo la principal fuente de abastecimiento de agua dulce que se tiene en el planeta, además de ser considerada como el agua más pura en su estado natural, genera la recarga de los acuíferos. Abastece a ríos y también suministra, por medio de las escorrentías, a lagos y lagunas, funcionando así como una parte importante

del ciclo hidrológico. De tal modo, este recurso hídrico desempeña ciertamente un papel fundamental para la sobrevivencia de los seres vivos del planeta.

METODOLOGÍA

Esta investigación contempla cuatro parámetros a seguir para el cumplimiento de los objetivos de la investigación. El mapa conceptual de la Figura 2 ilustra, a continuación, la metodología sugerida para el experimento.

Para conseguir el paso 1 de este estudio se realiza la investigación pertinente de ejemplos de experimentos y mediciones en términos de captación pluvial y comportamiento térmico del techo escudo. De esta forma, se busca generar una base que dé sustento al diseño del experimento elaborado en este trabajo y que permita reflexionar sobre materiales, dimensiones y características óptimas de los modelos.

Para el paso 2 se materializa el diseño de los modelos y, posteriormente, se realiza una prueba inicial con el objetivo de conocer su funcionamiento e identificar posibles errores que, de encontrarse, se corregirían aquí.

Los modelos fueron orientados en el eje Norte - Sur con la parte más alta de la techumbre hacia el norte, y se posicionaron equidistantemente en el eje Oriente – Poniente a una distancia de separación entre ellos de 1.50 m. Se utilizaron muros con la misma altura, dimensión y forma de los modelos para eliminar la variable de sombreado en las superficies de los muros, como ejemplifica la Figura 3.

Además, en la Figura 4 se puede observar la imagen del entorno inmediato, el cual fue debidamente analizado para evitar posibles errores en la medición por la generación de sombreado en los modelos experimentales. Por lo anterior, los modelos experimentales fueron colocados en el techo de una vivienda, dando prioridad a la libertad de obstáculos.

El modelo testigo, o MT (Figura 5), cuenta con una losa de concreto armado con peralte de 12 centímetros y recubrimiento de impermeabilizante asfáltico, y una estructura de madera que forma un espacio volumétrico de 1 m³ (debido a que la superficie de techumbre mide 1 m², unidad de medida utilizada nacional e internacionalmente para la cosecha de lluvia) y que es recubierta con placa de poliestireno de 2" de espesor con una densidad de 24 kg. Por último, el modelo dispone de un sistema de captación a base de un canal de PVC a media caña de 4" de

diámetro, tubería de PVC que conduce las escorrentías hasta el almacenamiento de lluvia, con una capacidad máxima de 45 litros.

El modelo con techo escudo y pendiente del 2% o TE2 (Figura 6), es exactamente igual que el testigo (MT), pero con la adición del techo escudo a base de lámina galvanizada, con una pendiente de 2% laterales cubiertos y únicamente un acceso y salida de ventilación de 5 cm. en la cara Norte y Sur.

Finalmente, el modelo con techo escudo y pendiente de 27% (15 °), o TE15 (Figura 7), es también igual al testigo, con la diferencia de que el sistema de descarga de calor a base de lámina galvanizada tiene una pendiente de 10% para la medición del mes de julio y 27% de pendiente para el mes de agosto. Posee laterales cubiertos y únicamente un acceso y salida de ventilación de 5 cm. en la cara Norte y Sur.

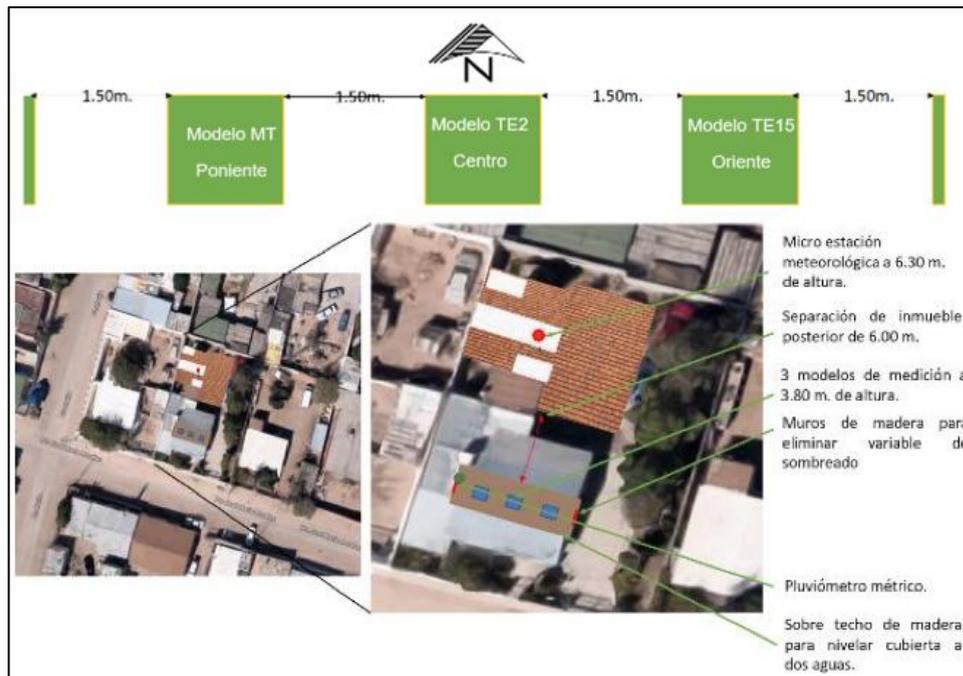


Figura 3. Gráfico de ejemplificación de la ubicación de los modelos. Fuente: Tobías (2019: 49).



Figura 4. Imagen del entorno los modelos. Fuente: Tobías (2019).

