



Instituto Politécnico Nacional
Secretaría de Investigación y Posgrado



Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio
Ambiente y Desarrollo

“Diseño, aplicación y evaluación de un techo verde ligero extensivo como
estrategia para la adaptación al cambio climático en la alcaldía Gustavo A.
Madero, Ciudad de México”

Tesis que presenta:

I.Q.I. Ana Laura Cervantes Nájera.

Para obtener el grado de

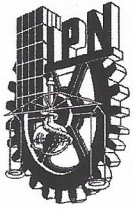
Maestría en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad.

Directoras:

Dra. María Concepción Martínez Rodríguez

M. en C. Lorena Elizabeth Campos Villegas

Ciudad de México, 01 de junio 2021



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, 20 de mayo del 202

El Colegio de Profesores de Posgrado del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo en su Sesión (Unidad Académica)

Ordinaria No. IV-21 celebrada el día 19 del mes mayo de 20 conoció la solicitud presentada por el (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Cervantes	Apellido Materno:	Nájera	Nombre (s):	Ana Laura
-------------------	-----------	-------------------	--------	-------------	-----------

Número de registro: B 1 9 0 1 7 8

del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad
Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

Diseño, aplicación y evaluación de un techo verde ligero extensivo como estrategia para la adaptación al cambio climático en la alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México.

Objetivo general del trabajo de tesis:

Cambio Climático, Techo y Áreas verdes urbanas

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director: Dra. María Concepción Martínez Rodríguez 2° Director: M. en C. Lorena Elizabeth Campos Villegas
No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente

Directora de Tesis

Dra. María Concepción Martínez Rodríguez

Aspirante

Ana Laura Cervantes Nájera

2° Director de Tesis (en su caso)

M. en C. Lorena Elizabeth Campos Villegas

Presidente del Colegio

Dr. Víctor Florencio Santos Hernández





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14
REP. 2017

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 18 horas del día 1 del mes de junio del 2021 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de CIEMAD para examinar la tesis titulada:

Diseño, aplicación y evaluación de un techo verde ligero extensivo como estrategia para la adaptación al cambio climático en la alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Cervantes	Apellido Materno:	Nájera	Nombre (s):	Ana Laura
--------------------------	-----------	--------------------------	--------	--------------------	-----------

Número de registro: B190178

Maestría en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 21 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI NO **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: *(Por ejemplo, el % de similitud se localiza en metadatos adecuadamente referidos a fuentes originales)*

El % de similitud corresponde a las fuentes bibliográficas correctamente citadas

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

Aprobada cumpliendo con todos los requisitos establecidos

COMISIÓN REVISORA DE TESIS



Dra. María Concepción Martínez
Directora de Tesis



Dr. Oscar Goiz Amaro



M. en C Miguel Alvarado Cardona

M. en C. Lorena Elizabeth Campos Villegas
2ª Directora de Tesis



Dr. Ciro Eliseo Márquez Herrera



Dr. Victor Florencio Santos Hernández
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CIEMAD
DIRECCIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 1ro del mes de junio del año 2021, la que suscribe Ana Laura Cervantes Nájera alumna del Programa de Maestría en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad, con número de registro B190178, adscrito(a) al Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, manifiesta que es la autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de las Dra. María Concepción Martínez Rodríguez y M. en C. Lorena Elizabeth Campos Villegas y cede los derechos del trabajo titulado Diseño, aplicación y evaluación de un techo verde ligero extensivo como estrategia para la adaptación al cambio climático en la alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso de la autora y/o directoras del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones cer.lau.ana.18@gmail.com, mcmartinezr@ipn.mx y lor_ca2003@yahoo.com.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ana Laura Cervantes Nájera
Nombre y firma del alumno(a)

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer en primer lugar y de manera especial a mis directoras de tesis a la Dra. María Concepción Martínez Rodríguez y a la M. en C. Lorena Elizabeth Campos Villegas, por su paciencia, apoyo y comprensión, por las largas horas de asesoría, aún a pesar de que más de la mitad del tiempo del programa se realizó a distancia ellas siempre estuvieron ahí accesibles para trabajar y culminar con éxito este trabajo de tesis. Ambas de una manera particular me han ayudado a crecer profesionalmente en este camino de la investigación y desarrollo. Gracias por ser grandes inspiraciones y siempre impulsarme a buscar y hacer más.

Agradezco a los integrantes de mi comité tutorial, el M. en C. Miguel Alvarado Cardona, el Dr. Oscar Goiz Amaro y el Dr. Ciro Eliseo Márquez Herrera, por su tiempo, observaciones y aportación de ideas para enriquecer y lograr esta tesis.

