

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**Techos verdes para climatización pasiva
en clima árido-seco**

TRABAJO ESCRITO

**Que para obtener el GRADO de
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD**

Presenta:

Obed Alejandro Yanez Romero

1942
Director de Tesis:

Dra. Juana Alvarado Ibarra

HERMOSILLO, SONORA

Julio del 2016

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

RESUMEN

El crecimiento poblacional en las ciudades trae como consecuencia la disminución de áreas verdes, por lo que obliga al sector de la construcción a conjuntar en las viviendas estrategias que promuevan el desarrollo sustentable. Por lo anterior, en este trabajo se presenta el diseño innovador de un sistema que funciona como techo verde, usando eco-materiales para la capa impermeabilizante, caucho proveniente del triturado de llantas como elemento de drenaje, y como sustrato de crecimiento, suelo tipo Yermosol, humus de lombriz y zeolita natural tipo chabazita; como cubierta vegetal se usó 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 la ciudad de Hermosillo, ya que lo que se buscó es que la cubierta ecológica sea eficiente energéticamente y que mejore el confort de los usuarios. También se presenta la construcción de un módulo de prueba; ya que se comprobó que el diseño innovador propuesto funciona de igual manera que los convencionales, donde se analizó el comportamiento térmico al interior del mismo, obteniendo resultados favorables ya que la reducción de la temperatura fue en promedio de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en comparación con las azoteas que no cuentan con algún sistema de naturación.

ABSTRACT

Population growth in cities has brought along the reduction of green areas, this has forced the construction industry to put together strategies that promote sustainable policies in housing developments. Therefore, this piece of work presents an innovative design that works as a green roof, using eco-materials in the waterproof layer, rubber crumbs as a drainage layer, and as a growing media, yermosol soil, vermicompost and natural chabazita zeolite; and Ipomea Purpurea as the vegetation element, a native plant to Mexico resistant to droughts and easily adapted to any type of soil. With this design we can achieve a lightweight load on buildings and thus, enhancing its application on typical housing of Hermosillo, seeking the energy efficiency in the ecological cover and the improvement of the users comfort. It also presents the construction of a pilot test; since it was proven that the proposed innovative design works in the same way as the conventional ones, obtaining favorable results since the reduction of the temperature was an average of ± 2 ° C in comparison with the roofs that do not have any kind of naturation system.

ÍNDICE

Índice de contenido

<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
<u>I. Introducción</u>	1
<u>II. Objetivo Estratégico</u>	3
<u>III. Objetivos Específicos</u>	3
<u>IV. Análisis Literario</u>	4
<u>4.1 Impactos de la Industria de la construcción</u>	4
<u>4.2 Construcción más sustentable</u>	6
<u>4.3 Edificación Verde</u>	7
<u>4.4 Techos verdes</u>	9
<u>V. Metodología</u>	15
<u>5.1 Tipo de estudio</u>	15
<u>5.2 Diseño Experimental</u>	15
<u>5.2.1 Fase de diseño</u>	15
<u>5.2.1.1 Vegetación</u>	16
<u>5.2.1.2 Sustrato de crecimiento</u>	16
<u>5.2.1.3 Elemento de drenaje</u>	16
<u>5.2.1.4 Capa impermeable</u>	16
<u>5.2.2 Fase de Construcción</u>	16
<u>5.2.3 Fase de Medición</u>	17
<u>5.3 Alcance</u>	17
<u>5.4 Hipótesis</u>	17
<u>5.5 Objeto de estudio</u>	17
<u>5.6 Selección del objeto de estudio</u>	17
<u>5.7 Instrumentos de recolección y manejo de datos</u>	18
<u>VI. Resultados</u>	19
<u>6.1 Diseño de prototipo de techo verde</u>	19

6.1.1 vegetación	19
6.1.2 Sustrato de crecimiento	20
6.1.3 Tela Geotextil	21
6.1.4 Elemento de drenaje	21
6.1.5 Capa impermeable	22
6.2 Construcción de prototipo	23
6.2.1 Elaboración de cimbra	23
6.2.2 Preparación de concreto F' C= 200 kg/cm²	24
6.2.3 Curado de concreto F' C= 200 kg/cm²	25
6.2.4 Habilitado de paredes de vidrio	25
6.2.5 Aplicación de impermeabilizante	26
6.2.6 Habilitado de elementos restantes	27
6.3 Diseño de módulo	28
6.3.1 Cadena de desplante	30
6.3.2 Cadena de cerramiento	31
6.3.3 Castillos	32
6.3.4 Losa de concreto	33
6.3.5 Pretil de ladrillo	33
6.4 Cálculo estructural	33
6.5 Diseño de techo verde habilitado en módulo	35
6.6 Construcción y habilitado de techo verde en módulo	36
6.7 Análisis de temperatura y humedad relativa	37
VII. Discusión	42
VIII. Conclusiones	44
IX. Recomendaciones	45
X. Referencias	46
Anexos	51

Índice de tablas

<u>Tabla</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
1	Impactos principales de las edificaciones e industria de la construcción	5
2	Características de techos verdes extensivos e intensivos	15
3	Aspectos de Norma NADF-013-RNAT-2007	23
4	Simulaciones realizadas durante la evaluación del módulo	39
5	Resumen del cumplimiento cualitativo de las capas de techo verde	42
6	Resumen de comparaciones de rangos de temperatura	43

Índice de figuras

<u>Figura</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
1	Indicadores de atención popular a edificaciones verdes	8
2	Componentes de techos verdes	11
3	Vista exterior del edificio experimental cerca de Ancona (Italia): cuesta norte	12
4	Fachada Norte y vista exterior del edificio experimental	12
5	Cubierta de Gaudenia	14
6	Cubierta de Suculenta	14
7	Diagrama de flujo para construcción de prototipo	17
8	Capas y sustratos de techo verde	19
9	Ipomea Purpurea	20
10	Medidas de techo verde (Unidades en cm.)	21
11	Migajas de llanta	22
12	Cimbra para dar forma a concreto	24
13	Concreto F´C= 200 kg/cm ² habilitado en cimbra	24
14	Curado de concreto	25
15	Habilitado de paredes de vidrio	26
16	Aplicación de impermeabilizante	26
17	Prototipo terminado	27
18	Módulo representativo, vista frontal (Unidades en cm.)	28
19	Módulo representativo, vista lateral (Unidades en cm.)	29

20	Módulo representativo, vista Aérea (Unidades en cm.)	30
21	Vista aérea de cadena de desplante del módulo (Unidades en cm.)	31
22	Vista aérea de cadena de cerramiento del módulo (Unidades en cm.)	31
23	Vista aérea de castillo del módulo	32
24	Perfil de losa de concreto del módulo	32
25	Perfil de techo verde habilitado en el módulo (Unidades en cm.)	35
26	Detalles en perfil de techo verde habilitado en el módulo	35
27	Vista aérea de techo verde habilitado en el módulo (Unidades en cm.)	36
28	Proceso constructivo de capas del techo verde	37
29	Simulación del módulo en Design Builder	38
30	Simulación sin techo verde	40
31	Simulación con techo verde	40
32	Comportamiento de temperaturas al interior del módulo	41
33	Comportamiento de la humedad relativa al interior del módulo	41

Índice de Anexos

<u>Anexo</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
1	Especificaciones técnicas del impermeabilizante Impertyre	51
2	Hojas del medidor Dickson TH800	52
3	Ejemplo de hojas obtenidas en el módulo	52
4	Ejemplo de los datos capturados en un día de medición del módulo	53

I. Introducción

La ciudad de Hermosillo, Sonora, México, al igual que en diversas partes del mundo se atribuye que debido al aumento poblacional se ha generado un crecimiento sin planeación dentro de la mancha urbana, y esta falta de planeación ha ocasionado la desaparición de áreas verdes (Maya y Aguilar, 2010), debido a este problema existe un descontento por parte de los habitantes de la ciudad, haciendo petición a las autoridades correspondientes a tomar medidas que solucionen dicho problema (Vásquez, 2015), ya que según la Organización Mundial de la Salud (OMS), para mantener una buena calidad de vida, es necesario que existan por lo menos 9 m² como mínimo de área verde por habitante (Rivas, 2005), mientras que en Hermosillo solo se cuenta con la mitad del mínimo recomendable (Pineda, 2015).

El crecimiento de la mancha urbana en la ciudad no solo ocasiona la disminución de áreas verdes en la misma, sino que también se genera el fenómeno conocido como Isla de Calor, siendo éste, el aumento térmico que se da por los pavimentos asfálticos, automóviles, y construcciones de concreto, ya que modifican los balances de radiación entre el suelo y el aire en una ciudad (Tumini, 2007). Tal efecto se corrobora con los datos obtenidos de los valores climáticos medios anuales por la estación meteorológica 761600 MMHO, donde se observó que en el año 1950 se obtuvo en la ciudad de Hermosillo una temperatura media anual (T) de 25.1 °C, mientras que en el año 2014 fue de 28.1 °C (Tu tiempo, 2015), dicho aumento en la temperatura se encuentra directamente relacionado con el aumento en el consumo de energía eléctrica, aunado a que el clima de la ciudad requiere del uso de aires acondicionados para el confort de los usuarios, donde a cada grado de incremento térmico que supere los 20 °C, se le atribuye un aumento de 500 megavatios generados por el aire acondicionado (Godoy, 2013).

La implementación de techos verdes en edificaciones, es considerada una solución a varios problemas ambientales ocasionados por la industria de la construcción, ya que reducen la huella de carbono mediante la conversión de dióxido de carbono en oxígeno a través de la fotosíntesis (Feng, et al, 2010), son un intento de recuperar los espacios verdes en las ciudades (Francis y Lorimer, 2011), además, han demostrado ser técnicas eficientes en la reducción de la variación de la temperatura interna y consumo energético de los edificios (Jaffal, et al, 2012).

Por lo anterior, en este proyecto se presenta el diseño de un modelo innovador de techo verde que sirva para las viviendas típicas del clima árido-seco de la ciudad de

Hermosillo, Sonora. Se presenta un concreto análisis de la literatura, en dónde se refuerzan los antecedentes de los techos verdes y los requerimientos técnicos para su implementación, así como revisar casos de éxitos en otras partes del mundo. El desarrollo metodológico se efectuó en dos partes, en la primera se diseñó un modelo a escala, utilizando una cimbra de medio metro en la que se colocaron los elementos que conformarían el techo verde para conocer su posibilidad de uso. En la segunda parte se usó un prototipo de módulo 2 x 2 m en el que se instaló el techo verde, se monitoreo la temperatura externa e interna y la humedad relativa para medir la eficiencia energética del modelo propuesto.

Como resultado de la medición hecha con el medidor Dickson TH800 se obtuvo que la propuesta de techo verde es eficiente energéticamente ya que las gráficas muestran una diferencia en la temperatura comparada e interna de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. por lo que es una propuesta aplicable a las viviendas.

II. Objetivo Estratégico

Contribuir a la reducción del uso de energía en edificaciones mediante el diseño innovador de un techo verde como dispositivo de climatización pasiva para clima árido.

III. Objetivos Específicos

1. Llevar a cabo un análisis literario del estado del arte sobre los impactos ambientales de la industria de la construcción, construcción sustentable, techos verdes y otros tópicos relacionados.
2. Diseñar un prototipo de techo verde para clima árido considerando materiales ecológicos y de reuso.
3. Construir un prototipo de techo verde.
4. Evaluar la eficacia del prototipo de techo verde.
5. Construir una prueba piloto de techo verde en la ciudad de Hermosillo/Sonora.
6. Validar la eficiencia energética del techo verde.

IV. Análisis Literario

4.1. Impactos de la Industria de la construcción

La industria de la construcción es de vital importancia, porque proporciona las necesidades del desarrollo humano ofreciendo productos para mejorar la calidad de vida, (Wu, 2014); además, según Burgan y Samson (2006) es una actividad que ayuda al crecimiento urbano porque proporciona hogar, espacios de trabajos e infraestructuras de transporte; sin embargo, es una industria que Samer (2013), Li y colaboradores (2010) consideran genera los mayores impactos ambientales al no ser un proceso amigable con el medio ambiente, porque consume energía, genera emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), utiliza enormes cantidades de recursos naturales y produce una cantidad significativa de desperdicios en la construcción y demolición de edificaciones (Poon, 2007), como lo demuestran los 91 millones de toneladas, cuantificados en el 2003 en Inglaterra (ODPM, 2004),

Hwang y Tan (2012), concuerdan con lo anterior, al establecer que uno de los mayores impactos de las edificaciones comerciales y residenciales es el alto consumo de energía en el mundo y que a pesar de lo difícil de determinar la cantidad exacta de diferentes fuentes, La Roche y Berardi (2014), estiman que el consumo de energía del sector de la construcción, aporta el 35% de GEI en todo el mundo, siendo las naciones industrializadas las que tienen mayor aportación como Estados Unidos (Zhou, et al., 2014), y según, Eastman y colaboradores (2008) el 39% del consumo total de energía corresponde al sector de la construcción; en este mismo sentido, Sorrell (2003) determinó que las edificaciones en el Reino Unido generaban el 46.6% del consumo de energía y el 46.9% de emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂).

Según Sev (2009), no solo las edificaciones existentes generan impactos, ya que los procesos constructivos actuales generan impactos ambientales, sociales y económicos, tal como se muestra en la tabla 1, aunado a que las tareas llevadas a cabo durante el proceso de construcción son una fuente importante de daños a la salud pública y el medio ambiente (Son, et al., 2011), así como a sus trabajadoras, ya que según Dewlaney y Hallowell (2012) la tasa de muertes ocupacionales en el sector de la construcción es desproporcionada en relación con el número de empleados en la industria.

Tabla 1. Impactos principales de las edificaciones e industria de la construcción

	Ambientales	Sociales	Economicos
Extracción y consumo de materia prima y el agotamiento de recursos relacionados.	*		*
Cambio de uso de la tierra, incluyendo la limpieza de flora existente	*	*	*
Uso de energía y emisiones asociadas de gases de efecto invernadero	*		*
Otras emisiones interiores y exteriores	*		*
Degradación estética		*	
Uso de agua y generacion de aguas residuales	*		*
Aumentar la necesidad de transporte, dependiendo del sitio	*	*	*
Generacion de desperdicios	*		*
Oportunidades de corrupcion		*	*
Trastorno de las comunidades, incluyendo el diseño y los materiales inapropiados		*	*
Riesgo para la salud en los lugares de trabajo y para los ocupantes del edificio		*	*

Fuente: (Sev, 2009).

En comparación con otras industrias, la industria de la construcción presenta un caso inusual, ya que las edificaciones son de larga duración, sobre todo en los países desarrollados, donde su vida media es de 80 a 100 años, lo cual significa repercusiones ambientales a largo plazo (Sev, 2009) y no sólo, en cuestión de uso de energía, sino también, en cuestión de emisiones considerables de dióxido de carbono, que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y desempeñan un papel muy importante en el cambio climático mundial (Yudelson y Fedrizzi, 2008). Además, la construcción de edificaciones genera otros problemas ambientales como contaminación atmosférica y del agua que surgen del uso de materiales tóxicos y muchos otros procesos dañinos involucrados (Christine, 2000).

Son y colaboradores (2011), afirman que es ampliamente conocido que las tareas llevadas a cabo durante el proceso de construcción son una fuente importante de daños a la salud pública y el medio ambiente, derivados de numerosos desechos tóxicos que se producen durante el curso de la construcción, los cuales, según Rohracher (2001) pueden causar enfermedades en los seres humanos; por ejemplo, la descarga al aire de los gases tóxicos producidos en el proceso de soldadura y pintura (Plank, 2005). Asimismo, según Drilling (2003), existe un grado de daño producido durante la fase de construcción de un proyecto que afecta a las condiciones ambientales durante las operaciones y fases de mantenimiento.