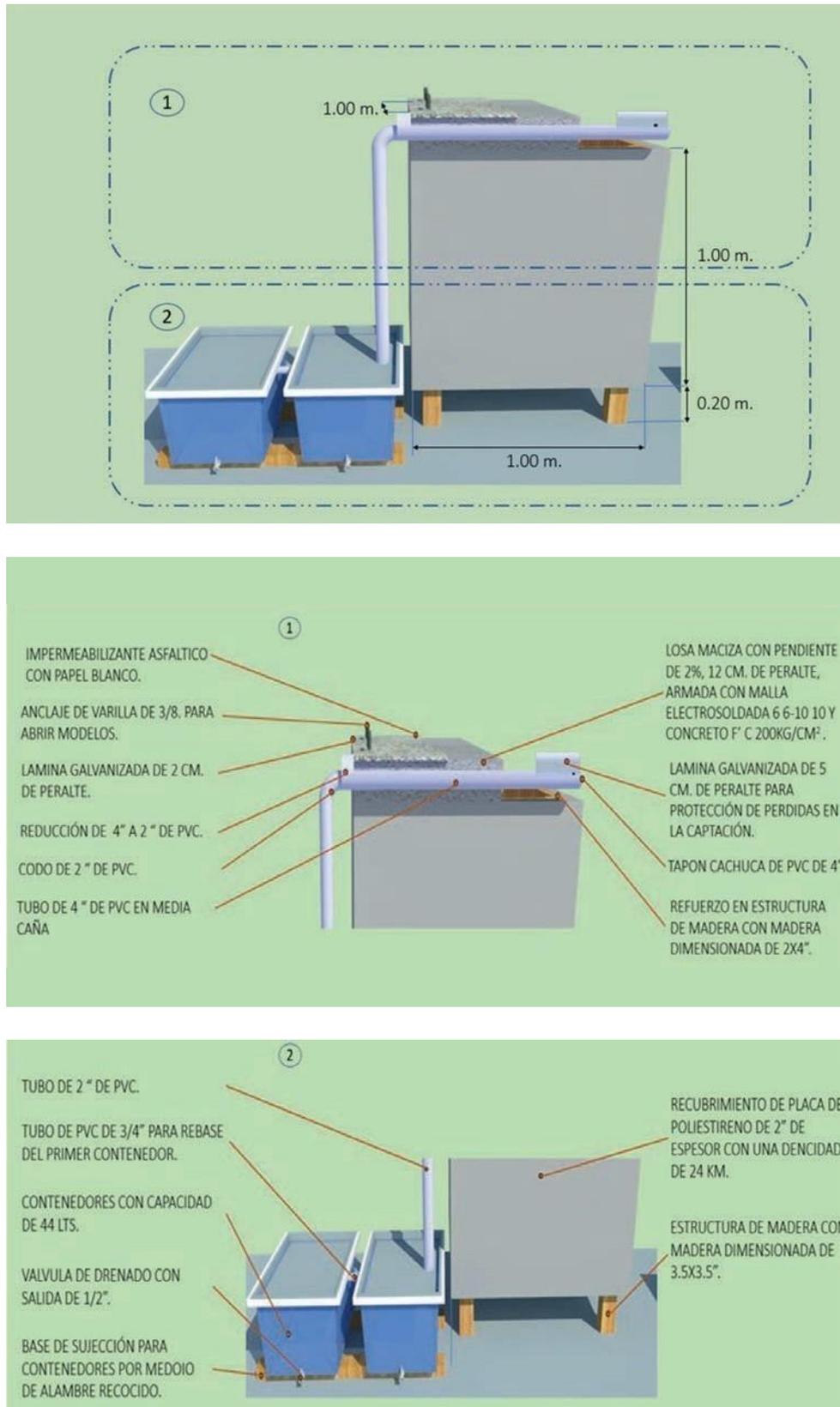


Figura 5. Gráfico del Modelo MT (ubicación poniente). Fuente: Tobias (2019: 51).

