



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**  
**División Académica de Ciencias Biológicas**



---

---

**“DESEMPEÑO DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS EN ASOCIACIÓN  
CON PANELES FOTOVOLTAICOS BAJO CONDICIONES DE  
CLIMA TROPICAL HÚMEDO”**

**Trabajo recepcional, en la modalidad de:**

Tesis de Maestría

**Para obtener el grado en:**

Maestría en Ingeniería, Tecnología  
y Gestión Ambiental

**Presenta:**

Ing. Miguel Ángel Jesús Castañeda

**Directores:**

Dr. José Roberto Hernández Barajas  
MISA. Elizabeth Magaña Villegas



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 27 de Junio de 2022

**ASUNTO:** Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON  
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
PRESENTE**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. MIGUEL ÁNGEL JESÚS CASTAÑEDA** egresado de la Maestría en **INGENIERÍA, TECNOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **"DESEMPEÑO DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS EN ASOCIACIÓN CON PANELES FOTOVOLTAICOS BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E

**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**U.J.A.T.  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**DIRECCIÓN**

C.c.p. - Expediente Alumno de la División Académica  
C.c.p.- Interesado



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



PRECIJRSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN

JUNIO 27 DE 2022

**C. MIGUEL ÁNGEL JESÚS CASTAÑEDA  
PAS. DE LA MAESTRIA EN INGENIERÍA, TECNOLOGÍA Y  
GESTIÓN AMBIENTAL  
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental titulado: **"DESEMPEÑO DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS EN ASOCIACIÓN CON PANELES FOTOVOLTAICOS BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO"**, asesorado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas y MISA. Elizabeth Magaña Villegas, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado integrado por el Dra. Erika Escalante Espinosa, Dr. Fidel Ulin Montejo, Dr. José Roberto Hernández Barajas, M.I.P.A. Sergio Ramos Herrera y Dr. León David Olivera Gómez.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR**

C.c.p.- Expediente del Alumno.  
C.c.p.- Archivo

U.J.A.T.  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

## CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **“DESEMPEÑO DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS EN ASOCIACIÓN CON PANELES FOTOVOLTAICOS BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el día 08 de junio del dos mil veintidós.

**AUTORIZO**



---

**MIGUEL ÁNGEL JESÚS CASTAÑEDA**



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ciencias  
Biológicas

Jefatura de Posgrado



2022 Ricardo Flores Magón  
Año de Magón  
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Villahermosa, Tabasco a 17 de junio de 2022.

**C. MIGUEL ÁNGEL JESÚS CASTAÑEDA**  
EST. DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA,  
TECNOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL  
PRESENTE

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los documentos recepcionales (tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad, el Reglamento General de Estudios de Posgrado, el Código Institucional de Ética para la Investigación y con los requerimientos para los posgrados en el SNP-CONACyT. Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones y el reporte de originalidad de su documento recepcional. Con el objetivo de fortalecer y enriquecer el programa de posgrado, el responsable del programa de maestría, realizó la revisión del documento en la plataforma iThenticate, obteniendo el reporte de originalidad, el índice de similitud y emitió las siguientes sugerencias y recomendaciones para dar seguimiento en el documento de tesis del proyecto de investigación: ***“Desempeño de techos verdes extensivos en asociación con paneles fotovoltaicos bajo condiciones de clima tropical húmedo”***.

#### OBSERVACIONES:

1. El índice de similitud obtenido fue de 17%, el cual se considera razonablemente bajo y dentro del estándar (15 - 20%) de tolerancia de acuerdo a las Políticas y Lineamientos para el uso y manejo del Software Antiplagio de la UJAT. Casi todas las coincidencias encontradas equivalen a menos del 1% de similitud con las fuentes detectadas, indicando una baja correlación de similitud.





**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**Jefatura de Posgrado**

**División  
Académica  
de Ciencias  
Biológicas**



**2022 Ricardo Flores  
Magón**  
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

2. para reducir el índice de similitud, se propone parafrasear aquellos textos (ver documento de Tesis con Observaciones) con número de palabras coincidentes mayores a 50 (ver el número de palabras coincidentes en el informe de resumen por fuente primaria). En particular, los apartados de tesis 2.3, 6.4 y 7.9 presentan coincidencias altas con las fuentes originales.
3. Se adjunta, el reporte de revisión de la tesis a través de la herramienta Turnitin iThenticate.
4. Finalmente, se le solicita a la C. Miguel Ángel Jesús Castañeda, integrar en la versión final de tesis, este oficio e informe de originalidad, realizado por el Turnitin iThenticate

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

  
DR. ALLAN KEITH CRUZ RAMÍREZ  
JEFATURA DE POSGRADO

**UJAT**



**DIVISION ACADÉMICA  
CIENCIAS BIOLÓGICAS  
JEFATURA DE POSGRADO**

C.C.P. Dr. José Roberto Hernández Barajas. Director de tesis  
Mtra. Elizabeth Magaña Villegas. Co-Directora de tesis  
Archivo

KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA

Tel. (993) 358-1500 Ext. 6407. Correo e: [posgrado.dacbiol@ujat.mx](mailto:posgrado.dacbiol@ujat.mx)

 Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

# Desempeño de techos verdes extensivos en asociación con paneles fotovoltaicos bajo condiciones de clima tropical húmedo

INFORME DE ORIGINALIDAD

# 17%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://www.archivos.ujat.mx">www.archivos.ujat.mx</a> Internet	640 palabras — 3%
2	<a href="http://es.slideshare.net">es.slideshare.net</a> Internet	418 palabras — 2%
3	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Internet	336 palabras — 1%
4	<a href="http://www.diarioeyipantla.com">www.diarioeyipantla.com</a> Internet	179 palabras — 1%
5	<a href="http://www.repositorio.usac.edu.gt">www.repositorio.usac.edu.gt</a> Internet	173 palabras — 1%
6	<a href="http://docplayer.es">docplayer.es</a> Internet	119 palabras — < 1%
7	<a href="http://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Internet	83 palabras — < 1%
8	<a href="http://www.solarenergy.org">www.solarenergy.org</a> Internet	79 palabras — < 1%
9	<a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> Internet	69 palabras — < 1%

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Techos verdes</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Tipos de techos verdes</b>	<b>4</b>
<b>2.2.1. Techos verdes intensivos</b>	<b>4</b>
<b>2.2.2. Techos verdes intensivos simples</b>	<b>5</b>
<b>2.2.3. Techos verdes extensivos</b>	<b>5</b>
<b>2.3. Paneles fotovoltaicos</b>	<b>6</b>
<b>3. ANTECEDENTES</b>	<b>10</b>
<b>3.1. EFICIENCIA ENERGÉTICA</b>	<b>10</b>
<b>3.2. GANANCIA TÉRMICA</b>	<b>12</b>
<b>4. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>15</b>
<b>5. OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>16</b>
<b>6. MÉTODOS</b>	<b>17</b>
<b>6.1. ÁREA DE ESTUDIO DONDE SE INSTALARON LAS UNIDADES EXPERIMENTALES</b>	<b>17</b>
<b>6.2. UNIDADES EXPERIMENTALES</b>	<b>17</b>
<b>6.2.1. Bandejas modulares de techo verde extensivo</b>	<b>18</b>
<b>6.2.2. Preparación del sustrato</b>	<b>19</b>
<b>6.2.3. Obtención y propagación de la vegetación</b>	<b>19</b>
<b>6.3. INSTALACIÓN DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS</b>	<b>20</b>
<b>6.3.1. Sistema autónomo que integran los paneles fotovoltaicos</b>	<b>21</b>
<b>6.3.2. Generación y Uso de Energía Eléctrica de los Paneles Fotovoltaicos</b>	<b>22</b>
<b>6.4. MONITOREO DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES</b>	<b>22</b>
<b>6.5. CARACTERÍSTICAS DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA VIVIENDA</b>	<b>24</b>
<b>6.5.1. Materiales y Construcción</b>	<b>25</b>
<b>6.5.2. Iluminación y equipo interior</b>	<b>26</b>
<b>6.5.3. Ocupación de la vivienda</b>	<b>27</b>
<b>6.5.4. Ocupación de la vivienda de acuerdo con la nueva normalidad</b>	<b>27</b>
<b>6.5.5. Sistemas de acondicionamiento de aire</b>	<b>28</b>
<b>6.5.6. Ahorro eléctrico asociado con un techo verde</b>	<b>29</b>
<b>6.5.7. Tarifas de energía eléctrica</b>	<b>29</b>
<b>6.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>	<b>30</b>

<b>6.7. INTERFAZ GRÁFICA EMPLEANDO VISUAL BASIC PARA APLICACIONES (VBA) EN MICROSOFT EXCEL</b>	<b>31</b>
<b>6.7.1. Diseño y programación de la interfaz gráfica</b>	<b>31</b>
<b>6.8. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE COSTOS DE TECHOS VERDES Y PANELES FOTOVOLTAICOS</b>	<b>32</b>
<b>6.8.1. Análisis de los costos y vida útil del techo verde y el sistema de paneles fotovoltaicos</b>	<b>33</b>
<b>6.8.2. Aspectos de la simulación estocástica</b>	<b>34</b>
<b>6.9. RELACIÓN BENEFICIO-COSTO</b>	<b>34</b>
<b>6.9.1. Costos</b>	<b>36</b>
<b>6.9.2. Costos de instalación</b>	<b>36</b>
<b>6.9.3. Reemplazo de equipos y materiales del techo verde y paneles fotovoltaicos</b>	<b>37</b>
<b>6.9.4. Desmantelamiento del techo verde y paneles fotovoltaicos</b>	<b>38</b>
<b>6.9.5. Beneficios negativos</b>	<b>39</b>
<b>6.9.6. Beneficios positivos</b>	<b>40</b>
<b>6.9.7. Relación convencional B/C</b>	<b>40</b>
<b>7. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	<b>41</b>
<b>7.1. MONITOREO DE LA VEGETACIÓN</b>	<b>41</b>
<b>7.2. TEMPERATURA DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES</b>	<b>44</b>
<b>7.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA TEMPERATURA EN LAS UNIDADES EXPERIMENTALES</b>	<b>48</b>
<b>7.4. ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS</b>	<b>52</b>
<b>7.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONSUMO Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS</b>	<b>56</b>
<b>7.6. COSTOS UNITARIOS DEL TECHO VERDE Y SISTEMA DE PANELES FOTOVOLTAICO</b>	<b>59</b>
<b>7.7. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO</b>	<b>63</b>
<b>7.8. SIMULACIONES ESTOCÁSTICAS</b>	<b>63</b>
<b>7.9. BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA INSTALACIÓN DE UN TECHO VERDE EXTENSIVO</b>	<b>65</b>
<b>7.10. RELACIÓN BENEFICIO-COSTO DE UN TECHO VERDE EXTENSIVO.</b>	<b>68</b>
<b>7.11. BENEFICIOS ECONÓMICOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA.</b>	<b>72</b>
<b>7.12. RELACIÓN BENEFICIO-COSTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA.</b>	<b>73</b>
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>75</b>
<b>9. REFERENCIAS</b>	<b>78</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Ángulo de inclinación de paneles fotovoltaicos según diseño (Martínez Borges, 2013) _	21
<b>Tabla 2.</b> Áreas de construcción de la edificación (Fuentes Velasco, 2014)._____	25
<b>Tabla 3.</b> Materiales de construcción para los elementos estructural/arquitectónicos de la edificación Tipo A (Fuentes Velasco, 2014). _____	25
<b>Tabla 4.</b> Consumo eléctrico de los equipos empleados en la edificación residencial (Fuentes Velasco, 2014) _____	26
<b>Tabla 5.</b> Costos por kWh según tarifa 1F (CFE, 2021)._____	30
<b>Tabla 6.</b> Costo de membrana drenante antirraíz y de mano de obra por su reemplazo. _____	37
<b>Tabla 7.</b> Monitoreo de la vegetación Tradescantia spathacea. _____	41
<b>Tabla 8.</b> Comparación múltiple de las temperaturas de las unidades experimentales. _____	47
<b>Tabla 9.</b> Pruebas de normalidad de la temperatura en las unidades experimentales. _____	49
<b>Tabla 10.</b> Prueba de homogeneidad de varianzas de la temperatura en las unidades experimentales. _____	49
<b>Tabla 11.</b> Prueba de ANOVA de un factor de las temperaturas en las unidades experimentales. _	50
<b>Tabla 12.</b> Comparaciones múltiples de las temperaturas en las unidades experimentales. _____	50
<b>Tabla 13.</b> Subconjuntos homogéneos de la prueba HSD de Tukey de las temperaturas en las unidades experimentales. _____	51
<b>Tabla 14.</b> Pruebas de normalidad del consumo energético de las unidades experimentales. ____	56
<b>Tabla 15.</b> Rango promedio y suma de rangos del consumo energético de las unidades experimentales. _____	56
<b>Tabla 16.</b> Prueba de U de Mann-Whitney del consumo energético de las unidades experimentales. _____	56
<b>Tabla 17.</b> Estadísticos del consumo eléctrico de las unidades experimentales _____	57
<b>Tabla 18.</b> Costos de materiales impermeabilizantes para techo verde de la comercializadora 1. _	59
<b>Tabla 19.</b> Costos de materiales impermeabilizantes para techo verde de la comercializadora 2. _	60
<b>Tabla 20.</b> Costos de materiales impermeabilizantes para techo verde de la comercializadora 3. _	60
<b>Tabla 21.</b> Costos de materiales impermeabilizantes para techo verde de la comercializadora 4. _	61
<b>Tabla 22.</b> Costos de materiales de impermeabilización para techo verde de la comercializadora 5. _____	61
<b>Tabla 23.</b> Prueba de normalidad de los precios unitarios del techo verde. _____	62
<b>Tabla 24.</b> Costos totales de sistemas fotovoltaicos de 60 kW conectados a red eléctrica. _____	62
<b>Tabla 25.</b> Prueba de normalidad de los costos totales del sistema fotovoltaico. _____	63
<b>Tabla 26.</b> Cálculo del costo por consumo eléctrico anual en la edificación Tipo A, Subtipo A5 con la Tarifa 1F en la etapa de la nueva normalidad. _____	65
<b>Tabla 27.</b> VPN de los costos del ciclo de vida de un techo verde extensivo. _____	68
<b>Tabla 28.</b> VPN de los costos del ciclo de vida del sistema de paneles fotovoltaicos conectado a la red eléctrica. _____	72
<b>Tabla 29.</b> Relación Beneficio-Costo de los paneles fotovoltaicos asociados con el ahorro energético del techo verde extensivo. _____	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Componentes de un techo verde. Adaptado de Bolívar-Fuentes (2015).	3
<b>Figura 2.</b> Operación de la tecnología fotovoltaica. Fuente: (Ariza Rodríguez y Ospino Gómez, 2015)	6
<b>Figura 3.</b> Componente de los sistemas fotovoltaicos: <b>1)</b> Arreglo solar; <b>2)</b> Panel Solar y; <b>3)</b> Celda solar.	7
<b>Figura 4.</b> Unidades experimentales para el análisis de la interacción techo verde-panel solar. ___	18
<b>Figura 5.</b> Componentes generales de un sistema fotovoltaico autónomo. (Fuente: MetEnergy, 2019)	22
<b>Figura 6.</b> Unidades experimentales del estudio.	43
<b>Figura 7.</b> Temperatura de las unidades experimentales y promedio móvil del periodo de monitoreo.	44
<b>Figura 8.</b> Comportamiento de la temperatura y la humedad relativa en el día más cálido del mes de septiembre	46
<b>Figura 9.</b> Diagrama de cajas y bigotes del consumo energético de las unidades experimentales 1 y 2	54
<b>Figura 10.</b> Distribuciones de probabilidad del costo total con instalación de un techo verde extensivo y un sistema de paneles fotovoltaicos.	64
<b>Figura 11.</b> Variabilidad de la relación B/C respecto a los costos de las actividades de mantenimiento con distintas frecuencias al año. Cada par de datos alrededor de cada punto corresponde a la frecuencia de mantenimiento y a la relación B/C, respectivamente.	71

## 1. INTRODUCCIÓN

---

A medida que las ciudades continúan creciendo y desarrollándose, la identificación y evaluación de enfoques prácticos para mitigar las altas temperaturas urbanas es fundamental para ayudar a proporcionar entornos urbanos térmicamente cómodos, atractivos y sostenibles. En una sociedad moderna y urbanizada, el crecimiento compatible con un ambiente saludable es extremadamente importante.

Las invenciones que incluyen tecnologías que ayudan a las personas a preservar el medio ambiente son cada vez más exitosas. Catalano *et al.* (2017) definen “biosolar roofs” (techos biosolares) para enfatizar el papel “simbiótico” de la promoción de la biodiversidad y la producción de energía renovable en los entornos urbanos contruidos con techos funcionalizados con módulos fotovoltaicos y la optimización de la energía con ayuda de la vegetación correctamente seleccionada.

Los techos verdes son propuestos como una tecnología innovadora de construcción energéticamente eficiente que aportan grandes y numerosos beneficios ambientales, económicos y además coadyuvan a disminuir el efecto de isla de calor (Dauda y Alibaba, 2020; Korol y Shushunova, 2016; Santamouris, 2014); sin embargo, su eficiencia depende en gran medida de su diseño, en particular aquellos techos verdes que varían en la profundidad del sustrato, las especies de vegetales, el régimen de riego, entre otras (Sailor y Bass, 2014).

Ogaili (2015) menciona que el uso de la tecnología de los paneles fotovoltaicos que convierten la radiación solar en energía eléctrica con mínimas consecuencias ambientales adversas ha demostrado ser muy popular en Portland, Estados Unidos, debido a varios factores, tales como sus costos relativamente bajos de inversión y de instalación; su rendimiento aceptable y a los costos cada vez más elevados de la energía eléctrica. Sin embargo, en días soleados y calurosos, los paneles fotovoltaicos se sobrecalientan. Las celdas fotovoltaicas y otros semiconductores son sensibles a la temperatura. Cuando la temperatura de las celdas solares aumenta, la tensión del circuito abierto disminuye, lo que reduce la potencia de salida de la celda solar

(Radziemska, 2003). En otras palabras, cuando las temperaturas de un panel fotovoltaico supera los 25 °C, que es por lo general la temperatura de prueba estándar, la eficiencia de los paneles fotovoltaicos se verá afectada en menor o mayor medida, en función del tipo de panel fotovoltaico. Por lo tanto, la posibilidad de encontrar medios pasivos o activos de enfriamiento de paneles fotovoltaicos podría mejorar el rendimiento de estos.

Existen varios métodos de enfriamiento de los paneles solares, desde el uso de componentes mecánicos como ventilación inducida o hacer fluir una película de agua sobre la superficie del panel periódicamente.

Por otro lado, existe un interés creciente en el uso de techos verdes con vegetación bajo paneles fotovoltaicos para reducir sus temperaturas y proporcionar múltiples beneficios a la edificación, al usuario y al medio ambiente. Los techos verdes no requieren limpieza, pero pueden requerir otro tipo de mantenimiento, como el deshierbe y el riego frecuente. Dicho lo anterior y con base en pruebas recientes, se plantea para este estudio la hipótesis que esta combinación de techo verde y paneles fotovoltaicos mejora y reduce la ganancia térmica del edificio y aumenta el ahorro energético bajo condiciones de clima tropical húmedo.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Techos verdes

Los techos verdes, también llamados techos ecológicos, son básicamente techos que integran uno o varios componentes de vegetación en la parte superior, seguido de un sustrato de crecimiento y un sistema de membranas que aseguran el buen funcionamiento de este. La introducción de techos verdes en las superficies de los techos comúnmente no valorizada, se considera, en su mayoría, una estrategia valiosa para convertir los edificios en construcciones sostenibles (Oberndorfer *et al.*, 2007).

El concepto de techos verdes fue desarrollado para proporcionar beneficios tanto estéticos como ambientales y económicos. Los techos verdes se componen particularmente de varios elementos; una o varias especies vegetales, un medio de sustrato para el crecimiento, sobrevivencia y propagación de las plantas; una membrana filtrante; una membrana de drenaje; una membrana impermeable con barrera anti-raíz y una capa impermeable (Vijayaraghavan y Man Joshi, 2015). Los componentes se acoplan entre sí, de tal forma que garantizan un funcionamiento seguro, además de cumplir con las expectativas de vida útil a largo plazo.



**Figura 1.** Componentes de un techo verde. Adaptado de Bolívar-Fuentes (2015).

## 2.2. Tipos de techos verdes

De acuerdo con la Sociedad de Investigación para el Desarrollo del Paisaje Paisajismo (FLL, por sus siglas en Alemán), los techos verdes pueden dividirse en tres tipos diferentes según el uso, sus características constructivas y el método utilizado para realizarlo. Además, el tipo de vegetación a utilizar juega un papel fundamental en su selección. Estos tipos de techos verdes son:

- Techos verdes intensivos;
- Techos verdes intensivos simples, y;
- Techos verdes extensivos.

Cada tipo de techo verde puede incluir diversas especies vegetales, teniendo en cuenta las experiencias y requerimientos de las plantas a utilizar, así como los hallazgos de la ciencia en la materia. Los tres tipos de cubiertas verdes se pueden diferenciar entre sí mediante los siguientes criterios distintivos (FLL, 2018).

### 2.2.1. Techos verdes intensivos

La vegetación intensiva consiste en plantas perennes, pastos, flores y arbustos, en algunos casos árboles, así como césped. Pueden ser homogéneos, diferenciados en altura o contruidos puntual y/o estratégicamente. Son comparables con los espacios abiertos en tierra en las posibilidades de uso y diversidad de diseño con el equipamiento adecuado. Las plantas utilizadas imponen altas exigencias a la estructura de las capas y de la edificación. Además, requieren de mantenimientos intensivos, especialmente el suministro de agua y nutrientes (FLL, 2018).

### **2.2.2. Techos verdes intensivos simples**

Este tipo de techo verde generalmente se diseña con plantas de cobertura del suelo, como suelen ser: pastos, plantas perennes y arbustos. La variedad de usos y de su diseño es limitada en comparación con un techo verde intensivo. Las plantas utilizadas exigen menos la estructura de las capas, así como el suministro de agua y nutrientes. Además, los costos de su instalación, materiales y equipos son más económicos en comparación con los techos verdes intensivos. Asimismo, se requieren medidas de mantenimiento en un grado menor (FLL, 2018).