4.2. Construcción más sustentable

Sev (2009) afirma que existe un creciente reconocimiento de que la capacidad de la tierra para absorber los impactos de la actividad humana no es infinita, por lo que muchos de los problemas ambientales, ecológicos y económicos han comenzado a dirigir la atención mundial hacia la urgente necesidad de adoptar la sustentabilidad en todos los ámbitos (Sameh, 2014), con lo cual, Coimbra y Almeida (2013), concuerdan al afirmar que los cambios en el clima global, el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación y la crisis económica se han vuelto insustentables.

Construcción sustentable ha sido definida por Du Plessis (2002) como “Un proceso holístico en el cual los principios del desarrollo sustentable son aplicados en todo el proceso constructivo, desde la extracción de materias primas, pasando por la planeación, diseño y construcción de los edificios e infraestructura, hasta su posible demolición y disposición de los desperdicios resultantes”; concepto que Elmualim y colaboradores (2010), consideran se ha vuelto sumamente importante en la industria de la construcción, donde según Matar y colaboradores (2008) se deben adoptar acciones que coadyuven a transitar hacia una construcción más sustentable.

En este mismo sentido, Rekola y colaboradores (2012), aseguran que la construcción sustentable es una herramienta que tiene como objetivos el rendimiento requerido y funcionalidad con un impacto ambiental adverso mínimo, mientras que se fomenta la mejora de las circunstancias económicas, sociales y culturales a nivel local, regional y mundial; para lo cual existen tecnologías probadas y disponibles en el mercado que reducen el consumo de energía en los edificios nuevos y existentes entre un 30 a 50% sin aumentar significativamente los costos de inversión (Cheng, et al., 2008); sin embargo y pesar de estos esfuerzos aún tienen que cumplir con su máximo potencial en la creación de nuevas generaciones de edificios de alto rendimiento (Bynum, et al., 2012).

Chong y colaboradores (2009), también concuerdan con que la industria de la construcción, genera impactos ambientales y sociales graves en la comunidad, que requiere, según Singh y colaboradores (2009), considerar el concepto de sustentabilidad para promover un desarrollo más positivo de la sociedad, y al mismo tiempo, mantener a raya a los impactos negativos que la construcción pueda tener con el medio ambiente (Singh, et al., 2009); para lo cual, Osmani y colaboradores (2008) afirman deben de adoptarse en todas las etapas de construcción, considerando los impactos a largo plazo del diseño, construcción y gestión de los residuos.

Morales y colaboradores (2011) en los últimos años, el potencial de reciclaje de desperdicios en la construcción y demolición de edificaciones ha hecho que sea un objetivo de interés y el foco principal de las políticas de gestión de residuos fomentando la minimización, reutilización, reciclaje y valorización de los residuos ya que el reciclaje es una estrategia de reducción de residuos porque ofrece tres beneficios: reducir la demanda en nuevos recursos, reducir los costos de transporte y la energía de producción (Edwards, 2000) además de que según Tam y Tam (2006), son valorados en mil millones de dólares.

En investigaciones recientes realizadas por Kane y colaboradores (2014), se ha demostrado que las prácticas de construcción sustentables pueden reducir considerablemente el papel del entorno construido en el consumo de energía; aunque, según Feige y colaboradores (2011), la proporción de construcciones sustentables que realmente se han construido sigue siendo baja a pesar de la clara importancia del sector de la construcción en el proceso de cambio ambiental y la creciente popularidad del tema de la sustentabilidad en el sector de la construcción; sobre esto, Meir y Pearlmutter (2010), sostienen que en los próximos años resultará imperativo adaptar los edificios a las necesidades del futuro.

4.3 Edificación Verde

En el sector de la construcción se utilizan una variedad de términos para el significado "verde", incluyendo la construcción verde, diseño sustentable, edificios de alto rendimiento, la construcción sustentable y el diseño integrado (Robichaud y Anantatmula, 2011), a pesar de que no existe una única definición el de construcción verde es ampliamente aceptado porque revela muchos puntos en común (Langdon, 2007); sin embargo, el concepto de edificio verde, es el que más se extendido en la industria de la construcción, debido, según Wu y Low a la creciente conciencia de la sustentabilidad (Wu y Low, 2010) y que según, Moskow (2008), para abordar estas preocupaciones, las especificaciones de muchos edificios nuevos, en particular los de los organismos públicos o clientes institucionales, deben llevar a frases tales como verde, sostenible, o eficientemente energéticos.

Las nuevas edificaciones remplazan las áreas verdes haciendo de estas lugares menos atractivos para vivir y trabajar (Van Mechelen, et al., 2014), por lo que, según Vijayaraghavan y Joshi (2014) es necesario el desarrollo de tecnologías innovadoras para recuperar los espacios verdes y mejorar la calidad del medio ambiente, de ahí que se ha

presentado una creciente atención al papel potencial que presentan los edificios verdes (Demuzere, et al., 2014). En la Figura 1 se demuestra el aumento de la atención a los edificios verdes por los planificadores, desarrolladores e inversionistas en el periodo comprendido del año 2005 al 2009 (Eichholtz, et al., 2013).

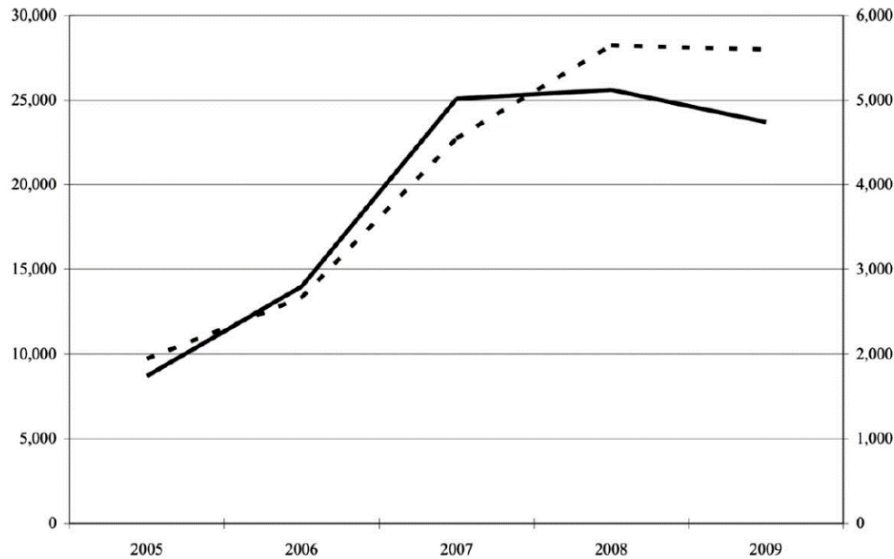


Figura 1. Indicadores de atención popular a edificaciones verdes

Fuente: (Eichholtz, et al., 2013).

Utilizando estos recursos, se define a las edificaciones verdes como una filosofía y prácticas de gestión de proyectos y construcción asociados que buscan, según Robichaud y Anantatmula (2011), (1) minimizar o eliminar los impactos sobre el medio ambiente, los recursos naturales y fuentes de energía no renovables para promover la sustentabilidad del entorno construido, (2) mejorar la salud, el bienestar y la productividad de los ocupantes y comunidades enteras, (3) aplicar el ciclo de vida se acerca a la planificación y desarrollo de la comunidad, y además, de acuerdo con Hwang y Tan (2012) buscan diseñarse en base a los principios de la construcción sustentable, que aborda las cuestiones ecológicas, sociales y económicas de un edificio en el contexto de su comunidad.

Existe una creciente demanda en los diversos grupos de interés, tales como propietarios, desarrolladores, consultores, contrato público a que las prácticas de diseño y edificación verde se incorporen en proyectos con el objetivo de aliviar los impactos ambientales negativos de los edificios y mejorar la salud y la productividad de los ocupantes (Swarup, 2010), destacando que un 95% de corporativos encuestados destacan que el diseño verde es importante en el proceso de selección del sitio (Kalette, 2010).

Algunos ejemplos de las características en edificios verdes es el uso de tecnologías verdes como la iluminación del día, así como la energía solar en lugar de electricidad, y la adopción de prácticas como la minimización de residuos, la conservación del agua y el uso de materiales reciclados en la construcción (Bon-Gang and Zong Bao, 2011), la construcción de edificios verdes también tiene que adoptar prácticas sustentables como el uso de agregados reciclados para el concreto y el uso de la madera reciclada (CIRIA, 2001) con el fin de asegurar que la contaminación de la construcción se mantenga al mínimo mediante el control de la erosión del suelo, la sedimentación pluvial y la generación de polvo en el aire (USGB, 2009b).

4.4. Techos Verdes

Según Issa (2013), la técnica de los techos verdes es considerada una contribución efectiva a la resolución de varios problemas ambientales en el área de la construcción, por lo que a menudo son señalados como tecnologías eficientes en la reducción de la variación de la temperatura interior y el consumo energético de los edificios, tanto en climas cálidos como en fríos (Jaffal, et al., 2012), además, dicen Fioretti y colaboradores (2010), son capaces de crear un ambiente agradable, los techos verdes ofrecen varias ventajas en comparación con los techos convencionales como: mejorar la gestión de aguas pluviales; asimismo y de acuerdo a Feng y colaboradores (2010), ofrecen reducir la contaminación del aire y el ruido, y también reducen la huella de carbono de una ciudad mediante la conversión de dióxido de carbono en oxígeno a través de la fotosíntesis.

Debido a lo anterior, los techos verdes se han vuelto populares en muchos países, sobre todo porque, según Vijayaraghavan y Joshi, (2014) son un intento de recuperar espacios verdes en las ciudades a pesar de haber sido creados por el hombre, pueden ser parte de la restauración de la naturaleza en los espacios construidos (Francis y Lorimer, 2011); no obstante, se reconoce que no pueden sustituir en la totalidad las áreas naturales (Demuzere, et al., 2014) pero si proporcionar un hábitat para la biota diversa y, por lo tanto, ayudar a proteger los ecosistemas terrestres y acuáticos (Ignatieva, et al., 2011).

Por otra parte, de acuerdo con Li y Babcock (2014), el utilizar techos verdes provee beneficios económicos al público en general ya que son eficaces en el ahorro de energía de las edificaciones mediante la reducción del calentamiento interno provocado por la radiación solar (Ouldboukhitine, et al., 2012), ya que el potencial de calentamiento y

enfriamiento de las edificaciones, depende fuertemente del clima de la región (La Roche y Berardi, 2014).

Según Ascione y colaboradores (2013) el potencial de los techos verdes para lograr estos beneficios a menudo viene en debate, y según Jim y Tsang (2011) la eficiencia de los techos verdes en el clima cálido y húmedo, el relieve, el tipo y la estructura de la biomasa juegan un papel notable en el potencial de enfriamiento, de ahí que las soluciones de techos verdes serán diferentes si se implementan al clima de Australia o al clima de Europa (Williams, et al., 2010).

En el caso de los climas árido y de acuerdo con Niu y colaboradores (2010) reducen potencialmente la temperatura interior a través de sombreado de la capa de la azotea y la reducción de la influencia directa de la radiación solar. Los techos verdes comprenden básicamente varios componentes (Figura 2) incluyendo la vegetación, el sustrato de crecimiento, la tela de filtro, el elemento de drenaje, la barrera de la raíz y el aislamiento (Demuzere, et al., 2014), clasificándose en extensivos e intensivos basados en la profundidad de los sustratos (Vijayaraghavan y Raja, 2014) donde los extensivos son aquellos que miden una profundidad máxima de 15 cm generalmente utilizados para mantener tipos de vegetación como hierbas, pastos etc., (Getter, et al., 2009), sin embargo, un estudio reciente en Michigan llevado a cabo por Whittinghill, et al. (2013) demostró que es posible producir vegetales comunes con un mínimo de fertilizantes en los techos verdes extensivos.

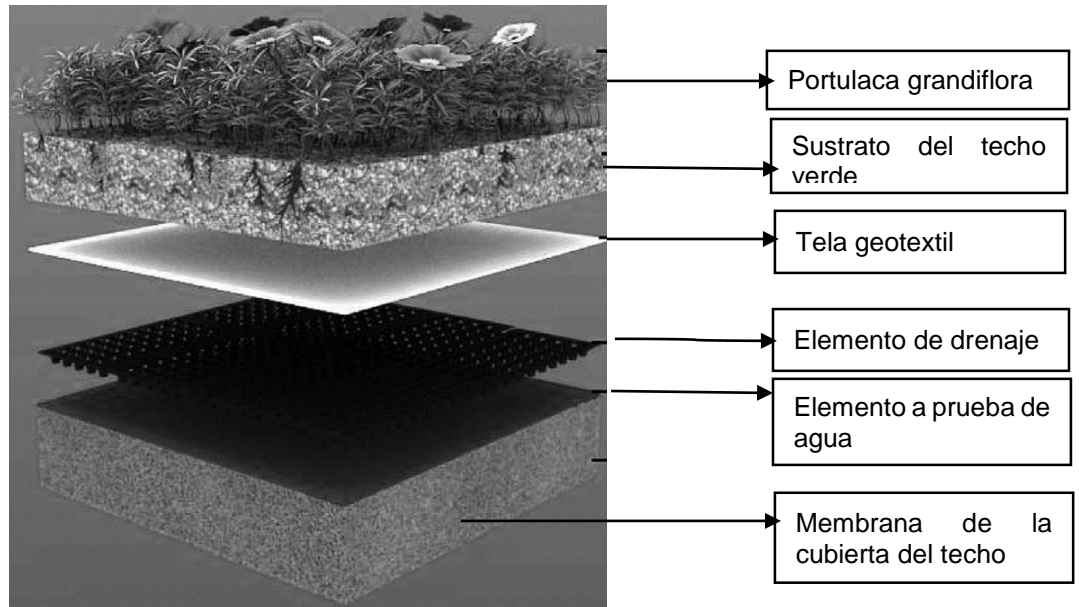


Figura 2. Componentes de techos verdes

Fuente: (Vijayaraghavan y Joshi, 2014).

D’Orazio, Di Pierna y Di Guiseppe en su trabajo publicado en el año 2012 compararon el comportamiento térmico de techos verdes extensivos con otros seis tipos de techos, todos ellos fueron instalados en un edificio experimental a escala real en las cercanías de Ancona, Italia (Figura 3). Los resultados que se obtuvieron en el experimento, evidenciaron que el rendimiento térmico de un techo verde bajo clima templado comparado con otros tipos de techos evidencia que en verano, la instalación de un techo verde conduce a la disminución de las temperaturas de la superficie y su amplitud diaria.



Figura 3. Vista exterior del edificio experimental cerca de Ancona (Italia): cuesta norte

Fuente: (D'Orazio, et al., 2012).

De igual manera S. Parizotto y R. Lamberts en el año 2011 construyeron en un edificio experimental ubicado en Florianópolis, una isla al sur de Brasil, un techo verde con el objetivo de evaluar la influencia del mismo en el perfil de temperatura y flujo de calor a través del techo, así como también, comparar el rendimiento térmico del techo verde contra tejados cerámicos y metálicos. La figura 4, muestra el edificio experimental



Figura 4. Fachada Norte y vista exterior del edificio experimental

Fuente. (Parizotto y Lamberts, 2011).

