

Módulo de prueba para cubierta ecológica en clima árido-seco

Introducción

El crecimiento poblacional en las ciudades tiene entre otras consecuencias la disminución de áreas verdes, por lo que el sector de la construcción está obligado a conjuntar en las viviendas estrategias que promuevan el desarrollo sustentable. Por lo anterior, en este trabajo se presenta el diseño de un módulo de prueba que funciona como techo verde, usando ecomateriales, tales como el impermeabilizante a base de caucho, migajas de caucho proveniente del triturado de llantas para la capa drenaje y para el sustrato de crecimiento se mezcló suelo tipo yermosol, humus de lombriz y zeolita natural tipo chabazita. La cubierta vegetal se elaboró con la especie botánica *Ipomea Purpurea*, ya que es una especie nativa de México, resistente a las sequías y se adapta a cualquier tipo de suelo. Con este diseño se obtiene un aporte de poca carga para las edificaciones y posibilita su utilización en las viviendas típicas de clima árido seco, como las de la ciudad de Hermosillo, Sonora, ya que lo que se busca es que la cubierta ecológica sea eficiente energéticamente y que mejore el confort de los usuarios.

Como consecuencia del aumento poblacional se ha visto que en las ciudades se da un crecimiento sin planeación, lo que ha ocasionado problemas propios de la urbanización como la desaparición de áreas verdes por el incremento en la construcción de diferentes tipos de edificios (Meza y Moncada, 2010), aumentando la superficie de áreas cubiertas con concreto, lo que presupone el efecto de isla de calor y la alteración del microclima de la ciudad en general y de las edificaciones en particular (Tumini,

2007). Como una alternativa para mitigar los efectos de esta problemática, se plantea utilizar las cubiertas ecológicas o techos verdes (Ibañez-Gutiérrez, 2008).

Los techos verdes se han popularizado desde la década del año 1990, ya que han demostrado ser una estrategia de adecuación ambiental viable, especialmente en países desarrollados (Gavilanes, 2015). En México, en años recientes se ha visto el incremento de proyectos que involucran el uso de techos verdes, por ejemplo, en la Ciudad de México se han establecido estándares locales que benefician a los usuarios que implementen de forma exitosa los techos verdes, no obstante, esta conceptualización no se ha extendido a todas las ciudades del país y, en lugares con clima árido-seco se puede tener un impacto directo en el ahorro energético por la climatización de los edificios (NOTIMEX, 2016). En otro tema, hay que tener en cuenta que los techos verdes implican una carga adicional sobre la estructura del edificio, así como costos de construcción y mantenimiento; sin olvidar que la eficiencia energética de la cubierta ecológica estará en función de la temperatura exterior, la humedad relativa en el aire exterior y la irradiación global (Barahona, 2011).

Actualmente, existen diversas investigaciones que basan sus conclusiones en datos experimentales de diferentes tipos de cubiertas vegetales (Macías y García-Navarro, 2010) e incluso existen edificios verdes que son certificados a través del sistema de Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED, por sus siglas

en inglés) (Villa, 2009). Sin embargo, en los techos verdes, existe la complejidad de no tratar los componentes de la envolvente vegetal (vegetación, sustrato y agua) como un material constante (Olivieri, 2013). Se debe asumir que la vegetación es un elemento vivo que interactúa con el ambiente y el edificio de muy diferentes modos, ya que depende de las condiciones climáticas e hidrológicas y de la vegetación usada (Varini, 2009). Por otro lado, los sustratos se pueden componer de diversos materiales cuyas características suelen diferir en la mayoría de los casos, influyendo notablemente en el comportamiento del conjunto (Machado, Brito, y Neila, 2000).

Objetivo del proyecto

El objetivo general de este proyecto es presentar los resultados del diseño experimental de un módulo de prueba para un tipo de cubierta ecológica extensiva, ya que tiene bajo costo de construcción, requiere de poco mantenimiento y se pueda implementar en las azoteas con baja carga de las construcciones de viviendas típicas del clima árido-seco de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Desarrollo

Selección del sitio de estudio

Según información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2014), el municipio de Hermosillo se ubica en las coordenadas geográficas 20°05'56" de latitud norte, 110°57'15" de longitud oeste y una altitud de 216 msnm, con clima seco, en promedio supera los 40°C en los meses de marzo a septiembre y temperaturas mínimas de 9°C en los meses de diciembre, enero y febrero; reporta una precipitación promedio anual de 378.7 milímetros.