Asimismo, a los profesores que con sus enseñanzas y conocimientos fomentaron mi curiosidad para desenvolverme en el ámbito académico: Dr. Pedro Francisco Rodríguez Espinosa por su apoyo en el laboratorio, al Dr. Stephan Brenneisen por sus conocimientos compartidos de techos verdes, al M. en C. Raúl Vera por su preparación para aplicar sistemas de información geográfica y al Ing. Omar Mayorga por su apoyo en las tutorías sobre análisis de ciclo de vida.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo a la beca otorgada para realizar el posgrado de tiempo completo en el CIEMAD. También agradezco al Programa Institucional de Formación de Investigadores del Instituto Politécnico Nacional por las becas otorgadas en cada semestre para realizar actividades de investigación.

A mis compañeros de generación, Gustavo y Mariana, nos convertimos en amigos por una misma pasión, gracias por su amistad y confianza, aprendí de ustedes a ser equipo y a trabajar por nuestros sueños.

A mis mejores amigos, Mar, Sam, Aldo y Jorge, gracias por su amistad y cariño, tal vez la vida nos haya llevado por caminos diferentes, pero seguimos juntos a pesar de todo, seguimos celebrando logros y auxiliándonos en tiempos no tan buenos.

A mis hermanos, cuñados y sobrina, gracias por siempre echarme porras, e impulsarme con su ejemplo a ser mejor. A mis padres, gracias por su amor, sus palabras de aliento, ánimo y por las enseñanzas de vida, sin ustedes no sería lo que soy ahora. A toda mi familia, cada uno de ustedes forman parte de mí.

A Bruno, gracias por tu amor, por sobrevivir a la cuarentena juntos, ser mi pareja, apoyo y acompañarme en esas mañanas de trabajo, tardes de frustración y largas noches de desvelo, gracias por siempre motivarme a no rendirme, superarme y crecer juntos.

CONTENIDO

Índice de imágenes	9
Índice de figuras	9
Índice de tablas	10
Índice de gráficos	11
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
ANTECEDENTES	18
<i>a. Generalidades del ambiente de la Ciudad de México</i>	19
<i>a.1. Dinámica de las Áreas Verdes Urbanas de la Ciudad de México</i>	23
<i>b. Techos verdes como mecanismo para la mitigación del cambio climático</i>	25
<i>c. Optimización del techo verde</i>	28
<i>d. Marco Regulatorio</i>	31
<i>Mapa transdisciplinario</i>	35
<i>Hipótesis</i>	35
<i>Objetivo General</i>	35
<i>Objetivos Específicos</i>	36
Capítulo 1_ <u>T</u> ECHOS VERDES	37
1.1. Techo verde	38
1.2. Antecedentes históricos de los techos verdes.....	39
1.3. Tipos de techos verdes	42
1.4. Estructura del techo verde	45
1.5. Servicios ecosistémicos	46
1.5.1. Fotosíntesis	47
1.6. Techos verdes en el mundo y sus servicios ambientales.....	49
1.7. Techos verdes en México	52
Capítulo 2_ <u>M</u> ETODOLOGÍA	57
2.1. Generalidades de la metodología.....	58
2.2. Caracterización de materiales orgánicos	60
2.2.1. Medición de la humedad	60
2.2.2. Medición de pH	61

2.2.3. Medición de Sales	61
2.3. Biodiversidad vegetal en el techo verde de estudio	62
2.4. Análisis para la cuantificación de la captación de CO ₂ en el techo verde y prototipos	63
2.4.1. Evaluación de la captación de CO ₂ en la vegetación del techo verde a partir de la biomasa (método destructivo)	64
2.5. Estructuración del control experimental (prototipos)	66
2.6. Estimación de la biodiversidad animal en el techo verde de estudio.....	70
2.7. Análisis de ciclo de vida	71
2.8. Análisis de costo-beneficio	75
2.9. Diagnóstico de la apreciación por la sociedad	77
Capítulo 3_ CASO DE ESTUDIO	82
3.1. Antecedentes de la zona del caso de estudio	83
3.2. Características de la zona del caso de estudio	84
3.3. Propiedades del techo verde de estudio	86
Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	89
4.1. Caracterización de los materiales	90
4.2. Estado actual del techo verde de estudio	92
4.3. Cuantificación de la captación de CO ₂ en la vegetación del techo verde	94
4.3. Biodiversidad vegetal en el control experimental (prototipos)	96
4.4. Estimación de la biodiversidad animal en el techo verde de estudio.....	99
4.5. Análisis de ciclo de vida simplificado.....	102
4.6. Análisis costo-beneficio	106
4.6. Diagnóstico de la apreciación del techo verde por la sociedad.....	109
4.4.1 Conocimiento de los encuestados respecto a los techos verdes	110
4.4.2. Grado de aceptabilidad	110
4.4.3. Sentimientos positivos o negativos generados por el tipo de visualización respecto a la estética del techo verde	111
4.4.4. Impresión de la sociedad respecto a los servicios ecosistémicos y sus efectos en las zonas urbanas.....	112
4.4.5. Valorización positiva o negativa por escenarios futuros.....	113
4.4.6. Relevancia de los techos verdes con la actual pandemia por COVID-19	115
4.4.7. Futuras investigaciones.....	117