El edificio experimental tiene tres diferentes tipos de techos: techo de cerámica, techo metálico y techo verde, donde el techo de cerámica consiste en azulejos blancos, listones de madera, barrera radiante de polietileno aluminizada, aislamiento de lana de roca y tableros de fibra orientada, y el techo metálico se compone de paneles solares fotovoltaicos, paneles metálicos de chapa plegada con pintura blanca, aislamiento de lana de roca, y el techo verde consta de una capa de vegetación *Bulbine frutescens*, capa de sustrato del suelo, filtro geotextil, grava y capa de drenaje de gravilla, cemento armado, aislamiento de poliestireno extruido, no sellador de asfalto y losa de concreto.

Con los datos obtenidos en este estudio se demostró que los techos verdes contribuyen a los beneficios térmicos de un edificio en condiciones de clima templado, donde la eficiencia del techo verde observada en este estudio es probablemente debido a la compensación de las tasas de evapotranspiración inferiores por otros efectos, tales como el sombreado, el aislamiento, y la masa térmica en relación con la temperatura del aire interno, el techo verde presenta la amplitud diaria más baja durante el período de calentamiento y casi la misma amplitud diaria de los tejados cerámicos y metálicos durante el período frío.

Por otra parte, E. Haro en el año 2009 mediante un método experimental-comparativo analizó el comportamiento de dos tipos de cubiertas vegetales como dispositivos de climatización para climas áridos sub-húmedos en el municipio de Coquimatlán, Colima. Para la investigación se utilizaron dos tipos de plantas, una del tipo suculenta con el nombre científico *Malephora Crocea*, eligiéndose por su abundante cobertura y por sus bajos requerimientos de agua, y la segunda del tipo rastrera conocida como *Gaudenia* o Hilo de Oro con el nombre científico *Wedelia Tribolata*, siendo seleccionada debido a su fácil crecimiento y el poco mantenimiento ya que no son necesarias las podas.

El experimento se llevó a cabo usando tres módulos en uno de los jardines de la facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Colima, los cuales son de base cuadrada de 1.81x1.81 m a exterior, contruidos de ladrillo rojo cocido de 14 cm. y enjarrados en la parte exterior con mortero cemento-arena de 1.5 cm. La altura de los muros es de 1.22 m teniendo una cubierta de concreto de 6 cm de espesor con un pretil de 16 cm sobre ella. Los módulos se encuentran en condiciones externas similares de soleamiento y radiación, en uno de ellos se colocó la cubierta de *Gaudenia* (Figura 5), en otro la cubierta suculenta (Figura 6), quedando el tercero como modulo testigo.



Figura 5. Cubierta de Gaudenia

Fuente: (Haro, 2009).



Figura 6. Cubierta de Suculenta

Fuente: (Haro, 2009).

Al analizar los datos obtenidos del experimento, se concluyó que se puede reducir la temperatura en el interior de una envolvente arquitectónica entre 5° y 10° C, con el uso de una cubierta vegetativa de Gaudenia respecto a un testigo. El sistema que tuvo una mayor disminución en la temperatura interna fue la cubierta de Gaudenia teniendo una disminución de 12° C en el mes de Marzo, mientras que la cubierta Suculenta tuvo una disminución de 3.6° C en el mismo mes, deduciendo que el hecho de que exista una mayor reducción en módulo de Gaudenia que en el módulo de Suculenta sea debido al papel importante que juega el follaje en este fenómeno.

V. Metodología

5.1 Tipo de estudio

El presente estudio tuvo un enfoque mixto, la parte cuantitativa se analizó con las mediciones de temperatura y humedad relativa, y la parte cualitativa se aplicó la observación del funcionamiento de los materiales usados en el sistema propuesto.

5.2 Diseño Experimental

El diseño experimental se adaptó de la metodología utilizada por Vila, et. al (2011), la cual describe la elaboración de un prototipo de techo verde y un módulo de prueba. En ésta propuesta se incluyó eco-materiales como el impermeabilizante ecológico a base de llantas ImperTyre de una duración de 10 años, y en la capa de drenaje materiales de reuso como migajas de llanta proporcionados por la empresa Ecoltec de Holcim Apasco Hermosillo, así como también se usó Humus de Lombriz y zeolita en el sustrato de crecimiento para proporcionar la materia orgánica necesaria y una mejor resistencia en minerales y agua para períodos de sequía. A continuación se describen las fases utilizadas en la elaboración del techo verde.

5.2.1 Fase de diseño. Se eligió un techo verde extensivo debido a las características que presentan (tabla 2).

Tabla 2: características de techos verdes extensivos e intensivos

Techos Verdes	
Extensivos	Intensivos
Ideales para azoteas con poca capacidad de carga	Se requiere de azoteas con mucha capacidad de carga
Bajo costo y poco mantenimiento	Costos altos y mucho mantenimiento
Profundidad máxima de 15 cm	Profundidad de 30 cm
Vegetación a base de hierbas y pastos	Vegetación a base de árboles y arbustos

Fuente: Elaboración propia.

Se diseñó cada una de las capas considerando las siguientes condiciones:

5.2.1.1 Vegetación

Las condiciones en los tejados de las casas, como lo es la temperatura, las radiaciones solares, velocidades de viento, y sequías, son retos para la supervivencia y el crecimiento de las plantas en el diseño de un techo verde, por lo que se debe de contar con una vegetación que resista las condiciones anteriormente mencionadas, y a su vez tener un crecimiento de su raíz preferentemente de manera horizontal, esto para evitar daños en la losa.

5.2.1.2 Sustrato de crecimiento

El sustrato de crecimiento comprendido principalmente por tierra es el que aporta los nutrientes para el desarrollo de la vegetación, su crecimiento y nutrición.

5.2.1.3 Elemento de drenaje

La función de la capa de drenaje es obtener un balance óptimo entre aire y agua asegurando un buen flujo de agua y la aireación para el sustrato de arena y las raíces de las plantas, usualmente compuesta por materiales de grano grande como la grava, y puzolana, o bien sistemas de drenaje prefabricados como los denominados Urban space.

5.2.1.4 Capa impermeable

Es la capa encargada de evitar la filtración del agua y humedad a la losa.

5.2.2 Fase de construcción.

La fase referente a la construcción, consistió en la construcción física del prototipo y del módulo de techo verde previamente diseñados en la fase anterior. En la figura 7 se presenta el diagrama de flujo que se siguió.

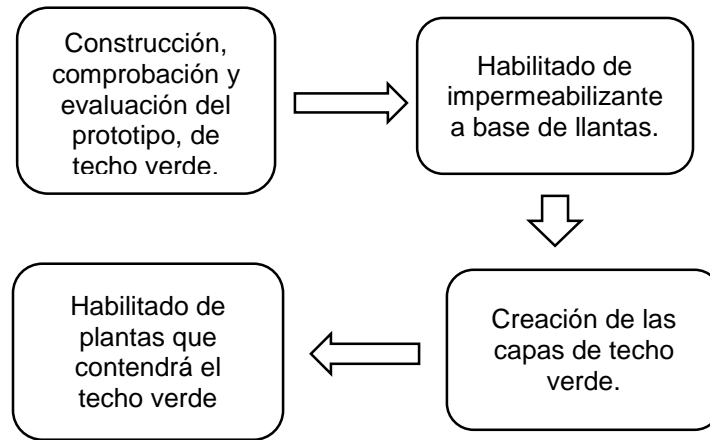


Figura 7. Diagrama de flujo para construcción de prototipo

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Fase de medición.

Por último, durante la fase denominada de medición, se midió la eficacia de los materiales propuestos en el prototipo, y en el módulo de techo verde la Temperatura y Humedad relativa con el medidor de clima Dickson TH800, las medidas se tomaron durante 3 meses, donde se realizaron los análisis de los datos en base a los estándares establecidos en la NOM-001-STPS-2008 y NOM-008-ENER-2001. Asimismo, se estuvo monitoreando el crecimiento de la vegetación y su desarrollo.

5.3. Alcance

Obtención de un diseño innovador de techo verde, el cual será llevado a cabo en el período comprendido de noviembre 2014 a julio de 2016.

5.4 Hipótesis y/o preguntas de investigación

¿Es posible, reducir la temperatura interna de las edificaciones mediante el diseño de un techo verde, que utilice materiales ecológicos y de reuso? ¿Es posible tener un techo verde en el clima árido-seco?

5.5 Objeto de estudio

El objeto de estudio de esta investigación fue un cubículo de techo verde utilizando materiales ecológicos y de reuso en su fabricación. La eficiencia de un techo verde elaborado con materiales reciclados como las llantas y probado para la eficiencia energética

en un módulo de prueba ubicado en la zona campestres los arbolitos en la periferia de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

5.6 Selección del objeto de estudio o del lugar que ubica al objeto de estudio

La Selección del objeto de estudio, por el interés de la academia de experimentar con el ya probado concepto de techo verde, pero en una zona de clima-árido seco y utilizando materiales ecológicos y de reuso de fácil acceso en la región. Por conveniencia, ya que se tiene interés de probar el concepto de techo verde en zonas de clima árido seco.

5.7 Instrumentos de recolección y manejo de datos

- AUTOCAD en la elaboración de los planos del prototipo y del módulo de techo verde.
- Hojas de Excel para el cálculo estructural y la elaboración de tablas de medición.
- Medidor Dickson TH800 para tomar las mediciones de temperatura y humedad relativa en el módulo.
- Software Design Builder y Energy Plus para realizar simulaciones del módulo.

VI. RESULTADOS

6.1 Diseño de prototipo de techo verde

Para el funcionamiento del techo verde propuesto para la ciudad de Hermosillo, Sonora se hicieron las capas y sustratos como se muestra en la Figura 8, considerando las necesidades y características necesarias mencionadas anteriormente en la metodología.

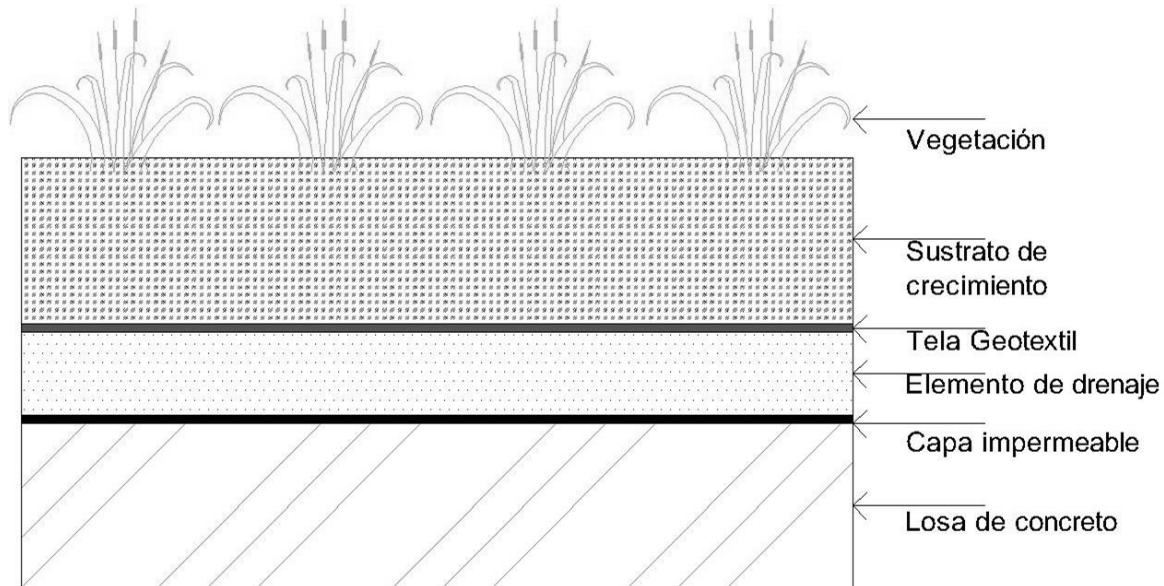


Figura 8: Capas y sustratos de techo verde.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.1 Vegetación

En base a las características necesarias para la vegetación en un techo verde mencionadas con anterioridad en la metodología, se utilizó *Ipomea Purpurea* (Figura 9), perteneciente a la familia convolvuláceae, planta herbácea, trepadora o postrada, ya que tiene una naturaleza resistente a las sequías, tiene baja demanda de agua, hojas de 2 a 11 cm. de largo, soporta los rayos solares, además, se adapta a cualquier tipo de suelos (Carranza, 2007).



Figura 9: Ipomea Purpurea.

Fuente: (Carranza, 2007)

6.1.2 Sustrato de crecimiento

Para el sustrato de crecimiento se utilizó un sustrato de 10 cm. de espesor (Figura 10), el cual estará conformada por el tipo de suelo Yermosol que posee la característica de tener minerales arcillosos como carbonatos y sulfatos, este suelo es comúnmente utilizado en los jardines de Hermosillo, Sonora (Gobierno Municipal de Hermosillo, 2007) aunque carecen de materia orgánica, por lo que se mezclará con Humus de Lombriz ya que es un fertilizante orgánico y ecológico resultado de la transformación digestiva y metabólica de la materia orgánica, mediante la crianza sistemática de lombrices de tierra (se venden en los viveros de Hermosillo es barata) y también, se agregará 2 kilogramos de zeolita por cada metro cuadrado de techo verde, ya que al mezclarse con fertilizantes como el humus de lombriz y tierra, se incrementa la retención de potasio, calcio y magnesio con lenta liberación de los mismo, además, atrapan partículas de agua permitiendo a las plantas mayor resistencia en los periodos de sequía y generando así, una reducción en el consumo de agua de hasta el 35%.

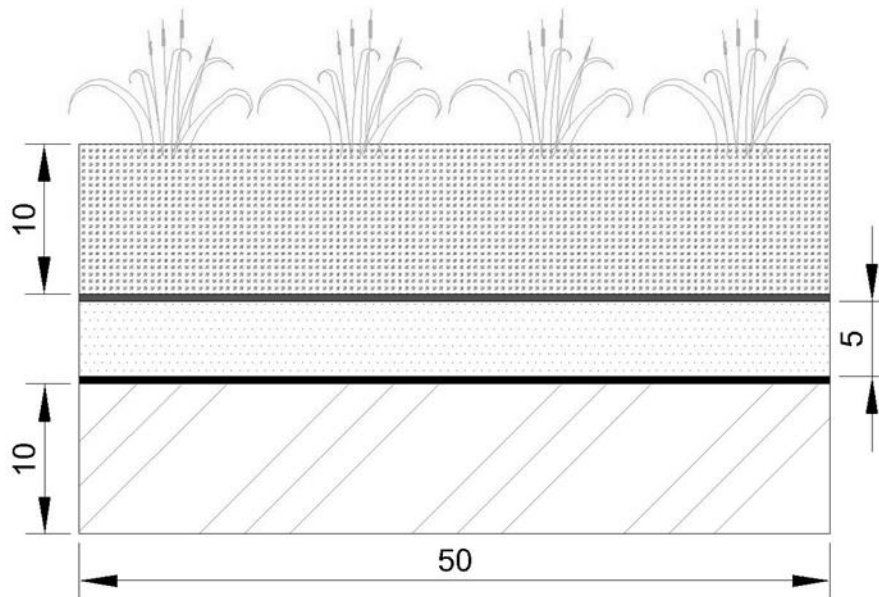


Figura 10: Medidas de techo verde (Unidades en cm.)

Fuente: Elaboración propia.