En este municipio existen 486 657 casas habitadas que tienen techo de losa de concreto o de viguetas con bovedilla (INEGI, 2014). Las viviendas con vigueta y bovedilla muestran temperaturas muy parecidas a las del exterior, debido entre otras variables a la alta conductividad de los materiales de la envolvente y a las ganancias por infiltración (Carrasco y Morillón, 2004). Lo anterior, implica que hay mucho que mejorar en los sistemas pasivos de climatización adicional de las viviendas para solucionar la problemática del consumo significativo de energía eléctrica para el enfriamiento de las mismas.

Metodología

En la Figura 1 se presenta el esquema del módulo de prueba que se construyó para simular una losa de concreto. Se utilizaron tablas de 4 pulgadas de ancho y una pulgada de espesor, las cuales fueron cortadas en una longitud de 50 cm para formar un cuadro de 0.250 m² de área y pendiente de inclinación de 2%. Se preparó concreto F' C = 200 kg/cm² usando arena, grava, cemento y agua en las proporciones indicadas por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (citado por CEMEX, s.f. p.49) y se vació en la cimbra, manteniendo las condiciones de humedad y temperatura por siete días. Se usó impermeabilizante comercial a base de caucho, libre de contaminantes tóxicos y con 10 años de vida. El impermeabilizante se diluyó con sellador en proporción 1:5.

Como elemento drenaje se utilizaron migajas de caucho con diámetro promedio de 3/4 de pulgada, provenientes del triturado de llantas y proporcionadas por la empresa Ecoltec de Holcim Apasco. Posteriormente se colocó tela geotextil de polietileno de alta densidad, la función es separar el sustrato de crecimiento y la capa drenaje, por lo que tiene la característica de permitir el paso de agua, pero no el de tierra.

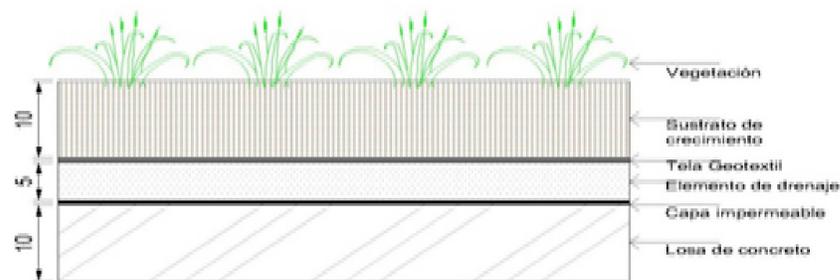


Figura 1. Esquema del prototipo de cubierta ecológica, tomando las medidas en centímetros de una losa de concreto utilizada comúnmente en las edificaciones de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

El sustrato de crecimiento tiene un espesor de 10 cm, se conformó de suelo tipo yermosol, que posee minerales arcillosos, carbonatos y sulfatos, es un suelo usado comúnmente en los jardines de Hermosillo, Sonora (Gobierno Municipal de Hermosillo, 2007) y carece de materia orgánica, por lo que se mezcló con humus de lombriz obtenido mediante la crianza sistemática de lombrices de tierra y con 2 kg/m² de zeolita natural tipo chabazita, obtenida de un yacimiento ubicado en Divisaderos, Sonora, la función de la zeolita es retener nutrientes y moléculas de agua y hacer una lenta liberación según necesidades de la planta (Chica-Toro, *et al.*, 2006).

La cubierta vegetal se realizó mediante el plantado de 8 plantas de *Ipomea Purpurea* por metro cuadrado, mismas que se obtuvieron de un vivero de la ciudad de Hermosillo, Sonora. Una vez plantadas se regaron de forma manual cada 7 días, usando una relación de 8 L/m².

Como medio de contención de las capas de la cubierta ecológica se usaron paredes de vidrio de 50 cm x 30 cm x ¼ de pulgada. Se utilizó pegamento a base de silicón acético entre la superficie de concreto y el vidrio.