CONCLUSIONES.....	118
Cuadro de congruencia	121
REFERENCIAS GENERALES	124
REFERENCIAS MARCO REGULATORIO.....	139

Índice de imágenes

Imagen 1. Mapa de la ZMVM.....	20
Imagen 2. Capas de un techo verde	38
Imagen 3. Casa de pared y techo de palma	41
Imagen 4. Casa con techo de palma	41
Imagen 5. Estructura prototipo A.	68
Imagen 6. Estructura prototipo B.	68
Imagen 7. Prototipo 1.....	69
Imagen 8. Prototipo 2.....	69
Imagen 9. Ubicación del sitio de estudio.....	84
Imagen 10. Ubicación CIIEMAD	85
Imagen 11. Localización del objeto de estudio, vista superior	85
Imagen 12. Localización del objeto de estudio, vista desde nivel el edificio principal de CIIEMAD	86
Imagen 13. Estructura techo verde de estudio	87
Imagen 14. Distribución del techo verde.....	88
Imagen 15. Cuadrantes del techo verde a medio año de su instalación.....	92
Imagen 16. Prototipo 2 a 6 meses de su instalación	98
Imagen 17. Prototipo 1 a 6 meses de su instalación	98
Imagen 18. Evidencia de la presencia de insectos: a) mariposa, b) catarina, c) hormigas, en el techo verde de estudio.....	101
Imagen 19. Evidencia de presencia de arañas en el techo verde de estudio	101

Índice de figuras

Figura 1. Mapa transdisciplinario del trabajo de tesis.....	34
Figura 2. Línea del tiempo antecedentes de los techos verdes.....	42
Figura 3. Diagrama caracterización fisicoquímica	62
Figura 4. Diagrama inventario de vegetación	62
Figura 5. Diagrama medición de CO ₂ por estimación de biomasa.....	65
Figura 6. Diagrama del proceso estimación de biomasa en Sedum dendroideum.....	66
Figura 7. Diagrama captura de insectos	70
Figura 8. Marco de referencia del Análisis de Ciclo de Vida.....	72
Figura 9. Proceso general del ACV del techo verde de estudio	74
Figura 10. Diagrama de flujo simplificado del ciclo de vida del techo verde de estudio.....	74

Índice de tablas

Tabla 1. Marco Regulatorio.....	33
Tabla 2. Tipos de techos verdes.....	44
Tabla 3. Servicios Ecosistémicos.....	47
Tabla 4. Beneficios de los techos verdes en el mundo.....	52
Tabla 5. Estado del arte del techo verde como objeto de estudio en México	53
Tabla 6. Superficie de techos verdes por alcaldía	55
Tabla 7. Variables independientes y dependientes.....	59
Tabla 8. Análisis realizados en la metodología	59
Tabla 9. Técnicas y resultados de captura de CO ₂ y carbón en techos verdes	63
Tabla 10. Detalle de prototipos propuestos.....	67
Tabla 11. Vegetación de los prototipos.....	69
Tabla 12. Materiales requeridos para la elaboración de los ACV comparativos ...	75
Tabla 13. Datos utilizados para el ACB.....	76
Tabla 14. Revisión de literatura respecto a la evaluación cualitativa de techos verdes.....	78
Tabla 15. Características de la vegetación del techo verde de estudio	87
Tabla 16. Resultados de la medición de humedad en los materiales orgánicos residuales.....	90
Tabla 17. Resultados de la medición de pH en los materiales orgánicos residuales	90
Tabla 18. Resultados de la medición de sales disueltas en los materiales orgánicos residuales	91
Tabla 19. Estado actual de la vegetación del techo verde.....	93
Tabla 20. Valores obtenidos de la evaluación de CO ₂ captado en Sedum dendroideum por estimación de la biomasa	95
Tabla 21. Resultados de la estimación teórica de la captación del CO ₂ en el techo verde	96
Tabla 22. Resultados del desempeño de prototipos	96
Tabla 23. Biodiversidad presente en el techo verde de estudio.....	100
Tabla 24. Resultados del análisis de ciclo de vida por material utilizado.....	103
Tabla 25. Resultados totales del ACVS	103
Tabla 26. Costos iniciales de instalación del techo verde de estudio y el convencional propuesto.....	106
Tabla 27. Comparación costos iniciales.....	106
Tabla 28. Beneficio neto	107
Tabla 29. VPN de los techos verdes.....	108
Tabla 30. Resultados del diagnóstico de la apreciación por la sociedad	109