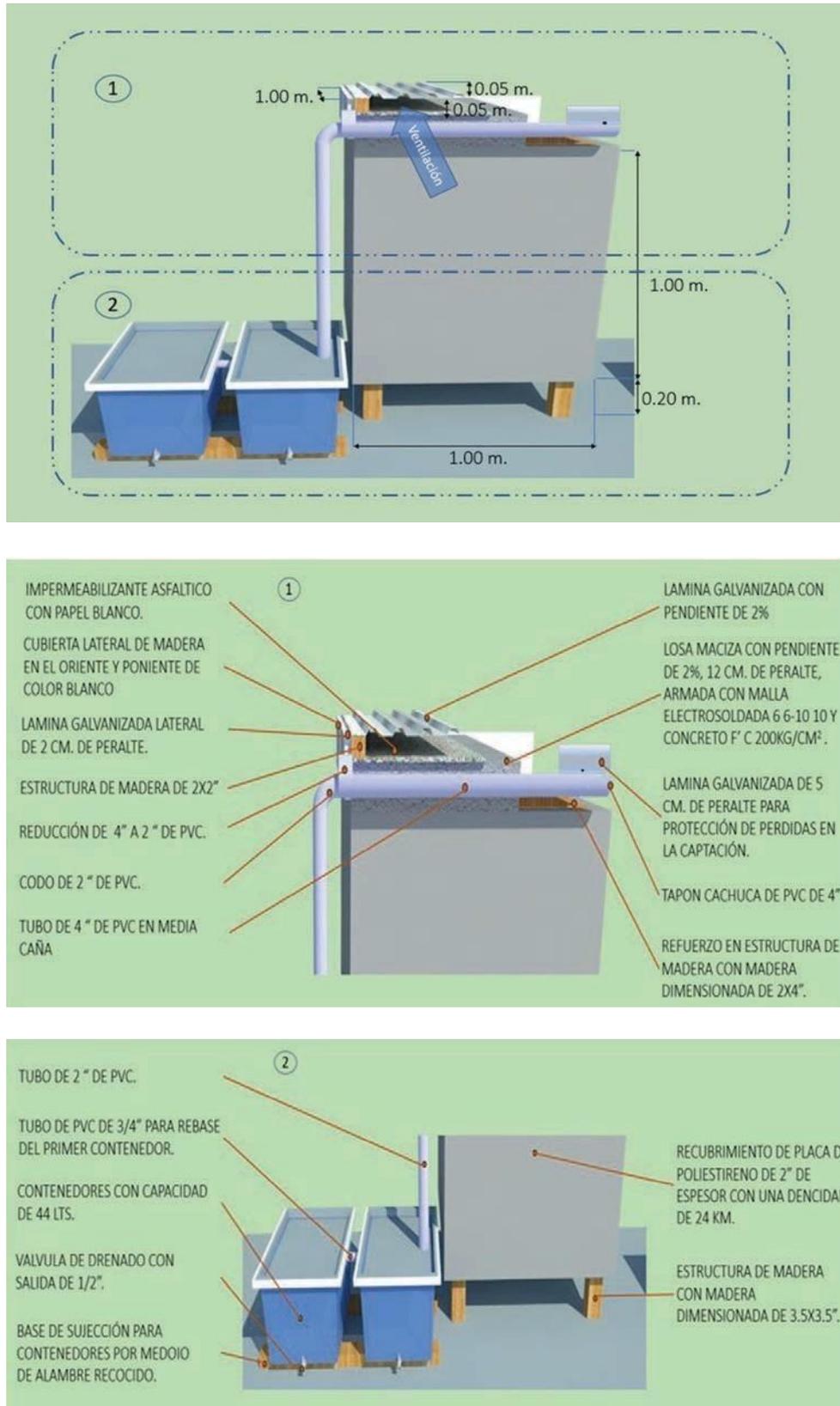


Figura 6. Gráfico del modelo TE2 (ubicación Centro). Fuente: Tobías (2019: 53).

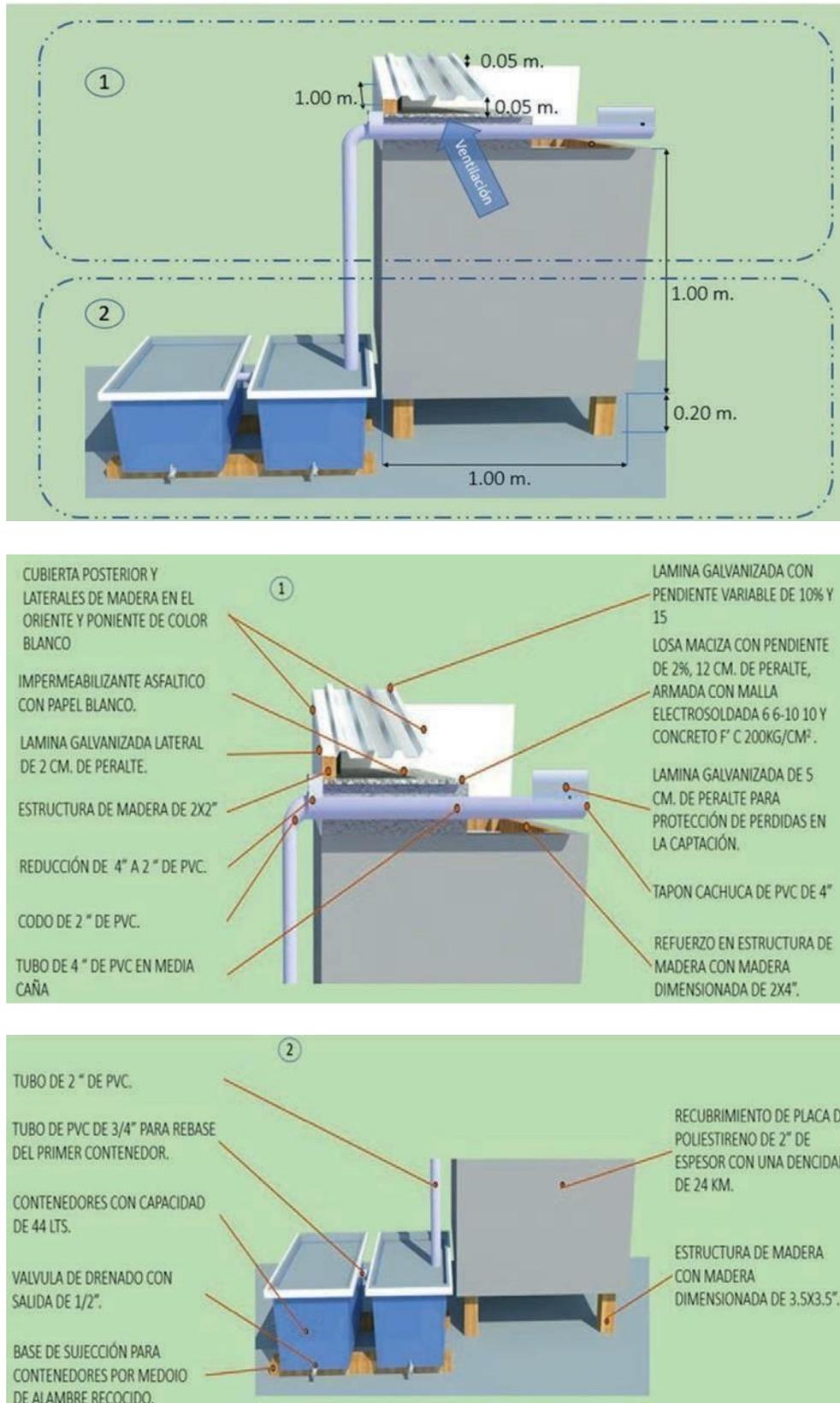


Figura 7. Gráfico del modelo TE15 (ubicación oriente). Fuente: Tobías (2019: 55).