El diseño incluye el uso de suelo tipo yermosol mezclado con humus de lombriz y zeolita natural tipo chabazita. Como cubierta vegetal se usó *Ipomea Purpurea*, perteneciente a la familia *convulváceae*, ya que es resistente a las sequías, tiene baja demanda de agua, sus hojas son de 2 a 11 cm que soportan los rayos solares y se adapta a cualquier tipo de suelo (Carranza, 2008).

En la Figura 2 se presenta el módulo experimental armado, mismo que se mantuvo a la intemperie durante el periodo de diciembre 2015 a febrero 2016.



Figura 2. Módulo de prueba de cubierta ecológica, la imagen es a los 30 días de implementado.

Considerando que el techo verde funciona como capa aislante y que el interior de la vivienda se debe mantener más cálido en invierno y más fresco en verano, aunque en ésta parte del proyecto no se evalúan temperaturas, sólo se observó de forma cualitativa y cuantitativa, a través de la observación y la medición del crecimiento de las hojas de las plantas y la cantidad de agua usada para el riego.

Cálculo estructural

En la Tabla 1, se presentan datos bibliográficos de las características del caucho, tierra vegetal y humus, para tomarlos como referencia para el cálculo del análisis estructural; además de la arena fina que sirve como comparativo para los elementos propuestos en este proyecto.

Se emplearon las ecuaciones 1 y 2, presentadas en la Tabla 2, para determinar el momento de la sección (Mn) que resiste la losa.

Tabla 1. Datos bibliográficos de los elementos considerados en el diseño de la cubierta ecológica.

Parámetros	Arena fina	Caucho triturado	Tierra vegetal	Humus
Densidad aparente (kg/m ³)	1436 – 1493 (Pire y Pereira, 2003)	250-300 (Gutiérrez y González, 2012)	1800 (NBE-CT-79, 1979)	
Conductividad térmica (W/m°C) (NBE-CT-79, 1979)	1.28	0.15	1.8	
Conductividad hidráulica (m/día)	0.02 – 20 (Domenico y Schwartz, 1998)	864 (Sánchez-Juan, 2012)	135 (Ansorena, 2016)	122
Peso seco (kg/m ³) (Torres-Rodríguez y Morillón-Gálvez, 2007)	1446.42		1300	568
Peso húmedo (kg/m ³) (Torres-Rodríguez y Morillón-Gálvez, 2007)	1928.56		16	1330

Tabla 2. Ecuaciones y factores considerados para el cálculo estructural.

Consideraciones	Ecuaciones (Siddiqi, 2014)
Factor de seguridad $\phi = 0.9$ $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$	$a = \frac{Asf'y}{0.85f'c(b)} \quad (1)$ $\phi Mn = \phi Asf'y \left(b - \frac{a}{2} \right) \quad (2)$
$f'y = 4200 \text{ kg/cm}^2$	
$b = 1 \text{ m}$	
$As = 2.85 \text{ cm}^2$	

Resultados y discusión

Durante el monitoreo no se observó presencia de filtración de agua en el techo. El material impermeabilizante presenta, según datos de especificaciones técnicas, resistencia a cambios bruscos de temperatura, choques térmicos, ambientes salinos y su elasticidad permite soportar movimientos estructurales de expansión y contracción que se presentan en toda construcción (Impertyre, 2011).

La capa de caucho triturado mantuvo la capacidad de drenar el agua, presentó un promedio de drenado de 4.1 ml/s que se midió durante el regado de las plantas, lo que es acorde según la porosidad del material y por ende la alta conductividad hidráulica.

De la Tabla 1, se aprecia que el caucho triturado tiene menor densidad y menor conductividad térmica que la arena fina, por lo que el material propuesto proporcionará menos peso a la estructura y se esperaría una reducción en la conducción de calor, por lo que el interior de la vivienda deberá tender a un ambiente más confortable, independientemente de la época del año. La malla geotextil, formada de filamentos tridimensionales funcionó como sistema de protección y drenaje, ya que permitió el paso de agua pero no de material de sustrato de crecimiento.

Se midió el crecimiento de la vegetación en tallos y hojas, las dimensiones alcanzadas a los 30 días fueron, tallo 15 cm y hojas 0.75 cm aproximadamente, creciendo un 25% en tallo y un 19% en hoja. Una característica de la vegetación es su capacidad para absorber la mayor parte de la radiación solar recibida y su utilización para sus funciones biológicas, lo que permite que no se sobrecaliente, transformando esta ventaja en un material interesante para la investigación desde el punto de vista de su comportamiento energético y su integración en los edificios.