Índice de gráficos

Gráfica 1. Evolución histórica de las AVU en la alcaldía G.A.M. y la CDMX	23
Gráfica 2. Índice verde en suelo urbano (m ² /habitante).....	24
Gráfica 3. Porcentaje de la superficie de techos verdes por alcaldía	55
Gráfica 4. Tasa de crecimiento (Tc) de la vegetación en el techo verde de estudio	93
Gráfica 5. Tasa de sobrevivencia (Ts) de la vegetación en el techo verde de estudio.....	94
Gráfica 6. Análisis térmico diferencial durante la estimación experimental de CO ₂ en <i>S. dendroideum</i>	95
Gráfica 7. Tasa de sobrevivencia (Ts) de la vegetación en los prototipos.....	97
Gráfica 8. Tasa de crecimiento (Tc) promedio de la vegetación en los prototipos	97
Gráfica 9. Distribución de la huella de carbono del techo verde de estudio (CIEMAD).....	105
Gráfica 10. Distribución de la huella de carbono del techo verde convencional propuesto	105
Gráfica 11. Apreciación positiva por parte de la sociedad del CIEMAD hacia el techo verde.....	114

RESUMEN

Las áreas verdes son esenciales para la sobrevivencia de los seres humanos, por lo que la disminución de espacios verdes por la urbanización genera un impacto ambiental que afecta la salud física y mental de sus habitantes. En las últimas cuatro décadas, una solución basada en la naturaleza para compensar la pérdida de áreas verdes urbanas y adaptar las ciudades al cambio climático, es la instalación de techos verdes. Esta investigación propone aplicar la economía circular para reutilizar y revalorizar dos materiales orgánicos residuales: paja y fibra de coco, como material drenante, en la estructura de un techo verde extensivo y en dos prototipos en la Ciudad de México (CDMX). Los materiales orgánicos residuales caracterizados para el diseño e implementación del techo verde por su alta capacidad de retención de agua en promedio de $3.5\text{gH}_2\text{O/g}_{\text{material}}$ y un pH de entre 5.31 a 5.94, resultados adecuados. El techo verde de estudio con paja tiene una tasa de sobrevivencia vegetal para todas las especies mayor al 100%, mientras que el promedio en los prototipos fue del 90.3%. Se encontró que es posible incidir en la calidad del aire por la capacidad de las plantas *Sedum* de mitigar en el nivel de CO_2 en $1.41 \times 10^8 \text{ppmCO}_2$. Respecto a la biodiversidad destacan los polinizadores, en la fauna se encontraron insectos de siete órdenes entomológicos distintos. El análisis de ciclo de vida y costo beneficio demuestra que el techo verde de estudio tiene una mayor factibilidad ambiental y económica por tener una huella de carbono de $2,669.6\text{kgCO}_2$ y un valor presente neto de $\$5,008.24 /\text{m}^2$; la revalorización económica en promedio de los materiales orgánicos residuales es de $\$698$ en promedio. Con base en los resultados obtenidos, el 85% de la comunidad cercana al techo verde de estudio, acepta y califica positivamente el valor que le da al entorno la nueva área verde. La propuesta del techo verde orgánico cumple con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en específico el 1ro, 3ro, 7mo, 11vo, 13vo y 15vo.

Palabras clave:

Techo verde, área verde urbana, economía circular, mitigación al cambio climático, captación de bióxido de carbono.