6.1.3 Tela Geotextil

La tela o malla geotextil es una membrana de polietileno de alta densidad (HDPL) formada de filamentos tridimensionales que funciona como sistema de protección y drenaje debido a la cámara de aire que se forma entre la estructura y el terreno natural, y en un techo verde tiene como función, separar el sustrato de arena y la capa de drenaje, por lo que tiene la característica de permitir el paso del agua pero no de la tierra ubicada por encima de la misma.

6.1.4 Elemento de drenaje

En este estudio se utilizaron migajas de caucho, proveniente del triturado de llantas (Figura 11) de un diámetro promedio de $\frac{3}{4}$ de pulgada, ya que se demostró por Vial, et.al, (2012) que no existe diferencias en la Conductividad Hidráulica (CH) entre los materiales de grano grande y las migajas de llanta, además, estas proporcionan menos peso a la estructura y menor conductividad Térmica, por lo que se espera que la reducción en la temperatura interna de la edificación, será mayor que utilizar materiales de grano grande.



Figura 11: Migajas de llanta

Fuente: Vial, et.al., (2012)

6.1.5 Capa impermeable

Se utilizó un impermeabilizante a base de caucho de 10 años de vida marca comercial, según las especificaciones técnicas (Anexo 1) se caracteriza por tener resistencia a cambios bruscos de temperatura, choques térmicos, ambientes salinos, además, su elasticidad le permite soportar los movimientos estructurales de expansión y contracción normales en toda construcción, por otra parte, no contiene contaminantes tóxicos o dañinos a las personas o al medio ambiente, por lo que se le considera un material ecológico.

La Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-NRAT-2007 es la norma encargada de las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en edificaciones, la cual tiene como objeto establecer los criterios o especificaciones técnicas, condiciones, parámetros y criterios mínimos de calidad y seguridad estructural, aplicables en la instalación de sistemas de naturación en el Distrito Federal. Es por ello que en la tabla 3 se resume si el diseño innovador propuesto cumple con las especificaciones dadas en dicha norma, considerando cada aspecto dado.

Tabla 3. Aspectos de Norma NADF-013-RNAT-2007

Aspectos de diseño considerados por la Norma NADF-013-RNAT-2007	
Estabilidad y resistencia Mecánica	Cumple
Pendiente minima del 2%	Cumple
Pretilos mínimos de 20 cm.	Cumple
Equipos sobre cubierta a 15 cm. por encima de sustrato de crecimiento	No Aplica
Rebosaderos con altura de 5 cm. por arriba de sustrato de crecimiento	Cumple
Carga viva adicional de 110 kg/m ²	Cumple
Desagüe de agua	Cumple
Capa drenante	Innovación
Capa filtrante	Cumple
Sustrato de crecimiento mínimo de 10 cm.	Cumple
Materiales en sustrato de crecimiento	Innovación
Vegetación	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la tabla anterior, se deduce que el diseño innovador propuesto para el prototipo cumple con las especificaciones técnicas de naturación de edificaciones, por tal motivo, se procede a la construcción del mismo. A continuación se describen las actividades realizadas durante el proceso de construcción del prototipo.

6.2 Construcción de prototipo

6.2.1 Elaboración de cimbra

Se realizaron dos cortes de 50 cm. y dos cortes de 55 cm. en una tabla de 4 pulgadas de ancho y 1 pulgada de espesor, con el fin de obtener un cuadrado de 50 cm. a sus interiores y una altura de 10 cm. (Figura 12), el cual servirá para darle la forma y espesor correcto a la muestra representativa de una losa de concreto comúnmente utilizada en las edificaciones al noroeste del país de México.



Figura 12. Cimbra para dar forma a concreto
Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 Preparación de Concreto $F'_{C}= 200 \text{ Kg/Cm}^2$

Para la elaboración del concreto necesario en la obtención de la muestra representativa de la losa, se preparó el concreto en base a las proporciones de grava-arena-agua como lo marcan las especificaciones de Cementos Mexicanos (CEMEX).

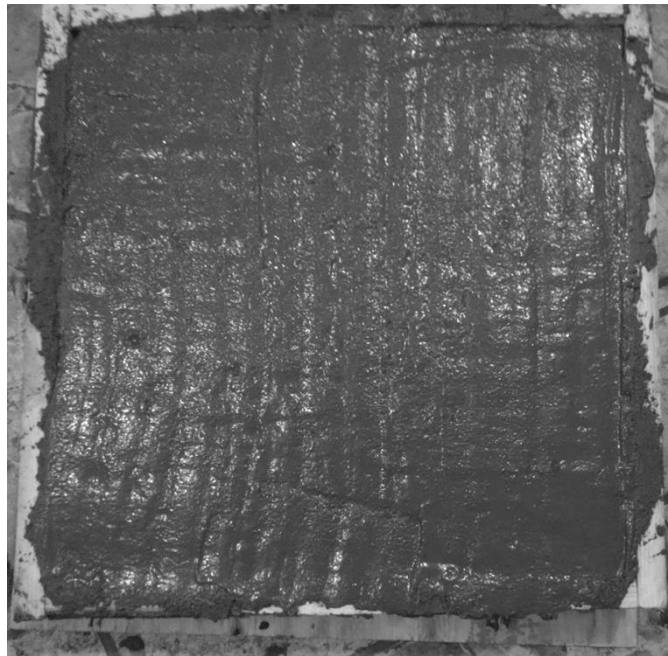


Figura 13. Concreto $F'_{C}= 200 \text{ kg/cm}^2$ habilitado en cimbra
Fuente: Elaboración propia.

6.2.3 Curado de Concreto $f'c = 200 \text{ Kg/Cm}^2$

El curado de concreto tiene como objetivo prevenir el secado prematuro del mismo, y se logra manteniendo los contenidos de humedad y temperatura satisfactorios durante un período de 7 días después de su colocación y acabado. Se realizó este proceso en la muestra representativa con el fin de obtener la resistencia deseada (Figura 14).

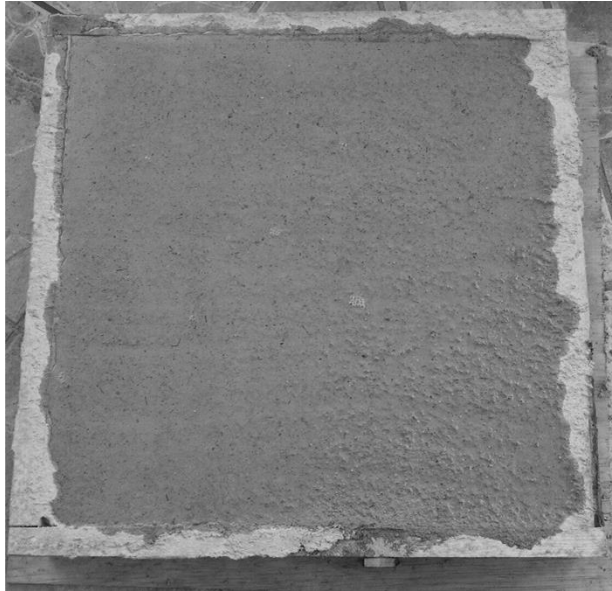


Figura 14. Curado de concreto
Fuente: Elaboración propia.

6.2.4 Habilitado de paredes de vidrio

Con el fin de mantener visibles y en su lugar las capas de techo verde en el prototipo, se habilitaron paredes de vidrio con medidas de 50 cm. x 30 cm x $\frac{1}{4}$ de pulgada de grosor, dichas medidas fueron tomando en cuenta el espesor de las capas de techo verde y de la muestra representativa de la losa. Se realiza el habilitado mediante pegamento especial a base de silicón acético para lograr una adherencia adecuada entre la superficie de concreto y el vidrio (Figura 15).

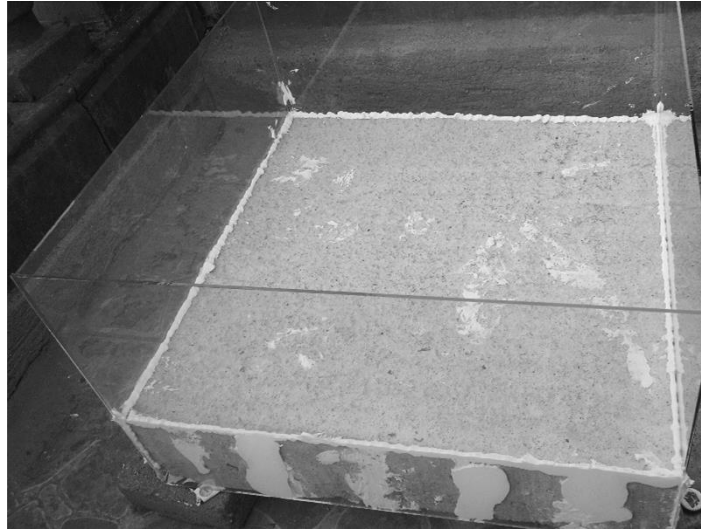


Figura 15. Habilitado de paredes de vidrio

Fuente: Elaboración propia.

6.2.5 Aplicación de Impermeabilizante

Se utilizó impermeabilizante a base de caucho, el cual se diluyó con el sellador correspondiente en una proporción de 1:5, donde se aplicaron dos capas en direcciones contrarias para poder así llenar todos los espacios en la losa tal y como lo indica las instrucciones del producto (Figura 16).



Figura 16. Aplicación de impermeabilizante.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.6 Habilitado de los elementos restantes.

Una vez aplicado el impermeabilizante en el prototipo, se procedió a habilitar los elementos restantes como la capa de drenaje la cual consta simplemente en colocar una capa de 5 cm. de espesor del caucho triturado, así como también el acomodar la tela geotextil arriba de la capa de drenaje, y por último, habilitar una capa de 10 cm. de espesor de tierra con zeolita que será la que contendrá a las plantas propuestas como Se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Prototipo terminado.

Fuente: Elaboración propia.

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.

La capa de caucho triturado mantuvo la capacidad de drenar el agua, no hubo diferencia en la conductividad hidráulica comparada con materiales gruesos. Además el caucho de llanta proporciona menos peso a la estructura y menor conductividad, con lo que se espera una mayor eficiencia en el prototipo propuesto, al tener una reducción en la temperatura interna del edificio. El volumen de agua promedio que drenaba es de 0.25 litros, esto fue al momento de echar el agua a la planta.

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 del 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 en intervalo de 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.

6.3 Diseño de módulo de techo verde Construcción de la prueba piloto

El diseño innovador de techo verde se aplicará en un módulo representativo (figura 18, 19, 20) de las edificaciones típicas del Estado de Sonora, tanto en su forma, diseño, y materiales utilizados. Dicho módulo se encuentra a 15 km. de la ciudad de Hermosillo en el club campreste Real del Alamito.

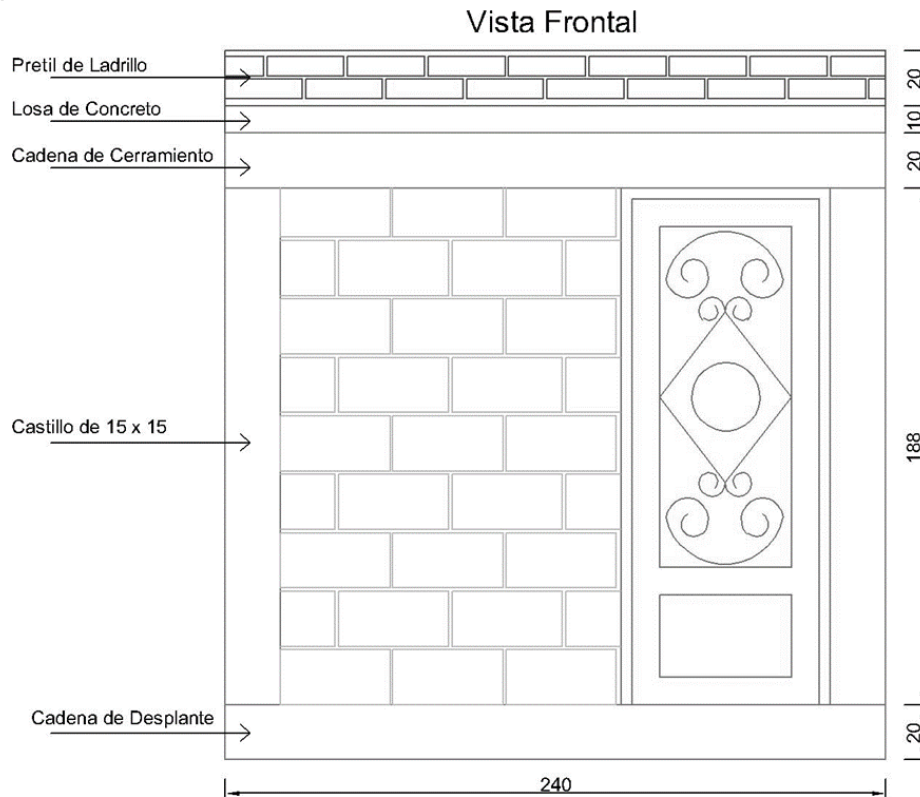


Figura 18: Módulo representativo, vista frontal (Unidades en cm.)

Fuente: Elaboración propia.

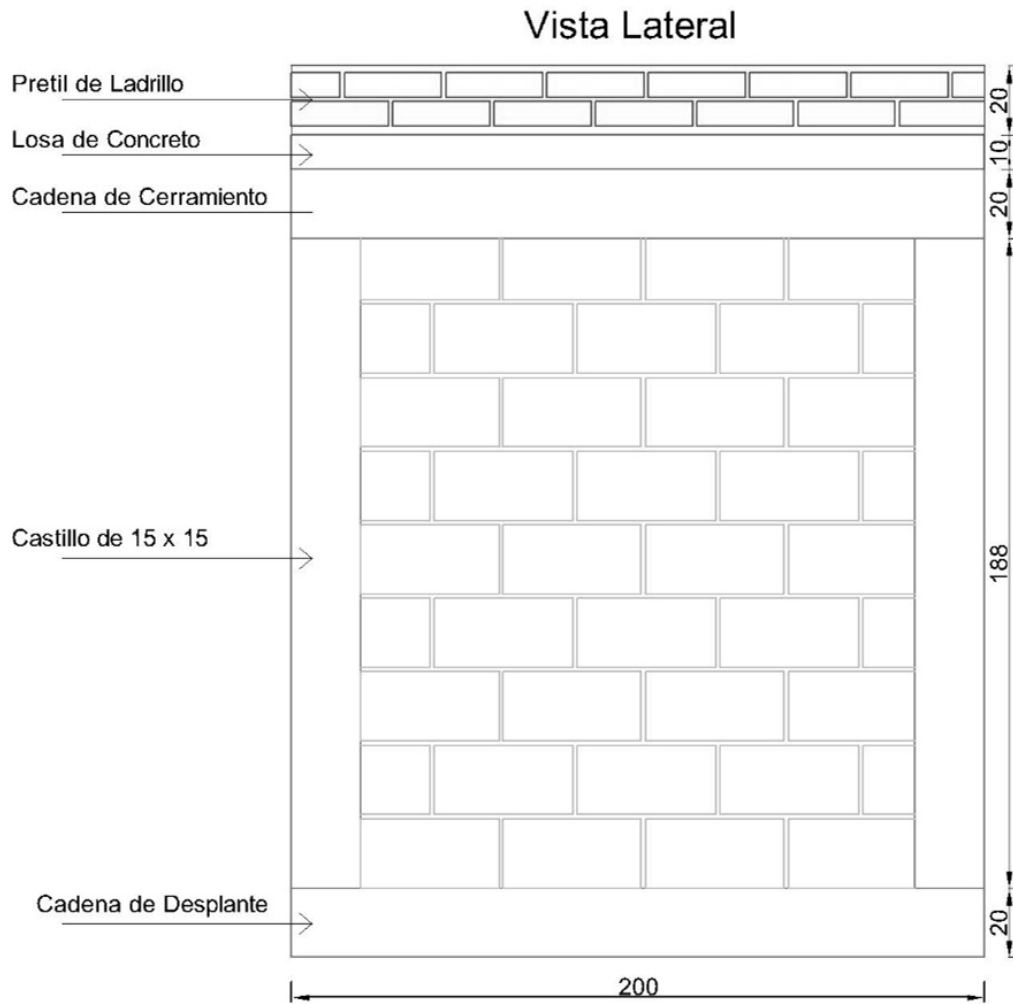


Figura 19: Módulo representativo, vista lateral (Unidades en cm.)