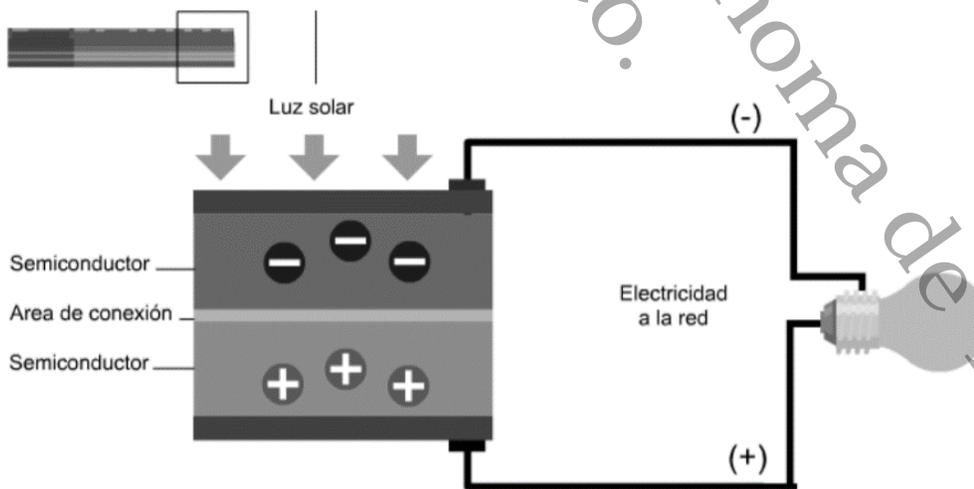
### **2.2.3. Techos verdes extensivos**

Los techos verdes extensivos representan formas naturales de vegetación que son en gran parte autosuficientes y se mantienen en constante crecimiento, ya que se utilizan plantas con especial adaptación a condiciones extremas del sitio y alta capacidad de regeneración. Por lo general, las plantas suelen ser nativas de la zona geográfica. Las áreas de vegetación en su mayoría intactas están formadas por musgos, suculentas, hierbas y pastos que pueden complementarse con vegetación floral y herbácea o algún otro tipo de planta que pueda asentarse de forma natural. El esfuerzo que implica la instalación y el mantenimiento del techo verde extensivo suele ser el menor de los ya mencionados. Los requerimientos de agua y nutrientes suelen ser los más bajos con los cuidados y las atenciones adecuadas. Las medidas de mantenimiento necesarias dependerán de las condiciones climáticas regionales y el método de construcción (FLL, 2018).

### 2.3. Paneles fotovoltaicos

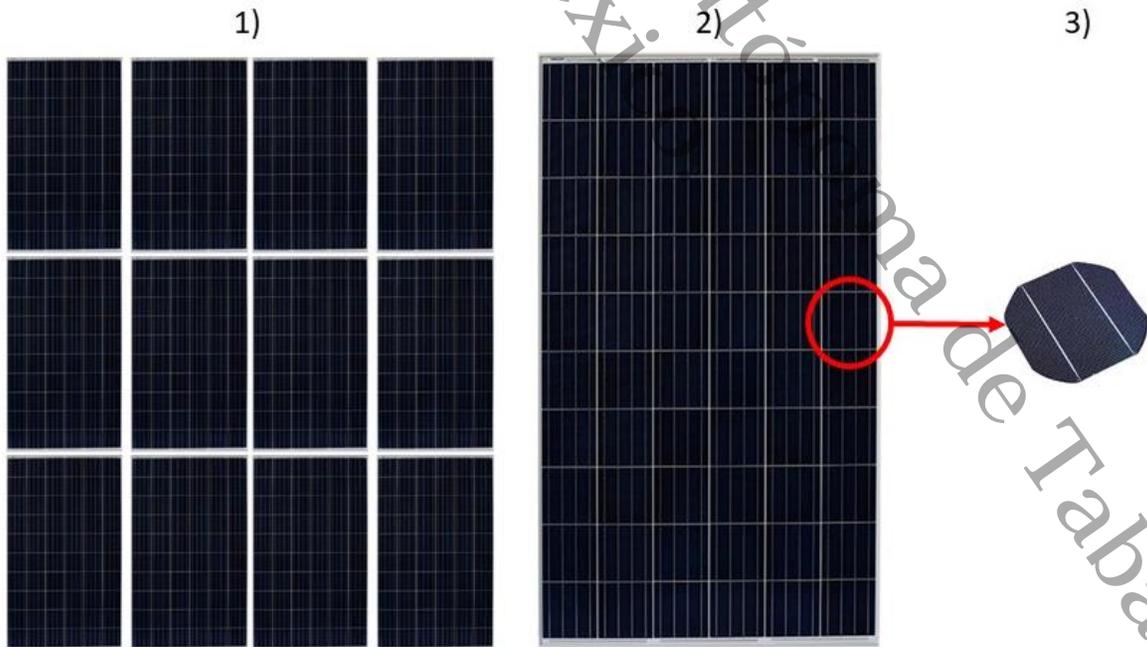
Los paneles fotovoltaicos, también llamados paneles solares o módulos fotovoltaicos, están integrados por un compuesto de celdas o células solares que se caracterizan por convertir en electricidad la radiación solar proveniente del sol. Su funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico, que es la característica de ciertos materiales de generar una corriente eléctrica cuando incide una radiación lumínica sobre ellos (Corcobado y Rubio, 2018).

Gracias a la tecnología fotovoltaica hoy es posible realizar la conversión de energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica por medio de un proceso que se basa en el uso de semiconductores fotovoltaicos. Este proceso fotovoltaico es la generación de la fuerza eléctrica resultado de la absorción de radiación ionizante obtenida por los paneles fotovoltaicos. La energía creada puede ser utilizada de inmediato o puede ser almacenada en una batería para uso posterior (Ariza Rodríguez y Ospino Gómez, 2015).



**Figura 2.** Operación de la tecnología fotovoltaica. Fuente: Ariza Rodríguez y Ospino Gómez, (2015)

Las células solares están hechas de materiales semiconductores, tales como el silicio, que usan en la industria microelectrónica. Para la elaboración de las células solares, una delgada rejilla semiconductor es especialmente tratada para crear un campo eléctrico positivo y negativo en cada lado (Figura 2). Cuando la energía lumínica llega hasta las celdas o células solares, los electrones son golpeados y sacados de los átomos del material semiconductor. Si se colocan conductores eléctricos tanto del lado positivo como del negativo de la rejilla, formando un circuito eléctrico, los electrones pueden ser capturados en forma de una corriente eléctrica; es decir, en energía eléctrica. La energía eléctrica puede entonces usarse para suministrar potencia a una carga; por ejemplo, desde encender una luz o energizar un equipo eléctrico. Múltiples paneles solares (o módulos solares) pueden ser conectados unos con otros para formar un arreglo fotovoltaico (Figura 3). En general, cuanto más grande es el área de un panel o arreglo fotovoltaico, más energía eléctrica será producida (Boylestad y Nashelsky, 2009).



**Figura 3.** Componente de los sistemas fotovoltaicos: **1)** Arreglo solar; **2)** Panel Solar y; **3)** Celda solar.

La radiación solar es uno de los principios más significativos con relación a la generación de energía solar fotovoltaica, esto es correspondido a que la producción de energía depende directamente de la radiación solar incidente en las celdas solares, esta radiación dependerá también de la zona geográfica, la época del año, la presencia de nubosidad y al ángulo de inclinación respecto a la perpendicular con el sol (Seguí, Gimeno, y Orts, 2016).

Sobrino Duarte (2013) indica que los paneles fotovoltaicos están sujetos a la disponibilidad de luz solar y aunque la capacidad que ofrecen varía relativamente poco ante las variaciones de radiación solar, la corriente de salida lo hace de una manera importante, por lo que considera tener un sistema que pueda acumular la energía solar que se recibe, tanto en periodos de abundancia como de escasez a través de las baterías, también llamadas acumuladores de carga.

El objetivo principal de los acumuladores de carga son abastecer de energía eléctrica al sistema cuando no la proporcionan los paneles fotovoltaicos, la batería almacena la energía eléctrica generada por los módulos fotovoltaicos durante los periodos de sol. Normalmente, las baterías se utilizan durante las noches o días con periodos nublados, el intervalo que incluye un periodo de carga y uno de descarga, recibe el nombre de un ciclo. Idealmente las baterías se recargan completamente durante el periodo de carga de cada ciclo (Delgado Trujillo, 2010).

De acuerdo con Ariza Rodríguez y Ospino Gómez (2015), las celdas solares no requieren de mucho mantenimiento y se caracterizan por una amplia vida útil. En los lugares desérticos es posible emplearlos al no tener partes mecánicas móviles esenciales y tener sus componentes electrónicos en estado sólido. Económicamente, la energía fotovoltaica es relativamente costosa, aunque hay aplicaciones en la que es más económica que otras y también es preferida, ya que no tiene un impacto ambiental negativo considerablemente alto.

Asimismo, Mikati, Santos y Armenta (2012) mencionan que la máxima generación de potencia de los sistemas fotovoltaicos coincide muchas veces con la demandada por las actividades humanas durante el día. Además, es una tecnología que se integra fácilmente en la población, debido a que su impacto visual es muy reducido; a la ausencia de ruido y a las pocas exigencias en su mantenimiento. Incluso aunque el costo es relativamente costoso (precio/potencia), el precio de la instalación es razonable para que un propietario de una residencia pueda considerar su adquisición.

En el comercio existen diferentes tipos de paneles fotovoltaicos que se caracterizan por los semiconductores con los que se elaboran y, por ende, su eficiencia energética. Esta eficiencia en la transformación de la radiación lumínica a energía eléctrica de los paneles solares se prueba en laboratorios con entornos controlados mediante un procedimiento específico llamado Condiciones de Prueba Estándar (STC, por sus siglas en inglés) (Mohammed y Jae, 2016). Sin embargo, esta eficiencia decrece o es afectada por varias condiciones ambientales del sitio y factores que deben tenerse en cuenta como resistencias en el circuito eléctrico, nivel de irradiancia, suciedad y polvo, sombra y velocidad del viento y temperatura del aire (Meral y Dincer, 2011).

### 3. ANTECEDENTES

---

Existen una serie de guías para el diseño, instalación y mantenimiento de techos ecológicos. Una guía de reconocido prestigio es la de *Research Society for Landscape Development and Landscaping* (acrónimo en alemán, *FLL*), la cual considera techos verdes bajo condiciones de clima templado (FLL, 2008). Además, se han propuesto guías para techos verdes bajo otras condiciones climatológicas; por ejemplo, la guía de la Universidad de Colorado es aplicable a condiciones de clima árido y semiárido (Tolderlund, 2010). Sin embargo, existen pocos estudios sobre diseño y operación de techos verdes extensivos en condiciones de clima tropical húmedo empleando especies nativas.

#### 3.1. EFICIENCIA ENERGÉTICA

Alshayeb y Chang, (2018) investigaron las interacciones térmicas entre la superficie del techo de un edificio con un sistema de paneles fotovoltaicos sobre un techo verde y otro con paneles fotovoltaicos instalados sobre un techo negro para medir la producción de energía fotovoltaica, la temperatura de la superficie inferior de los paneles fotovoltaicos, la temperatura del aire entre el panel fotovoltaico y el techo del edificio. Realizaron un estudio experimental de un año con paneles fotovoltaicos con una capacidad del sistema de 4,3 kW. Sus resultados muestran que, durante el verano, los paneles fotovoltaicos sobre un techo verde registraron temperaturas más bajas que la superficie de la parte inferior fotovoltaica y del aire entre el panel fotovoltaico y el techo del edificio, así como mayor producción de energía fotovoltaica que los paneles fotovoltaicos instalados sobre un techo negro. La diferencia promedio por hora de la producción de energía fue de aproximadamente 0.045 kWh, mientras que la diferencia máxima fue de aproximadamente 0.075 kWh, lo que representó un aumento en la producción del 3.3% y 5.3%. Durante todo el período de su estudio, los paneles fotovoltaicos sobre un techo verde produjeron 19,4 kWh más de energía, lo que representó un 1.4% más que los paneles fotovoltaicos instalados sobre un techo negro.

Hui y Sam, (2011) investigaron las ventajas de la combinación de los sistemas de techos verdes y paneles fotovoltaicos que podrían contribuir al desarrollo sostenible de las edificaciones y a la disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero en Hong Kong. Los efectos térmicos y energéticos los analizaron mediante modelos teóricos, experimentales y estudios de campo. Los hallazgos de una simulación de energía durante todo un año (mediante el uso de *EnergyPlus*) para un edificio comercial de poca altura, mostraron que el techo verde con un sistema fotovoltaico producía 8.3% más electricidad que un techo fotovoltaico. Sin embargo, considerando que la instalación de estos paneles contaba con poco espacio entre ellos, no había una adecuada circulación del aire detrás de los paneles para su enfriamiento, por lo que se esperaba que el rendimiento de estos sistemas sea mayor con una instalación adecuada.

Con respecto al estudio de Chemisana y Lamnatou (2014), la investigación se centró en la evaluación experimental de techos verdes asociados a paneles fotovoltaicos en condiciones clima mediterráneo durante el verano. Seleccionaron dos plantas autóctonas, *Gazania rigens* y *Sedum clavatum* para los sistemas de vegetación con paneles fotovoltaicos integrados, mientras que se usó una configuración de grava con paneles fotovoltaicos como el techo de referencia. Los sistemas de techado mencionados anteriormente fueron desarrollados y probados en la Universidad de Lleida, en España. Centrarón sus investigaciones en el rendimiento eléctrico, análisis térmico y de radiación. Los resultados obtenidos para un período soleado de cinco días revelaron un aumento promedio de la producción de potencia máxima de los paneles fotovoltaicos (que varía de 1.3% a 3.3% según la especie vegetal), verificando la sinergia positiva entre estas dos tecnologías. Otro efecto positivo de la interacción plantas/paneles fotovoltaicos fue el hecho de que estos sistemas mostraron una temperatura de la superficie del techo considerablemente inferior en comparación con la configuración de grava/paneles fotovoltaicos.

Baumann, *et al.*, (2019) analizaron el diseño y el rendimiento energético de un sistema de módulos bifaciales especialmente diseñados y hechos a medida, montados verticalmente para realizar la generación de energía fotovoltaica en combinación con un techo verde funcional a bajos costos de mantenimiento. Además, realizaron simulaciones con *PVSyst* (*PVsyst Photovoltaic Software*, 2018) para varias configuraciones con diferentes valores de cobertura de suelo de techo verde y albedo. Con el fin de evaluar la precisión de las simulaciones, los resultados calculados para los dos sistemas específicos los compararon con los datos medidos. En sus resultados mencionan que, a pesar de encontrarse con algunos sombreados de la vegetación y con factores de albedo  $< 0.2$ , la instalación bifacial con una potencia nominal de 9.09 kWp logró un rendimiento específico de los 942 kWh/kWp en un año. Esto es cercano a valores típicos de 1000 kWh/kWp logrados para sistemas fotovoltaicos orientados al sur en la misma región.

### 3.2. GANANCIA TÉRMICA

Radziemska E. (2003) estudió los parámetros de temperatura que afecta a la energía fotovoltaica, algunos como: la influencia de la temperatura en el mecanismo de la absorción de la luz solar; el rendimiento con respecto a la temperatura de un módulo solar de silicio que funciona bajo una irradiancia constante; el rendimiento con respecto a la radiación en las celdas solares que funcionan a temperatura constante; entre otras. En su estudio mencionan que la temperatura de las celdas solares tuvo variaciones entre 22 °C y 70 °C y que estas derivan de la intensidad y al tiempo de la radiación disponible. Además, a medida que aumenta la temperatura de las celdas, descubrieron una disminución del 0.8% en la potencia de salida fotovoltaica, observaron un cambio mínimo en la corriente de cortocircuito y una disminución significativa en el voltaje de circuito abierto.

Sherba *et al.* (2011) examinaron el papel de la reflectividad del techo. Se desarrolló y validó un modelo utilizando datos de un experimento de campo (Portland, Oregón), mientras se estudiaron varias tecnologías en el techo: un techo de membrana oscura, un techo altamente reflectante, un techo verde con vegetación y con paneles fotovoltaicos. Los modelos de balance de energía que se desarrollaron y validaron se utilizaron para estimar la irradiancia solar en ciudades ubicadas en seis zonas climáticas en los EE. UU. (Nueva York, NY; Los Angeles, CA; Chicago, IL; Houston, TX; Minneapolis, St. Paul, Mn; Portland, OR). Los resultados mostraron que al reemplazar un techo negro con un techo blanco o un techo verde se produjo un descenso sustancial en la radiación solar total resultante de la atmósfera urbana. Un techo de membrana oscura reemplazado por un techo blanco cubierto de paneles fotovoltaicos o un techo verde cubierto de paneles fotovoltaicos mostró una reducción en el flujo sensible total del orden del 50%.

En otro estudio de ganancia térmica, Pérez *et al.*, (2012) evaluaron 10 meses de datos experimentales de cuatro unidades de prueba en múltiples sistemas de techado a pequeña escala: con grava, con vegetación, paneles fotovoltaicos con grava y paneles fotovoltaicos con vegetación, sobre modelos de casas pequeñas en Nueva York, USA. Utilizaron datos de temperatura, humedad relativa y radiación solar para modelar cuantitativamente los impactos positivos de estos. Asimismo, especies de Sedum fueron adaptadas a estos sistemas. La mayor variabilidad de la temperatura dentro de la casa con techo de grava se encontró que era un 16.5% más alta que en la casa con un sistema de cubierta solar fotovoltaica con techo verde integrado. La variabilidad de las temperaturas de la superficie en la casa de grava fue 10.69% mayor que en la casa con techo de paneles fotovoltaicos.

Ramshani *et al.*, (2018), desarrollaron un modelo de programación estocástico de dos etapas para incorporar decisiones de colocación de paneles fotovoltaicos y techos verdes bajo diferentes modelos climáticos para maximizar el beneficio general de la energía generada y ahorrada. En sus investigaciones, mencionan que los techos verdes pueden proporcionar un aislamiento adicional al techo y enfriar la temperatura del aire

cerca de la superficie al disminuir la tasa de absorción de la radiación solar por la estructura del edificio, por lo que este efecto de enfriamiento puede contribuir a una caída aproximadamente del 30% en la temperatura de la superficie. Asimismo, mencionan que estos pueden contribuir a la producción de energía generada por paneles fotovoltaicos si se instalan conjuntamente, ya que estas dos tecnologías pueden crear un microclima fresco en climas cálidos y reducir las temperaturas en el área circundante que pueden ayudar a enfriar los paneles, lo que les permitirá funcionar con una mayor eficiencia que oscila entre el 0.08% y el 8.3% de acuerdo con estudios de diversos periodos y realizados en diferentes climas.

## 4. JUSTIFICACIÓN

---

Los sistemas de techos verdes y los paneles fotovoltaicos son dos tecnologías que podrían contribuir al desarrollo sostenible de las viviendas y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos sistemas tecnológicos instalados en el techo pueden parecer inicialmente como competidores por el espacio limitado en el techo (Peck, 2010). Sin embargo, cuando se combinan pueden mejorar su funcionamiento mediante los efectos de enfriamiento y sombreado (Köhler *et al.*, 2007). Se cree que el enfriamiento de la evapotranspiración de la cobertura vegetal permite una mayor eficiencia de los paneles fotovoltaicos y, al mismo tiempo, los paneles protegen a la vegetación de la exposición excesiva al sol y reduce la evaporación, lo que mejora el crecimiento de la vegetación. Tanto los paneles fotovoltaicos como los techos verdes son estrategias ampliamente utilizadas para utilizar de manera efectiva el espacio del techo de un edificio para reducir el consumo de energía, pero en gran parte se han estudiado de forma independiente, por ende, existen pocos ejemplos de investigación que estudian los efectos sinérgicos de la combinación de estos.

Es preciso señalar que existen algunos problemas que deben afrontarse y superarse. Aparte de las dificultades asociadas a la carencia de una política ambiental y energética, debe considerarse que los paneles fotovoltaicos están sometidos a continuas fluctuaciones más o menos bruscas. Por ejemplo, la radiación solar es menor en invierno, pero en verano es muy intensa. Asimismo, la eficiencia de los techos verdes depende del área geográfica, de los componentes que conforman el sistema tales como el tipo de sustrato, el tipo de membrana, el tipo de vegetación, el área foliar, entre otras.

## 5. OBJETIVOS

---

Evaluar el efecto de la combinación de techos verdes extensivos con paneles solares sobre la reducción de la ganancia térmica del edificio y en el ahorro energético, bajo condiciones de trópico húmedo.

### 5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Monitorear y cuantificar el consumo eléctrico de diversos electrodomésticos conectados a un panel fotovoltaico instalado sobre la unidad experimental de techo verde extensivo.
- Medir el efecto del techo verde extensivo sobre la eficiencia energética de la celda solar.
- Determinar el efecto de la celda fotovoltaica sobre la ganancia térmica del edificio.
- Comparar la relación costo-beneficio de un techo verde extensivo, un panel solar y la combinación de ambas tecnologías.

## 6. MÉTODOS

---

### 6.1. ÁREA DE ESTUDIO DONDE SE INSTALARON LAS UNIDADES EXPERIMENTALES

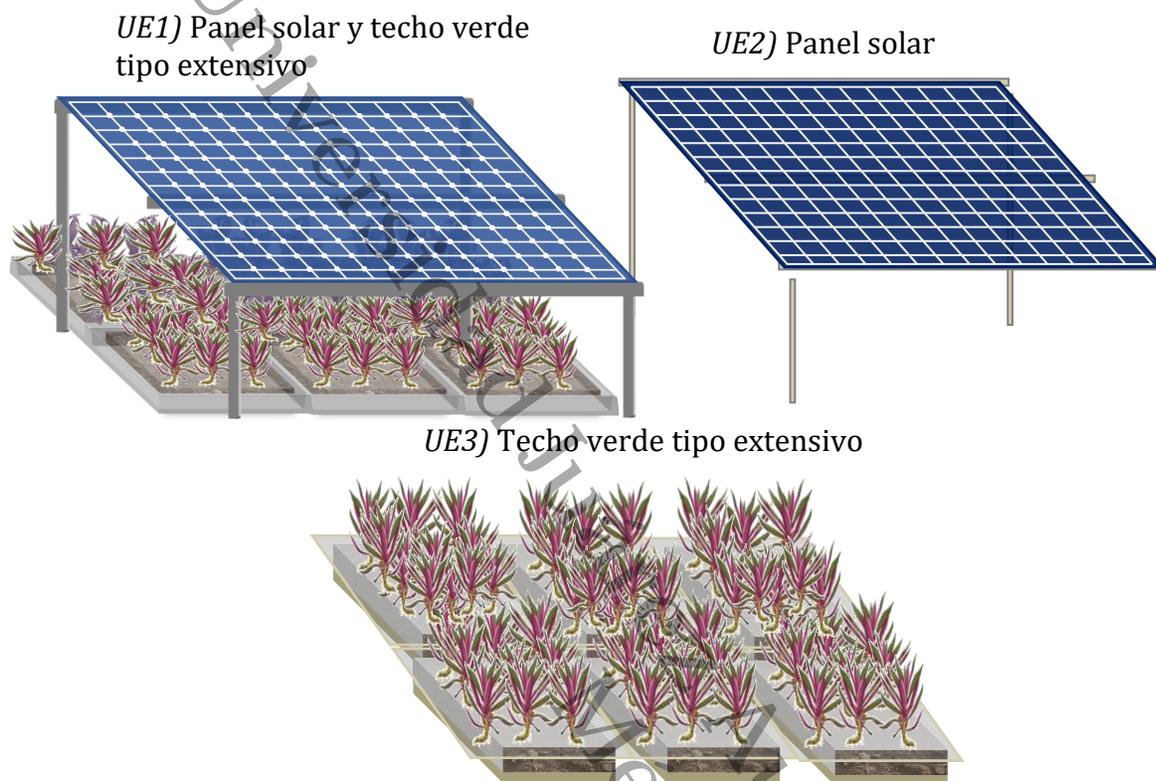
Las unidades experimentales de techo verde están ubicadas en una vivienda localizada la Ranchería la Lima, localidad de la zona conurbada de la Ciudad de Villahermosa en el municipio de Centro, Tabasco, y que se encuentra a una altitud de 10 msnm. La ubicación exacta de las unidades experimentales se logra situar a través de las siguientes coordenadas en Universal Transversal Mercator (UTM) 1980197 N; 506620 E.