ABSTRACT

Green areas are essential for human survival, so the decrease of green spaces due to urbanisation generates an environmental impact that affects the physical and mental health of its inhabitants. In the last four decades, a nature-based solution to compensate for the loss of urban green areas and adapt cities to climate change is the installation of green roofs. This research proposes to apply the circular economy to reuse and revalue two waste organic materials: straw and coconut fibre, as drainage material, in the structure of an extensive green roof and in two prototypes in Mexico City (CDMX). The residual organic materials characterised for the design and implementation of the green roof by their high-water retention capacity of $3.5\text{gH}_2\text{O/g}_{\text{material}}$ and a pH between 5.31 and 5.94, these are adequate results. The green roof studied with thatch has a plant survival rate for all species higher than 100%, while the average for the prototypes was 90.3%. It was found that it is possible to influence air quality due to the capacity of Sedum plants to mitigate CO_2 levels by $1.41 \times 10^8 \text{ppmCO}_2$. Regarding biodiversity, pollinators stand out, and insects from seven different entomological orders were found in the fauna. The life cycle and cost-benefit analysis show that the green roof of study has a greater environmental and economic feasibility by having a carbon footprint of $2,669.6\text{kgCO}_2$ and a net present value of $\$5,008.24 /\text{m}^2$; the average economic revaluation of the residual organic materials is $\$698$. Based on the results obtained, 85% of the community near the green roof of study accepts and rates positively the value given to the environment by the new green area. The organic green roof proposal complies with the Sustainable Development Goals (SDGs), specifically the 1st, 3rd, 7th, 11th, 13th and 15th.

Keywords:

Green roof, urban green area, circular economy, climate change mitigation, carbon dioxide capture

INTRODUCCIÓN

Esta primera sección se describe de manera preliminar y general el contenido de la investigación, desde la problemática ambiental en la Ciudad de México hasta la propuesta del diseño, establecimiento y análisis de un techo verde ligero con materiales orgánicos residuales.

Introducción

El crecimiento de las zonas urbanas, tal como es el caso de la Ciudad de México (CDMX), tiene distintas consecuencias a nivel ambiental, una de estas es el cambio de uso del suelo al desplazar las áreas verdes urbanas por edificaciones. Aunado a lo anterior se encuentra la reducción de ciertos servicios ecosistémicos tales como la regulación del clima, reducción del ruido, captación de agua, la preservación de la biodiversidad y la conservación de una buena calidad del aire. Lo descrito ha resultado en diversos impactos negativos en el ambiente urbano por mencionar algunos: el efecto isla de calor y afectaciones a la salud de los habitantes. Una solución basada en la naturaleza (SbN) para mitigar estas alteraciones en los centros urbanos son los techos verdes.

Otro problema ambiental en la ciudad es la generación de residuos, el cual a pesar de las acciones implementadas por el gobierno para su gestión y aprovechamiento no han sido suficientes, una consecuencia visible de ello es la saturación de los espacios destinados para su disposición. De manera que se requiere aplicar actividades de reutilización y reciclado para evitar el arribo excesivo de residuos orgánicos a los rellenos sanitarios.

Este trabajo plantea una estrategia para atenuar los impactos negativos mencionados, al incluir fibras naturales residuales como parte de la estructura de un techo verde con dos fines: aligerar el peso de este sistema para crear un área verde urbana (AVU) e impedir que los residuos orgánicos incorrectamente dispuestos, generen gases de efecto invernadero (GEI). El propósito es generar una opción para la creación de AVUs sustentables que promuevan la economía circular.

Los materiales de origen orgánico propuestos para aprovechar en la capa drenante del techo verde ligero extensivo y dos prototipos son: paja y fibra de coco, la obtención de ambos es posible debido a su presencia como residuo en la ciudad; el uso de estas fibras para el análisis de su desempeño fue de manera individual y en mezcla.

Este es un trabajo transdisciplinar que a partir de diversos aspectos desde puntos de vista biológicos, químicos y sociales. Se busca evaluar, analizar y sintetizar integralmente los servicios ecosistémicos que aporta el techo verde de estudio a la sociedad como lo pueden ser servicios estéticos, captación de CO₂, fomento a la biodiversidad. Algunos de los temas que se tratan en esta tesis son:

- La vegetación y sustrato enriquecido por los materiales orgánicos propuestos en distintos porcentajes.
- El funcionamiento del material orgánico residual como drenante natural no contaminante con el fin de evitar la acumulación de agua en el techo y aligerar su peso.
- Las propiedades físicas de los materiales orgánicos propuestos para contar con información que respalde su capacidad como material drenante.
- La viabilidad de un espacio para la biodiversidad en el techo verde de estudio.
- La opinión general de un grupo de la sociedad respecto al techo verde, ya que donde se localice un techo verde habrá personas que vivan o trabajen debajo de este, o simplemente transiten cerca de él y estas tendrán una perspectiva respecto de este.

Los antecedentes presentados a continuación delimitan la problemática que implican las condiciones ambientales de la CDMX, en particular la desigualdad en la distribución de AVUs algunos de los usos más comunes para estos espacios son el ejercicio, la relajación y la socialización, por lo que si no existen una cantidad suficiente de estos pueden tener repercusiones en la salud física y mental (Frumkin et al., 2017).