Como en el diseño de los techos verdes se debe de evaluar la capacidad de soporte de la estructura del mismo y del edificio en general, en donde se considere la membrana filtro para el agua, el sistema de drenaje, el sustrato de crecimiento, el tipo de plantas, el sistema de riego y el almacenaje del agua. Por lo anterior, considerando valores promedio de

los elementos de la Tabla 1, se determinó el peso total de las cargas muertas y se asumió un peso de 110 kg para cargas vivas. En la Tabla 3 se presentan los resultados de los cálculos del análisis estructural, en donde se observa que la carga total a soportar es inferior al momento de la sección, por lo que el diseño propuesto es factible.

Tabla 3. Resultados de los cálculos de Momento de la sección (Mn), cargas vivas y cargas muertas.

Factor	
Alfa (α)	0.704
Momento de la sección, Mn (kg/m ²)	501
Cargas vivas (kg/m ²)	176
Factor de carga 1.6 (ASCE, 2013)	
Cargas muertas (kg/m ²)	309
Factor de carga 1.2 (ASCE, 2013)	
Carga total (kg/m ²)	485

Conclusiones

Aunque el conocimiento sobre el comportamiento térmico del módulo propuesto aún es limitado, el avance en los resultados obtenidos confirman que la cubierta ecológica analizada es funcional y factible para que se pueda incorporar en las viviendas típicas de climas árido-secos, ya que los elementos estructurales que conformarán la cubierta serán soportados por los techos de éstas, además que los elementos de la cubierta ecológica propuesta funcionan como aislantes térmicos debido a la baja conductividad térmica y a que la vegetación reduce las ganancias solares gracias al albedo y a los fenómenos de evapotranspiración que tienen lugar.

Además, aunque en la actualidad existen muchos tipos de cubiertas vegetales, las particularidades de su construcción influyen en el comportamiento global de forma determinante y los resultados obtenidos son significativos para cada caso analizado, siendo imposible extrapolar los datos obtenidos a otras situaciones debido a variables como la composición, la orientación, las características de la vegetación y las condiciones climáticas locales. Con los resultados obtenidos es posible llevar a cabo la experimentación a escala piloto que permita la comparación del comportamiento térmico en viviendas de clima árido-seco con techo de concreto armado y con cubierta ecológica. 