En este sitio, el clima es de tipo tropical húmedo con temperaturas máximas normales de 35.4 y 27.9 °C, para mayo y enero respectivamente, y las temperaturas mínimas normales fueron de 24.5 y 19.5 °C, para los mismos meses del año (información recopilada en 30 años, desde 1981 hasta 2010, SMN, 2021). En particular, durante el mes de mayo suelen ocurrir temperaturas máximas diarias hasta de 43.5 °C. Por su parte, la precipitación normal mensual es de 34.4 mm para el mes de abril y 323.8 mm para el mes de octubre. La precipitación anual acumulada es de 1,972 mm con 127 días del año presentando eventos pluviales.

### 6.2. UNIDADES EXPERIMENTALES

Se instalaron tres unidades experimentales con las configuraciones siguientes:

- *UE1*) una unidad experimental integrada por un panel fotovoltaico policristalino de 100 W de potencia máxima y módulos de techo verde tipo extensivo que se encuentran por debajo de este y en su área circundante;
- *UE2*) una unidad experimental constituida por un panel fotovoltaico policristalino de 100 W de potencia máxima, y;
- *UE3*) una unidad experimental compuesta por módulos de techo verde tipo extensivo. La Figura 4 representa las tres unidades experimentales anteriormente mencionadas.



**Figura 4.** Unidades experimentales para el análisis de la interacción techo verde-panel solar.

### 6.2.1. Bandejas modulares de techo verde extensivo

Los módulos que integran el sistema de techo verde extensivo están conformados por un modelo estándar de bandejas modulares de la marca *LiveRoof*®, diseñadas principalmente para plantas suculentas y bulbos. Tienen una forma rectangular con medidas de longitud, anchura y altura aproximada de 0.61 m, 0.31 m y 0.11 m, respectivamente.

Las bandejas están elaboradas de un tipo de polietileno de alta densidad con una base conformada por una superficie cóncava y convexa con pequeñas aberturas que ayudan a mantener un adecuado drenaje en caso de riego excesivo o precipitaciones extraordinarias que puedan sobresaturar el sustrato que se ha establecido como medio de crecimiento de la vegetación plantada. Sin embargo, se colocó una malla impermeabilizante de refuerzo en cada una de las bandejas como base para el sustrato,

para evitar pérdidas de sustrato por medio de las aberturas y contener el crecimiento excesivo de las raíces de la vegetación.

### 6.2.2. Preparación del sustrato

Se aplicaron dos materiales para el sustrato de la vegetación de las bandejas modulares de techo verde extensivo, los cuales fueron fibra de coco (50% fibra/50% polvo) y agrolita o perlita (con diámetros de 6 a 8 mm). Se emplearon las cantidades de masa requerida de la preparación de las bandejas modulares de techo verde extensivo del estudio de García Trinidad (2019). Para el caso de la fibra de coco, se aplicó una cantidad de 0.71 kg y para la agrolita una cantidad de 1.00 kg, equivalentes con una proporción en volumen del 60% y 40%, respectivamente.

García Trinidad (2019) realizó un estudio donde evaluó la capacidad de un techo verde extensivo para mejorar la calidad del agua pluvial durante la temporada de frentes fríos empleando bandejas modulares con dos proporciones experimentales de sustrato y diferentes especies vegetales. Para la primera proporción, utilizó la fibra de coco y la agrolita con proporciones del 60% 40%, respectivamente. En la segunda proporción invirtió los valores para la fibra de coco y la agrolita (40%/60%). Sus resultados indican que las dos mezclas permitieron el crecimiento óptimo de los dos tipos de vegetación bajo estudio (*Tradescantia spathacea* y *Tradescantia pallida*).

### 6.2.3. Obtención y propagación de la vegetación

Se adquirió una gran cantidad de individuos vegetales de *Tradescantia spathacea* de diversos viveros comerciales en su etapa juvenil para su reproducción. Inicialmente, las plantas disponían de una altura inicial de entre 9 y 13 cm aproximadamente. Posteriormente, los individuos fueron propagados por esquejes en las mismas macetas con el suelo adquirido y una pequeña proporción se obtuvo de jardines ornamentales de diferentes viviendas particulares.

Por un determinado tiempo, a estos especímenes se les permitió enraizar adecuadamente y desarrollarse bajo una exposición solar controlada y riego continuo cada dos días sin uso de fertilizantes, esto con la finalidad de que se adaptaran a las condiciones climatológicas o fenómenos meteorológicos a los que estuvieron expuestos durante la etapa de monitoreo de la investigación. Finalmente, se llevó a cabo un monitoreo en el crecimiento de estos individuos, recolectando datos de altura y cobertura vegetal en las unidades experimentales que contaron con un techo verde.

### **6.3. INSTALACIÓN DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS**

En el tema de la instalación de los paneles fotovoltaicos, existen diversos manuales que mencionan algunos criterios a considerar antes de su implementación, como una adecuada ubicación, orientación e inclinación de los paneles solares, radiación solar en el sitio y la evaluación de posibles sombras que puedan afectar su funcionamiento. Con relación a esto, los paneles fotovoltaicos de la UE1 y UE2, se instalaron de manera independiente sobre unas bases móviles en el techo que permitieron ubicarlos de manera conveniente para la optimización de su funcionamiento en cada unidad experimental. Las bases móviles están fabricadas con perfiles tubulares cuadrados de acero de 1 in<sup>2</sup>. La altura mínima con respecto a la losa es de 0.40 m en el frente (su lado más cercano al techo) y una altura máxima de 0.70 m en su lado más alto, de tal manera que aseguren los 18° de inclinación deseada en los paneles.

Para determinar el ángulo de inclinación óptimo de los paneles fotovoltaicos, se utilizó la Tabla 1 descrita por (Martínez Borges, 2013), en la que menciona que el ángulo ideal para un periodo de diseño en las estaciones de primavera y verano será igual a la Latitud correspondiente de la ubicación geográfica donde se ubicarán. En este sentido, las unidades experimentales se encuentran a una Latitud geográfica de 17° 54' 35.00" N, por lo que 18° de inclinación en los paneles es un valor aceptable.

**Tabla 1.** Ángulo de inclinación de paneles fotovoltaicos según diseño (Martínez Borges, 2013)

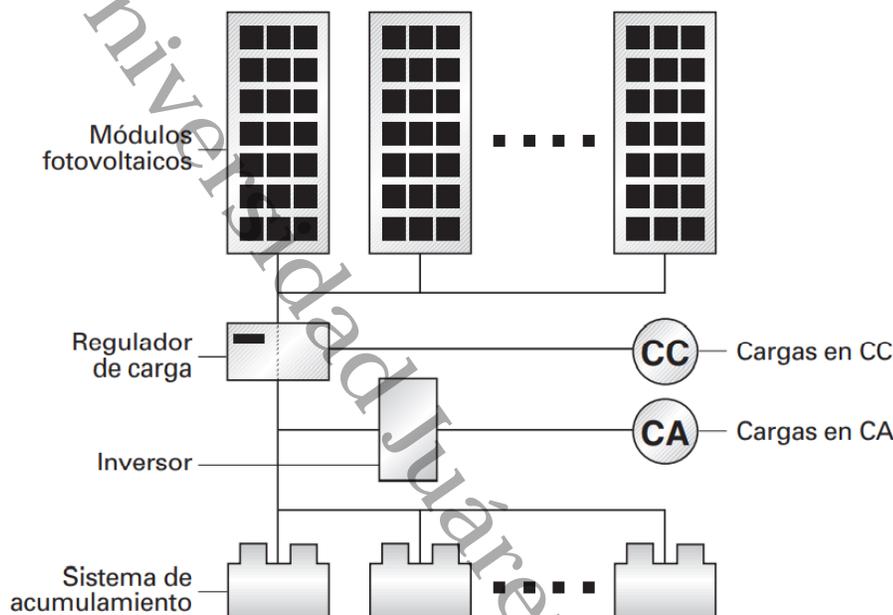
Periodo de Diseño	Ángulo óptimo $\beta$ (°)
Invierno	$\lambda + 20$
Uniforme Anual	$\lambda + 15$
Primavera y Verano	$\lambda$
Conexiones a red eléctrica	$\lambda * 0.85$

$\lambda$ : Latitud del lugar en valor absoluto y grados.

La organización *Solar Energy International* (2016) menciona en su manual de diseño que las latitudes del hemisferio norte de la Tierra están inclinadas hacia el Sol desde junio hasta agosto, lo que causa el verano en el hemisferio norte. La duración más extensa de los días en verano y la inclinación del eje de la Tierra incrementa la radiación solar accesible de forma significativa en un día de verano que en un día de invierno. Por lo anterior, en el hemisferio norte, la orientación de los paneles fotovoltaicos debe ser hacia el sur para obtener la mayor cantidad de radiación por  $m^2$  y así obtener el máximo aprovechamiento de la energía solar.

### 6.3.1. Sistema autónomo que integran los paneles fotovoltaicos

La necesidad de implementar un sistema autónomo e independiente para las dos unidades experimentales con los paneles fotovoltaicos es imprescindible para el control y monitoreo de la energía almacenada y consumida. Debido a lo anterior, se adquirieron los equipos y materiales necesarios para su instalación y operación, por lo que en cada unidad experimental se instaló 17 m de cable doble reforzado de calibre 12 junto con sus terminales de dos polos; un controlador de carga de 10 A con voltaje nominal de 12 V/24 V de la marca *Irene Inevent*; una batería de 12 V de la marca *LTH*®, modelo L-31T/S-190M de ciclado profundo para aplicaciones solares; un inversor de energía solar de 12 V de la marca *Foval*® con un voltaje de salida de 110-120 V y, finalmente; un foco incandescente de 100 W de potencia para el alumbrado parcial de la vivienda (Figura 5).



**Figura 5.** Componentes generales de un sistema fotovoltaico autónomo. (Fuente: MetEnergy, 2019)

### 6.3.2. Generación y Uso de Energía Eléctrica de los Paneles Fotovoltaicos

El principio de esta tecnología radica en la capacidad que tienen los paneles fotovoltaicos de convertir la radiación solar en la generación de energía eléctrica, por lo que el presente estudio requirió de la instalación de dos sistemas fotovoltaicos autónomos de la red eléctrica que, además de los paneles fotovoltaicos, están conectados cada uno de ellos a un regulador de carga que mantiene el suministro de voltaje adecuado para después ser acumulado en una batería que garantiza un suministro de corriente estable. Finalmente, la corriente pasa por un inversor que convierte la corriente continua en corriente alterna y de esta manera alimenta los aparatos eléctricos de uso común en una edificación o vivienda familiar.

## 6.4. MONITOREO DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES

El periodo de monitoreo de la ganancia térmica y el consumo energético de las unidades experimentales (UE) comprendió los meses de junio a septiembre del 2021. Como se

describió anteriormente, durante este periodo, la generación de energía eléctrica y la energía almacenada en las baterías se registraron con controladores de carga solar. El consumo eléctrico se registró diariamente empleando una bitácora elaborada en *Microsoft Excel* donde se anotó el tiempo de consumo energético de cada unidad experimental que cuenta con un panel fotovoltaico (UE1 y UE2) con ayuda de un medidor de energía de la marca *Master Power*©.

Por su parte, la ganancia térmica de las unidades experimentales se midió empleando sensores de temperatura termopar tipo *K* de contacto, unidos a registradores de datos (*dataloggers*) de la marca *ThermoWorks Inc.*© modelo *TC101A* con una frecuencia de registro cada cinco minutos. Cada *datalogger* recolecta información de dos tipos de temperatura: la temperatura ambiente por medio de un sensor interno del equipo, y la temperatura registrada por medio del sensor tipo termopar.

Los *dataloggers* y los sensores de temperatura se colocaron en los siguientes puntos de las tres unidades experimentales: *i*) un *datalogger* en la parte inferior de cada panel fotovoltaico para monitorear la temperatura del ambiente y cada uno acoplado a un sensor termopar tipo *K* de contacto que registra la temperatura de la superficie inferior de los paneles fotovoltaicos y; *ii*) un *datalogger* en la unidad experimental de los módulos del techo verde tipo extensivo para monitorear la temperatura del aire circundante y con ayuda del sensor termopar se registra la temperatura dentro de la cobertura vegetal.

Cabe señalar que ocasionalmente y por periodos intermitentes, también se realizó un monitoreo de la temperatura de la losa de concreto donde se ubican las unidades experimentales con ayuda de otro *datalogger* de temperatura. Además, se instaló un pluviómetro para el registro de los niveles de precipitación y también se colocó en cada unidad experimental un higrómetro digital calibrado para obtener una estimación de la humedad relativa cada hora en su área circundante.

## 6.5. CARACTERÍSTICAS DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA VIVIENDA

Con la finalidad de determinar la relación beneficio-costado de un techo verde extensivo y de un sistema fotovoltaico, es necesario comparar los costos totales de los materiales, equipos, mantenimiento y obra civil con el beneficio del ahorro energético asociados a estos. Sin embargo, la capacidad de los paneles fotovoltaicos y el área de cobertura del techo verde existente en las unidades experimentales solo cubren la demanda necesaria para la obtención de datos del presente estudio y no representan la demanda real de una vivienda familiar. Por esta razón, se determinaron los costos totales de estas dos tecnologías estableciendo la demanda eléctrica de toda una vivienda considerando ciertos parámetros o características como su ocupación, acondicionamiento de aire, iluminación y equipo eléctrico con la finalidad de obtener una mayor representatividad en los resultados.

Al respecto, Fuentes Velasco, (2014) realizó un estudio donde determina el ahorro energético que ofrece el instalar un techo verde tipo extensivo contra un techo convencional a partir de simulaciones en edificios con diferentes características estructurales y en condiciones de clima tropical cálido húmedo con ayuda del software *EnergyPlus*®. Para el desarrollo de su investigación, monitoreó las variables ambientales y operativas de la unidad experimental con techo verde y la edificación con techo convencional, obteniendo datos de la diferencia de la temperatura entre ambos techos que fueron utilizados para la alimentación del software y de esta manera obtener las simulaciones del consumo eléctrico.

Dada la practicidad y la estrecha relación que tiene su investigación con el presente estudio, a continuación, se hará uso de esta metodología para el cumplimiento de uno de los objetivos particulares: Dentro de sus cálculos, establece las dimensiones, espacios arquitectónicos, tipo de construcción, materiales, consumo energético y demás características de utilidad de una edificación a la cual denomina *Tipo A*. Esta edificación cuenta con 6 m de longitud, 10 m de anchura y una altura de 2.7 m. En ella, se

delimitaron siete espacios; nivel inferior, cocina, escaleras, nivel superior/estudio, baño, recámara principal y recámara secundaria (Tabla 2).

### 6.5.1. Materiales y Construcción

Fuentes Velasco, (2014) definió las siguientes construcciones con los materiales que se enlistan en la Tabla 3.

**Tabla 2.** Áreas de construcción de la edificación (Fuentes Velasco, 2014).

Espacios	Área de Construcción (m <sup>2</sup> )	
	Tipo A	
Nivel Inferior	45.0	
Cocina	12.0	
Escaleras	6.0	
Nivel Superior/estudio	24.4	
Baño	5.0	
Recámara principal	15.6	
Recámara secundaria	12.0	
<b>Total</b>	<b>120</b>	

**Tabla 3.** Materiales de construcción para los elementos estructural/arquitectónicos de la edificación Tipo A (Fuentes Velasco, 2014).

Construcción	Material	Espesor (cm)
<b>Muro de carga</b>	Concreto normal	20.3
<b>Muro ligero</b>	Concreto ligero	10.2
<b>Techo interior</b>	Concreto normal	20.3
<b>Techo exterior</b>	Concreto normal	20.3
<b>Suelo</b>	Concreto normal	10.2
<b>Ventana</b>	Vidrio	0.5
<b>Puerta interior</b>	Madera	4.5
<b>Puerta exterior</b>	Madera	10

### 6.5.2. Iluminación y equipo interior

En su estudio, consideró focos de 25 W de potencia para todas las áreas de la edificación. Los aparatos eléctricos fueron estimados en la simulación del software *EnergyPlus*; sus respectivos consumos eléctricos se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Consumo eléctrico de los equipos empleados en la edificación residencial  
(Fuentes Velasco, 2014)

Equipo eléctrico	Consumo eléctrico (W)
<b>Nivel Inferior</b>	
Televisor a color	150
Ventilador	120
Teléfono digital	40
<b>Cocina</b>	
Refrigerador	650
Extractor de jugos	250
Cafetera	850
Batidora	150
Horno de microondas	1200
Tostador Eléctrico	1000
Licuadaora	350
Ventilador	150
Lavadora	375
Bomba para agua	400
<b>Baño</b>	
Secadora de pelo	1350
<b>Nivel Superior/estudio</b>	
Ventilador	120
Computadora de escritorio	150
Cargadores de teléfono celular (2)	13
Consola de videojuegos	180
Impresora	170
Módem	30
<b>Recámara Principal</b>	
Televisor	150
Reproductor DVD	25
Ventilador	120
<b>Recámara Secundaria</b>	
Televisor	150
Reproductor DVD	25
Ventilador	120

### **6.5.3. Ocupación de la vivienda**

Fuentes Velasco, (2014) indica que la edificación *Tipo A* es de clase unifamiliar, la construcción está destinada para alojar una sola familia, la cual está conformada por cuatro integrantes: dos adultos y dos menores de 12 años. En este sentido, se estableció que la actividad de un adulto de la familia tiene un horario de trabajo fuera del hogar de 07:00 a 15:00 horas y el otro de 09:00 a 18:00 horas. En cuanto a los menores de edad, consideró un horario escolar de 7:00 a 14:30 horas. Además, estimó horarios de desayuno, los cuales se toman entre las 06:00 y 08:00 horas. Posteriormente, la comida de 15:00 a 16:30 horas. Seguido de esto, menciona que los menores de edad realizan labores escolares y contó con que uno de ellos realizará una actividad extraescolar de 17:30 a 18:30 horas. La hora de la cena la estableció de 20:00 a 21:00 horas. Finalmente, la hora de dormir para los menores de edad es a las 21:30 y para los adultos, a las 22:30 horas.

### **6.5.4. Ocupación de la vivienda de acuerdo con la nueva normalidad**

Debido a la situación que se vivió globalmente con el virus SARS-CoV-2 y la enfermedad COVID-19, las actividades académicas, sociales y servicios profesionales también han sobrellevado un cambio importante en la rutina diaria. El riesgo de contagio y la gran morbilidad y mortalidad que ocasionó el virus mantuvo a la población resguardada, perturbando consecuentemente los horarios y las jornadas laborales habituales. En apego y de acuerdo con las disposiciones del Gobierno de México, la Secretaría de Educación Pública y la Secretaría de Salud, sólo las actividades catalogadas como esenciales en el ámbito económico, educativo y social estuvieron permitidas de manera presencial, mientras las actividades no esenciales se desarrollaron en función de un semáforo de riesgo epidemiológico.

En este sentido, un gran número de familias se mantuvieron resguardadas en sus hogares realizando parte de sus actividades profesionales, educativas y sociales con ayuda de recursos tecnológicos y de las redes del internet, lo que conlleva a una demanda energética más elevada por el uso constante de aparatos eléctricos y de los

sistemas de acondicionamiento del aire. Dicho lo anterior, la estimación del consumo energético en la vivienda propuesta por Fuentes Velasco (2014), se reevaluó de acuerdo con la demanda correspondiente a la nueva normalidad.

#### 6.5.5. Sistemas de acondicionamiento de aire

Debido a las altas temperaturas en zonas con clima tropical húmedo, es común el uso de equipos de acondicionamiento de aire para el confort térmico de los espacios. En viviendas en donde el poder adquisitivo de sus ocupantes lo permite, es común encontrar más de un equipo de aire acondicionado en las recámaras e incluso en las áreas comunes como sala, comedor y estudio. Dicho lo anterior, Fuentes Velasco (2014) utilizó un análisis de sensibilidad paramétrica en la edificación *Tipo A* en función del número de sistemas de aire acondicionado en el edificio dividiéndolos por *subtipos* para un mejor entendimiento de la eficiencia de un techo verde, donde:

- *Subtipo A0.* Los espacios en la edificación no contaron con equipos de aire acondicionado y la inclusión en su estudio ha sido para obtener los datos de temperatura de las zonas y su consumo eléctrico.
- *Subtipo A1.* Adiciona un equipo de aire acondicionado en la recámara principal.
- *Subtipo A2.* Adiciona otro equipo de aire acondicionado en la recámara secundaria.
- *Subtipo A3.* Mantiene los equipos de aire acondicionado en ambas recámaras y se sumó otro al nivel inferior, en el área de la sala y comedor donde considera su funcionamiento de 16:30 a 18:00 horas, de lunes a viernes.
- *Subtipo A4.* Utilizó el mismo criterio que en el *subtipo A3*; sin embargo, el equipo de aire acondicionado fue agregado en el nivel superior.