Fuente: Elaboración propia.

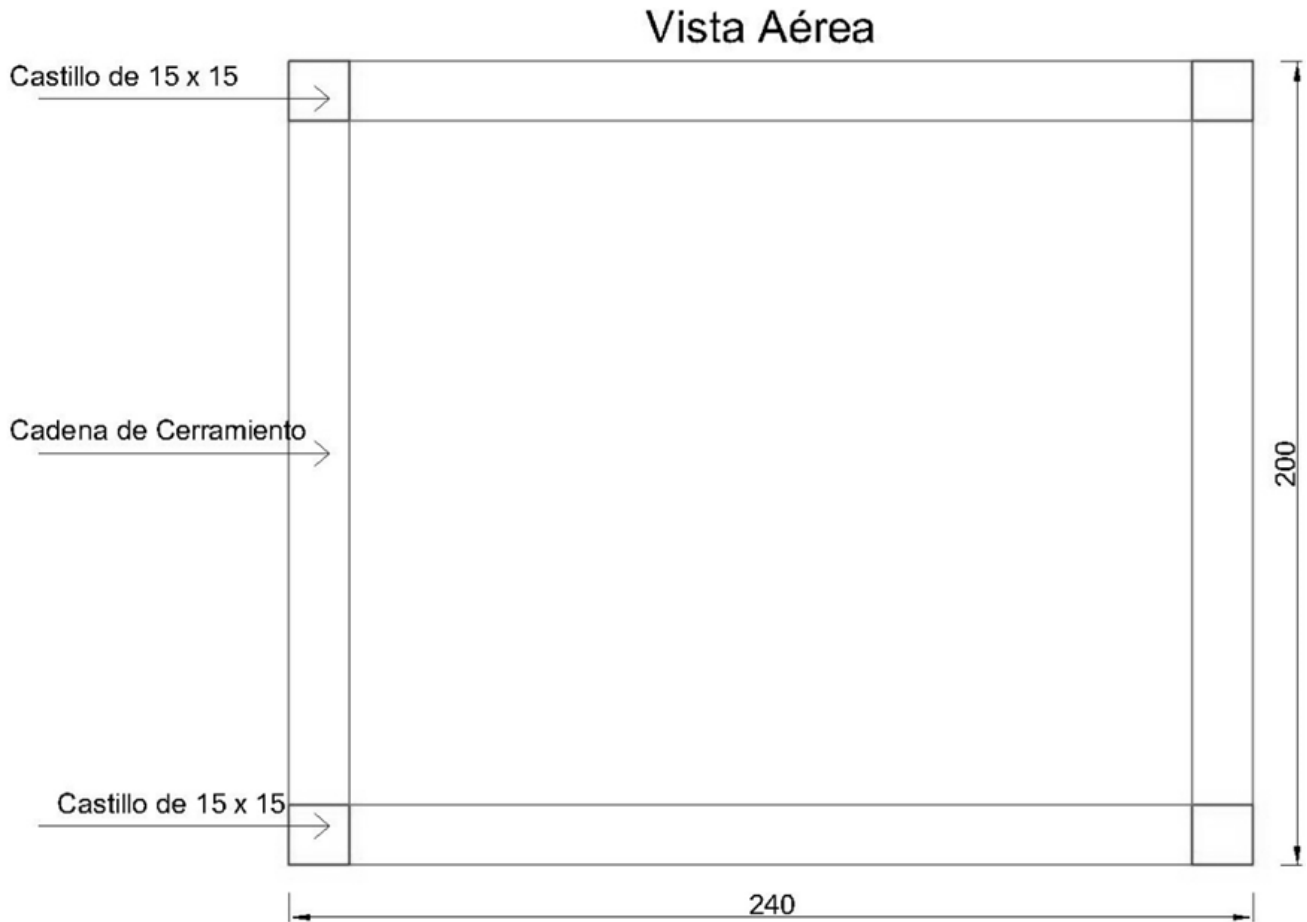


Figura 20: Módulo representativo, vista Aérea (Unidades en cm.)

Fuente: Elaboración propia.

Para mayor comprensión de lo que significa cada elemento estructural, en los párrafos siguientes se describe de forma breve a cada uno de éstos y su función.

6.3.1 Cadena de Desplante (Figura 21)

Es la cadena utilizada para repartir el peso de la construcción a lo largo del cimiento o suelo. La cadena de desplante del módulo es de 15 cm. de ancho por 20 cm. de alto de concreto $F'_{C} = 150 \text{ kg/cm}^2$ con un tamaño máximo de agregado de $\frac{3}{4}$ " reforzado con 4 varillas de $\frac{3}{8}$ " y estribos del número 2 a cada 20 cm.

Cadena de Desplante

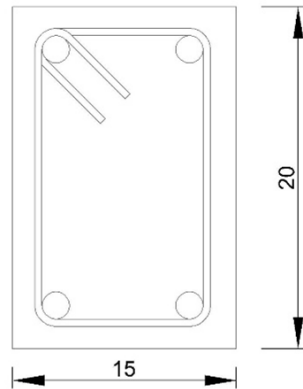


Figura 21: Vista aérea de cadena de desplante del módulo (Unidades en cm.)

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 Cadena de Cerramiento (Figura 22)

La cadena de Cerramiento tiene como función distribuir igualmente el peso de la construcción ya que reparte las cargas y absorbe los movimientos de tensión y flexión. El módulo consta de una cadena de cerramiento de 15 cm. de ancho por 20 cm. de alto de concreto $F' C = 150 \text{ kg/cm}^2$ con un tamaño máximo de agregado de $\frac{3}{4}$ " reforzado con 4 varillas de $\frac{3}{8}$ " y estribos del número 2 a cada 20 cm.

Cadena de Cerramiento

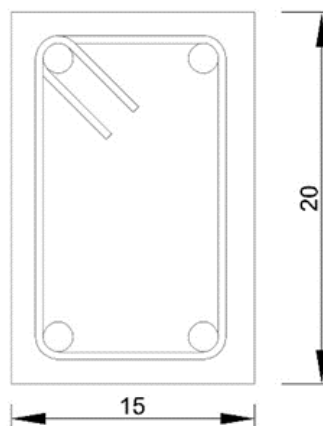


Figura 22: Vista aérea de cadena de cerramiento del módulo (Unidades en cm.)

Fuente: Elaboración propia.

6.3.3 Castillos (Figura 23)

Los castillos son elementos verticales que sirven para la unión de diferentes muros que concurren en un mismo punto, así como también, sirve como refuerzo vertical de la edificación. Los castillos que conforman al módulo son de 15 cm. por 15 cm. de concreto $F^{\prime}C= 150 \text{ kg/cm}^2$ con un tamaño máximo de agregado de $\frac{3}{4}$ " reforzado con 4 varillas de $\frac{3}{8}$ " y estribos del número 2 a cada 15 cm.

Castillo de 15 x 15

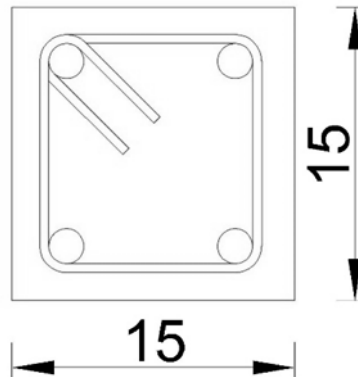


Figura 23: Vista aérea de castillo del módulo

Fuente: Elaboración propia.

6.3.4 Losa de concreto (Figura 24)

Son elementos que proporcionan las superficies horizontales y planas donde se aplican las cargas en las estructuras, además, se colocan las instalaciones necesarias para el funcionamiento del edificio. El módulo consta de una losa de 10 cm. de espesor con concreto $F^{\prime}C= 200 \text{ kg/cm}^2$, y varillas del número 3 a cada 20 cm.

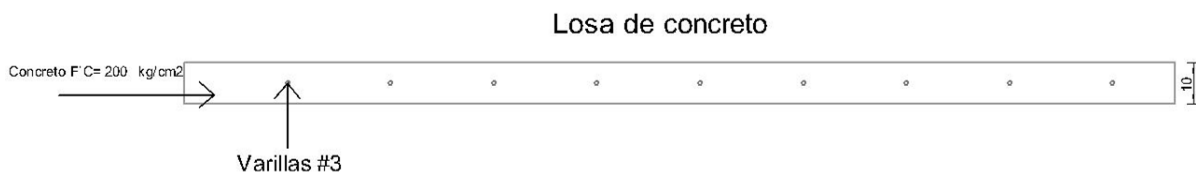


Figura 24: Perfil de losa de concreto del módulo

Fuente: Elaboración propia.

6.3.5 Pretil de ladrillo

Se utilizan en las azoteas para contener el agua de lluvia y poder canalizarla a un punto de conveniencia para su desagüe. El módulo consta de un pretil de 20 cm. de alto conformado por ladrillo 7 x 14 x 28 cm. asentado con mortero cal-arena 1:3.

6.4 Cálculo Estructural

Para encontrar la capacidad de carga de la losa donde se habilitará el diseño innovador de techo verde, se considera una sección de 1 m. de base (b), un factor de seguridad (ϕ) de 0.9 utilizado para elementos a flexión, y en base a las características anteriormente mencionadas de la losa se obtienen los siguientes datos.

$$\phi = 0.9, \quad f'c = 200 \text{ kg/cm}^2, \quad f'y = 4200 \text{ kg/cm}^2, \quad b = 100 \text{ cm}, \quad d = 5 \text{ cm},$$

$$As = 2.85 \text{ cm}^2$$

Dado los datos anteriores se procede al cálculo de la variable **a** necesaria para obtener el momento que soporta la sección de la losa (M_n):

$$a = \frac{Asf'y}{0.85f'c(b)}, \text{ sustituyendo datos y realizando las operaciones se obtiene que } a = 0.704$$

Una vez que se obtiene **a** se procede al cálculo del momento de la sección (M_n) que resiste la losa el cual está dado por la siguiente fórmula:

$$\phi M_n = \phi Asf'y \left(b - \frac{a}{2} \right)$$

Donde se obtiene que la losa soporta un $M_n = 50072 \text{ kg/cm}$ ó **$M_n = 501 \text{ kg/m}$** .

Una vez obtenido el momento de la sección (M_n), es necesario el cálculo de cargas vivas y cargas muertas que actuarán sobre la estructura, las cargas muertas en losas de cubierta como la del módulo de prueba, se obtienen; para el caso de techos verdes, con la suma del peso que éste ocasiona, considerando para las cargas vivas el peso que genera una persona promedio al momento de dar mantenimiento al techo, tomando en cuenta los valores de factor de carga como 1.6 para cargas vivas y 1.2 para cargas muertas que se estipulan en la American Society of Civil Engineers (ASCE) en el documento Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures.

Dado lo anterior, se procede al cálculo de los elementos, tomando en cuenta un peso volumétrico de 950 kg/m^3 al caucho, y de 2100 kg/m^3 a la tierra saturada con agua:

Peso de tierra saturada= $2100 \text{ kg/m}^3 \times 0.10 \text{ m} = 210 \text{ kg/m}^2$

Peso de caucho= $950 \text{ kg/m}^3 \times 0.05 \text{ m} = 47.5 \text{ kg/m}^2$

Carga viva= 110 kg/m^2

Peso total de cargas muertas= $W_m = 210 \text{ kg/m}^2 + 47.5 \text{ kg/m}^2 = 257.5 \text{ kg/m}^2$

$W_m = 257.5 \text{ kg/m}^2 \times 1.2 = \mathbf{309 \text{ kg/m}^2}$

Peso total de cargas vivas= $W_v = 110 \text{ kg/m}^2 \times 1.6 = \mathbf{176 \text{ kg/m}^2}$

Peso total de losa= $W_u = W_m + W_v = 309 \text{ kg/m}^2 + 160 \text{ kg/m}^2 = \mathbf{485 \text{ kg/m}^2}$

Ya obtenido el peso total de la losa, se procede a realizar los cálculos necesarios por el método clásico de Montoya, donde, de acuerdo a las medidas del módulo, se obtendrán los siguientes valores tomando en cuenta que se restan 7.5 cm. a cada lado dado que las cargas se centran en los apoyos:

$$s = 1.85 \text{ m}, \quad l = 2.25, \quad s/l = 0.82$$

Con el valor obtenido entre la relación de s y l se podrán encontrar los coeficientes C_x y C_y donde:

$$C_x = 42, \quad C_y = 61$$

Para el cálculo del momento por el método clásico de Montoya en la dirección X y Y se utiliza la siguiente fórmula:

$$M_y = 0.001(W_u)(C_y)(s^2)(b), \quad M_x = 0.001(W_u)(C_x)(s^2)(b)$$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$M_y = 0.001(485)(61)(2.7225)(1) = 80.54 \text{ kg/m}$$

$$M_x = 0.001(485)(42)(2.7225)(1) = 55.46 \text{ kg/m}$$

$M_n > M_u$ por lo que la sección resiste el peso del techo verde propuesto y cumple con los requisitos de la NADF-013-RNAT-2007.

6.5 Diseño de techo verde habilitado en módulo

Después de analizar las características estructurales del módulo en el que se aplicará el techo verde, se realizan los dibujos correspondientes del diseño innovador habilitado en el módulo, como se demuestra en las Figuras 25, 26 y 27.

Perfil de techo verde

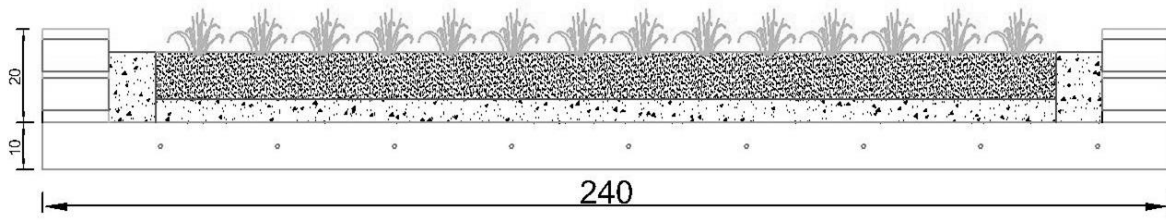


Figura 25: Perfil de techo verde habilitado en el módulo (Unidades en cm.)

Fuente: Elaboración propia.