Una vez fabricados los modelos se lleva a cabo el paso 3, la medición. Para la captación, los almacenadores de agua de lluvia son graduados litro por litro con el fin de eliminar cualquier variación causada por algún desnivel. Para la medición de temperatura, se colocan hobs tipo *data logger* dentro de los modelos, aunado a termopares que miden la temperatura superficial de las cubiertas. Además, con el propósito de comparar estos datos con el exterior, se dispondrá una micro estación meteorológica que permitirá conocer la temperatura, humedad relativa, precipitación, velocidad y dirección del viento.

El paso 4, y final, plantea agrupar la información recopilada y generar una base de datos a partir de la cual se pueda construir una matriz de información que, a su vez, sirva para comparar el comportamiento térmico y la captación pluvial de cada uno de los modelos propuestos.

ANTECEDENTES CAPTACIÓN PLUVIAL

En los últimos años la captación pluvial en viviendas, desde la arquitectura e ingeniería, ha sido supeditada al fin único de recoger el recurso hidrológico sin la búsqueda del máximo aprovechamiento del sistema. Por ejemplo, Novak, Geisen y Debusk (2014) expresan que la cantidad de lluvia que se puede recolectar está estrechamente relacionada con el material de la superficie impermeable donde se canalizan las escorrentías para su almacenamiento, por ello utilizan como parámetro de medición el coeficiente de escurrimiento (Figura 8). De semejante forma, Worm y Hattum (2006) (Figura 9) utilizan sus propios valores en los materiales más comunes para techumbres.

El equipo de Novak tiene similitudes en el coeficiente de escurrimiento en el metal con Lancaster (2009), cuyo valor es de 0.95. A diferencia de los anteriores autores, Burgess menciona que “como regla general, se puede esperar captar en promedio de 75-80 por ciento de la precipitación real” (2012: 22), debido a los materiales que cubren la superficie de cosecha de lluvia y las pérdidas del sistema.

Gracias a estos coeficientes de escurrimiento se han desarrollado fórmulas para estimar la cantidad de lluvia captable al año. El equipo de Novak emplea la Ecuación 1 siguiente:

$$V_{supply} = A \times P \times C \times 0.623 \quad (1)$$

Donde:

V_{supply} es igual a la cantidad de agua de lluvia disponible a captar.

P es igual a la precipitación pluvial anual.

A es igual al área de captación.

C es igual al coeficiente de escurrimiento.

0.623 es el valor de conversión a galones (este valor es utilizado por los autores ya que son americanos y utilizan el sistema de medida inglés.).

Por su parte, Burgess utiliza la siguiente Ecuación 2:

$$PWC = A \times P \times CE \quad (2)$$

Roofing Material	Runoff Coefficient
Metal	0,95
Asphalt	0,90
Concrete	0,90
Membrane Type EPDM, PVC, etc.	0.95-0.99
Tar and Gravel	0.80-0.85

Figura 8. Tabla de coeficientes de escurrimiento por material. Fuente: Novak, Geisen y Debusk (2014: 89).

Type	Runoff Coefficient
Galvanised iron sheets	>0.9
Tiles (glazed)	0.6-0.9
Aluminium sheets	0.8-0.9
Flat cement roof	0.6-0.7
Organic (e.g. thatched)	0.2

Figura 9. Tabla de coeficientes de escurrimiento por material. Fuente: Worm y Hattum (2006: 31).

Donde:

PWC es la Potencial captación de lluvia.

A es igual al área de captación.

P es igual a la precipitación pluvial anual.

CE es igual a la eficiencia de captación del 75-80%.

Lo anterior evidencia la importancia de la unidad de medida según cada autor y su nacionalidad. Para el sistema métrico inglés, la captación es medida en una superficie por ft^2 y por pulgada de lluvia anual, a diferencia del sistema métrico decimal, donde es medida en una superficie por m^2 y por mm de precipitación al año.

Krishna (2005) establece que para la potencial lluvia captable se deben de considerar otros factores (y no solo el material de la superficie captable) como la evaporación del agua o el agua que salpica fuera del área de captura, los cuales pueden mermar la cantidad de lluvia que se almacena. Aunado a ello, un aspecto para tener en cuenta es el explicado en la guía de captación pluvial desarrollada por la Environment Agency England (2010) donde la eficiencia del filtro es medida como un coeficiente de 0.90 dentro del sistema de canales que, por ende, disminuye el volumen de la cosecha de lluvia. Es interesante mencionar, en esta línea, que para Vasudevan (2002) la calidad del

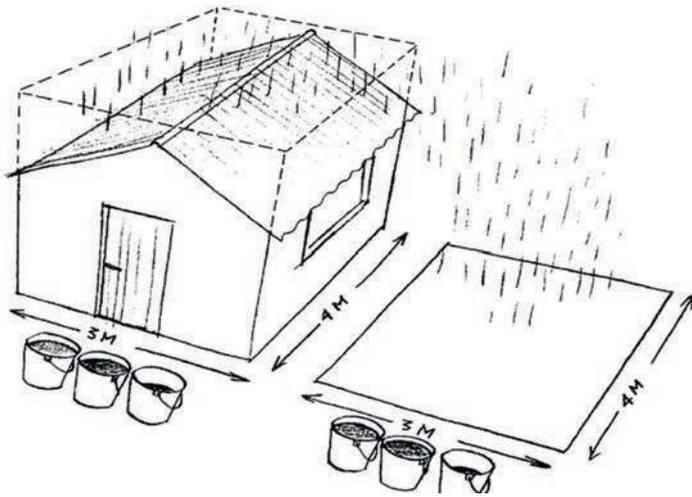


Figura 10. Gráfico de área de captación en techos con pendiente.
 Fuente: Worm y Hattum (2006: 29).