También se describe el funcionamiento de los techos verdes como una opción para la recuperación de AVU, de esta manera obtener servicios ecosistémicos que contribuyen a la adaptación al cambio climático. Además, se exponen las alternativas probadas para la optimización de su estructura, por último, el marco regulatorio pertinente a la investigación.

Posteriormente se desarrolla el primer capítulo de esta tesis el cual ahonda en el fundamento e historia del techo verde, se describen los beneficios que aporta por

su instalación, así como su aplicación alrededor del mundo y a nivel nacional. En el segundo capítulo se presenta la metodología mixta aplicada para el cumplimiento de los objetivos.

En el tercer capítulo especifica las características del lugar donde se lleva a cabo el caso de estudio y la estructura del techo verde ligero extensivo. El capítulo cuarto abarca los resultados obtenidos de los métodos empleados, así como el análisis para la comprobación de la hipótesis.

ANTECEDENTES

En esta sección del trabajo de tesis establecen las características ambientales de la CDMX, así como la utilidad de los techos verdes en las zonas urbanas y el desarrollo tecnológico por la implementación de diversos materiales. Asimismo, se describe el conjunto de leyes y normas relevantes y aplicables al objeto de estudio.

a. Generalidades del ambiente de la Ciudad de México

La densidad poblacional de la CDMX es de 7,404 hab/km² este dato incluye la superficie total de 1,485.67 km² (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del DF (PAOT), 2018) y a los 8,918,653 habitantes de la ciudad, además de las 1,720,145 personas pertenecientes a la población flotante la cual trabaja o estudia en la CDMX pero que radica en el Estado de México (EDOMEX), Hidalgo o Morelos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2015, 2017). Estos factores la convierten en un área con gran demanda de servicios energéticos, alimentarios, sanitarios, médicos, educativos y de transporte.

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), se conforma por las dieciséis alcaldías de la CDMX, el municipio de Tizayuca en Hidalgo y cincuenta y nueve municipios del Estado de México (ver Imagen 1), la población total de esta zona es de 20.9 millones de habitantes (Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU), Consejo Nacional de Población (CONAPO), y Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2015).

La calidad del aire de la ZMVM es afectada por la generación de GEI en diversas fuentes, como los automóviles responsables del 23%, los rellenos sanitarios del 16% y el sector habitacional del 9% (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011). El ranking mundial de calidad de aire respecto a la concentración anual de partículas PM_{2.5} presenta a Delhi, India como la ciudad más contaminada con un valor de 98.6 µg/m³ y a la ciudad menos contaminada es Nassau, Bahamas con 3.3 µg/m³, mientras que la CDMX se encuentra en la posición 40 del ranking con 20.5 µg/m³ (IQAir Group, 2019).