- *Subtipo A5*. Utilizó el mismo criterio que en el *subtipo A4*, tomando el funcionamiento de los equipos de aire acondicionado igual que el de las recámaras; encendido durante la noche y apagado durante el día.

Para este estudio se consideró el *subtipo A5*, donde la edificación cuenta con 3 equipos de acondicionamiento de aire situados en el segundo nivel; uno en cada recámara, cumpliendo con los horarios nocturnos de funcionamiento y de acuerdo con el horario del sueño.

#### **6.5.6. Ahorro eléctrico asociado con un techo verde**

Con la finalidad de obtener la eficiencia energética de la edificación con techo verde, se analizaron los datos de las dos simulaciones del consumo eléctrico para la edificación **Tipo A, Subtipo A5** propuestas por Fuentes Velasco, (2014), donde considera un techo convencional y en el otro, un techo verde extensivo.

#### **6.5.7. Tarifas de energía eléctrica**

Se utilizaron los precios establecidos por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) del año 2021 de la tarifa 1F que es aplicable al servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 33°C, la cual permite un consumo máximo de 2500 kWh/mes antes de ingresar a la tarifa doméstica de alto consumo. Los meses de abril a septiembre se consideraron los más cálidos del año. Los costos por kWh se muestran en la Tabla 5.

Para realizar los cálculos del costo de la energía eléctrica, la CFE utiliza la tarifa del segundo mes completo del bimestre, por lo que se utilizaron las tarifas correspondientes al mes en el que finaliza el periodo de facturación correspondiente.

**Tabla 5.** Costos por kWh según tarifa 1F (CFE, 2021).

Tipo de Consumo	Tarifa por kWh (M.N.) para meses del año 2021					
	Meses menos cálidos					
	Enero	Febrero	Marzo	Octubre	Noviembre	Diciembre
Básico ( $x \leq 75$ ) *	0.855	0.857	0.859	0.873	0.875	0.877
Intermedio ( $75 < x \leq 125$ )	1.034	1.037	1.040	1.061	1.064	1.067
Excedente ( $x > 125$ )	3.026	3.034	3.042	3.098	3.106	3.115
Tipo de Consumo	Meses más cálidos					
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
	Básico ( $x \leq 300$ )	0.633	0.635	0.637	0.639	0.641
Intermedio bajo ( $300 < x \leq 900$ )	0.794	0.796	0.798	0.800	0.802	0.804
Intermedio alto ( $900 < x \leq 1300$ )	1.932	1.937	1.942	1.947	1.952	1.957
Excedente ( $x > 1300$ )	3.05	3.058	3.066	3.074	3.082	3.090

\*  $x$  = energía eléctrica en kilowatt utilizada en una hora (kWh).

## 6.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos experimentales obtenidos del consumo eléctrico y de la energía producida fueron analizados estadísticamente con el software estadístico *IBM SPSS© versión 21*. Para conocer las diferencias entre los grupos experimentales se utilizó un análisis de varianza con un factor, también conocido como ANOVA, para el caso de los datos que presentaron normalidad. Asimismo, durante el periodo de experimentación, se analizó la demanda de energía para saber si ésta superaba a la oferta de los paneles solares.

En referencia al efecto de los paneles solares sobre la ganancia de calor, se analizaron los datos con metodología de análisis de varianza para determinar las diferencias significativas entre la ganancia térmica de los grupos experimentales observando el efecto de la instalación de paneles solares sobre la ganancia térmica en función de la estacionalidad.

## 6.7. INTERFAZ GRÁFICA EMPLEANDO VISUAL BASIC PARA APLICACIONES (VBA) EN MICROSOFT EXCEL

El desarrollo y aplicación de interfaces gráficas por medio de un *UserForm*, conocido también como “formulario”, facilita la cuantificación y estimación de los costos totales de las dos tecnologías ambientales bajo estudio en el presente trabajo. Para el desarrollo de esta herramienta de cómputo se utilizó una hoja de cálculo de *Microsoft Excel* y de *Visual Basic for Applications (VBA)*, por sus siglas en inglés), un lenguaje de programación que funciona mediante la ejecución de macros, llamados también procedimientos, que son capaces de automatizar cálculos repetitivos y avanzados. En el ambiente de *VBA*, se pueden desarrollar interfaces gráficas con un lenguaje de programación orientado a objetos. La interfaz gráfica no es más que el conjunto de imágenes y objetos que representan la información proporcionada y permite realizar acciones (eventos) que a su vez ejecutan métodos y realizan cambios en las propiedades de los mismos objetos (García Pech, 2010).

### 6.7.1. Diseño y programación de la interfaz gráfica

La interfaz gráfica de usuario (GUI, del inglés *Graphical User Interface*) desarrollada en este estudio es una modificación a la GUI presentada por Jesús-Castañeda (2019), en donde se desarrolló una herramienta de cómputo con las mismas características descritas en este apartado que permitió la cuantificación y estimación de los costos de instalación de un techo verde tipo extensivo y de un sistema de paneles fotovoltaicos conectado a la red eléctrica y que incluyen obra civil, la gestión ante CFE y la instalación en la vivienda.

## 6.8. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE COSTOS DE TECHOS VERDES Y PANELES FOTOVOLTAICOS

La recopilación de costos de los materiales y equipos de los sistemas de techos verdes y paneles fotovoltaicos, así como los costos por servicios de honorarios necesarios para su instalación, se delimitaron con ayuda de los lineamientos del Análisis de Ciclo de Vida tipo *Cuna a la Tumba* establecidos por (Guinée, 2002), del cual se consideraron las etapas de:

- Instalación;
- Mantenimiento y/o reemplazo de materiales;
- Desmantelamiento y;
- Disposición final de residuos.

Se cotizó con proveedores nacionales y locales los costos de los sistemas fotovoltaicos y de impermeabilizantes especializados para instalaciones de techos verdes, así como los honorarios por mano de obra y los materiales necesarios para su correcta instalación.

La información recopilada con los contratistas fue el número de jornadas de trabajo y el costo por honorarios de mano de obra y supervisión de la obra. Sin embargo, las cotizaciones de los sistemas integrales de los paneles fotovoltaicos integran los costos de mano de obra y materiales en sus costos totales, por lo que estos se consideraron en conjunto.

Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente para determinar sus medidas de tendencia central y se aplicó la prueba de normalidad correspondiente para determinar la homogeneidad en los costos recopilados, esto es, una menor dispersión o variabilidad en los datos obtenidos.

### 6.8.1. Análisis de los costos y vida útil del techo verde y el sistema de paneles fotovoltaicos

El análisis de costos consideró los diversos costos directos e indirectos, fijos y/o variables de la instalación, mantenimiento y reemplazo, desmantelamiento y disposición final de los residuos para un sistema integrado de techo verde extensivo con un tiempo de vida útil de 40 años. Ulubeyli y Arslan, (2017), consideran 40 años de vida útil para un techo verde. Sin embargo, Mahdiyar *et al.*, (2016), deducen que la esperanza de vida útil de un techo verde sea de más de 40 años.

Así también, se consideraron los costos totales de un sistema interconectado de paneles fotovoltaicos que abarca la demanda energética de la vivienda bajo estudio con un tiempo de vida útil de 25 años (Solar Energy International, 2016). El tiempo de vida útil de un sistema fotovoltaico dependerá de la calidad de los equipos y materiales utilizados, el uso adecuado y la correcta instalación de cada uno de sus componentes, por lo que existe incertidumbre para determinar cuál será el periodo óptimo de vida útil de un sistema. Autores como (Sherwani, Usmani, y Varun, 2010) mencionan 20 años de vida útil en sistemas de paneles fotovoltaicos en su estudio de evaluación de ciclo de vida. Sin embargo, la *Agencia Internacional de Energías Renovables* y la *Agencia Internacional de Energía en Sistemas Fotovoltaicos* (IRENA e IEA-PVPS, 2016) (por sus siglas en inglés), señalan una media de 30 años de vida útil para sistemas fotovoltaicos.

Los costos recopilados del techo verde extensivo presentan mayor incertidumbre en la etapa de instalación. Así también, las cotizaciones obtenidas de proveedores/comercializadores de sistemas interconectados de paneles fotovoltaicos combinan los costos de los equipos y materiales con los costos de mano de obra por instalación, por lo que no es posible determinar el costo unitario que cada comercializadora ofrece a sus productos. Además, el número de cotizaciones obtenidas en campo es muy escaso, por lo que, debido a estas condicionantes, se consideró la simulación estocástica para esta etapa en ambas tecnologías.

### 6.8.2. Aspectos de la simulación estocástica

El análisis de los costos de la etapa de instalación se realizó en *Microsoft Excel* para facilitar su integración con el programa de cómputo y con el método de simulación estocástica tipo Monte Carlo. Las etapas restantes fueron representadas como un modelo determinístico. Los costos de la etapa de instalación del techo verde y el sistema fotovoltaico fueron representados con una distribución normal o función de probabilidad gaussiana una vez comprobada la normalidad de los datos. Para el tratamiento estocástico del modelo, se empleó una simulación tipo Monte Carlo que consistió en realizar 10,000 eventos estocásticos (estimaciones del costo total de instalación) para generar una función de distribución de probabilidad de ese costo total. Esta función de distribución permitió determinar, con bases estadísticas, los valores mínimo, medio y máximo del costo total de instalación con un 95% de intervalo de confianza.

### 6.9. RELACIÓN BENEFICIO-COSTO

El Análisis de Beneficio-Costo es una herramienta analítica para juzgar las ventajas o desventajas económicas de una decisión de inversión al evaluar sus costos y beneficios con el fin de evaluar el cambio de bienestar atribuible a ella. En su marco analítico, figura el concepto subyacente de la perspectiva a largo plazo de los bienes o servicios, que pueden variar de un mínimo de 10 a un máximo de 30 años o más, dependiendo del sector de intervención. De ahí la necesidad de:

- Establecer un horizonte temporal adecuado;
- Pronosticar costos y beneficios futuros;
- Adoptar tasas de descuento apropiadas para calcular el valor presente de los costos y beneficios futuros, y;
- Tener en cuenta la incertidumbre evaluando los riesgos del proyecto (European Commission, 2014).

La relación beneficio-costo (B/C) del presente estudio se desarrolló bajo los criterios metodológicos descritos por Aguaza, (2012); donde en la primera etapa se identificaron los costos de las herramientas y los equipos que integran la instalación de un área aproximada de 63 m<sup>2</sup> de módulos de techo verde extensivo, la instalación de un arreglo solar compuesto por módulos de paneles fotovoltaicos que suministran adecuadamente la demanda energética de una edificación *Tipo A, Subtipo A5* descrita por (Fuentes Velasco, 2014) incluyendo los equipos que asegurarían su correcto funcionamiento. El análisis de los costos se limitó únicamente a las etapas de instalación, mantenimiento, reemplazo de materiales, desmantelamiento y disposición final de residuos al cumplir su tiempo de vida útil.

Con el propósito de calcular el Valor Presente Neto (VPN) de un proyecto de inversión de un sistema combinado de paneles fotovoltaicos con techo verde extensivo, se empleó la expresión de Blank y Tarquin, (1999), también conocida como factor P/F (Ec. 1) y se definieron aquellos conceptos que interrelacionan esta expresión.

Por consiguiente, antes de calcular la relación B/C, todos los beneficios positivos, negativos y costos identificados se configuraron a las mismas unidades monetarias. Se consideró el uso del valor presente para todos los costos y beneficios identificados.

$$P = \sum_{j=i}^N F_j = \left[ \frac{1}{(1+i)^{n_j}} \right] \quad (1)$$

Con ayuda de esta expresión se determinó el valor presente  $P$ , donde  $F_j$  son los costos a futuro, como el mantenimiento y/o reemplazo de equipos y materiales correspondientes a un periodo  $n_j$  siendo  $N$  el tiempo de vida útil del proyecto, a una tasa de interés  $i$  que considera en conjunto una tasa de rendimiento y una tasa de inflación de 7.26%, de acuerdo con un instrumento convencional de ahorro e inversión en México, conocido como CETES directo (CONDUSEF, 2022).

### 6.9.1. Costos

Los costos son los gastos anticipados por construcción, operación, mantenimiento, entre otros, restando cualquier valor de salvamento (Blank y Tarquin, 1999). Los costos son considerados como aquellos requeridos en la inversión inicial. En este sentido, los costos considerados en este apartado fueron la instalación de un techo verde extensivo y la instalación de un sistema interconectado de paneles fotovoltaicos, así como el reemplazo de materiales y/o equipos y el desmantelamiento de estos una vez concluido su tiempo de vida útil.

### 6.9.2. Costos de instalación

Los costos asociados a la instalación del techo verde extensivo están relacionados con las etapas de aplicación de los impermeabilizantes, materia orgánica y la vegetación. En el formulario desarrollado en *Microsoft Excel* permitió enlistarlos de la siguiente manera:

- **Etapa 1.** Lavado y desinfección de losa;
- **Etapa 2.** Aplicación del primario asfáltico;
- **Etapa 3.** Instalación de impermeabilizante prefabricado SBS;
- **Etapa 4.** Instalación de la lámina nodular de polietileno para drenaje antirraíz;
- **Etapa 5.** Aplicación de la materia orgánica y;
- **Etapa 6.** Aplicación de la vegetación. Así también, se definieron los costos de mano de obra y de insumos para su instalación en diferentes pestañas dentro de la misma interfaz gráfica.

Los sistemas fotovoltaicos requieren una importante inversión de capital inicial, pero tienen gastos de mantenimiento bajos. Debido a que las empresas comercializadoras de sistemas de paneles fotovoltaicos ofrecen únicamente información integrada de los costos unitarios de los materiales, equipos, gestiones correspondientes y mano de obra

que ofrecen para su instalación, las cotizaciones con el costo total se ingresaron en este apartado.

### 6.9.3. Reemplazo de equipos y materiales del techo verde y paneles fotovoltaicos

Los fabricantes y comerciantes especializados en impermeabilizantes de techos verdes indican un tiempo de vida útil de 10 años en las membranas drenantes antirraíz de polietileno debido a que estas se encuentran en contacto directo con la materia orgánica, el agua de riego o de las precipitaciones y además se encarga de obstruir el crecimiento excesivo de las raíces de la vegetación con el propósito de evitar un daño en la losa de la vivienda. Debido a esto, se recomienda el reemplazo de la membrana drenante antirraíz cada 10 años, incluyendo los costos de mano de obra que conlleve durante los 40 años de vida útil de todo el sistema de techo verde. Jesús Castañeda (2019) considera los honorarios de la mano de obra por tipo de trabajador, número de trabajadores y los días trabajados en cuatro etapas que conllevan al reemplazo de la membrana drenante considerando una desviación típica en los costos del 30% con la finalidad de abarcar, en medida de lo posible, los costos del mercado (Tabla 6).

**Tabla 6.** Costo de membrana drenante antirraíz y de mano de obra por su reemplazo.

Reemplazo de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje	Mano de Obra	Número de Trabajadores	Costo (MXN)	Días Trabajados	Costo Total por Etapas (MXN)
<b>Etapas 1. Remoción de la vegetación, materia orgánica y membrana drenante</b>	Supervisor Técnico	1	\$500.00	1	\$1,100.00
	Obrero	2	\$300.00		
<b>Etapas 2. Instalación de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje</b>	Supervisor Técnico	1	\$500.00	2	\$2,200.00
	Obrero	2	\$300.00		
<b>Etapas 3. Aplicación de la Materia Orgánica</b>	Supervisor Técnico	1	\$500.00	2	\$2,200.00
	Obrero	2	\$300.00		

Reemplazo de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje	Mano de Obra	Número de Trabajadores	Costo (MXN)	Días Trabajados	Costo Total por Etapas (MXN)
Etapa 4. Aplicación de la Vegetación	Supervisor Técnico	1	\$500.00	2	\$1,600.00
	Obrero	1	\$300.00		
Costo promedio de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje	-	-	-	-	\$13,209.27*
<b>Total</b>					<b>\$20,309.27</b>

Fuente: Adaptado de Jesús Castañeda (2019).

\*Costo promedio obtenido en el mes de octubre del año 2021.

Con respecto a los costos de los paneles fotovoltaicos, los proveedores sostienen que debido a la calidad de los materiales y equipos que se emplean, además de la instalación, operación y mantenimiento adecuados, se espera que estos se mantengan en condiciones operativas hasta un periodo de 25 años de vida útil. Sin embargo, se recomienda que cada 10 años se realice el cambio del cableado eléctrico reforzado que suministra la corriente eléctrica generada desde los paneles fotovoltaicos hasta los sistemas de control (controladores de carga, inversores), en caso de que se encuentren expuestos a las condiciones ambientales que, con el tiempo, puedan generar pérdidas de energía y no garantizar el adecuado funcionamiento de los equipos. Los costos por honorarios de la mano de obra para el cambio de cableado eléctrico dependerán de las dimensiones del sistema fotovoltaico, sin embargo, se estimó un costo de MXN 1,200.00 para todo el sistema.

#### 6.9.4. Desmantelamiento del techo verde y paneles fotovoltaicos

Los costos generados en la etapa de desmantelamiento del techo verde y de los paneles fotovoltaicos se consideraron en la inversión inicial, una vez concluida su vida útil, se requiere el desmantelamiento y la disposición final de los residuos que se generen, por lo que se estimó un costo de mano de obra para este concepto.

Los residuos generados de los techos verdes de características domiciliarias (orgánicos e inorgánicos) serán depositados en contenedores temporales. Estos residuos serán recolectados por el servicio de recolección municipal. Asimismo, los residuos producto de la vegetación y la materia orgánica removida serán colocados en zonas de jardín para su incorporación al suelo por procesos naturales de degradación. Dicho lo anterior, se entiende que estas actividades no generan costos adicionales.

Sin embargo, los residuos generados por los equipos que integran los paneles fotovoltaicos se clasifican como residuos de manejo especial, por lo que existen dos alternativas para su disposición final:

- 1) La contratación de un servicio particular de recolección y disposición final de los residuos o;
- 2) Su disposición por medio de campañas estatales de recolección de residuos de manejo especial, siendo esta última la alternativa seleccionada para no generar un gasto adicional en esta etapa.

#### **6.9.5. Beneficios negativos**

Los beneficios negativos son las desventajas para el propietario cuando el proyecto bajo consideración es implementado (Blank y Tarquin, 1999). Se estableció como beneficio negativo las etapas de mantenimiento del techo verde y de los paneles fotovoltaicos durante el tiempo estimado de la vida útil de estas dos tecnologías.

El mantenimiento del techo verde consiste en el riego, la poda, el deshierbe periódico y la aplicación anual de fertilizantes. En el caso de que el propietario no esté implicado en las actividades de mantenimiento del techo verde, estas serían realizadas por un trabajador cuya jornada de trabajo tendría un costo por honorarios con visitas periódicas de mantenimiento. Jesús-Castañeda (2019) sugiere costos de MXN 300.00 y MXN 350.00 por jornada de trabajo cada 3 meses.

Para el caso de los paneles fotovoltaicos, se recomienda, al menos, una vez cada mes retirar la suciedad o polvo que se encuentre sobre las células fotovoltaicas. Dicho lo anterior, esta actividad no generó un costo adicional considerando que el propietario se encargará del mantenimiento.

#### 6.9.6. Beneficios positivos

Blank y Tarquin (1999) mencionan que los beneficios positivos son aquellas ventajas experimentadas por el propietario. En este apartado se incluye, entre otros, el ahorro energético como principal beneficio positivo asociado al sistema de techos verdes extensivos, así como el ahorro producto de la eficiencia energética de la implementación de los paneles fotovoltaicos asociados.

#### 6.9.7. Relación convencional B/C

Una vez identificados y monetizados los beneficios positivos, los beneficios negativos y los costos, podemos utilizar la ecuación de la relación convencional de beneficio-costos, la cual se calcula de la siguiente manera de acuerdo con Blank y Tarquin (1999):

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Beneficios positivos} - \text{Beneficios negativos}}{\text{Costos}} = \frac{B - BN}{C} \quad (2)$$

donde una relación B/C mayor que 1 indica que el proyecto evaluado es económicamente ventajoso (Blank y Tarquin, 1999).

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 7.1. MONITOREO DE LA VEGETACIÓN

La elección adecuada de una especie vegetal para el desarrollo del techo verde extensivo en las unidades experimentales es de gran importancia para el presente estudio, por lo que esencialmente se seleccionó una especie nativa de México y Centroamérica, optando por la especie herbácea *Tradescantia spathacea* del género *Tradescantia* y familia de las *commelináceas*, como la única variedad vegetal que se propagó en las unidades experimentales. García Trinidad (2019) menciona que la especie vegetal *T. spathacea* se adapta muy bien a las condiciones ambientales presentes en el techo de una edificación, tales como temperaturas elevadas, altos niveles de radiación solar, precipitaciones extraordinarias y/o condiciones de estiaje que puedan presentarse en zonas geográficas de condiciones climatológicas del tipo trópico húmedo.

En la Tabla 7 se registra una siembra inicial de siete individuos de *Tradescantia spathacea* por cada bandeja modular de techo verde para las unidades experimentales del proyecto, obteniendo un total de 22 bandejas que se dividieron en partes iguales para instalarlos en las unidades experimentales 1 y 3. La densidad que representa el conteo de los individuos monitoreados en cada unidad experimental con respecto al área de techo verde, representa un valor de 37 individuos/m<sup>2</sup>. Asimismo, la cobertura vegetal promedio estimada inicialmente fue de 31.6%.

**Tabla 7.** Monitoreo de la vegetación *Tradescantia spathacea*.

Monitoreo de la vegetación						
Etapa	Unidad Experimental	Área total de techo verde (m <sup>2</sup> )	Altura de las plantas (cm)	Individuos por módulo	Densidad (individuos/m <sup>2</sup> )	Cobertura total (%)
Instalación e inicio de monitoreo	UE1	2.1	9-13	7	37	31.6
	UE3	2.1		7	37	31.6
Operación y Mantenimiento	UE1	3.4	16 - 21	6	31	81.5
	UE3	3.4		8	44	51.7
Fin del Monitoreo	UE1	3.4	19-33	9	45	88.1
	UE3	3.4		10	52	85.2

Posteriormente, durante la etapa de operación y mantenimiento se desarrollaron las actividades de riego periódico con una frecuencia de cada dos días, la aplicación de fertilizante para las plantas en dos ocasiones (junio y septiembre), la reproducción vegetativa de los individuos y la remoción periódica de otras especies herbáceas (deshierbe) que compiten por un espacio en los módulos del techo verde, pero que son ajenas al presente estudio. De acuerdo con la Tabla 7, durante esta etapa de operación y mantenimiento se puede notar que, a pesar de que la cobertura vegetal es mayor, el número de individuos contabilizados decreció debido a que los individuos muy pequeños y en crecimiento no se tomaron en cuenta en el conteo, pero sí en su cobertura vegetal, además de que esta última no permitía el conteo y medición de todos los individuos en algunas bandejas modulares de techo verde por lo que se integraron en una cobertura total. Finalmente, el resultado del establecimiento y crecimiento satisfactorio permitió que al final del monitoreo incrementara el número de individuos por cada bandeja modular alcanzándose coberturas vegetales de 88.1% y 85.2% en las UE1 y UE3, respectivamente.