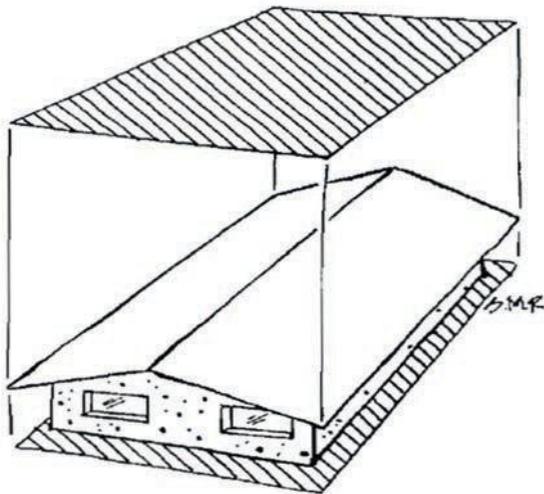


Figura 11. Gráfico de área de captación en techos con pendiente.
 Fuente: Lancaster (2009: 50).

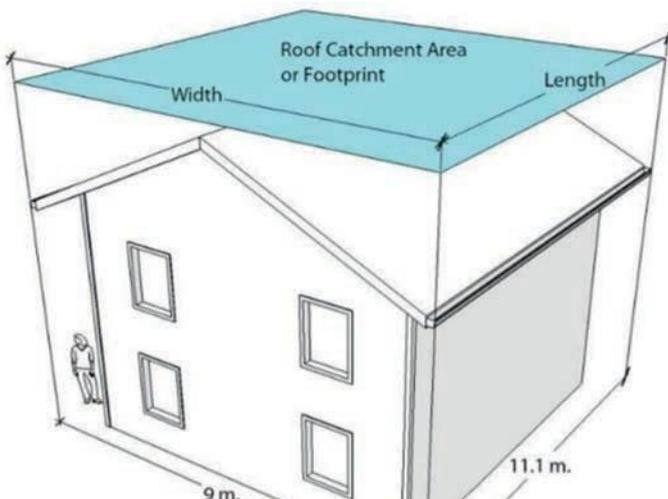


Figura 12. Gráfico de área de captación en techos con pendiente.
 Fuente: Burgess (2012: 21).

agua captada en una superficie se relaciona estrechamente con las condiciones del clima, el medioambiente circundante y el material de la cubierta

En las Figuras 10, 11 y 12 se puede observar cómo la captación pluvial es considerada sin buscar una eficiencia máxima. En efecto, se identifica cómo en un techo con poca pendiente o con una inclinación más pronunciada, esta se debe medir en el plano horizontal del área captable, sin importar si el techo posee una longitud más larga por tener pendiente, en comparación con una cubiertaplana.

ANTECEDENTES DEL TECHO ESCUDO

Con respecto al techo escudo o sistema de descarga de calor, este ha sido medido en investigaciones mediante una metodología donde se experimenta con un modelo a escala, ya sea en un sitio al aire libre o en un lugar controlado donde se simula la radiación solar, lo cual a su vez es complementado por el modelo analítico, en base a cálculos necesarios para medir su funcionamiento. Tal es el caso de Hernández *et al.* (2011) (Figura 13) y de Chi-ming, Huang y Chiou (2008) (Figura 14), quienes llevan a cabo una comparativa de su medición experimental con autores que han realizado estudios a base de cálculos, como Morrone, Campo y Manca (1997).

Hora (hrs)	G	T _a	T _t °C	T _c °C	T _p °C	T _a °C
9:00	100	22	20,5	22,1	29,3	23,2
10:00	180	21,8	21,7	21,9	36,5	30,2
11:00	290	23,3	23,9	24	47	35
12:00	380	23,5	24,5	24,6	56,1	43,5
13:00	430	25	25	25,3	58,5	44,2
14:00	410	25,6	25,1	25,8	57,3	46,6
15:00	350	25	25,6	26	53,4	39,7
16:00	240	24	24,2	24,5	44,3	34,2
17:00	180	22,8	23,8	23	38,1	29,2

Hora (hrs)	G	T _a	T _t °C	T _c °C	T _p °C	T _a °C
9:00	100	22	20,5	20,52	27,27	26,11
10:00	180	21,8	21,7	21,963	34,78	27,28
11:00	290	23,3	23,9	23,796	44,37	34,27
12:00	380	23,5	24,5	24,33	51,11	37,41
13:00	430	25	25	24,79	56,23	40,2
14:00	410	25,6	25,1	25,98	55,38	39,47
15:00	350	25	25,6	25,46	50,43	37,69
16:00	240	24	24,2	24,42	41,44	32,98
17:00	180	22,8	23,8	23,76	35,88	29,86

Figura 13. Gráfico de comparación de resultados del modelo experimental y el analítico. Fuente: Hernández (2011: 38).

	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
Present study	6,56	7,5	8,56
Eq. (16) by Morrone et. Al. [8]	6,32	6,66	7,1
Sum of thermal boundary layers	7,25	7,633	8,62

Figura 14. Gráfico de dimensiones óptimas entre autores.
 Fuente: Chi-ming (2008: 1754).