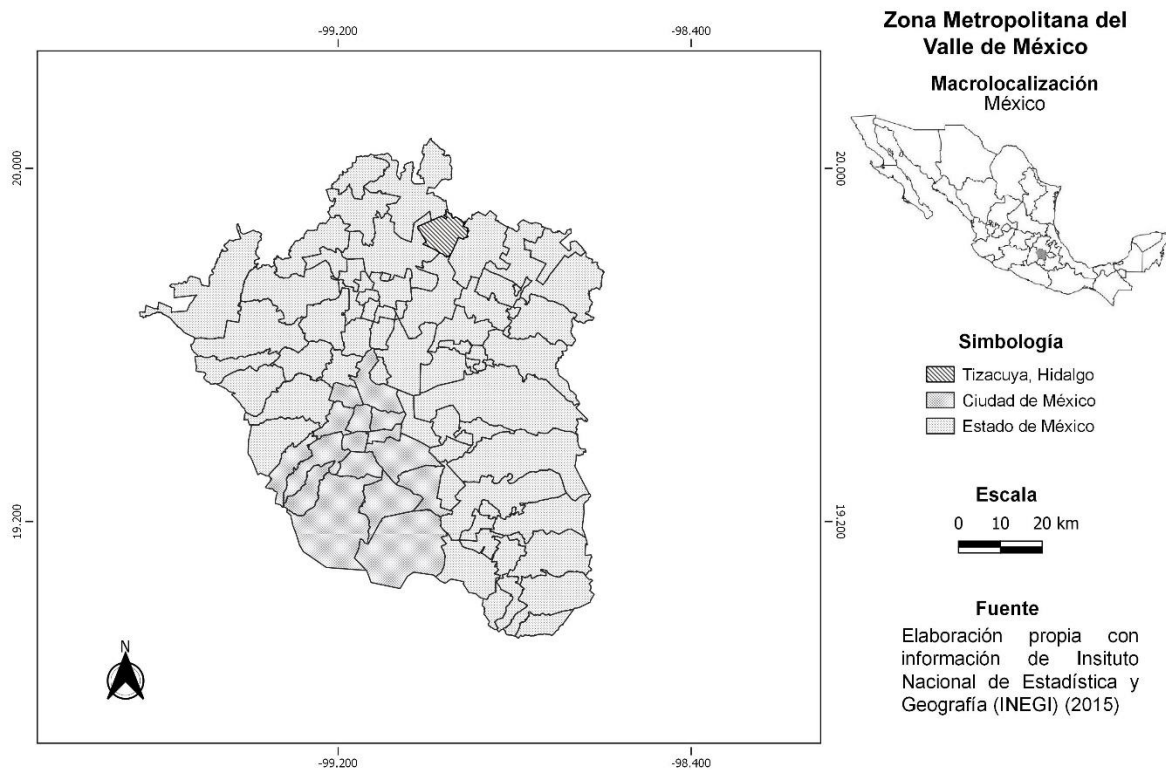


Imagen 1. Mapa de la ZMVM.

Fuente: Elaboración propia con información del INEGI (2015)

Respecto al sector transporte, el 95% de estos utilizan gasolina, el resto usa diésel y gas licuado de petróleo; durante el año 2018 en la CDMX se registraron 5,801,469 vehículos en circulación (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018), a esta cantidad se añaden los 5.5 millones de automóviles pertenecientes a la población flotante que también transitan por la ciudad (Comisión Ambiental de la Megalópolis, 2018) todos emiten GEI durante su combustión. En la CDMX anualmente en promedio son generados 0.0043ppm de SO₂, 0.041ppm de óxidos de nitrógeno, 0.4ppm de CO y 0.03ppm de ozono, lo anterior resulta en una mala calidad del aire (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA);, 2018), estas cifras permiten comprender la necesidad de aplicar acciones que atenúen las emisiones de contaminantes a la atmósfera.

Diariamente en la CDMX se generan 13,073 toneladas de residuos sólidos, el 65% de estos son dispuestos en rellenos sanitarios, el 14% se recicla, dejando un 20% sin disposición final (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México

(SEDEMA), 2018a) de acuerdo con la Norma Ambiental NADF-024-AMBT 2013 sobre Separación, Clasificación, Recolección Selectiva y Almacenamiento de los Residuos del Distrito Federal (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2015) , estos se dividen en cuatro categorías:

1. Orgánicos: residuos biodegradables, como flores, pasto, hojarasca, ramas, o restos de alimentos.
2. Inorgánicos reciclables: materia prima para reutilización y reciclaje como papel, cartón, vidrio, plástico, metales, textiles, madera y envases multicapas.
3. Inorgánicos no reciclables: de aprovechamiento limitado: residuos sanitarios, uncel, calzado, hule, colillas de cigarro, entre otros.
4. Manejo especial y voluminosos: residuos electrónicos domésticos, equipos de informática, radiografías, aparatos de alumbrado, colchones, entre otros.

Los residuos sin tratamiento o valorización se distribuyen en cinco rellenos sanitarios, ninguno de ellos en la CDMX, estos se encuentran distribuidos en el Estado de México y en Morelos, pero al ser estos vecinos de la CDMX la contaminación atmosférica de estos lugares puede llegar a afectar su calidad de aire.

Las fuentes generadoras de residuos orgánicos en la CDMX son las viviendas, los mercados públicos y mercados sobre ruedas, los parques, las escuelas, los establecimientos comerciales. Una de las estrategias planteadas por el gobierno de la ciudad para el aprovechamiento de los residuos orgánicos son las plantas de composta. De manera general, la eficiencia promedio de recolección de residuos orgánicos en la CDMX es del 42% (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2018a), esto significa que más del 50% de los residuos orgánicos no son recolectados y por lo tanto no son dispuestos correctamente. Esta problemática es solo una de las que enfrenta la CDMX por su crecimiento, lo expuesto demuestra la necesidad de generar soluciones ante la problemática espacial por la cantidad de residuos sólidos orgánicos generados.