Durante la segunda y tercera etapa de monitoreo, la UE1 demostró el mayor incremento de la cobertura vegetal con valores que fueron de 81.5% hasta el 88.1%, respectivamente. Sin embargo, la longitud y el desarrollo de las rosetas de hojas de los individuos de *Tradescantia spathacea* predominó en los módulos de techo verde extensivo que se localizaron debajo del panel fotovoltaico (Figura 6). Al respecto, Hui y Chan (2011) afirman que los paneles solares aportan sombra a secciones del techo verde y por lo tanto reducen su exposición al sol y las altas tasas de evaporación que normalmente experimentan. El sombreado reduce el estrés por exceso de temperatura y sequía en las plantas por lo que mejora el crecimiento y la viabilidad del ecosistema de los techos verdes ofreciendo también la posibilidad para el desarrollo de más especies vegetales. Asimismo, plantean que esto podría permitir el uso de otras especies que aumenten la captura de carbono, lo que justificaría un beneficio positivo al momento de evaluar el análisis económico de esta tecnología ambiental.



a) Unidades UE1 (al frente) y UE2 (atrás)

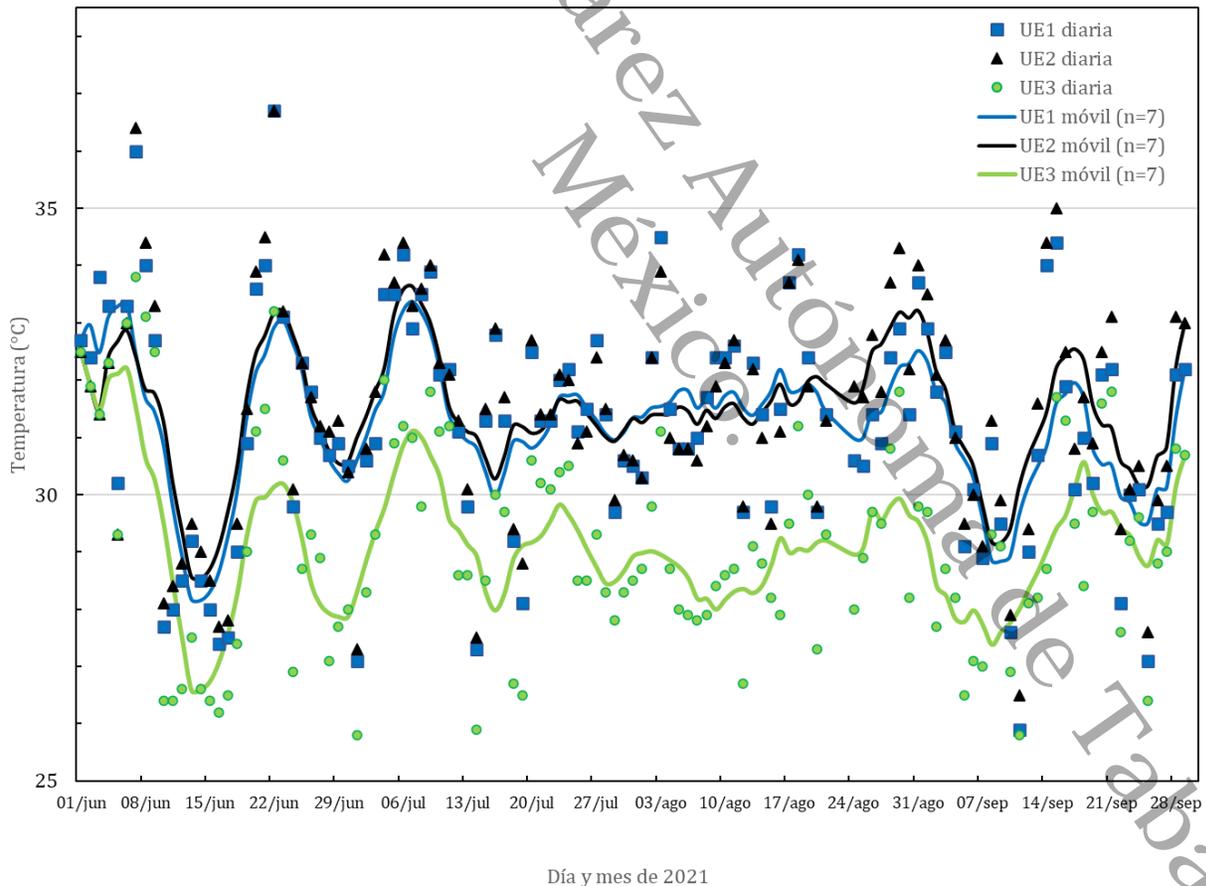


b) Unidad UE3

**Figura 6.** Unidades experimentales del estudio.

## 7.2. TEMPERATURA DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES

El monitoreo de la temperatura ha permitido observar el comportamiento de la ganancia térmica en las unidades experimentales. De manera general, en la Figura 7 se observa que las temperaturas más bajas fueron registradas en la UE3, la que únicamente posee bandejas modulares de techo verde extensivo. Las UE1 y UE2 presentaron fluctuaciones similares ante los registros de temperatura; sin embargo, la tendencia temporal de la temperatura en UE1 (panel fotovoltaico más techo verde) es ligeramente menor que la obtenida para la UE2 (un panel fotovoltaico).

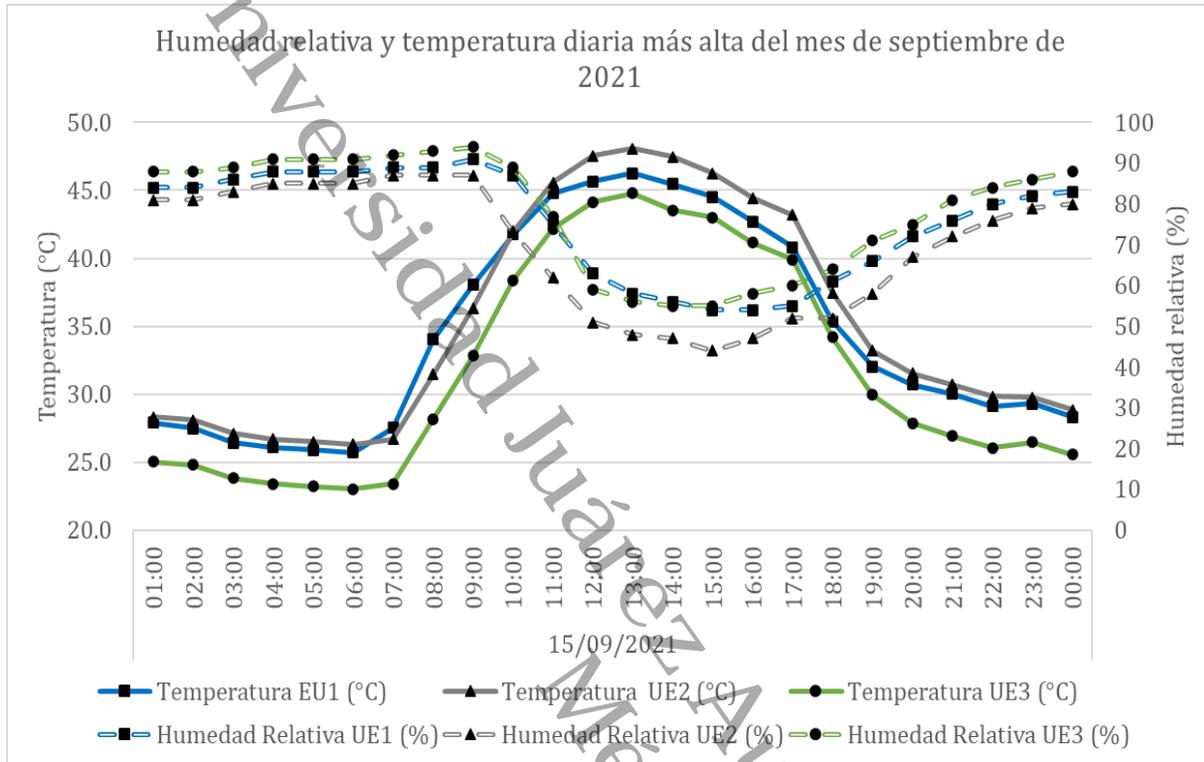


**Figura 7.** Temperatura de las unidades experimentales y promedio móvil del periodo de monitoreo.

Por su parte, los registros de las condiciones y eventos meteorológicos como la nubosidad y las precipitaciones también permitieron comprender el comportamiento de las temperaturas en las unidades experimentales durante el periodo de estudio. Por ejemplo, en el mes de junio se registraron precipitaciones aisladas los días 4, 5, 24 y 25 mientras que se presentaron precipitaciones sucesivas acompañadas de alta nubosidad durante los días 9 y 20, por lo que se infiere que estos factores influyeron en los valores de las temperaturas bajas obtenidas y representadas en la Figura 7.

Las tendencias horarias de temperatura y humedad relativa muestran la relación intrínseca entre estos parámetros durante un día muy caluroso (Figura 8). En la figura se observa que, a medida que la temperatura aumenta, la humedad relativa disminuye, particularmente en las horas más cálidas (11:00 a 17:00 horas). Las temperaturas más altas en el ambiente registradas el día 15 de septiembre, se obtuvieron a las 13 horas con valores de 46.3 °C, 48.1 °C y 44.8 °C de las UE1, UE2 y UE3, respectivamente. Los porcentajes más altos de humedad relativa predominan en la UE3 durante todo el día con valores mínimos de 54% y máximos de 94%; mientras que la UE1 obtuvo valores mínimos de 54% y máximos de 91%. Sin embargo, en las horas más cálidas (10:00 a 15:00 horas) existen similitudes con los valores reportados en la UE1, que también cuenta con bandejas modulares de techo verde. No obstante, bajo las mismas condiciones de temperatura, la humedad relativa en la UE2 se encuentra entre 8% y 10% por debajo de los valores de la UE1 y UE3, respectivamente.

Autores como Jahanfar, Drake, Sleep, y Margolis (2016), compararon las tasas de evapotranspiración de módulos de techo verde sin sombra y las tasas de evapotranspiración de uno que integraba un panel fotovoltaico encima de ellos utilizando lisímetros durante los períodos de verano y otoño en Toronto, Canadá. La evapotranspiración medida en techos verdes con panel fotovoltaico fue 81% y 38% más baja que la evapotranspiración medida para techos verdes sin sombra en períodos de verano con riego y otoño sin riego, respectivamente.



**Figura 8.** Comportamiento de la temperatura y la humedad relativa en el día más cálido del mes de septiembre

Los niveles altos de humedad relativa en las unidades experimentales de este estudio pueden relacionarse entonces con las funciones biológicas de evapotranspiración del agua en las especies vegetales. Al respecto, Köhler (2002), deduce que cuando los techos verdes y los paneles fotovoltaicos se combinan en el techo de un edificio, la integración puede mejorar las funciones y efectividad de cada uno de ellos mediante los efectos de enfriamiento y sombra. Chemisana y Lamnatou (2014) afirman que la vegetación proporciona un efecto de enfriamiento en los sistemas fotovoltaicos, lo que puede conducir a un aumento en la producción de energía eléctrica y que este efecto de enfriamiento puede variar según la especie vegetal. Por su parte, autores como Hui y Chan (2011); Morakinyo, Dahanayake, Ng, y Chow, (2017) plantean que la evapotranspiración a través de las funciones biológicas de la vegetación puede crear un efecto de enfriamiento que permite una mayor eficiencia en los paneles fotovoltaicos y,

al mismo tiempo, estos protegen a las plantas de la exposición solar excesiva y la evaporación, mejorando así su crecimiento.

Con respecto a los resultados de la temperatura de la losa, se obtuvo un total de 28 días de monitoreo. La recolección de datos permitió conocer las diferencias entre la losa y las unidades experimentales, además de reconocer los beneficios asociados a los sistemas integrados de techos verdes, como la mitigación de los efectos de la isla de calor. En la Tabla 8 se presenta una comparación múltiple o combinada que muestra la diferencia de las temperaturas encontradas en cada unidad experimental.

**Tabla 8.** Comparación múltiple de las temperaturas de las unidades experimentales.

Unidades Experimentales		Diferencia de temperatura
UE1	UE2	-0.18
	UE3	1.99
	Temperatura de losa	-1.20
UE2	UE1	0.18
	UE3	2.16
	Temperatura de losa	-0.98
UE3	UE1	-1.99
	UE2	-2.16
	Temperatura de losa	-3.03
Temperatura de losa	UE1	1.20
	UE2	0.98
	UE3	3.03

Las diferencias se elaboraron a partir de las medias diarias de las temperaturas recolectadas durante el periodo de monitoreo. Los resultados indican que, para el caso de la UE1, se encontró que la temperatura es 0.18 °C más baja con respecto a la UE2; 1.99 °C más alta con relación a la UE3 y 1.20 °C más baja que los registros de la temperatura de la losa. Para el caso de la UE2, se encontró que la temperatura es 0.18 °C más alta con respecto a la UE1; 2.16 °C más alta con relación a la UE3 y 0.98 °C más baja que la temperatura de la losa. En la UE3 se encontró que la temperatura es 1.99 °C más baja con respecto a la UE1; 2.16 °C más baja con relación a la UE2 y 3.03 °C más baja que la temperatura de la losa. Finalmente, la temperatura de la losa es 1.20 °C más alta que en la UE1; 0.98 °C más alta con respecto a la UE2 y 3.03 °C más alta que la UE3.

En resumen, la unidad con techo verde UE3, registró una temperatura más baja, con un promedio de 3.03 °C con respecto a la temperatura de la losa y una temperatura de casi 2 °C más baja con respecto a las unidades experimentales que poseen un panel fotovoltaico (UE1 y UE2). La unidad que combina al panel fotovoltaico con el techo verde (UE1) registró una temperatura promedio de 1.2 °C más baja con respecto a la temperatura de la losa.

Cabe señalar que, el periodo de monitoreo en el mes de julio y septiembre, se presentó un evento climático llamado “canícula”, el cual consiste en la disminución de las precipitaciones en las regiones noreste y centro-sur del país. La Secretaría de Medio Ambiente informa que, durante esta temporada, en Mesoamérica, a la cual pertenece la región centro-sur de México, cada año se observa un comportamiento característico en las precipitaciones caracterizado por el registro de dos periodos de lluvia máxima en junio y septiembre. En contraste, en los meses de julio y agosto disminuye el nivel de lluvias, etapa a la que se le conoce como sequía intraestival o del medio verano, canícula o veranillo, dependiendo de la región donde se experimente. (SEMARNAT, 2010). La canícula es un evento climático generado por la presencia de los vientos denominados “alisios”, los cuales soplan fuertemente en el Golfo de México, impidiendo el desarrollo de nubes convectivas en el océano y, como consecuencia, la formación de lluvia en la parte continental de México. El dominio de vientos alisios durante julio y agosto impide el desarrollo de nubes convectivas profundas, a su vez permite mayor incidencia de radiación solar y, por lo tanto, una mayor temperatura de superficie, la cual es asociada con el calor agobiante de la canícula.

### **7.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA TEMPERATURA EN LAS UNIDADES EXPERIMENTALES**

El análisis estadístico coadyuvó a definir si esas similitudes o diferencias cuantitativas en las temperaturas descritas en la Tabla 9 son significativas entre ellas o no, por lo que la prueba *ANOVA* comparó las medias de los valores de estas tres unidades experimentales y de la temperatura de la losa. Para el cumplimiento de un análisis

estadístico adecuado y la aplicación de la prueba paramétrica *ANOVA* (Wackerly *et al.* 2008), se comprobó la normalidad de los valores recolectados con el test de *Kolmogórov-Smirnov* con corrección de *Lilliefors* (Abdi y Molin, 2007) para las tres unidades experimentales y el test de *Shapiro-Wilk* (Wilk y J., 1968) para la temperatura de la losa, este último debido a la menor cantidad de registros.

**Tabla 9.** Pruebas de normalidad de la temperatura en las unidades experimentales.

Unidades Experimentales	Kolmogórov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Temperatura de losa	0.151	28	0.100	0.977	28	<b>0.778</b>
UE1	0.062	124	<b>0.200*</b>	0.987	124	0.316
UE2	0.054	124	<b>0.200*</b>	0.993	124	0.804
UE3	0.079	124	<b>0.054</b>	0.981	124	0.072

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Las pruebas de normalidad correspondientes a los datos obtenidos de cada una de las unidades experimentales indican un *p-valor* mayor para un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , por lo que se demuestra una homogeneidad en los datos (Tabla 9). De igual manera, la *prueba de Levene* contrastó la igualdad de varianzas entre las unidades experimentales con respecto a los datos de la temperatura. El *p-valor* de 0.084 para un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  comprueba la homogeneidad de varianzas entre las muestras obtenidas de cada una de las unidades experimentales estudiadas (Tabla 10). Por consiguiente, la prueba de *ANOVA* demuestra con un *p-valor* por debajo del nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , que en al menos una unidad experimental es significativamente diferente de las otras (Tabla 11).

**Tabla 10.** Prueba de homogeneidad de varianzas de la temperatura en las unidades experimentales.

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
2.340	3	396	<b>0.084</b>

**Tabla 11.** Prueba de ANOVA de un factor de las temperaturas en las unidades experimentales.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
<b>Inter-grupos</b>	431.541	3	143.847	41.229	<b>0.000</b>
<b>Intra-grupos</b>	1381.624	396	3.489		
<b>Total</b>	1813.165	399			

Para identificar estas unidades experimentales, se realizó una prueba de comparaciones múltiples *Post Hoc* y contrastar qué media difiere de otra (Tabla 12). Estas comparaciones permitieron controlar la tasa de error al efectuar varios contrastes utilizando las mismas medias y, además, asumiendo que las varianzas son estadísticamente iguales, se seleccionó la prueba *HSD de Tukey*.

Las comparaciones múltiples de la Tabla 12 indican que la UE1 y UE2 con un *p-valor* de 0.867 para un nivel de significancia  $\alpha=0.05$  no representan estadísticamente una diferencia significativa en la media de sus temperaturas. El *p-valor* inferior al nivel de significancia de la UE3 indica que existen diferencias significativas en relación con las demás unidades experimentales y la temperatura de la losa. Asimismo, la temperatura de la losa presenta diferencias significativas con respecto a las tres unidades experimentales del proyecto.

**Tabla 12.** Comparaciones múltiples de las temperaturas en las unidades experimentales.

(a) Unidades Experimentales	(b) Unidades Experimentales	Diferencia de medias (a-b)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					inferior	superior
<b>UE1</b>	UE2	-0.183	0.237	<b>0.867</b>	-0.795	0.429
	UE3	1.913*	0.237	<b>0.000</b>	1.301	2.525
	Losa	-1.357*	0.391	<b>0.003</b>	-2.365	-0.348
<b>UE2</b>	UE1	0.183	0.237	<b>0.867</b>	-0.429	0.795
	UE3	2.160*	0.237	<b>0.000</b>	1.484	2.708
	Losa	-1.174*	0.391	<b>0.015</b>	-2.182	-0.165
<b>UE3</b>	UE1	-1.977*	0.237	<b>0.000</b>	-2.525	-1.301
	UE2	-2.160*	0.237	<b>0.000</b>	-2.708	-1.484
	Losa	-3.334*	0.391	<b>0.000</b>	-4.278	-2.261

(a) Unidades Experimentales	(b) Unidades Experimentales	Diferencia de medias (a-b)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					inferior	superior
Temperatura de losa	UE1	1.357*	0.391	<b>0.003</b>	0.348	2.365
	UE2	1.174*	0.391	<b>0.015</b>	0.165	2.182
	UE3	3.334*	0.391	<b>0.000</b>	2.261	4.278

\*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

En la Tabla 13 se agrupan en tres subconjuntos homogéneos las unidades experimentales con relación a los valores observados en la tabla anterior. En el subconjunto dos se encuentra la UE1 y la UE2 con un *p-valor* de 0.942 que comprueba estadísticamente, que no existen diferencias significativas entre ellas. Así también, la UE3 y la temperatura de la losa contrastan una diferencia entre ellas y las demás unidades experimentales.

**Tabla 13.** Subconjuntos homogéneos de la prueba HSD de Tukey de las temperaturas en las unidades experimentales.

Unidades Experimentales	N	Subconjunto para $\alpha = 0.05$		
		1	2	3
UE3	124	<b>29.341</b>		
UE1	124		<b>31.254</b>	
UE2	124		<b>31.437</b>	
Temperatura de losa	28			<b>32.611</b>
<b>Sig.</b>		1.000	0.942	1.000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Diversos autores mencionan las bondades que ofrecen los techos verdes y las especies vegetales asociadas con los sistemas fotovoltaicos, por ejemplo, la sombra y la evapotranspiración, que permiten regular las temperaturas en el área circundante, incluyendo la de estas dos tecnologías implementadas. (Hui y M., 2011) consideran que los beneficios de la integración de los sistemas de techos verdes y paneles fotovoltaicos podrían contribuir al desarrollo sostenible de edificios y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Los efectos térmicos que observó comparando un

sistema de techos verdes y paneles fotovoltaicos contra un sistema de techo verde fue una diferencia de temperatura entre los 4 y 5 °C.

El estudio afirma que los efectos de las sombras son importantes para el crecimiento saludable y el bienestar de la vegetación, especialmente durante los períodos calurosos de verano. En cuanto a los paneles fotovoltaicos con techo verde, los autores encontraron que las medidas de temperatura tuvieron de 5 a 11 °C más bajos que el sistema fotovoltaico sin techo verde, señalando que estas diferencias se registraron bajo un sol radiante cuando los paneles fotovoltaicos producían una alta potencia eléctrica. El estudio sugiere que, para maximizar el efecto de enfriamiento, la distribución y el espaciado del sistema integrado deben diseñarse con cuidado. El tamaño y la escala del reverdecimiento deben ser lo suficientemente grandes como para contribuir a enfriar el entorno. El panel fotovoltaico y la vegetación deben colocarse a una distancia cercana para que el enfriamiento por evaporación pueda influir directamente en los paneles fotovoltaicos. Así también, los techos verdes con riego por aspersión podrían mejorar el enfriamiento al aumentar el nivel de humedad y aumentar el vapor de agua en el aire. Si el sistema de riego y las precipitaciones se organizan correctamente, el agua también podría ayudar a eliminar la suciedad y el material particulado de los paneles fotovoltaicos.