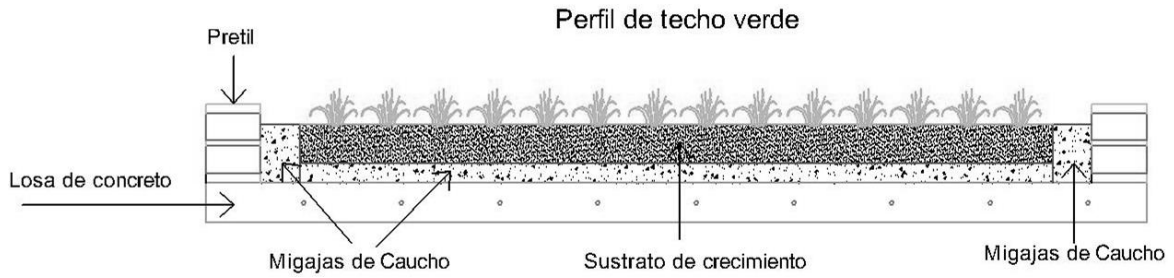


Figura 26: Detalles en perfil de techo verde habilitado en el módulo

Fuente: Elaboración propia.

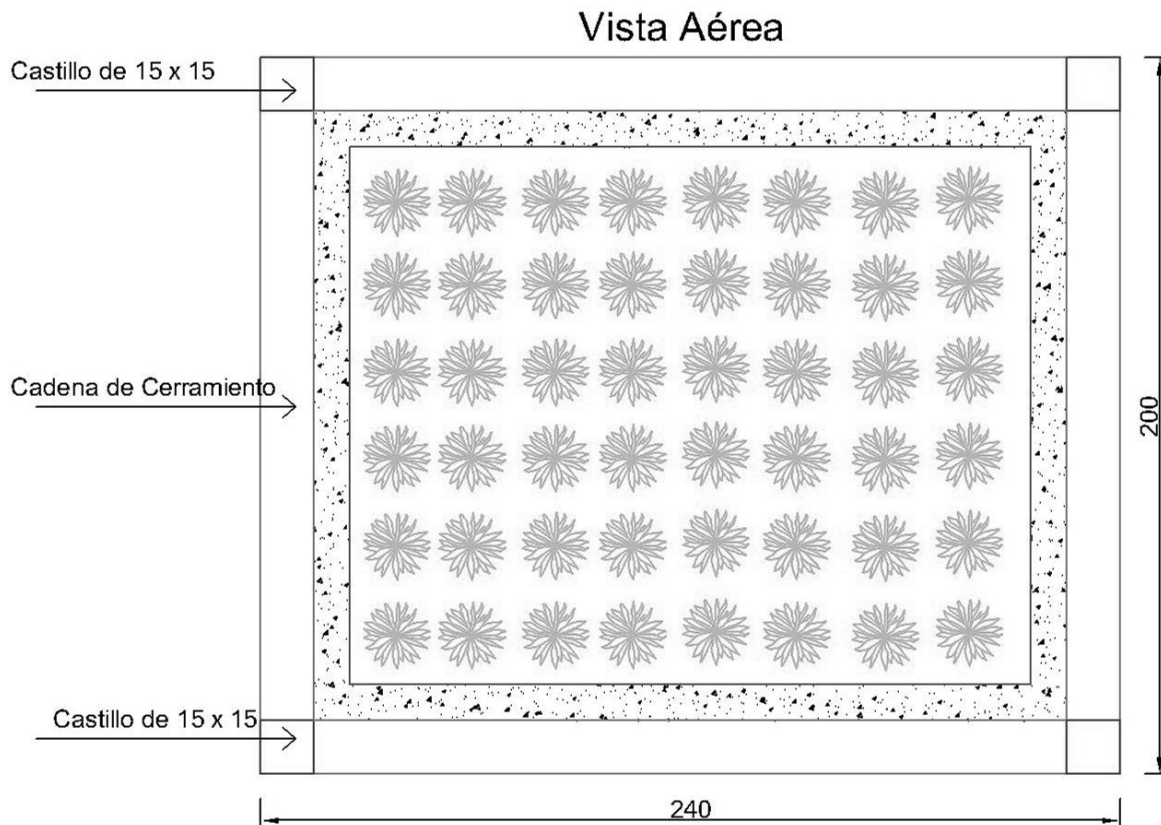


Figura 27: Vista aérea de techo verde habilitado en el módulo (Unidades en cm.)

Fuente: Elaboración propia.

6.6 Construcción y habilitado de techo verde en módulo

El proceso constructivo del módulo de prueba es el comúnmente realizado en la construcción de cualquier casa habitación, el cual consta desde la limpieza, trazo y nivelación del terreno, hasta los acabados finales en el módulo. Las capas se habilitaron de la misma manera en la que se hicieron en el prototipo previamente construido, donde se habilita la capa impermeable, el elemento de drenaje, la tela geotextil, el sustrato de crecimiento y finalmente el habilitado de la vegetación tal y como se muestra en la figura 28.

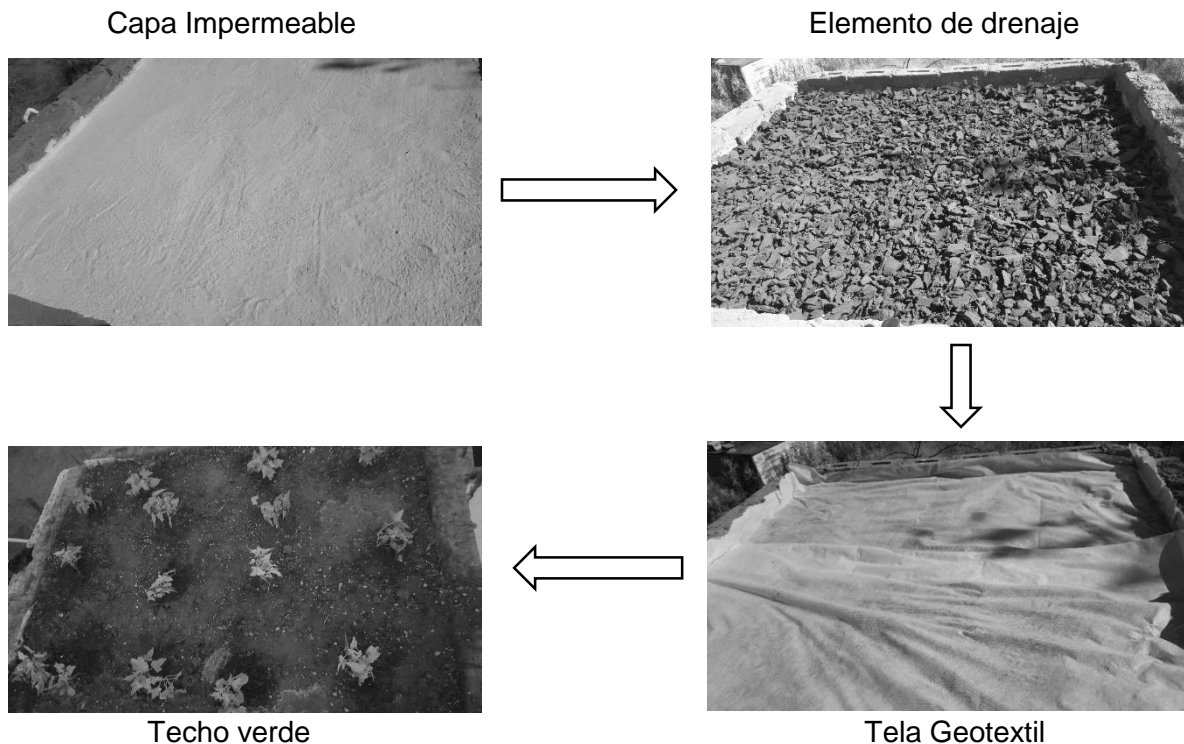


Figura 28: Proceso constructivo de capas del techo verde.

Fuente: Elaboración propia

6.7 Análisis de Temperatura y Humedad Relativa

Se midió la temperatura y humedad interna del módulo con el medidor Dickson TH800 previamente calibrado en el laboratorio de Metrología de la Universidad de Sonora, el cual fue cuidadosamente colocado al centro del módulo, donde semanalmente se realizó el cambio de las hojas registradoras de temperatura y humedad relativa (Anexo 2). Al igual que en el prototipo se le aplicó la cantidad de 8 litros de agua por cada metro cuadrado de techo verde en períodos de una vez por semana.

Durante el proceso de medición no se presentó ninguna filtración aparente a la losa del módulo, así como tampoco algún daño o fisura ocasionada por el peso agregado de las capas comprendidas por el techo verde, que comprometan de alguna forma la estabilidad y capacidad estructural de los elementos que conforman al módulo, los cuales son comúnmente usados en las edificaciones de la ciudad de Hermosillo/Sonora.

Al analizar a simple vista las hojas de registro de temperatura y humedad obtenidas durante el proceso de medición (Anexo 3), se deduce que la temperatura interna del módulo pocas veces sobrepasa el confort térmico que establece la norma mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013, el cual comprende un rango que va desde los 18 a los 25 grados Celsius y una humedad relativa entre el 20% y 60% al interior de la edificación.

Dado que solamente se construyó el módulo que contenía al techo verde, y no se construyó el módulo testigo, para poder tener puntos de referencia y comparación, se recurrió a la simulación de ambos módulos en el programa Design Builder el cual proporciona herramientas avanzadas de modelado, permitiendo desarrollar diseños en la construcción tomando en cuenta el uso de la energía en la construcción en base a las temperaturas al exterior e interior de las edificaciones, con las especificaciones térmicas de los materiales utilizados y orientación del edificio.

Al momento de realizar la simulación en Design Builder, y para que se apegue lo más posible a la realidad, se tomaron en cuenta los materiales que se utilizaron en la construcción del módulo; descritos a detalle con anterioridad en el diseño del módulo, y la orientación en la que se encuentra (Figura 29). Las propiedades térmicas ingresadas en la simulación son las que presenta Chavez, J., 2009 en su tesis doctoral titulada Evaluación Experimental de Propiedades Térmicas de Materiales de Construcción Nacionales y Desarrollo de Ventanas Ahorradoras de Energía. Se muestra un resumen en la tabla 4 de las simulaciones que se realizaron durante el período de evaluación del módulo, y en el Anexo 5 un ejemplo de los datos que se tomaron en campo al momento de la medición.

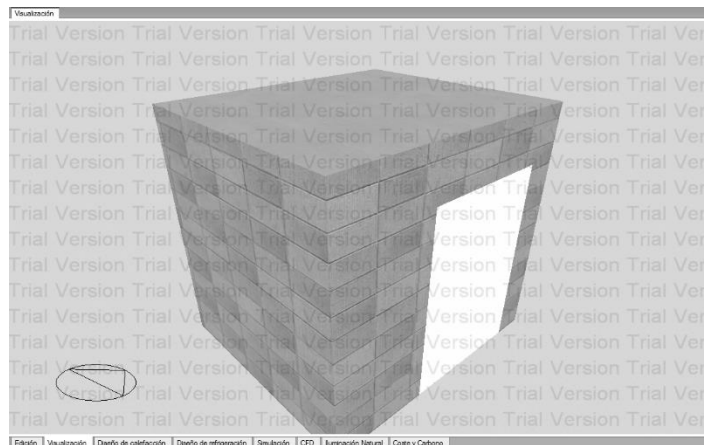


Figura 29: Simulación del módulo en Design Builder

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4: Simulaciones realizadas durante la evaluación del módulo

Mediciones

Mes	T° Interna (Días)	T° Externa (Días)	Humedad Int. (Días)	Humedad Ext. (Días)	Simulación
Marzo	25	25	25	25	50
Abril	30	30	30	30	60
Mayo	31	31	31	31	62
Total	86	86	86	86	172

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla se realizaron un total de 172 simulaciones para los 86 días en los que se tomaron las mediciones. Dichas simulaciones fueron comparadas con las temperaturas y humedades tomadas al interior del módulo y con la temperatura y humedad del ambiente en esas fechas, las cuales fueron proporcionadas por el climatólogo Jesús Antonio Juvera, utilizando la estación más cercana al lugar donde se encuentra el módulo de techo verde. Poner el nombre de la estación

Al analizar las simulaciones del módulo sin el techo verde habilitado y con el techo verde habilitado, y el comportamiento térmico que se obtuvo del módulo que se construyó, se deduce que existe una diferencia promedio de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ entre ambos módulos. En las figuras 30 y 31 se muestran las simulaciones con y sin el techo verde habilitado respectivamente, en la figura 32 se muestra el comportamiento de la temperatura interna medida con respecto a la temperatura externa proporcionada por la estación meteorológica, y en la figura 33 se presenta la humedad relativa medida al interior del módulo en comparación con la humedad relativa externa también proporcionada por la misma estación meteorológica. Cabe aclarar que se utilizaron esas como el ejemplo más claro donde se denota con mayor claridad la diferencia de temperaturas y humedades, así como también el comportamiento de ambas a través del tiempo, demostrando lo que se dijo con anterioridad acerca de los rangos de confort térmico tanto de temperatura como de humedad relativa.