El modelo utilizado por el equipo de Hernández presentaba una pendiente de 30° con un espaciamiento entre las dos cubiertas de 5 cm y una superficie de 2.40 m^2 (Figura 15). En cambio, el equipo de Chi-ming, que buscó la máxima eficiencia del sistema, realizó mediciones a partir de un modelo con pendientes de 30° , 45° y 60° ; un espaciamiento entre los techos de 5.0 cm, 6.56 cm, 7.5 cm y 8.56 cm, consecutivamente; una superficie de 0.80 m^2 y la adición de la barrera radiante que disminuye aún más la entrada del calor en el techo inferior. Advirtieron así que el techo escudo es más eficiente entre mayor sea la velocidad del flujo del calor ventilado (Figura 16). Por su parte, Morales (1993) midió el techo escudo en uno de los cubículos del Laboratorio de Energía Solar del I IM-UNAM en Temixco, en el marco de una investigación planteada por medio del modelo analítico y experimental. Al momento de realizar las mediciones de campo, llevó a cabo el monitoreo de un techo hueco, con un sistema constructivo de vigueta y bovedilla, el cual poseía una inclinación de $9^\circ 35'$, con orientación Norte-Sur; al sur la parte más baja del techo y al norte la parte más alta de este. Dicha elección (del sistema constructivo) se debió al objetivo general que se tenía definido, donde el sistema de descarga de calor debía ser para clima cálido, usar los materiales y mano de obra disponibles en el mercado local, lo cual, a diferencia de los otros autores citados, genera un diálogo con el entorno donde se inserta el experimento (Figura 17).

RESULTADOS

El experimento realizado en la temporada de verano del año 2017 contempló los meses de julio, agosto y septiembre, y midió la captación de lluvia con 3 modelos experimentales: el llamado "Modelo TE15", que posee un techo escudo con pendiente variable de 10% y 27%; el "Modelo TE2", que dispone de un techo escudo con pendiente de 2% sin posibilidad de cambiar dicha inclinación; y, por último, el "Modelo MT" que tiene una cubierta con impermeabilizante asfáltico sin techo escudo.

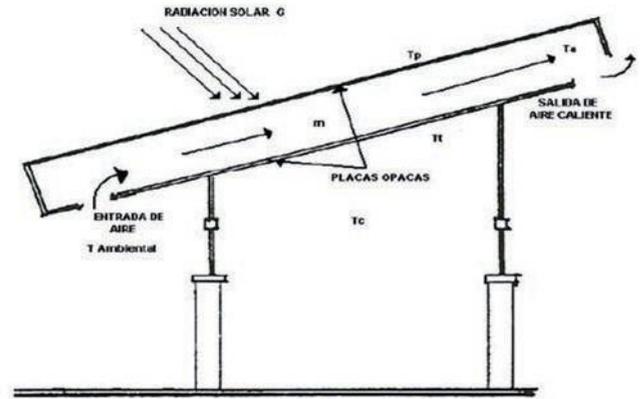


Figura 1. Sistema de descarga de calor en techos formado por dos superficies opacas

Figura 15. Gráfico del modelo experimental.
 Fuente: Hernández (2011: 34).

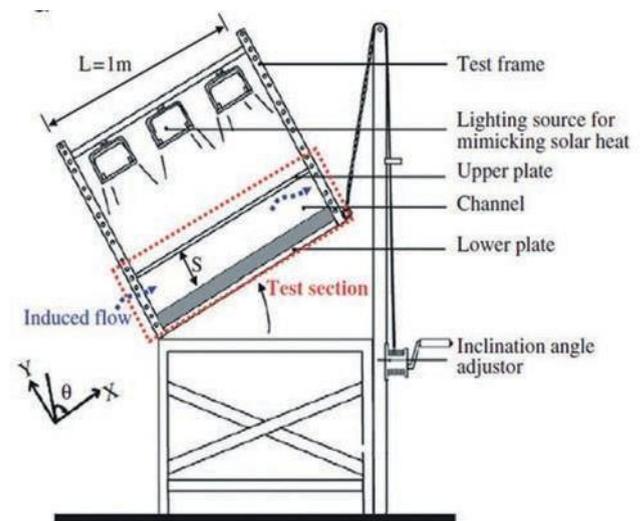


Figura 16. Gráfico del modelo experimental.
 Fuente: Chi-ming (2008: 1750).

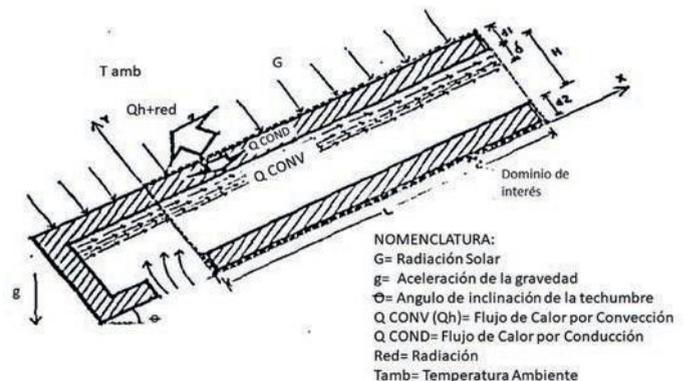


Figura 17. Gráfico del funcionamiento del techo escudo.
 Fuente: Morales (1993: 20).