#### **7.4. ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS**

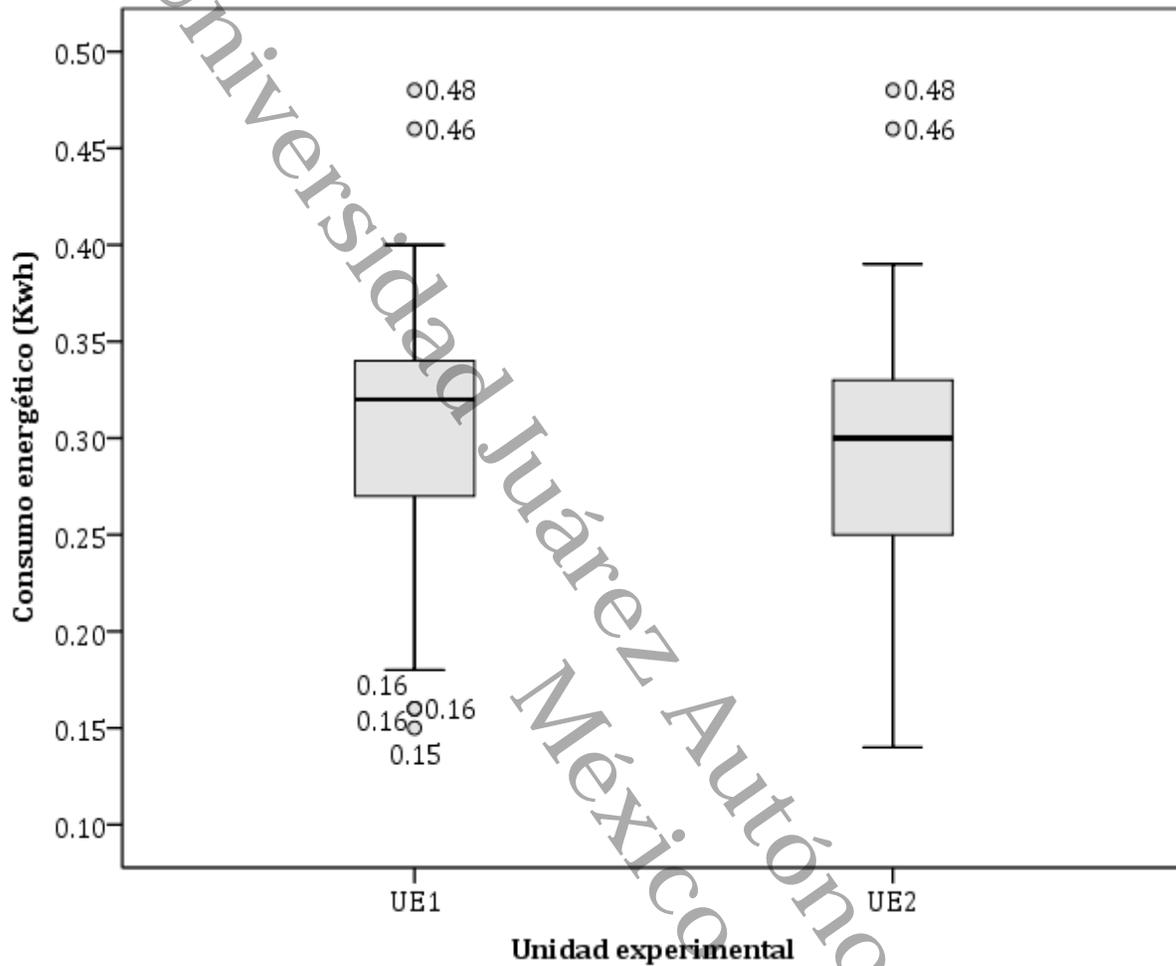
La recolección de datos proporcionó 104 registros del tiempo de descarga de las baterías y del consumo eléctrico en las UE1 y UE2. El tiempo y el consumo eléctrico fueron medidos en unidades de horas (h) y kilowatt-hora (kWh), respectivamente. Sin embargo, se realizó una validación de los datos obtenidos con los supuestos de que el consumo de la energía eléctrica almacenada en las baterías solares se diera en el mismo horario del día y que solo se aceptaran los registros cuando estas se hubiesen descargado completamente un día anterior, de esta manera, se obtienen mediciones diarias del consumo eléctrico y del tiempo de descarga más precisos. Asimismo, y con la

finalidad de comparar las unidades experimentales, se descartaron aquellos registros en donde se emplearon numerosos aparatos eléctricos y electrodomésticos para el consumo de la energía almacenada; debido a que, frecuentemente, la demanda energética no era equitativa en ambas unidades experimentales, lo que ocasionaba un sesgo amplio en el tiempo de descarga y, por ende, habría causado una mala interpretación de los datos. Debido a lo anterior, solo se incluyó el tiempo de descarga con registros de consumo energético por medio de un foco incandescente de 100 W de potencia conectado en cada unidad experimental.

En la Figura 9 se representan los resultados del consumo eléctrico correspondiente a las unidades experimentales. En el diagrama de cajas se indica que la UE1 registró un 50% de los datos distribuidos entre 0.27 kWh (cuartil Q1) y 0.34 kWh (Cuartil Q3), con una mediana de 0.32 kWh y una media de 0.30 kWh. Los mínimos y máximos corresponden a los valores de 0.17 kWh y 0.40 kWh, respectivamente. El rango intercuartil de los datos demuestra que existen cuatro valores atípicos de 0.15 kWh y 0.16 kWh por debajo de los valores mínimos, así también, se observan dos valores atípicos de 0.46 kWh y 0.48 kWh en los valores máximos.

Con respecto a la UE2, se observa una caja más distribuida hacia valores inferiores con el 50% de los datos entre 0.25 kWh (Q1) y 0.33 kWh (Q3), con una mediana de 0.30 kWh y una media de 0.28 kWh. Los mínimos y máximos corresponden a los valores de 0.14 kWh y 0.39 kWh, respectivamente. El rango intercuartil en los datos evidencia que existen dos valores atípicos de 0.46 kWh y 0.48 kWh.

Las observaciones de estos datos atípicos se examinaron y corroboraron en las bitácoras de registro de consumo eléctrico, temperatura, nubosidad, humedad relativa y precipitación/riego; obteniendo el siguiente análisis:



**Figura 9.** Diagrama de cajas y bigotes del consumo energético de las unidades experimentales 1 y 2

Los datos atípicos de 0.46 kWh y 0.48 kWh observados en los valores máximos de consumo eléctrico de ambas unidades experimentales corresponden a los días 21 y 29 de junio, respectivamente. Los registros de temperatura indican una temperatura media y máxima de 35.8 °C y 53.5 °C, respectivamente para el día 21 de junio; y una temperatura media y máxima de 31.9 °C y 46.7 °C, respectivamente para el día 29 de junio. Los registros de nubosidad indicaron días soleados sin nubosidad en horas pico. Además, se observó que no se requirió de actividades de riego en el techo verde debido a que, en ambas fechas, se tiene registro de precipitaciones continuas tres días anteriores al 21 y 29 de junio, con magnitudes de 4 mm a 37 mm. Otro factor importante fue el

horario inicial del uso de la energía eléctrica en estos días. La hora inicial del consumo eléctrico de los datos obtenidos se encuentran, por lo general, entre las 19:00 y 21:00 horas. En los días 21 y 29 del mes de junio, el consumo eléctrico comenzó dentro del rango horario de las 18:00 horas. A esta hora, los paneles fotovoltaicos aún se encontraban recibiendo, aunque en menor medida, radiación solar de la etapa crepuscular en los días señalados, por lo que se espera que el registro del consumo eléctrico fuera mayor.

En la UE1 se observó en los valores mínimos de consumo un dato atípico de 0.15 kWh (el 1 de julio); y tres datos atípicos de 0.16 kWh (12 y 13 de junio, 14 de julio). En general, los registros de temperatura ambiente indican valores con temperaturas medias que van de 27.1 °C a 29.2 °C y máximas de 35.7 °C a 47.8 °C. Los registros de nubosidad indicaron días nublados y parcialmente nublados en horas de sol. Así también, se presentaron lluvias continuas en los días 11 y 12 de junio y desde dos días anteriores con precipitaciones extraordinarias que variaron de 41 mm a 69 mm, mientras que el 14 de julio se presentaron precipitaciones de 4 mm.

## 7.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONSUMO Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

El análisis de los datos dio como resultado 89 registros en cada una de las unidades experimentales. En la Tabla 14 se observa que la prueba de normalidad de *Kolmogórov-Smirnov* con corrección de *Lilliefors* indican con un *p-valor* < 0.05 para un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , que el consumo eléctrico en las UE1 y UE2 no siguen una distribución normal entre sus datos.

**Tabla 14.** Pruebas de normalidad del consumo energético de las unidades experimentales.

Unidad Experimental	Kolmogórov-Smirnov <sup>a</sup>			
	Estadístico	gl	Sig.	
Consumo energético	UE1	0.123	89	<b>0.002</b>
	UE2	0.109	89	<b>0.011</b>

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Para determinar las diferencias significativas entre las unidades experimentales, se realizó la prueba no paramétrica de *U de Mann-Whitney* (Wackerly *et al.* 2008), comparando las medianas de estos grupos independientes (Tabla 16).

**Tabla 15.** Rango promedio y suma de rangos del consumo energético de las unidades experimentales.

Unidades Experimentales	N	Rango promedio	Suma de rangos	
Consumo energético	UE1	89	97.34	8663.0
	UE2	89	81.66	7268.0
	<b>Total</b>	178		

**Tabla 16.** Prueba de U de Mann-Whitney del consumo energético de las unidades experimentales.

Estadísticos de contraste <sup>a</sup>	Consumo energético
U de Mann-Whitney	3263.000
W de Wilcoxon	7268.000
Z	-2.033
<b>Sig. asintót. (bilateral)</b>	<b>0.042</b>

a. Variable de agrupación: Unidades Experimentales

Los resultados de la prueba demuestran con un  $p$ -valor de 0.042 que sí existen diferencias significativas en el consumo energético entre las unidades experimentales 1 y 2.

**Tabla 17.** Estadísticos del consumo eléctrico de las unidades experimentales

Unidades Experimentales	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
<b>Consumo energético</b>	UE1	89	0.306	0.065
	UE2	89	0.289	0.066

El tamaño del efecto de la  $g$  de *Hedges* para datos no paramétricos y la comparación de dos muestras independientes, expresa el número de desviaciones típicas de diferencia que hay entre los resultados del consumo energético en las unidades experimentales bajo estudio (UE1 que integra un panel fotovoltaico sobre un techo verde y la UE2 que comprende un panel fotovoltaico sin techo verde) utilizando los estadísticos de cada unidad experimental expuestos en la Tabla 17. Para tal caso, se obtuvo un tamaño del efecto pequeño con una desviación típica de 0.257, lo que indica que una pequeña parte de una mayor generación eléctrica está dada por la integración del techo verde en la UE1.

Es importante señalar que se obtuvo el promedio de las diferencias del consumo eléctrico de ambas unidades experimentales encontrándose un mayor tiempo de descarga y consumo energético en la UE1 con un resultado de 0.016 kWh/día (16 Wh/día). Este resultado podría atribuirse a la sinergia del techo verde extensivo con el panel fotovoltaico, lo que puede representarse también como un incremento mediano de 1.3% en la generación diaria de energía eléctrica y un incremento máximo de 2.8% durante las horas pico de sol, considerando que los paneles fotovoltaicos instalados en ambas unidades experimentales tienen una potencia máxima de 100 W y que esta potencia fue menor en campo debido al efecto de la temperatura.

Hui y Sam, (2011) demostraron una eficiencia mensual de 8.4% en el consumo energético de un edificio donde integraba los techos verdes y paneles fotovoltaicos comparándolo con un edificio solamente con paneles fotovoltaicos. El estudio de caso lo

desarrolló por medio de cuatro simulaciones de los efectos térmicos y energéticos con ayuda del software *EnergyPlus* para la modernización del techo de un edificio en Hong Kong. En otra investigación, Osma-Pinto y Ordóñez-Plata, (2019) realizaron un estudio experimental describiendo la influencia de tres factores en el rendimiento de los paneles fotovoltaicos en climas tropicales cálidos: altura de instalación (25, 50, 75 y 100 cm), tipo de techo (techo verde y concreto) y velocidad del aire (0, 1.15 y 2.10 m/s). En sus resultados, señalan que un sistema de techo verde integrado con paneles fotovoltaicos puede generar entre un 1.0% ( $\pm 0,4\%$ ) y un 1.3% ( $\pm 0,4\%$ ) más energía por día que un sistema fotovoltaico instalado en un techo de losa a una altura media de 50 cm por encima de la superficie del techo. De manera similar, Chemisana y Lamnatou, (2014) reportaron eficiencias de 1.3% a 3.3% en la generación de energía eléctrica en paneles fotovoltaicos asociados a techos verdes con dos especies vegetales en comparación con paneles fotovoltaicos sobre un techo con grava en un periodo de cinco días en verano, bajo condiciones de clima mediterráneo, en España.

Respecto a la eficiencia de los paneles fotovoltaicos, Makrides, *et al.*, (2009) realizaron investigaciones en Chipre y Alemania acerca de los coeficientes de la temperatura en trece tipos diferentes de módulos fotovoltaicos mediante mediciones directas y datos meteorológicos recopilados para finalmente compararlos con los coeficientes de temperatura proporcionados por los fabricantes de los módulos solares. De esta manera demostró que las altas temperaturas pueden disminuir la productividad del panel fotovoltaico hasta en un 25% y considera que se puede aplicar un valor de -0.45% por cada grado centígrado para las células fotovoltaicas de silicio cristalino. Ubertini y Desideri, (2003) mencionan una tasa lineal de decremento en la eficiencia energética de los paneles fotovoltaicos de 0.025% por grado Celsius a temperaturas ambiente mayores a 28 °C, para un panel fotovoltaico instalado en un techo de tejas, donde alcanza los 38 °C.

## 7.6. COSTOS UNITARIOS DEL TECHO VERDE Y SISTEMA DE PANELES FOTOVOLTAICO

Las tablas que se muestran a continuación son resultado de la recopilación de costos obtenidos por medio de cotizaciones y de sitios web oficiales de empresas y/o comercializadoras nacionales especializadas en impermeabilizantes de techos verdes. La cantidad de materiales requeridos se calculó de acuerdo con las dimensiones de la edificación *Tipo A, subtipo A5* propuesta por Fuentes Velasco, (2014). Así también, se obtuvo la recopilación de costos por honorarios de mano de obra civil para aplicación de los impermeabilizantes e instalación del techo verde extensivo, así como de su desmantelamiento al final de su tiempo de vida útil del estudio de Jesús-Castañeda (2019).

Con base en los costos obtenidos, se utilizaron los precios unitarios de cada uno de los materiales y mano de obra requerida para un adecuado tratamiento dentro del programa de cómputo desarrollado en *Microsoft Excel*.

**Tabla 18.** Costos de materiales impermeabilizantes para techo verde de la comercializadora 1.

<b>Comercializadora 1</b> <b>Materiales de impermeabilización</b>	<b>Descripción del Producto</b>	<b>Presentación</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo por unidad (MXN)*</b>
<b>Primario asfáltico</b>	Primario asfáltico base agua de aplicación en frío de excelente adherencia sobre concreto y mortero.	Cubeta de 19 L	1	691.38
<b>Impermeabilizante prefabricado SBS (estireno butadieno estireno)</b>	Membrana impermeable prefabricada de asfalto modificado con polímero SBS autoadherible	Rollo de 20 m <sup>2</sup>	4	6,083.00
<b>Membrana impermeabilizante drenante antirraíz</b>	Membrana impermeable prefabricada de asfalto modificado APP (Polipropileno Atáctico), con aditivo antirraíz, diseñada especialmente para sistemas de techo verde.	Rollo de 10 m <sup>2</sup> ; espesor de 4.0 mm	8	1,640.01
	Membrana de polietileno de alta densidad (HDPL) sin geotextil, que funciona como sistema de protección y drenaje.	Rollo de 40 m <sup>2</sup> ; espesor de 0.6 mm	2	3,599.08

\*Costos obtenidos en el mes de octubre de 2021. Incluyen IVA.

**Tabla 19.** Costos de materiales impermeabilizantes para techo verde de la comercializadora 2.

Comercializadora 2 Materiales de impermeabilización	Descripción del Producto	Presentación	Cantidad	Costo por unidad (MXN)*
<b>Primario asfáltico</b>	Compuesto asfáltico para sellado de superficies previo a la aplicación de sistemas impermeables y membranas prefabricadas.	Cubeta de 19 L	1	1,804.05
<b>Impermeabilizante prefabricado SBS (estireno butadieno estireno)</b>	Manto impermeable prefabricado con refuerzo poliéster y protección antirraíz.	Rollo de 10 m <sup>2</sup>	8	3,050.00
<b>Membrana impermeabilizante drenante antirraíz</b>	Película de polietileno calibre 600, recomendado como refuerzo	Rollo de 198 m <sup>2</sup>	1	9,203.44
	Laminado de polietileno semirrígido de alta densidad moldeado para facilitar el drenado de agua.	Rollo de 48.8 m <sup>2</sup>	2	9,176.76
	Laminado de polietileno moldeado con geomembrana para facilitar el drenado de agua y retener finos de sustrato.	Rollo de 48.8 m <sup>2</sup>	2	14,107.92

\*Costos obtenidos en el mes de octubre de 2021. Incluyen IVA.

**Tabla 20.** Costos de materiales impermeabilizantes para techo verde de la comercializadora 3.

Comercializadora 3 Materiales de impermeabilización	Descripción del Producto	Presentación	Cantidad	Costo por unidad (MXN)*
<b>Primario asfáltico</b>	Sellador primario, base solvente para superficies de concreto.	Cubeta de 19 L	1	534.00
<b>Impermeabilizante prefabricado SBS (estireno butadieno estireno)</b>	Impermeabilizante prefabricado formulado a base de asfalto, modificado SBS.	Rollo de 10 m <sup>2</sup>	8	1,397.85
<b>Membrana impermeabilizante drenante antirraíz</b>	Membrana impermeabilizante antirraíz prefabricada, con alta elasticidad y resistencia a la penetración de raíces.	Rollo de 10 m <sup>2</sup> ; espesor 4mm.	8	1,940.11
	Lámina nodular de polietileno de alta densidad para drenaje de sistemas de impermeabilización en jardines elevados.	Rollo de 42 m <sup>2</sup> ; espesor 10 mm.	2	4,467.39

\*Costos obtenidos en el mes de octubre de 2021. Incluyen IVA.

**Tabla 21.** Costos de materiales impermeabilizantes para techo verde de la comercializadora 4.

Comercializadora 4 Materiales de impermeabilización	Descripción del Producto	Presentación	Cantidad	Costo por unidad (MXN)*
<b>Primario asfáltico</b>	Primario asfáltico base solvente para sellado de superficies.	Cubeta de 19 L	1	752.59
<b>Impermeabilizante prefabricado SBS (estireno butadieno estireno)</b>	Impermeabilizante prefabricado, protección para la losa o cimentación.	Rollo de 49 m <sup>2</sup>	2	3,675.00
<b>Membrana impermeabilizante drenante antirraíz</b>	Membrana con nódulos hecha de un polietileno especial de alta densidad y tejido geotextil	Rollo de 49 m <sup>2</sup>	2	6,125.00
	Polietileno antirraíz	Rollo de 90m <sup>2</sup>	1	3,150.00

\*Costos obtenidos en el mes de octubre de 2021. Incluyen IVA.

**Tabla 22.** Costos de materiales de impermeabilización para techo verde de la comercializadora 5.

Comercializadora 5 Materiales de impermeabilización	Descripción del Producto	Presentación	Cantidad	Costo por unidad (MXN)*
<b>Primario asfáltico</b>	Primario asfáltico base solvente, promotor de adherencia en sistemas de impermeabilización asfálticas, base solvente o prefabricada.	Cubeta de 19 L	1	880.67
<b>Impermeabilizante prefabricado SBS (estireno butadieno estireno)</b>	Impermeabilizante prefabricado a base de bitumen modificado SBS y protección total contra la penetración de raíces.	Rollo de 10 m <sup>2</sup>	8	2,547.94
<b>Membrana impermeabilizante drenante antirraíz</b>	Membrana geotextil de poliéster con soportes de polipropileno rígido, complemento filtrante del Sistema.	Rollo de 30.18 m <sup>2</sup>	3	7,013.94
	Membrana geotextil poliéster, complemento filtrante y retenedor de humedad.	Rollo de 150 m <sup>2</sup>	1	5,622.69

\*Costos obtenidos en el mes de octubre de 2021. Incluyen IVA.

Los precios unitarios recopilados fueron analizados con la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk* resultando que todos ellos siguen una distribución normal con un *p-valor* > 0.05 para un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  en cada uno de los casos (Tabla 23).

**Tabla 23.** Prueba de normalidad de los precios unitarios del techo verde.

Producto	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Primario asfáltico	0.783	5	<b>0.058</b>
Membraba SBS	0.876	5	<b>0.292</b>
Membrana Drenante	0.920	5	<b>0.530</b>
Materia orgánica	0.955	8	<b>0.761</b>
Vegetación	0.992	6	<b>0.994</b>

La recopilación de costos de un sistema de paneles fotovoltaicos conectados a la red eléctrica se realizó con base en la demanda energética de la vivienda considerando los equipos eléctricos y electrodomésticos enlistados por Fuentes Velasco, (2014); sin embargo, se tomó en cuenta la etapa de la nueva normalidad, donde se estimó un consumo energético de acuerdo con la ocupación de la vivienda en los meses menos cálidos y más cálidos obteniendo valores de 40.37 kW/día y 52.35 kW/día, respectivamente. En este sentido, las empresas comercializadoras que proveen los materiales y equipos, recomiendan un sistema fotovoltaico que suministre una demanda energética de al menos 60 kW/día, con la finalidad de cubrir eventualmente demandas energéticas extraordinarias. Como resultado, en la Tabla 24 se muestran las seis cotizaciones que se obtuvieron en campo con estos requerimientos, donde se integran los suministros y la mano de obra de la instalación en un costo total. Debido a esta limitante, se aplicó la prueba de normalidad *Shapiro-Wilk* a los costos recopilados, obteniendo un *p-valor* > 0.05 para un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  en cada uno de los seis casos (Tabla 25), por lo que no se rechaza la homogeneidad de los datos y se considera la simulación estocástica con una distribución de probabilidad normal para estos costos.