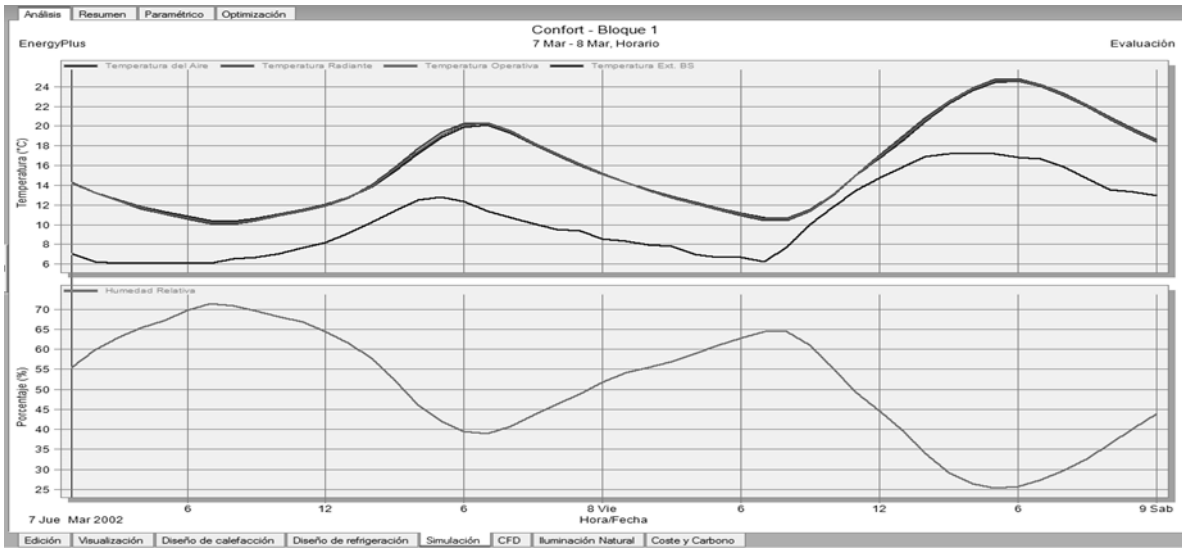


Figura 30: Simulación sin techo verde

Fuente: Elaboración propia

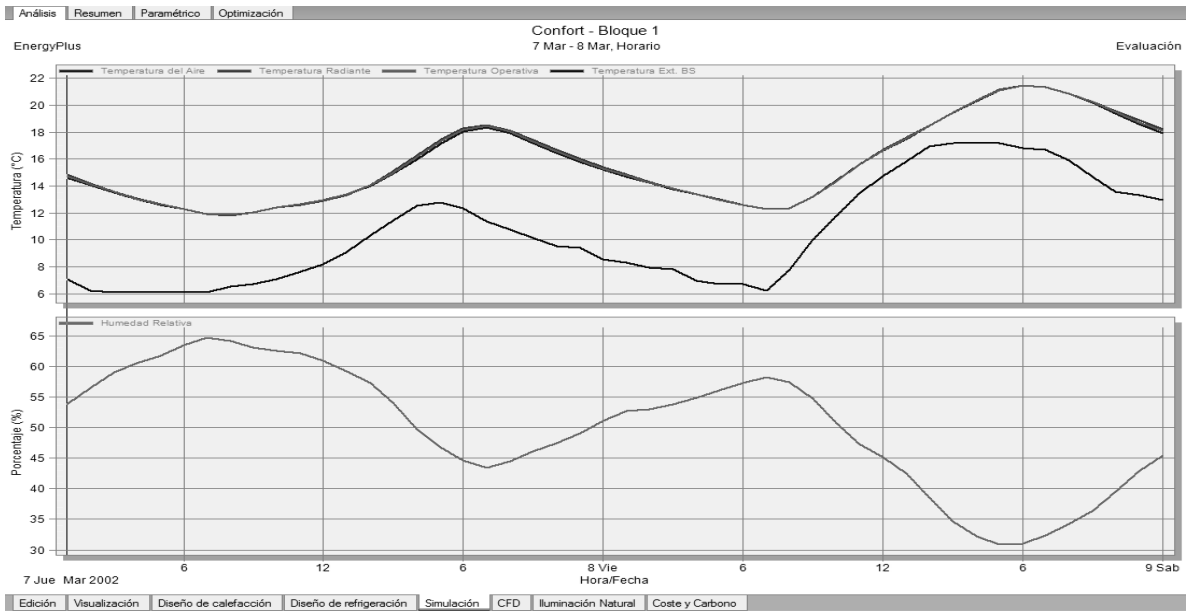


Figura 31: Simulación con techo verde

Fuente: Elaboración propia

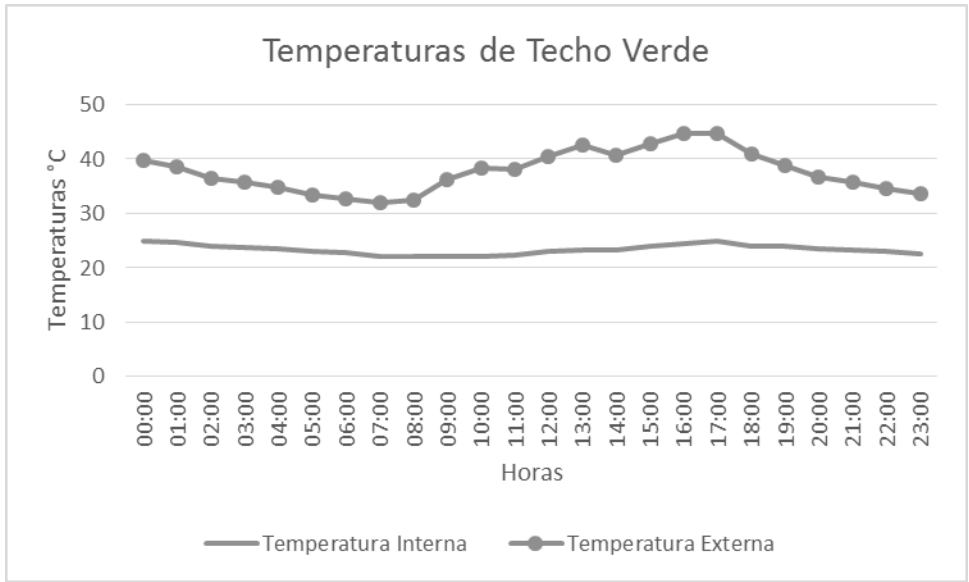


Figura 32: Comportamiento de temperaturas al interior del módulo

Fuente: Elaboración propia.

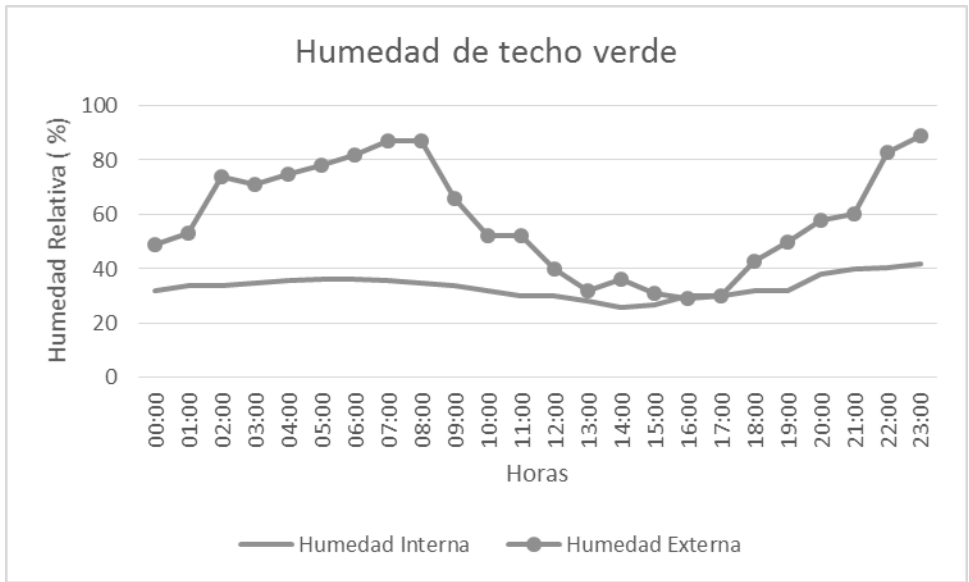


Figura 33: Comportamiento de la humedad relativa al interior del módulo

Fuente: Elaboración propia.

VII. DISCUSIÓN

Una vez que se analizaron los resultados obtenidos durante el proceso de experimentación del diseño innovador de techos verdes especializado para trabajar en climas árido-seco, se deduce que el sistema de techo verde del prototipo propuesto funciona de la misma manera que lo hacen los sistemas convencionales conformados tanto de materiales prefabricados como de agregados pétreos, ya que en la losa no se presenta ninguna filtración aparente tanto en el prototipo como en el módulo, el elemento de drenaje conformado con migajas de caucho drenó el agua de la manera esperada, y el sustrato de crecimiento el cual estaba comprendido de tierra, zeolita y lombricomposta permitió el crecimiento de la vegetación, donde dicha vegetación soportó los rayos solares, las temperaturas a las que se encontró expuesta, y con un bajo consumo de agua. En la tabla 5 se muestra un resumen del cumplimiento cualitativo de las capas de techo verde.

Tabla 5: Resumen del cumplimiento cualitativo de las capas de techo verde

Elementos	Cumplimiento cualitativo	
	Si	No
Capa impermeable	X	
Elemento de drenaje	X	
Tela Geotextil	X	
Sustrato de crecimiento	X	
Vegetación	X	

Fuente: Elaboración propia.

Como ya se demostró con anterioridad la temperatura al interior del módulo se comporta dentro de los rangos de confort térmico que se establece en la Norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013, la cual establece que dicho rango debe de comprender una temperatura interna mínima de 18°C, y una máxima de 25°C, y respecto a la humedad relativa al interior del mismo; en la misma norma mexicana, se establece un mínimo del 20% y un máximo del 60% de humedad relativa.

Por otra parte, al analizar exhaustivamente las simulaciones realizadas con el techo verde habilitado y sin el mismo, y en comparación a las medidas reales obtenidas en el módulo que se construyó, se obtuvo que existe una diferencia de $\pm 2^\circ\text{C}$, lo que significa que

el diseño innovador propuesto funciona tal y como se esperaba en la reducción de la temperatura.

Se analizó la diferencia de temperatura que obtuvieron diferentes investigadores en su experimentación, donde Jaffal, I., Ouldboukhidine, S.-E. Y Belarbi, R., en el año 2012, en su estudio comprensivo de los impactos que tienen los techos verdes en el desempeño energético de las edificaciones obtuvieron una diferencia que fluctuaba entre los rangos de ± 1.5 a $\pm 2^{\circ}\text{C}$. De la misma manera La Roche, P. Y Berardi, U., en el año 2014 en el estudio que realizaron denominado confort y ahorros energéticos con techos verdes activos, se encontraron en los rangos de ± 2 a $\pm 3^{\circ}\text{C}$, y Parizotto, S. Y Lamberts, R., en el año 2011, investigaron el desempeño térmico de techos verdes en climas templados en un caso de estudio realizado en un edificio experimental en la ciudad de Florianópolis al sur de Brasil, obtuvieron rangos de ± 1.5 a $\pm 2^{\circ}\text{C}$. En la tabla 6 se muestra un resumen de las comparaciones de los autores anteriormente mencionados, con el prototipo propuesto en esta investigación.

Tabla 6: Resumen de comparaciones de rangos de temperatura

Comparaciones	
Autor	Rangos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
Parizotto, S. Y Lamberts, R. 2011	0.5-1
La Roche, P. Y Berardi, U. (2014).	2-3
Jaffal, I., Ouldboukhidine, S.-E. Y Belarbi, R. (2012).	1.5-2
Propuesto	1.5-2

Fuente: Elaboración propia.

VIII. CONCLUSIONES

Al término de esta investigación, se puede concluir que el sistema de techo verde propuesto, conformado por eco-materiales y de reuso, se comporta de manera eficaz como lo hace cualquier otro sistema de naturación habilitado en las azoteas de las edificaciones; casa habitación en específico, esto quiere decir que se puede utilizar en efecto, en lugares de clima árido-seco como lo es la ciudad de Hermosillo/Sonora, teniendo una respuesta positiva en sus resultados.

Se obtiene una diferencia de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura al interior de las edificaciones sin un sistema de naturación en las azoteas con respecto a un techo al cual se le habilita el diseño propuesto de techo verde de la investigación actual, lo que significa que el consumo de energía eléctrica disminuye, por lo cual sirve como un sistema de climatización pasiva para las edificaciones en climas árido-seco.

IX. Recomendaciones

Para investigaciones futuras, se recomienda analizar la factibilidad del uso de agua proveniente de la condensación de los aires acondicionados, para el riego de la vegetación en el techo verde propuesto, ya que al parecer, la planta impomea purpurea es capaz de crecer y desarrollarse de igual manera que lo haría con agua natural, ya que soporta un PH neutro como lo es el agua producto de la condensación.

Por otra parte, se recomienda el uso de mejores tecnologías tanto al interior del módulo de prueba como al exterior, es decir, medidores de temperatura y humedad relativa más precisos que el utilizado en esta investigación, así como también, medidores externos para tener puntos de comparación mucho más precisos, logrando resultados más apegados a la realidad.

Otro punto a considerar, son las proporciones de suelo-zeolita en el sustrato de crecimiento, para obtener una mejor eficiencia en el uso de agua y reducir el consumo de la misma, y por último, considerar diferentes tipos de vegetación y comparar si existe una diferencia efectiva al interior del módulo utilizando dicha planta, siempre y cuando se tomen en cuenta las condiciones climatológicas que se encuentran en la ciudad como se realizó en esta investigación.

X. REFERENCIAS

- American Society of Civil Engineers, 2013. *Minimum design Loads for Building and Other Structures*. 2^{da} ed. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Ascione, F., Bianco, N., DE' Rossi, F., Turni, G. Y Vanoli, G. P. 2013. Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy*, 104, 845-859.
- Bon-Gang, H. & Zong Bao, Y. 2011. Perception on benefits of construction waste management in the Singapore construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 18, 394-406.
- Burgan, B. A. Y Sansom, M. R. 2006. Sustainable steel construction. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, pp. 1178-1183.
- Bynum, P., Issa, R. Y Olbina, S. 2012. Building Information Modeling in Support of Sustainable Design and Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 139, pp.24-34.
- Carranza, E., 2007. Flora del bajío y de regiones adyacentes. [pdf] Disponible en: <<http://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/resumeness/FLOBA/ConvolvulaceaeI151.pdf>> [Acceso 25 de Noviembre 2015]
- Chávez, J., 2009. Evaluación Experimental de Propiedades Térmicas de Materiales de Construcción Nacionales y Desarrollo de Ventanas Ahorradoras de Energía. [pdf]. Disponible en <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2906/chavezgalan.pdf?sequence=JPG>> [Acceso 15 Junio del 2016].
- Cheng, C., Pouffary, S., Svenningsen, N. Y Callaway, M. 2008. The Kyoto Protocol, the Clean Development Mechanism and the Building and Construction Sector – *A Report for the UNEP Sustainable Buildings and Construction Initiative*.
- Chong, W., Kumar, S., Haas, C., Beheiry, S., Copen, L. Y Oey, M. 2009. Understanding and Interpreting Baseline Perceptions of Sustainability in Construction among Civil Engineers in the United States. *Journal of Management in Engineering*, Vol. 25, pp. 143-154.
- CIRIA. 2001. Sustainable Construction Procurement: a Guide to Delivering Environmentally Responsible Projects. CIRIA: London.
- Christine, P. 2000. The implications of environmental issues on UK construction management. *Engineering, Construction and Architectural Management*, Vol. 6, pp. 276-286.
- Coimbra, J. Y Almeida, M. 2013. Challenges and benefits of building sustainable cooperative housing. *Building and Environment*, Vol. 62, pp. 9-17.
- Demuzere, M., Orru, K., Heidrich, O., Olazabal, E., Geneletti, D., Orru, H., Bhave, A. G., Mittal, N., Feliu, E. Y Faehnle, M. 2014. Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, Vol. 146, pp. 107-115.
- Dewlaney, K. S. Y Hallowell, M. 2012. Prevention through design and construction safety management strategies for high performance sustainable building construction. *Construction Management and Economics*, Vol. 30, pp. 165-177.
- D'orazio, M., Di Perna, C. Y Di Giuseppe, E. 2012. Green roof yearly performance: A case study in a highly insulated building under temperate climate. *Energy and Buildings*, Vol. 55, pp. 439-451.

- Du Plessis, C. 2002. Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries: A Discussion Document. *CSIR, Pretoria and CIB, Rotterdam.*
- Drilling, J. 2003. The Role of the Contractor on Green Buildings, technical report. Partnership for Achieving Construction Excellence. *Pennsylvania State University: Torrance, CA.*
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. & Liston, K. 2008. BIM Case Studies. BIM Handbook. *John Wiley & Sons, Inc.. Hoboken, NJ, USA*
- Edwards, B. (2000). Sustainable Architecture: European Directives and Building Design. (2da Edicion). Oxford: *Architectural Press.*
- Eichholtz, P., Kok, N. Y Quigley, J. M. 2013. THE ECONOMICS OF GREEN BUILDING. *Review of Economics & Statistics*, Vol. 95, pp. 50-63.
- Elmualim, A., Czwakiel, A., Valle, R., Ludlow, G. Y Shah, S. 2010. The Practice of Sustainable Facilities Management: Design Sentiments and the Knowledge Chasm. *Gestão & Tecnologia de Projetos; v. 4, n. 2 (2009): Tecnologia da Informação e o projeto do edifício e da cidade.*
- Feige, A., Wallbaum, H. Y Krank, S. 2011. Harnessing stakeholder motivation: towards a Swiss sustainable building sector. *Building Research & Information*, Vol. 39, pp. 504-517.
- Feng, C., Meng, Q. & Zhang, Y. 2010. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, Vol. 42, pp. 959-965.
- Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L. G. Y Principi, P. 2010. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment*, Vol. 45, pp. 890-1904.
- Francis, R. A. Y Lorimer, J. 2011. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management*, Vol. 92, pp. 1429-1437.
- Getter, K. L., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Cregg, B. M. Y Andresen, J. A. 2009. Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environ.Sci.Technol.*, Vol. 43, pp. 7564.
- Gobierno Municipal de Hermosillo, 2007. Programa parcial de mejoramiento y conservación. Sonora: Estado de Sonora.
- Gustavo, Godoy. 2013. Modelo de la Isla de Calor Atmosférico y Superficial: Factores en Común y alternativas para la Mitigación de su Efecto en salud humana y medioambiente urbano. [pdf] Disponible en: < <http://www.dinamica-de-sistemas.com/revista/0913d-dinamica-de-sistemas.pdf> > [Acceso 05 de Octubre 2015].
- Haro, E.T., 2009. Comportamiento de dos tipos de cubiertas vegetales, como dispositivo de climatización, para climas cálido sub-húmedos.
- Hwang, B.-G. Y Tan, J. S. 2012. Green building project management: obstacles and solutions for sustainable development. *Sustainable Development*, Vol. 20, pp. 335-349.
- Ignatieva, M., Stewart, G. Y Meurk, C. 2011. Planning and design of ecological networks in urban areas. *Landscape and Ecological Engineering*, Vol. 7, pp. 17-25.
- Issa, U. H. 2013. Implementation of lean construction techniques for minimizing the risks effect on project construction time. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 52, pp. 697-704.
- Jaffal, I., Ouldoukhitine, S.-E. Y Belarbi, R. 2012. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, Vol. 43, pp. 157-164.