CAPTACIÓN PLUVIAL EN MODELOS EXPERIMENTALES EL MES DE AGOSTO 2017								
DÍA	MODELO TE15 (ORIENTE) 15° - 10 %	MODELO TE2 (CENTRO) 2%	MODELO MT (PONIENTE) 2%	PLUVIÓMETRO	CAP. MAYOR		CAP. INTERMEDIA	CAP. MENOR
1	5.90 LTS.	4.43 LTS.	4.42 LTS.	6.40 LTS.	M. TE15		M. TE2	M. MT
5	1.31 LTS.	1.17 LTS.	0.69 LTS.	1.00 LTS.	M. TE15		M. TE2	M. MT
7	0.47 LTS.	0.98 LTS.	0.25 LTS.	0.40 LTS.	M. TE15		M. TE2	M. MT
11	1.37 LTS.	1.47 LTS.	1.07 LTS.	1.00 LTS.	M. TE2		M. TE15	M. MT
12	2.00 LTS.	2.00 LTS.	0.71 LTS.	1.20 LTS.	TE15	TE2	-	M. MT
14	3.60 LTS.	2.71 LTS.	3.00 LTS.	1.20 LTS.	M. TE15		M. MT	M. TE2
15	24.25 LTS.	17.65 LTS.	19.67 LTS.	29.00 LTS.	M. TE15		M. MT	M. TE2
20	8.35 LTS.	6.20 LTS.	7.00 LTS.	5.80 LTS.	M. TE15		M. MT	M. TE2
21	5.45 LTS.	3.67 LTS.	4.00 LTS.	4.40 LTS.	M. TE15		M. MT	M. TE2
24	2.40 LTS.	2.27 LTS.	1.96 LTS.	1.60 LTS.	M. TE15		M. TE2	M. MT

Figura 18. Tabla de la captación pluvial del mes de agosto. Fuente: Tobías (2019: 64).

En las Figuras 18 y 19 se puede observar que, en el mes de agosto, el modelo TE15 captó en promedio 21.94% más lluvia que el modelo TE2 y 31.03% más que el MT. El día con mayor precipitación pluvial fue el 15 de agosto, cuando se registraron 29 mm, de los cuales el modelo TE15 captó 24.25 litros; el TE2, 17.65 litros y el modelo MT, 19.67. Así, resulta que el modelo TE15 captó 4.58 litros más que el MT, es decir, 18.88 % más.

Las mediciones de temperatura realizadas en la temporada de verano del año 2017 también contemplaron los meses de julio, agosto y septiembre, registrando la temperatura exterior, la temperatura interior de los modelos, la humedad relativa interior y exterior, así como las temperaturas superficiales de las cubiertas de lámina galvanizada y las cubiertas con impermeabilizante asfáltico. El día 26 de julio se pudo constatar que: en relación a la temperatura interior de los tres modelos, el modelo MT tuvo un incremento de

temperatura mayor a 10 grados centígrados en las horas críticas de la tarde, en comparación con el modelo TE15, tal como exhibe la Figura 20.

También se observa en la gráfica cómo, en la madrugada, la temperatura va descendiendo en los tres modelos de una manera similar, incluso el modelo MT llega a tener una temperatura interior menor que los modelos con el techo escudo a las 7:00 am, pero a las 8:00 am la temperatura empieza a aumentar y el modelo MT sube fuera de proporción con respecto a los modelos TE15 y TE2.

Con respecto a la humedad relativa del 26 de julio del periodo 2017, se puede ver (Figura 21) cómo esta se comporta de una manera constante dentro de los modelos experimentales, sin variaciones abruptas, siendo el modelo TE15 el que presenta la humedad relativa más baja, en promedio 79.14%, y el modelo MT, la humedad relativa más alta, un 88.30%.

CONCLUSIONES

La situación de Ciudad Juárez evidencia un panorama poco alentador para la localidad en relación al abastecimiento de agua dulce y el abatimiento del acuífero Bolsón del Hueco. El limitado recurso hídrico del que se dispone, ya sea superficialmente en el Río Bravo, el cual no se utiliza para consumo de la ciudad, o subterráneamente, en los acuíferos Bolsón del Hueco y Conejos-Médanos, es un claro indicador de alarma para la región. Geográficamente, esta se encuentra inserta en la zona de la latitud de 31 grados norte, la que es mundialmente reconocida por los grandes desiertos que alberga, en este caso particular, el Desierto Chihuahuense, caracterizado especialmente por la poca precipitación y las temperaturas extremas registradas.

Dado este panorama, es de suma importancia el uso de agua de lluvia para los juarenses y por ello también concebir un sistema que pueda mejorar las condiciones de una cubierta en términos de captación y comportamiento térmico, ya sea en una edificación construida como en una en etapa de proyecto. Sumado a lo anterior, la multifuncionalidad que logra generarse con el techo escudo, la que va más allá de solo utilizar un material óptimo para captar lluvia en una cubierta, sin duda, puede mejorar las condiciones de los techos típicos con impermeabilizante asfáltico de Ciudad Juárez.

Desde esa perspectiva, el trabajo expuesto demostró que el sistema de captación pluvial combinado con el techo escudo consigue una mayor captación de lluvia, además de un mejor comportamiento térmico, en comparación al sistema de cosecha de lluvia sin el techo escudo. Efectivamente, los resultados de este estudio evidencian que el modelo testigo (MT), el cual no contó con el techo escudo, fue el que presentó una menor captación pluvial y una menor eficiencia térmica. Es importante resaltar que el modelo TE2 consiguió una mejor eficiencia en cuanto al comportamiento térmico que el MT, sin embargo, la eficiencia de dicho comportamiento resulta menor al compararse con el modelo TE15.

Con respecto a la diferencia de captación pluvial registrada entre los modelos experimentales MT y TE15 en los eventos de precipitaciones, se concluye que esta se debe a dos factores principalmente. En primer lugar, al uso de un material óptimo para un mayor coeficiente de escurrimiento y, en segundo, a los grados de inclinación de la cubierta determinados para este caso de estudio.

A partir de la investigación planteada, se ha podido comprobar la viabilidad del modelo desarrollado, el cual busca perfeccionar la captación del agua pluvial y, al mismo tiempo, mejorar las características térmicas de la edificación. Consecuentemente, esta propuesta aspira a desarrollar un sistema que promueva tanto la optimización de las características de confort de un espacio arquitectónico, como la reducción del desperdicio del agua, con el fin último de mitigar los efectos negativos al ambiente.