**Tabla 24.** Costos totales de sistemas fotovoltaicos de 60 kW conectados a red eléctrica.

Descripción del Producto	Costos totales (MXN)	
<b>Sistema solar para interconexión a red de 60 kW (incluye paneles fotovoltaicos, soportes de aluminio, inversor, cableado, conectores, gestión ante CFE y mano de obra especializada para su instalación)</b>	Comercializadora 1	172,705.30
	Comercializadora 2	157,628.36
	Comercializadora 3	128,545.40
	Comercializadora 4	150,000.00
	Comercializadora 5	142,090.72

Descripción del Producto	Costos totales (MXN)	
	Comercializadora 6	162,297.78

\*Costos obtenidos en el mes de septiembre de 2021. Incluyen IVA.

**Tabla 25.** Prueba de normalidad de los costos totales del sistema fotovoltaico.

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
<b>Costo total de paneles fotovoltaicos</b>	0.990	6	<b>0.990</b>

### 7.7. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

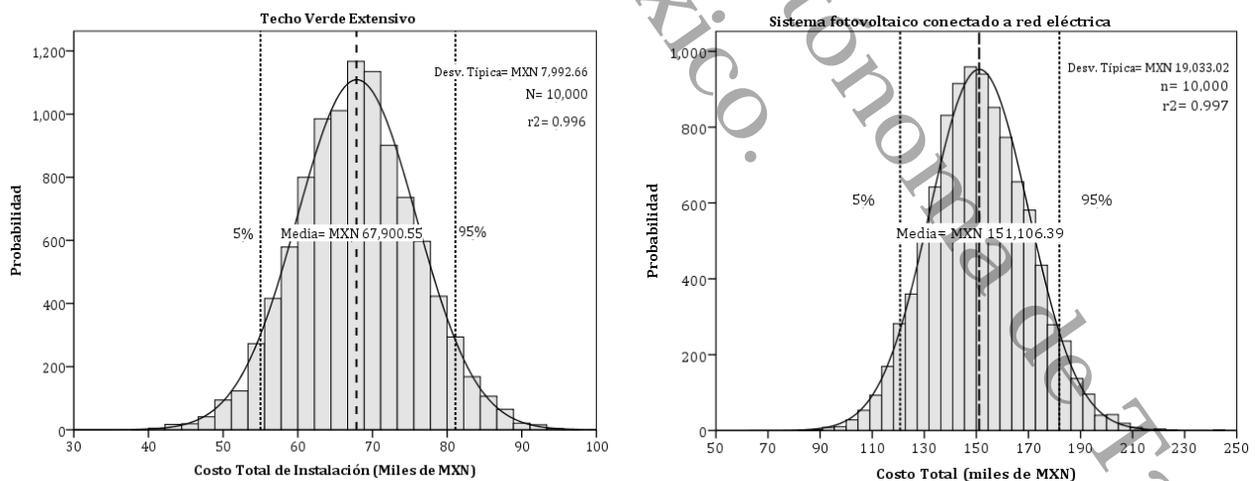
El diseño de las interfaces gráficas elaborados en la plataforma de *Visual Basic for Applications* (VBA) de *Microsoft Excel* está compuesto un formulario creado desde el *Editor* de VBA para el ingreso de datos y criterios de la simulación estocástica (Prodan y Prodan, 2001). Además, con la ayuda del *cuadro de herramientas* se colocaron los controladores que ayudaron a solicitar la información necesaria desde varios *libros* configurados de *Microsoft Excel*. Finalmente se desarrolló en un *Módulo*, una *subrutina* de programación donde se realizaron las simulaciones a partir de los métodos numéricos que estarán vinculados con el formulario para la automatización de las tareas.

### 7.8. SIMULACIONES ESTOCÁSTICAS

La normalidad de los precios unitarios analizados del techo verde extensivo y los costos totales obtenidos de los sistemas de paneles fotovoltaicos permitieron realizar la simulación de los costos por medio de un modelo gaussiano, por lo que se llevaron a cabo dos simulaciones estocásticas para determinar el efecto del grado de incertidumbre de estos costos asociados en su etapa de instalación, siendo esta la que representa los costos con mayor incertidumbre, con respecto a otras etapas del ciclo de vida delimitadas. A continuación se describen los resultados de los escenarios propuestos, teniendo como criterios principales la vivienda propuesta por Fuentes Velasco, (2014), que cuenta con un área de construcción de 63 m<sup>2</sup> disponibles en la planta alta; una desviación típica del 20% en los costos de mano de obra directa y los insumos de la instalación del techo verde extensivo para considerar, dentro de este grado de

incertidumbre, las cotizaciones existentes en campo no consideradas, y; un evento de 10,000 simulaciones para cada costo de mano de obra de la instalación, insumos y/o equipos correspondientes a cada escenario de las dos tecnologías bajo estudio.

Los resultados de los costos de mano de obra y materiales necesarios para la instalación del techo verde extensivo graficados y representados en la Figura 10 a), muestran una función distribución de probabilidad simétrica en relación con el costo total de la instalación con una media de MXN 67,900.55 y una mediana de MXN 67,868.44. Los percentiles del 5% y 95% indican que el costo mínimo con un 95% de confianza serán de MXN 55,099.07 y el costo máximo con un 95% de confianza de MXN 81,217.83, respectivamente. La prueba de *Kolmogórov-Smirnov* con corrección de *Lilliefors* determinó que no existe homogeneidad en los valores obtenidos con un *p-valor* = 0.003, para un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$  y con un coeficiente de determinación alto ( $r^2 = 0.996$ ).



a) Distribución de probabilidad gaussiana del costo de instalación del techo verde extensivo.

b) Distribución de probabilidad gaussiana del costo total de un sistema fotovoltaico.

**Figura 10.** Distribuciones de probabilidad del costo total con instalación de un techo verde extensivo y un sistema de paneles fotovoltaicos.

Por su parte, los costos totales de los materiales, equipos e instalación de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica representados en la Figura 10 b), muestran una función de probabilidad ligeramente asimétrica con una media de MXN 151,106.39 y una mediana de MXN 150,511.57. Los percentiles del 5% y 95% indican que el costo mínimo con un 95% de confianza serán de MXN 120,752.56 y el costo máximo con un 95% de confianza de MXN 183,078.15, respectivamente. La prueba de normalidad *Kolmogórov-Smirnov* con corrección de *Lilliefors* determinó que no existe homogeneidad en los valores obtenidos con un *p-valor* < 0.00, para un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ , a pesar de obtener un coeficiente de determinación  $r^2 = 0.997$ .

El coeficiente de determinación  $r^2$  es una herramienta importante que representa la proporción de variación o el grado de asociación lineal de las variables en el presente estudio, por lo que un valor  $r^2$  próximo a 1 demuestra una alta capacidad explicativa de la recta (Montgomery *et al.*, 2006).

### 7.9. BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA INSTALACIÓN DE UN TECHO VERDE EXTENSIVO

En la Tabla 26 se presenta la estimación del consumo energético anual de la vivienda con dimensiones y características descritas por Fuentes Velasco (2014), considerando que la ocupación de la vivienda concurre en la etapa de la nueva normalidad.

Se utilizó el porcentaje de ahorro económico obtenido a partir de las simulaciones del consumo energético de Fuentes Velasco (2014) que representa la edificación *Tipo A del Subtipo A5*, donde comparó el consumo energético de la misma vivienda con techo verde extensivo contra un techo convencional.

**Tabla 26.** Cálculo del costo por consumo eléctrico anual en la edificación Tipo A, Subtipo A5 con la Taira 1F en la etapa de la nueva normalidad.

Inicio del bimestre	Final del bimestre	kWh bimestral	Consumo (kWh)	Tarifa (MXN)	Subtotal (MXN)	Total bimestral (MXN)	Total + IVA (MXN)
01-ene-21	28-feb-21	2,381.63	150	0.855	128.25	6,383.16	7,404.47
			250	1.034	258.5		

DESEMPEÑO DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS EN ASOCIACIÓN CON PANELES  
FOTOVOLTAICOS BAJO CONDICIONES DE CLIMA TROPICAL HÚMEDO

Inicio del bimestre	Final del bimestre	kWh bimestral	Consumo (kWh)	Tarifa (MXN)	Subtotal (MXN)	Total bimestral (MXN)	Total + IVA (MXN)
			1981.63	3.026	5996.41		
01-mar-21	30-abr-21	<b>2,821.88</b>	600	0.633	379.8	2,624.08	<b>3,043.93</b>
			1800	0.794	1429.2		
			421.88	1.932	815.08		
01-may-21	30-jun-21	<b>3,193.39</b>	600	0.637	382.2	3,359.36	<b>3,896.85</b>
			1800	0.798	1436.4		
			793.39	1.942	1540.76		
01-jul-21	31-ago-21	<b>3,245.74</b>	600	0.641	384.6	3,479.08	<b>4,035.73</b>
			1800	0.802	1443.6		
			845.74	1.952	1650.88		
01-sep-21	31-oct-21	<b>2,821.88</b>	150	0.873	130.95	7,899.19	<b>9,163.06</b>
			250	1.061	265.25		
			2421.88	3.098	7502.99		
01-nov-21	31-dic-21	<b>1,251.36</b>	150	0.877	131.55	3,050.30	<b>3,538.35</b>
			250	1.067	266.75		
			851.36	3.115	2652.00		
<b>Total anual</b>		<b>15,715.88</b>					<b>31,082.39</b>
<b>Total anual de la edificación con techo verde extensivo</b>		<b>12,604.14</b>					<b>24,928.08</b>

La reducción del uso de energía eléctrica es un factor muy importante en los beneficios de los techos verdes (Kosareo y Ries, 2007). Para tal caso, Fuentes Velasco (2014) obtuvo un 19.8% de ahorro económico en la vivienda con techo verde extensivo con respecto a la vivienda con techo convencional, lo que representaría para este estudio, un ahorro de MXN 6,154.31 y un equivalente a un ahorro eléctrico de 3,111.74 kW/año.

Ascione *et al.* (2013) investigaron el ahorro de energético de los aires acondicionados en edificios con techos verdes en Europa con tres tipos de plantas tipo césped, gramíneas y sedum. Los resultados revelaron que los techos verdes fueron efectivos para el ahorro de energía en climas cálidos, ya que la vegetación puede captar la radiación solar. Se encontró una reducción del consumo de energía anual entre 1-11% en Tenerife, 2-8% para Roma y 0-11% para Sevilla.

Mahmoud *et al.* (2017) analizaron el ahorro energético de un techo verde en Dhahran, Arabia Saudita, utilizando un modelo desarrollado en *DesignBuilder* para simular el rendimiento de ahorro de energía de un edificio residencial en un clima cálido-húmedo. Los resultados demostraron que se podría lograr un ahorro de energía del 24 % al 35 % mediante el uso de un techo verde en el edificio.

En la última década, varios estudios han demostrado el potencial de los techos verdes para mejorar la eficiencia energética de los edificios (Jaffal *et al.*, 2012; Besir y Cuce, 2018). Su rendimiento puede variar según las características del sistema; (área foliar, tipo de sustrato, profundidad, contenido de humedad, materiales de cada capa); características físicas del edificio (altura, aislamiento, materiales de construcción, acristalamiento, orientación solar, sombreado) y; a las condiciones climáticas locales (estaciones climáticas, necesidades de calefacción o refrigeración) (Manso *et al.*, 2021).

Además del ahorro energético asociado a la instalación del techo verde, existen otros beneficios ambientales asociados a este a través de los cuales pueden obtenerse incentivos económicos. Algunos de ellos se encuentran establecidos de manera jurídica por medio de normativas estatales, federales o internacionales, tales como los bonos de carbono y los descuentos en las tarifas de los pagos del impuesto predial a las viviendas o edificaciones que cuenten con techos verdes siempre y cuando cumplan con las características y especificaciones de la normatividad correspondiente.

En nuestro país, existen algunas ciudades y estados que ofrecen descuentos en el impuesto predial de viviendas cuando cuentan con un techo verde instalado en ellas. En la Ciudad de México, los beneficios positivos generados por la reducción del impuesto en el predial los otorga la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) en coordinación con la Secretaría de Finanzas. Un beneficio fiscal del 10% en la disminución del impuesto predial a aquellas personas físicas que acrediten ser propietarias de inmuebles destinados a uso habitacional y que instalen voluntariamente un sistema de naturación de azoteas o azotea verde en los techos de sus viviendas y cumpla con lo dispuesto en la

Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013 RNAT-2007 emitida por la SEDEMA (Código Fiscal de la Ciudad de México, 2017) (Jesús Castañeda, 2019). Asimismo, el Ayuntamiento de Mérida cuenta con el “Programa de Estímulo a las Acciones ante el Cambio Climático-Azoteas Verdes”, dirigido a los propietarios que acrediten el uso habitacional en sus viviendas y que tengan instalados en ellos las azoteas verdes. Los propietarios podrán acceder al subsidio 15% sobre el monto principal del impuesto predial, respecto al pago total anual de dicho impuesto (Ayuntamiento de Mérida 2021-2024). Sin embargo, el Estado de Tabasco aún son muy limitados o muy escasos los programas o normativas que fomenten algún tipo de incentivo, subsidio y/o reducción de impuestos a aquellos propietarios que cuenten con una vivienda con techos verdes, por lo que no se considera este beneficio para el presente proyecto.

Autores como Gibler (2015); Vijayaraghavan (2016) mencionan otros beneficios ambientales como la captación y el manejo de las aguas pluviales; la disminución del ruido y; de los efectos de las islas de calor en entornos urbanos, pero señalan que aún no han sido claramente reconocidos nacional e internacionalmente para establecerse como incentivos económicos, por lo que también no se contemplan en el presente estudio.

#### 7.10. RELACIÓN BENEFICIO-COSTO DE UN TECHO VERDE EXTENSIVO.

En este apartado, se estableció que el ahorro energético es el único beneficio positivo que genera la instalación del techo verde extensivo en un periodo de 40 años. En la Tabla 27 se presenta el VPN de cada etapa propuesta del ciclo de vida del proyecto del techo verde extensivo.

**Tabla 27.** VPN de los costos del ciclo de vida de un techo verde extensivo.

Insumos e Instalación	Mantenimiento	Reemplazo de membrana drenante	Desmantelamiento y disposición final de residuos	Costo Total
MXN 67,900.55	MXN 46,817.78*	MXN 60,265.21	MXN 1,700.00	<b>MXN 176,683.54</b>

\*El costo total de mantenimiento considera el pago de honorarios de MXN 300.00 cada 3 meses por 40 años.

Los costos generados en las etapas de instalación y desmantelamiento del techo verde se realizarán una sola vez durante el tiempo de vida útil del proyecto, por lo que pueden considerarse como la inversión inicial del mismo. De esta manera, los costos representan el 39.4% con respecto a la vida útil del techo verde a lo largo de 40 años.

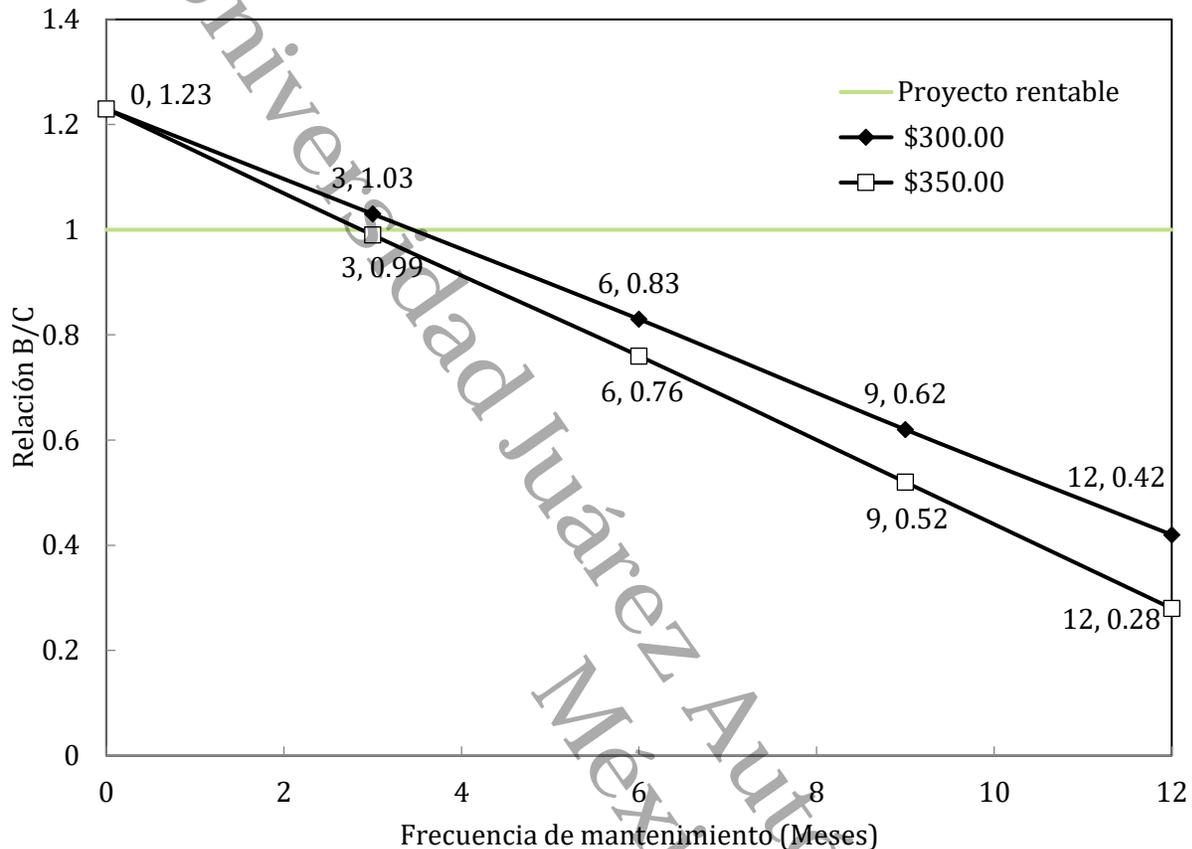
De acuerdo con Niu *et al.* (2010), el costo inicial de los techos verdes es significativamente más alto que el de los techos convencionales debido a la necesidad de construcción y operaciones adicionales. Sin embargo, el costo de un techo verde durante su tiempo de vida útil puede ser menor si se tienen en cuenta los beneficios ambientales proporcionados. El VPN puede ser de un 30 a 40% menor que el de los techos convencionales (Chen, 2013).

Por su parte, las actividades de mantenimiento representan el 26.5% del costo total de su vida útil (Tabla 27). Esta actividad juega un papel muy importante en el ciclo de vida del proyecto, ya que garantiza la eficiencia y los beneficios ambientales o económicos que pueda aportar el sistema integrado de techo verde. Además, los honorarios, la frecuencia de poda y/o aplicación de fertilizantes pueden variar en el tiempo, incluso el propietario de la vivienda puede hacerse cargo de estas actividades y de esta manera se evita el pago de servicios de mantenimiento. Zhang *et al.*, (2012) menciona que diversos estudios no consideraron los costos de mantenimiento de techos verdes. Desafortunadamente, el incremento en los costos de mantenimiento ha sido una de las mayores barreras para la implementación de esta tecnología. El reemplazo de la membrana drenante de polietileno antiraíz cada 10 años se traduce en un 34.1% del costo total de la vida útil del techo verde, siendo una etapa necesaria que garantiza el adecuado funcionamiento del techo verde extensivo.

La estimación de la relación beneficio-costos de la instalación del techo verde extensivo se presentan en la Figura 11. Los periodos de mantenimiento establecidos fueron cada

tres, seis, nueve y doce veces al año por el tiempo de vida útil con costos de MXN 300.00 y MXN 350.00 por honorarios para determinar la viabilidad del proyecto. Asimismo, se propuso que el propietario de la edificación sea el que realice las actividades de mantenimiento, por lo que solo se generará anualmente un costo indirecto en el insumo de fertilizantes, pero no en costos de mano de obra.

Los resultados indican que si el propietario decide realizar el mantenimiento de su techo verde, la relación B/C será de 1.23, equivalente a un beneficio o ahorro económico de MXN 50,489.19. Si el propietario decide pagar honorarios de MXN 300.00 con una frecuencia de tres mantenimientos por año, la relación B/C será de 1.03, que resulta en un beneficio o ahorro económico de MXN 3,671.41. Sin embargo, la relación B/C no será económicamente viable si se toma la decisión de pagar igual o mayor a cuatro mantenimientos al año, ya que los resultados presentan valores menores a 1.0. Asimismo, los honorarios por servicios de mantenimiento con costos de MXN 350.00, resultan en un proyecto no rentable si se decide pagar tres o más mantenimientos al año durante su tiempo de vida útil.



**Figura 11.** Variabilidad de la relación B/C respecto a los costos de las actividades de mantenimiento con distintas frecuencias al año. Cada par de datos alrededor de cada punto corresponde a la frecuencia de mantenimiento y a la relación B/C, respectivamente.

Mahdiyar *et al.*, (2016) compararon los costos de instalación, operación y mantenimiento de un techo verde intensivo y uno extensivo, con los beneficios del ahorro energético, el aumento en el valor de la propiedad y el efecto acústico para determinar el VPN y un periodo de reembolso utilizando el método de la simulación estocástica Monte Carlo en un periodo de 50 años. Sus resultados muestran que el VPN del escenario más probable del proyecto de un techo verde extensivo es de USD 173.00/m<sup>2</sup> (aproximadamente MXN 3,507.85/m<sup>2</sup>).

### 7.11. BENEFICIOS ECONÓMICOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA.

En la Tabla 28 se presenta el VPN por etapa que representa un sistema de paneles fotovoltaicos en un periodo de 25 años, excluyendo las etapas de instalación y desmantelamiento que se consideraron como inversión inicial del proyecto y que representan el 96.4% de los costos de esta tecnología. El sistema de paneles fotovoltaicos abastece la demanda energética de la vivienda bajo estudio; sin embargo, durante su tiempo de vida útil se estimó el costo de una cuota de un mínimo mensual equivalente a 25 kWh establecida por la CFE. Esta tarifa junto con el reemplazo del cableado eléctrico cada diez años representan la etapa de operación y mantenimiento y que en conjunto abarcan el 3.6% del costo total de esta tecnología.