- Jim, C. Y. Y Tsang, S. W. 2011. Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Building and Environment*, Vol. 46, pp. 1263-1274.
- Kalette, D. 2010. 2010 Green Building Survey. National Real Estate Investor. En línea. Disponible en <http://nreionline.com/sitefiles/nreionline.com/files/archive/nreionline.com/2010NREIGreenBuildingSurvey.pdf> [Acceso Enero 2015]
- Kane, K., Tuccillo, J., York, A. M., Gentile, L. Y Ouyang, Y. 2014. A spatio-temporal view of historical growth in Phoenix, Arizona, USA. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 121, pp. 70-80.
- Langdon, D. 2007. The Cost & Benefits of Achieving Green Building. *Davis Langdon and Seah International, Sydney, Australia*.
- La Roche, P. Y Berardi, U. 2014. Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and Buildings*, Vol. 82, pp. 492-504.
- Li, X., Zhu, Y. Y Zhang, Z. 2010. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. *Building and Environment*, Vol. 45, pp. 766-775.
- Li, Y. Y Babcock, R., JR. 2014. Green roofs against pollution and climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 34, pp. 695-705.
- Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A. & Valverde-Espinosa, I. 2011. Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 742-748.
- Matar, M. M., Georgy, M. E. Y Ibrahim, M. E. 2008. Sustainable construction management: introduction of the operational context space (OCS). *Construction Management and Economics*, Vol. 26, pp. 261-275.
- Maya, J., & Aguilar, M. (2010). Las áreas verdes de la ciudad de México. Un reto actual. *Scripta Nova: revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, Vol. 14, pp. 56.
- Meir, I. A. Y Pearlmutter, D. 2010. Building for climate change: planning and design considerations in time of climatic uncertainty. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, Vol. 45, pp. 70-75.
- Montoya, P. J., Meseguer, A. G., y Cabré, F. M., 2001. *Hormigón Armado*. 14ª ed. México: Gustavo Gili, SA.
- Moskow, K. (2008). *Sustainable Facilities: Green Design, Construction, and Operations*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Niu, H., Clark, C., Zhou, J. Y Adriaens, P. 2010. Scaling of Economic Benefits from Green Roof Implementation in Washington, DC. *Environmental Science & Technology*, Vol. 44, pp. 4302-4308.
- Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R. Y Djedjig, R. 2012. Characterization of green roof components: Measurements of thermal and hydrological properties. *Building and Environment*, Vol. 56, pp. 78-85.
- ODPM (Office of the Deputy Prime Minister), 2004. Survey of Arising and Use of Construction, Demolition and Excavation Waste as Aggregate in England in 2003. HSMO, London, United Kingdom.
- Osmani, M., Glass, J. & Price, A. D. F. 2008. Architects' perspectives on construction waste reduction by design. *Waste Management*, Vol. 28, pp. 1147-1158.
- Parizotto, S. Y Lamberts, R. 2011. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 1712-1722.

- Pineda, N., 2015. Por un Hermosillo arbolado. [en línea] Portales. Disponible en: <http://portales.colson.edu.mx/num483/y-sin-embargo-8/> [Acceso 05 de Octubre 2015]
- Plank, R. 2005. Sustainable Construction ? A UK Perspective. Structures Congress 2005. American Society of Civil Engineers.
- Poon, C. S. 2007. Management of construction and demolition waste. *Waste Management*, Vol. 27, pp.159-160.
- Rekola, M., Mäkeläinen, T. Y Häkkinen, T. 2012. The role of design management in the sustainable building process. *Architectural Engineering and Design Management*, 8, 78-89.
- Rivas, D., 2005. Planeación, Espacios Verdes y Sustentabilidad en el Distrito Federal. [pdf] Disponible en: < http://www.arboricultura.org.mx/pdfs/Planeacion_espaciosverdes_sustentabilidad_DF.pdf > [Acceso 05 de Octubre 2015]
- Robichaud, L. B. Y Anantatmula, V. S. 2011. Greening Project Management Practices for Sustainable Construction. *Journal of Management in Engineering*, 27, 48-57.
- Rohracher, H. 2001. Managing the Technological Transition to Sustainable Construction of Buildings: A Socio-Technical Perspective. *Technology Analysis & Strategic Management*, Vol. 13, pp. 137-150.
- Sameh, S. H. 2014. Promoting earth architecture as a sustainable construction technique in Egypt. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 65, pp. 362-373.
- Samer, M. 2013. Towards the implementation of the Green Building concept in agricultural buildings: a literature review. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, Vol. 15, pp. 25-46.
- Sev, A. 2009. How can the construction industry contribute to sustainable development? A conceptual framework. *Sustainable Development*, Vol. 17, pp. 161-173.
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K. Y Dikshit, A. K. 2009. An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, Vol. 9, pp. 189-212.
- Son, H., Kim, C., Chong, W. K. Y Chou, J.-S. 2011. Implementing sustainable development in the construction industry: constructors' perspectives in the US and Korea. *Sustainable Development*, Vol. 19, pp. 337-347.
- Sorrell, S. 2003. Making the link: climate policy and the reform of the UK construction industry. *Energy Policy*, Vol. 31, pp. 865-878.
- Swarup, L. 2010. Influence of project delivery methods on achieving sustainable high performance buildings. M.S., Michigan State University.
- Tam, V. W. Y. & Tam, C. M. 2006. Evaluations of existing waste recycling methods: A Hong Kong study. *Building and Environment*, Vol. 41, pp. 1649-1660
- Tu tiempo 2015. Clima en Hermosillo Sonora. [en línea]. Disponible en <http://www.tutiempo.net/clima/Hermosillo_Son/761600.htm> [Acceso 05 de Octubre 2015]
- Tumini, I., 2007. Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. [pdf] Disponible en: < <http://www.sb10mad.com/ponencias/archivos/a/A033.pdf> > [Acceso 05 de Octubre 2015]
- US Green Building Council (USGBC). 2009b. LEED 2009 for New Construction and Major Renovations Rating System. USGBC: Washington,DC.

- Van Mechelen, C., Dutoit, T. Y Hermy, M. 2014. Mediterranean open habitat vegetation offers great potential for extensive green roof design. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 121, pp. 81-91.
- Vásquez, T., 2015. Piden vecinos áreas verdes. El Imparcial, [en línea] 14 de Agosto. Disponible en: <http://www.elimparcial.com/EdicionEnLinea/Notas/Noticias/14082015/998534-Piden-vecinos-de-Sonomex-areas-verdes.html> [Acceso 05 de Octubre 2015]
- Vijayaraghavan, K. Y Joshi, U. M. 2014. Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. *Environmental Pollution*, Vol. 194, pp. 121-129.
- Vijayaraghavan, K. Y Raja, F. D. 2014. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption. *Water Research*, Vol. 63, pp. 94-101.
- Whittinghill, L. J., Rowe, D. B. Y Cregg, B. M. 2013. Evaluation of Vegetable Production on Extensive Green Roofs. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, Vol. 37, pp. 465-484.
- Williams, N. S. G., Rayner, J. P. Y Raynor, K. J. 2010. Green roofs for a wide brown land: Opportunities and barriers for rooftop greening in Australia. *Urban Forestry and Urban Greening*, Vol. 9, pp. 245-251.
- Wu, P. Y Low, S. 2010. Project Management and Green Buildings: Lessons from the Rating Systems. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, Vol. 136, pp. 64-70.
- Vila, A., Pérez, G., Solé, C., Fernández, A. I. & Cabeza, L. F. 2012. Use of rubber crumbs as drainage layer in experimental green roofs. *Building and Environment*, 48, 101-106.
- Wu, Y. 2014. Modular construction and evaluation of green building technology system based on LEED. *Journal of Chemical & Pharmaceutical Research*, Vol. 6, pp. 2904-2913.
- Yudelson, J. & Fedrizzi, S. R. 2008. *The green building revolution*, Island Press.
- Zeynel Cebeci, 2002. Lantana Camara. Disponible en: < https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lantana_camara_flowers_2.JPG > [Acceso 14 Octubre del 2015].
- Zhou, Y., Clarke, L., Eom, J., Kyle, P., Patel, P., Kim, S. H., Dirks, J., Jensen, E., Liu, Y., Rice, J., Schmidt, L. Y Seiple, T. 2014. Modeling the effect of climate change on U.S. state-level buildings energy demands in an integrated assessment framework. *Applied Energy*, Vol. 113, pp. 1077-1088.

ANEXO 1.-

Especificaciones técnicas de impermeabilizante Impertyre



No se agrieta y dura más.

Impertyre secado rápido 10 años al secar forma una capa impermeable de alta resistencia; se puede aplicar sobre losas planas e inclinadas, techumbres de lámina de asbesto y metálicas; incluso sobre acabados térmicos como: poliestireno y espuma de poliuretano, paredes, jardineras, tablaroca, durock, etc.

Elaborado con resinas acrílicas y reforzado con partículas de caucho vulcanizado, indestructible, con gran capacidad impermeable y de alta resistencia al medio ambiente.

- ▶ Secado: **en 3 hrs.**
Rendimiento: **Cubeta de 19 lt. cubre 20m2 por cubeta a 2 manos** (depende de la rugosidad y la naturaleza de la superficie)
Colores: **blanco, verde, terracota, negro**

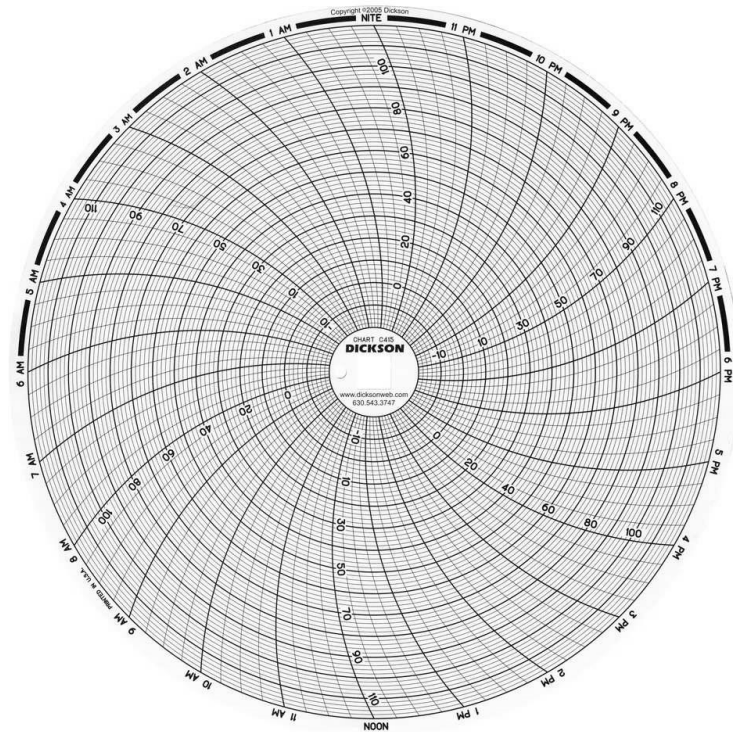
- ▶ Posee excelente resistencia al intemperismo, cambios bruscos de temperatura, choque térmico, lluvia, ambientes salinos, etc. Su elasticidad le permite soportar los movimientos estructurales de



Garantizado por 20 años

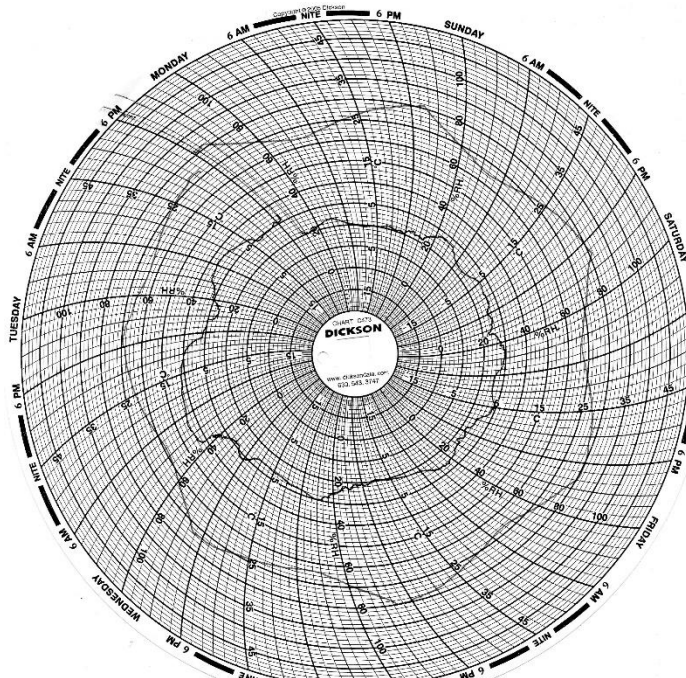
Anexo 2.-

Hojas del medidor Dickson TH800



Anexo 3.-

Hojas obtenidas en el módulo



Anexo 4.-

Ejemplo de los datos capturados en un día de medición del módulo

Día: 08/03/16	T° Interna (°C)	T° Externa (°C)	Humedad Int. (%)	Humedad Ext. (%)	Radiación Solar (W/M2)
Hora					
00:00	25	14.7	32	49	
01:00	24.8	13.8	34	53	
02:00	24	12.4	34	74	
03:00	23.8	12	35	71	
04:00	23.5	11.4	35.8	75	
05:00	23	10.3	36	78	
06:00	22.8	9.8	36	82	
07:00	22	10.1	35.6	87	7
08:00	22	10.4	34.8	87	74
09:00	22	14.2	34	66	657
10:00	22	16.4	32	52	761
11:00	22.4	15.7	30	52	163
12:00	23	17.5	30	40	334
13:00	23.2	19.3	28	32	232
14:00	23.2	17.4	26	36	125
15:00	24	18.8	26.8	31	185
16:00	24.4	20.3	30	29	580
17:00	25	19.7	30	30	309
18:00	24	16.9	31.8	43	5
19:00	24	14.7	32	50	
20:00	23.6	13.1	38	58	
21:00	23.2	12.6	40	60	
22:00	23	11.6	40.5	83	
23:00	22.6	11.1	42	89	