Figura 19. Gráfica de la captación pluvial del mes de agosto. Fuente: Tobías (2019: 65).

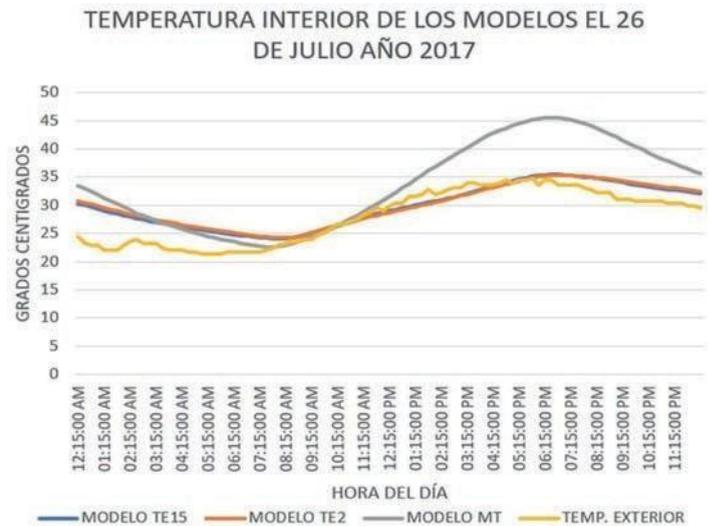


Figura 20. Gráfica de temperatura interior de los modelos el 26 de julio 2017. Fuente: Tobías (2019: 67).



Figura 21. Gráfica de humedad relativa en el interior de los modelos el 26 de julio 2017. Fuente: Tobías (2019: 68).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnold, J., Chester L. y Gibbons J. (1996). Impervious Surface Coverage. The Emergence of a Key Environmental Indicator. *Journal of the American planning association*. 62 (2),(1996). 243-258.
- Burgess, B. (2012) *Rainwater Harvesting BEST PRACTICES GUIDEBOOK*. British Columbia: REGIONAL DISTRICT OF NANAIMO.
- CANAPO. (2010) *Proyecciones de la Población 2010-2050*. Recuperado de <http://www.conapo.gob.mx/ES/CONAPO/PROYECCIONES>
- Chi-ming, J. y Huang, J. 2007. Optimal spacing for double-skin roofs. *Building and Environment*, 43 (2008), 1749-1754.
- Clarke, R. y King J. (2004). *The Water Atlas*. Los Angeles: University of California Press.
- CONAGUA. (2013). *Estadísticas del agua en México edición 2013*. México D.F.: CONAGUA.
- CONAGUA. (2014). *Estadísticas del agua en México edición 2014*. México D.F.: CONAGUA.
- CONAGUA. (2016). *Estadísticas del agua en México edición 2016*. México D.F.: CONAGUA.
- Environment Agency England. (2010). *Harvesting rainwater for domestic uses: an information guide*. Almondsbury: Environment Agency.
- Hernández, V., Contreras, C., Gonzáles, G., Morillón D. y Fernández J. (2011). Modelo analítico que describe el comportamiento térmico de un sistema de descarga de calor en techos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 33 (1), 33-42.
- IMIP.(2016) *Plan de Desarrollo Urbano sostenible de Cd. Juárez, Chihuahua*. Cd. Juárez: IMIP.
- INEGI. (2010). *Clima Chihuahua*. Recuperado de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chih/territorio/clima.aspx?tema=me&e=08>
- INEGI. (2015). *Censo de población 2015*. Recuperado de http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chih/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=08
- IPCC. (2012) *Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: IPCC.
- Krishna, J. (2005). *The Texas Manual on Rainwater Harvesting*, Austin Texas.: Texas Water Development Board
- Lancaster, B. (2009). *Rainwater Harvesting for Drylands and Beyond Volume 1*. Tucson: Rainsource Press.
- Morrone B, CAMPO A, y Manca O. (1997). Optimum plate separation in vertical parallel-plate channels for natural convective flows: incorporation of larger spaces at the channel extremes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40 (5): 993–1000.
- Morales, J. (1993). *Estudio de Techos de Edificios Construidos para Operar en forma Pasiva*. Tesis publicada. Ciudad de México: UNAM.
- Novak A, DeBusk, K. y VanGiesen E. (2014). *Designing Rainwater Harvesting systems: integrating Rainwater into Building systems*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Organización de las Naciones Unidas - ONU. (2017). *La población mundial aumentará en 1.000 millones para 2030*. Recuperado de <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-population-prospects-2017.html>
- Salas J (2006). *Problemática del Agua y Crecimiento Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua*. Cd. Juárez: UACJ.
- Serrano, S. (2014). *Aprovechar el agua de lluvia. Doble solución. Impluvium*. Recuperado de <http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/impluvium/numero01.pdf>
- SMN. (2010) *Información Climática por Estado*. Recuperado de <https://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chih>
- Tobias, S. (2019). *Comparativa entre el sistema tradicional de captación pluvial y la combinación de la cosecha de lluvia con el techo escudo. caso de estudio: Ciudad Juárez*. Tesis publicada. Ciudad Juárez: UACJ.
- Vasudevan, L. (2002) *A study of Biological Contaminants in Rainwater Collected from Rooftops in Bryan and College Station. Texas: Texas A&M university*.
- WEF. (2018). *The Global Risks Report 2018 13th edition*. Switzerland, Geneva: World Economic Forum.
- Worm, J. y Hattum, T. (2006). *Rainwater harvesting for domestic use*. Netherlands: Digigrafi.