Se estimó una cuota para la recolección y disposición final de los residuos que, por sus características, son considerados de manejo especial, por lo que una empresa privada brindará los servicios correspondientes. En este apartado, se considera el ahorro energético como el principal beneficio económico que ofrece el sistema de paneles fotovoltaicos.

**Tabla 28.** VPN de los costos del ciclo de vida del sistema de paneles fotovoltaicos conectado a la red eléctrica.

Insumos e Instalación	Pago de tarifa mínima de consumo	Reemplazo de cableado eléctrico	Desmantelamiento y disposición final de residuos	Costo Total
MXN 151,106.39	MXN 3,785.86	MXN 1,848.83	MXN 1,500.00	<b>MXN 158,241.07</b>

Los paneles fotovoltaicos se han utilizado ampliamente en los techos como una característica ecológica y sostenible (Saber *et al.*, 2014). De acuerdo con Shafiquea, Luo, y Zuo, (2020), en muchos países como China, India y EE. UU., la electricidad se produce quemando carbón. Esto conduce a la degradación del entorno natural, provoca la contaminación atmosférica y aumenta las emisiones de carbono. En estas circunstancias, el sistema fotovoltaico reduce las emisiones de carbono al disminuir la producción de energía a partir del carbón. Sin embargo, la escasa promoción de leyes hacendarias

nacionales que incentiven e impulsen la adopción de los paneles fotovoltaicos en las viviendas puede ser un obstáculo en el corto plazo. Sin embargo, existe un incentivo federal que se ofrece para invertir en energías limpias. Tal es el caso de la Ley de ISR, en el Artículo 34; Fracción XIII; que menciona incentivos (ahorros) del 30% al 40% de la inversión realizada en energía limpias y que estas pueden ser 100% deducibles de impuestos el primer año de funcionamiento siempre y cuando se mantengan en operación los siguientes cinco años.

Por su parte, en la Ciudad de México, el Código Fiscal de la Ciudad de México, Artículo 276; párrafo III; ofrece una reducción fiscal en el impuesto predial de hasta el 20% a los propietarios de viviendas o bienes inmuebles de uso habitacional que acrediten instalación y uso de paneles fotovoltaicos que acrediten una disminución del 20% en el consumo de energía eléctrica. En otros estados y municipios existen también algunos incentivos, por ejemplo, el “Programa de Estímulo a las Acciones ante el Cambio Climático - Paneles Solares” del Ayuntamiento de Mérida, Yucatán, contempla un descuento del 15% adicional en el pago del impuesto predial base valor catastral a los propietarios de predios particulares y comercios que usan paneles solares.

La situación en el Estado de Tabasco es similar con respecto a la tecnología de los techos verdes, ya que no existen programas bien definidos que ofrezcan incentivos a propietarios que cuenten con esta tecnología, por lo que no se consideró este beneficio para el presente proyecto.

#### **7.12. RELACIÓN BENEFICIO-COSTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA.**

La relación beneficio-costo indica que el sistema de paneles fotovoltaicos cotizado para abastecer los requerimientos energéticos de la vivienda en la etapa de la nueva normalidad, es económicamente viable, con un valor mayor que 1. Esto era de esperarse, ya que el ahorro energético, beneficio principal de esta tecnología, supera los costos

generados por todas las etapas del ciclo de vida. Cabe señalar que relación B/C de 3.19 descrita en la Tabla 29, también considera el ahorro energético otorgado por el techo verde extensivo; es decir, implementando la sinergia de ambas tecnologías en la vivienda, sin embargo, es el sistema de paneles fotovoltaicos el que aporta mayor beneficio económico al propietario.

**Tabla 29.** Relación Beneficio-Costo de los paneles fotovoltaicos asociados con el ahorro energético del techo verde extensivo.

Actividad	Monto (MXN)
<b>Costos</b>	
Insumos e instalación de paneles fotovoltaicos	151,106.39
Desmantelamiento y disposición final de los residuos	1,500.00
<b>Subtotal</b>	<b>152,606.39</b>
Pago de tarifa mínima de consumo eléctrico	3,785.86
Reemplazo de insumos	1,848.83
<b>Total</b>	<b>158,241.07</b>
<b>Beneficios</b>	
Ahorro Energético	496,967.54
<b>Relación B/C</b>	<b>3.19</b>

Es importante señalar que el propietario de la vivienda debe mantener el capital del mantenimiento y/o del reemplazo de materiales en una cuenta de inversión durante el tiempo de vida útil del proyecto para ambas tecnologías, debido a que los precios crecen anualmente con la inflación, pero las inversiones también lo hacen con las tasas de rendimiento otorgadas por los CETES directo en México (Jesús Castañeda, 2019).

Shafiquea, Luo, y Zuo (2020) señalan que una barrera que puede surgir para la aplicación de un techo verde fotovoltaico es el costo total del sistema. La inversión inicial para el techo verde con paneles fotovoltaicos puede ser demasiado alta para los países de bajos ingresos. Por lo tanto, ve la necesidad de realizar más trabajos de investigación que con la finalidad de descubrir materiales más rentables para techos verdes con paneles fotovoltaicos y disminuir costos de producción, así como desarrollar políticas de cooperación multidisciplinarias a nivel nacional.

## 8. CONCLUSIONES

---

El presente estudio evaluó el desempeño de la combinación de techos verdes extensivos con la tecnología de los paneles fotovoltaicos con respecto a la reducción de la ganancia térmica de una edificación y el ahorro energético bajo condiciones climatológicas del trópico húmedo.

Con respecto a la ganancia térmica, las unidades experimentales 1 y 2 (UE1 y UE2) presentaron fluctuaciones similares ante los registros de temperatura; sin embargo, la tendencia temporal de la temperatura en UE1 (panel fotovoltaico más techo verde) es ligeramente menor que la obtenida para la UE2 (un panel fotovoltaico). La unidad experimental de techo verde (UE3), registró una temperatura más baja con un promedio de 3.03 °C con respecto a la temperatura de la losa y una temperatura de casi 2 °C más baja con respecto a las unidades experimentales que poseen un panel fotovoltaico (UE1 y UE2). La unidad que combina al panel fotovoltaico con el techo verde (UE1) registró una temperatura promedio de 1.2 °C más baja con respecto a la temperatura de la losa.

Durante la segunda y tercera etapa de monitoreo de la vegetación, la UE1 demostró el mayor incremento de la cobertura vegetal con valores que fueron de 81.5% hasta el 88.1%, respectivamente. Sin embargo, la longitud y el desarrollo de las rosetas de hojas de los individuos de *Tradescantia spathacea* predominó en los módulos de techo verde extensivo que se localizaron justo debajo del panel fotovoltaico.

Los porcentajes más altos de humedad relativa predominan en la UE3 durante todo el día con valores mínimos de 54% y máximos de 94%; mientras que la UE1 obtuvo valores mínimos de 54% y máximos de 91%, sin embargo, en las horas más cálidas (10:00 a 15:00 horas) existen similitudes con los valores reportados en la UE1, que también cuenta con bandejas modulares de techo verde. No obstante, bajo las mismas condiciones de temperatura, la humedad relativa en la UE2 se encuentra entre 8% y

10% por debajo de los valores de la UE1 y UE3, respectivamente. De esta manera, los altos niveles de humedad relativa reportados por las unidades experimentales pueden relacionarse con las funciones biológicas de evapotranspiración de las especies vegetales y se complementan positivamente con los paneles fotovoltaicos, ya que mejoran las funciones y la efectividad entre ellos mediante los efectos de enfriamiento y sombra.

Con respecto al ahorro energético, las pruebas estadísticas demostraron que existen diferencias en el consumo energético entre la UE1 y la UE2. El promedio de las diferencias del consumo eléctrico de ambas unidades experimentales dio como resultado un mayor tiempo de descarga y consumo energético en la UE1 con un valor de 0.016 kWh/día (16 Wh/día), lo que podría atribuirse a la sinergia del techo verde extensivo con el panel fotovoltaico, lo que puede representarse también como un incremento mediano de 1.3% en la generación diaria de energía eléctrica y un incremento máximo de 2.8% durante las horas pico de sol, considerando que los paneles fotovoltaicos instalados en ambas unidades experimentales tienen una potencia máxima de 100 W y que esta potencia fue menor en campo debido al efecto de la temperatura.

La herramienta de cómputo creada con *Visual Basic para Aplicaciones* (VBA) de *Microsoft Excel*© facilitó la integración de los costos de instalación de los materiales del techo verde extensivo y del sistema de paneles fotovoltaicos conectados a la red pública, así como los honorarios de la mano de obra con el método de simulación estocástica Monte Carlo. La herramienta permitió la simulación de los costos totales de la instalación de estas dos tecnologías y fueron representadas cada una con la función de probabilidad gaussiana después de haberse comprobado estadísticamente la normalidad de los datos. Se determinó la relación B/C del techo verde extensivo y de los paneles fotovoltaicos en relación al tiempo de vida útil correspondiente a cada uno de ellos, considerando como único beneficio el ahorro energético que ofrecen. Los resultados indicaron que la instalación de un techo verde es viable económicamente con una relación de 1.23 si el

propietario decide realizar el mantenimiento a lo largo de su vida útil (40 años). Asimismo, en caso de que el propietario decida pagar honorarios de MXN 300.00 con una frecuencia de tres mantenimientos por año, la relación B/C será positiva con una relación B/C de 1.03. Por consiguiente, la relación B/C de los paneles fotovoltaicos es sumamente ventajoso, con una relación B/C de 3.19 que considera la implementación de ambas tecnologías en la vivienda; sin embargo, el sistema de paneles fotovoltaicos aporta el mayor beneficio económico al propietario a lo largo de un tiempo de vida útil de 25 años.

En un futuro próximo, convendría realizar estudios experimentales de techos verdes asociados con paneles fotovoltaicos a mayor escala para definir sus beneficios de manera más puntualizada. Los hallazgos podrían ser una referencia útil para la mejora del diseño de techos verdes asociados con paneles fotovoltaicos para su aplicación en múltiples infraestructuras.

Finalmente, existe la necesidad de la promoción de nuevas leyes o normativas hacendarias (o el mejoramiento de ellas) nacionales y locales que incentiven económicamente a las partes interesadas a obtener beneficios de estas tecnologías, desde la compra-venta hasta incentivos gubernamentales para adoptar tecnologías verdes en proyectos de construcción. El desarrollo de nuevas fuentes de investigación puede coadyuvar a la optimización de estas tecnologías para cada región climática del país; así como la inclusión de más beneficios económicos, ambientales y sociales dentro de sus ciclos de vida, incluida la selección óptima de materiales a través de la investigación colaborativa y la conciencia educativa. De esta manera, el presente estudio pretende orientar los resultados obtenidos al alcance de las metas del objetivo 7 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) asociados a la Agenda 2030 que tiene como finalidad garantizar el acceso a una energía segura, sostenible y moderna para todos.

## 9. REFERENCIAS

---

- Abdi, H., & Molin, P. (2007). *Lilliefors/Van Soest's - Test of normality*. Dallas, Texas: Encyclopedia of Measurement and Statistics.
- Aguaza, B. O. (2012). Análisis Coste-Beneficio. *eXtoikos*, 147-149.
- Alshayeb, M. J., & Chang, J. D. (2018). Variations of PV Panel Performance Installed over a Vegetated Roof and a Conventional Black Roof. *Energies*, 1110.
- Ariza Rodríguez, J. D., & Ospino Gómez, R. A. (2015). *Guía Teórica-Práctica de Energía Solar Fotovoltaica (Proyecto de Grado)*. Barranquilla, Atlántico: Universidad de la Costa C.U.C; Facultad de ingeniería.
- Ascione, F. B. (2013). Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy*, 845-859.
- Ayuntamiento de Mérida 2021-2024. (27 de Diciembre de 2021). Gaceta Municipal. *Órgano Oficial de la Publicación del Municipio de Mérida, Yucatán, México*. Mérida, Yucatán, México. Obtenido de [http://www.merida.gob.mx/municipio/portal/gobierno/gaceta/doc/1701-1800/gaceta\\_1783.pdf](http://www.merida.gob.mx/municipio/portal/gobierno/gaceta/doc/1701-1800/gaceta_1783.pdf)
- Baumann, T., Klent, H., Dreisiebner, A., Carigiet, F., & Baumgartner, F. (2019). Photovoltaic systems with vertically mounted bifacial PV modules in combination with green roofs. *Solar Energy*, 139-146.
- Besir, A. B., & Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: a comprehensive review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 915-939.
- Billo, E. J. (2007). *Excel for Scientists and Engineers: Numerical Methods*. United States of America: Wiley and Sons, 1st ed.
- Blank, L. T., & Tarquin, A. J. (1999). *Ingeniería Económica* (Cuarta ed.). Texas: Mc Graw Hill.
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*. México: Pearson Educación.
- Catalano, C., Baumann, N., Chan, L., & Tan, J. J. (2017). *City Green - Verdant Cities*. (15, Ed.)
- Chemisana, D., & Lamnatou, C. (2014). Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. *Applied Energy*, 146-256.

- Chen, C.-F. (2013). Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: A review. *Ecological Engineering*, 51-58.
- Corcobado, T. D., & Rubio, G. C. (2018). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Mc Graw Hill.
- Dauda, I., & Alibaba, H. Z. (2020). Green roof benefits, opportunities and challenges. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, 106-112.
- Delgado Trujillo, E. (2010). Diseño de una instalación y alimentación eléctrica de un comedor industrial por medio de generación distribuida". (Tesis de Licenciatura). *Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería*. Obtenido de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3459651>
- Dey, D., & Subudhi, B. (2020). Design, simulation and economic evaluation of 90kWgrid connected Photovoltaic system. *Energy Reports*, 1778-1787.
- European Commission. (2014). *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects: Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020*. Belgium: European Union, 2015.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau. (2008). *Guidelines for the planning construction and maintenance of green roofing - Green roof Guideline*. Germany: FLL e. V.
- Fuentes Velasco, M. (2014). Estimación de ahorro energético asociado a la instalación de un techo verde para el aislamiento térmico de un edificio bajo condiciones de un clima tropical húmedo. Villahermosa, Tabasco, México.
- Fuentes, R. C. (2015). Análisis del Ciclo de Vida de un Techo Ecológico como Tecnología para el Ahorro Energético en pequeños Inmuebles bajo Condiciones de Clima Tropical Húmedo. Tesis de Maestría, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- García Pech, E. I. (2010). Programa de cómputo para la determinación de mapas de iso-concentraciones a partir de modelos gaussianos de dispersión atmosférica en escenarios típicos de emisión. Villahermosa, Tabasco, México: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- García Trinidad, W. I. (2019). Caracterización del agua proveniente de un techo verde extensivo empleado como sistema de captación pluvial. Villahermosa, Tabasco, México: Tesis de Licenciatura.
- Gibler, M. R. (2015). Comprehensive benefits of green roofs. *Master theses(7396)*. Obtenido de [http://scholarsmine.mst.edu/masters\\_theses/7396](http://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7396)
- Guinée, J. G. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards*. Springer Science & Business Media.

- Hernández, D. M. (2006). *Control digital para convertidor multinivel alimentado con energía solar*. Cholula, Puebla: Tesis de maestría.
- Hui, & M., S. C. (2011). Integration of green roof and solar photovoltaic systems. *Integrated Building Design in the New Era of Sustainability*, 1-10.
- IRENA & IEA-PVPS. (2016). *End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels*. Masdar, Abu Dabi: International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems.
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.-E., & Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. 2012;43:157–64. *Renewable Energy*, 157–164.
- Jahanfar, A., Drake, J., Sleep, B., & Margolis, L. (2016). Shading Effects of Photovoltaic Panels on the Evapotranspiration Process in Extensive Green Roofs. *9th International Novatech Conference*. Lyon, France.
- Jesús Castañeda, M. Á. (09 de Abril de 2019). Relación Costo-Beneficio de la Instalación de un Techo Ecológico en Zonas Urbanas y Bajo Condiciones de Trópico Húmedo (Tesis de Licenciatura). *Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*. Villahermosa, Tabasco, México.
- Köhler, M. (2002). Photovoltaic-panels on greened roofs: positive interaction between two elements of sustainable architecture. *Proceedings of the RIO 02 - World Climate & Energy Event*, 151-158.
- Köhler, M., Wiartalla, W., & Feige, R. (2007). Interaction Between PV-systems and Extensive Green Roofs. *Green Rooftops for Sustainable Communities*. april 29, Minneapolis, United States of America.
- Korol, E., & Shushunova, N. (2016). Benefits of A Modular Green Roof Technology. *Procedia Engineering*, 1820-1826.
- Kosareo, L., & Ries, R. (2007). Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*, 2606-2613.
- Landscape Development and Landscaping Research Society e. V. (2018). *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs*. Bonn, Germany: Dachbegrünungen.
- Mahdiyari, A. T. (2016). Probabilistic private cost-benefit analysis for green roof installation: A Monte Carlo simulation approach. *Urban Forestry & Urban Greening*, 317–327.
- Mahmoud, A. A.-A. (2017). Energy and economic evaluation of green roofs for residential buildings in hot-humid climates. *Buildings*, 30.

- Makrides, G., Zinsser, B., Georghiou, G. E., Schubert, M., & Werner, J. H. (2009). Temperature behaviour of different photovoltaic systems installed in Cyprus and Germany. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 1095-1099.
- Maria Manso; Inés Teotónio; Cristina Matos Silva; Carlos Oliveira Cruz. (2021). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110111.
- Martínez Borges, J. (2013). Implementación de paneles solares en casa habitación. Tula, Hidalgo, México: Tesis de Licenciatura.
- Meral, M. E., & Dincer, F. (2011). A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2176-2184.
- Mikati, M., Santos, M., & Armenta, C. (2012). Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 267-281.
- Mohammed, A., & Jae, C. D. (2016). Photovoltaic Energy Variations Due to Roofing Choice. *Procedia Engineering*, 145, 1104-1109.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2006). *Introducción al Análisis de Regresión Lineal 3ra. Ed.* México: Grupo Patria Cultural S.A de C.V.
- Morakinyo, T., Dahanayake, K., Ng, E., & Chow, C. (2017). Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study. *Energy Build.*, 226-237.
- Niu, H., Clark, C., Zhou, J., & Adriaens, P. (2010). Scaling of economic benefits from green roof implementation in Washington, DC. *Environmental Science and Technology*, 4302-4308.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., . . . Rowe, D. B. (2007). Green Roofs As Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions And Services. *BioScience*, 823-833.
- Ogaili H, H. (2015). Measuring the effect of vegetated roofs on the performance of photovoltaic panels in combined systems. Portland, United States of America: Master of science Thesis; Portland State University.
- Osma-Pinto, G., & Ordóñez-Plata., G. (2019). Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates. *Solar Energy*, 112-123.
- Peck, S. W. (Septiembre de 2010). *System integration, Eco-structure*. Obtenido de (www.eco-structure.com)

- Perez, M. J., Fthenakis, V. M., Wight, N. T., & Ho, C. (2012). Green roof integrated PV canopies - An empirical study and teaching tool for low income students in the south Bronx. *Paper presented at: World Renewable Energy Forum; Denver, CO, USA.*
- Peri, G. T. (2012). The cost of green roofs disposal in a life cycle perspective: Covering the gap. *Energy*, 406-414.
- Prodan, A., & Prodan, R. (2001). Stochastic simulation and modelling. *Iuliu Hatieganu University*, 461-466.
- Radziemska, E. (2003). The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renewable Energy*, 1-12.
- Radziemska, E. K., & Klugmann, E. (2002). Thermally affected parameters of the current-voltage characteristics of silicon photocell. *Energy Conversion and Management*, 1889-1990.
- Ramshani, M. K. (2018). Optimal Planning of the Joint Placement of Photovoltaic Panels and Green Roofs Under Climate. *Omega*, 1-49.
- Saber, E. M., Lee, S. E., Manthapuri, S., Yi, W., & Deb, C. (2014). PV (photovoltaics) performance evaluation and simulation-based energy yield prediction for tropical buildings. *Energy*, 588-595.
- Sailor, D. J., & Bass, B. (2014). Development and features of the green roof energy calculator. *Journal of Living Architecture*, 36-58.
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 682-703.
- Seguí, S. F., Gimeno, .., & Orts, S. (2016). *Instalaciones Solares Fotovoltaicas De Conexión a Red*. Valencia, España: Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica de Valencia.
- SEMARNAT. (2010). *Inicia el periodo de la Canícula en México: SMN*. México: Gobierno Federal.
- Shafiquea, M., Luo, X., & Zuo, J. (2020). Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends. *Solar Energy*, 485-497.
- Sharma, N. K., Tiwari, P. K., & Sood, Y. R. (2012). Solar energy in India: Strategies, policies, perspectives and future potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 933-941.

- Sherba, A., Sailor, D., Rosenstiel, T., & Wamser, C. (2011). Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. . *Build Environ*, 2542-2551.
- Sherwani, A. F., Usmani, J., & Varun. (2010). Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 540-544.
- Sobrinho Duarte, E. (2013). Sistema de Regulación Fotovoltaico basado en Microcontrolador. *Tesis de Licenciatura*.
- Solar Energy International. (2016). *Fotovoltaica: Manual de diseño e instalación. Una panorámica de la energía fotovoltaica*. Paonia, Colorado.
- Tolderlund, L. (2010). Design Guidelines and Maintenance Manual for Green Roofs in the Semi-Arid and Arid West. University of Colorado Denver, College of Architecture and Planning, United States of America.
- Ubertini, S., & Desideri, U. (2003). Performance estimation and experimental measurements of a photovoltaic roof. *Renewable Energy*, 1833-1850.
- Ulubeyli, S., & Arslan, V. (16 de Enero de 2017). Economic viability of extensive green roofs through scenario and sensitivity analyses: Clients' perspective. *Energy and Buildings*, 314-325.
- Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 740-752.
- Vijayaraghavan, K., & Man Joshi, U. (2015). Application of seaweed as substrate additive in green roofs: Enhancement of water retention and sorption capacity. *Landscape and Urban Planning*, 25-32.
- Wackerly, D. D., III, W. M., & Scheaffer, R. L. (2008). *Mathematical Statistics with Applications 7th ed*. Pacific Grove, California: Thomson/Brooks-Cole.
- Wilk, S. S., & J., C. H. (1968). A Comparative Study of Various Tests for Normality. *Journal of the American Statistical Association*, 1343-1372.
- Yang, J., Kumar, D. I., Pyrgou, A., Chong, A., MatSantamouris, Kolokotsa, D., & Eang, H. d. (2018). Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. *Solar Energy*, 597-609.
- Zhang, X., Shen, L., Tam, V., & Lee, W. (2012). Barriers to implement extensive green roof systems: a Hong Kong study. *Renew Sustain Energy*, 314-319.