Bibliografía

- Ansorena, J. (2016). El compost de biorresiduos, normativa, calidad y aplicaciones. España: Mundi-Prensa. [En línea] Disponible en: <http://www.mundiprensa.com/catalogo/9788484767152/el-compost-de-biorresiduos--normativa-calidad-y-aplicaciones> [Último acceso: 23 septiembre 2016].
- ASCE, (2013). American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for building and other structures. [En línea] Disponible en: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/003/asce.7.2002.pdf> [Último acceso: 22 septiembre 2016].
- Barahona, T. (2011). Evaluación de la Tecnología de Techos Verdes como Agentes ahorradores de energía en México. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Carranza, E. (2008). Flora del Bajío y de regiones adyacentes. [En línea] Disponible en: <http://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/resumenes/FLOBA/ComplementarioXXIII.pdf> [Último acceso: 23 septiembre 2016].
- Carrasco, C. y Morillón, D. (2004). Adecuación bioclimática de la vivienda de interés social del noroeste de México con base al análisis térmico de la arquitectura vernácula. *ASADES Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 8(1). 97-102.
- CEMEX, s.f. Cementos Mexicanos. En: Manual del Constructor. s.l.:s.n., p. 49. [En línea] Disponible en: <https://www.cemexmexico.com/Concretos/files/Manual%20del%20Constructor%20-%20Construcci%C3%B3n%20General.pdf> [Último acceso: 22 septiembre 2016].
- Chica-Toro, F. D. J., Londoño-Benítez, L. M. y Álvarez-Herrera, M. I. (2006). La zeolita en la mitigación ambiental. *Revista Lasallista de Investigación*, 3(1). 30-34.
- Domenico, P. A. y Schwartz, F.W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology* 2nd. Ed. United States: John Wiley and Sons Inc.
- Gavilanes, M. (2015). Techos verdes: Prácticas de gestión ambiental en áreas urbanas. Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador. [En línea] Disponible en: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/8638> [Último acceso: 22 septiembre 2016].
- Gobierno Municipal de Hermosillo, (2007). Programa parcial de mejoramiento y conservación del centro urbano de Hermosillo: s.n. [En línea] Disponible en: http://ordenamientoterritorial.gob.mx/SEIOT/DPT/PPDU/Hermosillo/DOCUMENTO/01_introduccion.pdf [Último acceso: 23 septiembre 2016]
- Gutiérrez, J. A. y González, A. D. (2012). Determinación experimental de conductividad térmica de materiales aislantes naturales y de reciclado. *ASADES, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 16. 41-48.
- Ibañez-Gutiérrez, R. A. (2008). Techos vivos extensivos, una práctica sostenible por descubrir e investigar en Colombia. *Alarife: Revista de arquitectura*, 16. 21-36.
- Impertyre, (2011). Impermeabilizante ecológico. [En línea] Disponible en: www.impertyre.com/productos/fichas/impertyre.pdf [Último acceso: 22 septiembre 2016]
- INEGI, (2014). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [En línea] Disponible en: <http://www.ceieg.sonora.gob.mx/Files/Publicaciones/Anuario%20Estad%C3%ADstico%20y%20Geogr%C3%A1fico%202014.pdf> [Último acceso: 22 septiembre 2016].
- Machado, M., Brito, C. y Neila, J. (2000). La cubierta ecológica como material de construcción. *Informes de la Construcción*. 52(467). 15-29.
- Macías, M. y García-Navarro, I. (2010). Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios. *Informes de la Construcción*. 62(517). 87-100.
- Meza, M. del. C. y Moncada, J. O. (2010). Las áreas verdes de la ciudad de México. Un reto actual. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 14(331). [En línea] Disponible en: <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-331/sn-331-56.htm> [Último acceso: 23 septiembre 2016]
- NBE-CT-79, (1979). Normas Básicas de la Edificación. [En línea] Disponible en: http://www.ual.es/Depar/proyectosingenieria/descargas/Normas_Edificacion/NBE-CT-79.pdf [Último acceso: 19 septiembre 2016].
- NOTIMEX, (2016). Ofrecen beneficios fiscales por instalar azoteas verdes en el DF. Ex-

- celsior, 13 enero. [En línea] Disponible en: <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/01/13/1068598> [Último acceso: 23 septiembre 2016].
- Olivieri, F. (2013). Caracterización experimental y modelo predictivo del comportamiento térmico de una fachada vegetal. Tesis doctoral. Archivo Digital UPM. [En línea] Disponible en: <http://oa.upm.es/cgi/export/22384/> [Último acceso: 23 septiembre 2016].
- Pire, R. y Pereira, A. (2003). Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. *Bioagro*, 15(1). 55-63.
- Sánchez-Juan, R. (2012). Segunda vida de los neumáticos usados. *QuímicaViva*, Vol. 11(1). 25-40.
- Siddiqi, Z.A. (2014). Concrete structures. Part – I. 3rd. ed. Cap. 4. p. 144. United States: Help Civil Engineering Publisher.
- Torres-Rodríguez, A. y Morillón-Gálvez, D. (2007). Evaluación del uso de techos verdes en clima templado: caso Ecatepec de Morelos, Estado de México. *ASADES, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 11. 183-190.
- Tumini, I. (2007). Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. [En línea] Disponible en: <http://www.sb10mad.com/ponencias/archivos/a/A033.pdf> [Último acceso: 23 septiembre 2016].
- Varini, C. (2009). Envoltentes arquitectónicas: nueva frontera para la sostenibilidad energético-ambiental ¿cuáles modelos y cuáles aplicaciones? *Alarife: Revista de arquitectura*, Vol. 17. 79-96.
- Villa, F. (2009). Construcciones verdes. *Alarife: Revista de arquitectura*, Vol. 17. 39-54.

Juana Alvarado Ibarra
Obed Alejandro Yanez Romero
Andrea Guadalupe Zavala Reyna
Luis Eduardo Velázquez Contreras
Universidad de Sonora, Sonora, México.