Otro efecto del crecimiento y transformación continua de la CDMX es el reemplazo de casas por espacios cerrados como grandes edificios corporativos, habitacionales o centros comerciales, así mismo el diseño de las viviendas compactas no permite a los residentes poder contar con espacios verdes propios. Se puede decir que la sobreocupación espacial en la CDMX ha relegado las áreas verdes (Pérez y Martínez, 2016); un ejemplo de esto es la construcción de 108 nuevos centros comerciales en el período de 2006 al 2016 (Cabrera, 2017), en promedio son 10 nuevos edificios al año donde la única vegetación que ofrece está dispuesta en macetas.

La importancia de las AVUs por su relación con el ser humano radica en su capacidad para reducir: la mortalidad, el estrés, la depresión, ansiedad, actitudes agresivas y para mejorar: el sistema inmune, la actividad cognitiva, la capacidad de restauración; además al estar rodeado de espacios verdes se fomenta una actitud positiva hacia el cuidado ambiental (World Health Organization (WHO), 2016). El empleo de diversas estrategias para la preservación y creación de AVU es necesario y posible de lograr por medio del incremento de la instalación de techos verdes en los inmuebles de las zonas urbanas.

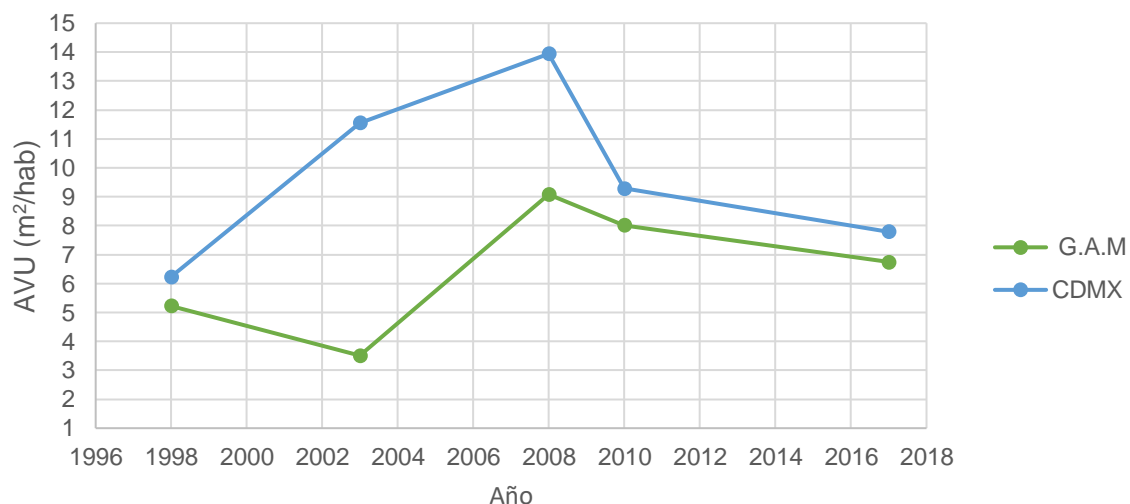
La flora y la fauna, estos al verse afectados por la disminución de hábitats y por el crecimiento de la población, en caso de la fauna: los pájaros, insectos, abejas y lagartijas, por mencionar algunos, se han acoplado a las nuevas condiciones; en el caso de la flora se puede observar en el paisaje de las ciudades que plantas oportunistas crecen en el asfalto o en columnas de puentes, en ambas situaciones al no ser pensadas estas construcciones para ellos pueden surgir daños estructurales, actualmente está surgiendo una teoría del diseño urbano llamada "Animal-aided" que si los considera como parte de los inmuebles (Wolfgang y Hauck, 2017).

a.1. Dinámica de las Áreas Verdes Urbanas de la Ciudad de México

Los beneficios de las AVUs recibidos por los seres humanos es el principal motivo para la preservación y aumento de la naturaleza que conforma los espacios verdes en las áreas urbanas. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) es recomendable un mínimo de 9m² de superficie verde por habitante considerando que estos residan a 15 minutos caminando de su hogar al área verde (Naciones Unidas, 2015b), en la CDMX no todos los habitantes cuentan con esta superficie verde.

La desigualdad en la distribución de áreas verdes urbanas se encuentra en registros de la Comisión de Recursos Naturales del Gobierno del Distrito Federal del año 1998, en reportes de la PAOT de los años 2003, 2008, 2010 y el más reciente inventario de AVU por la SEDEMA de 2017. En estos informes establecen el “Índice Verde” donde las variables AVU y población aportan los datos de la superficie de área verde por habitante, de los cuáles en la siguiente gráfica se muestra la evolución de la CDMX y en particular de la alcaldía Gustavo A. Madero, ya que en este lugar es donde se encuentra el techo verde de estudio.

Gráfica 1. Evolución histórica de las AVU en la alcaldía G.A.M. y la CDMX

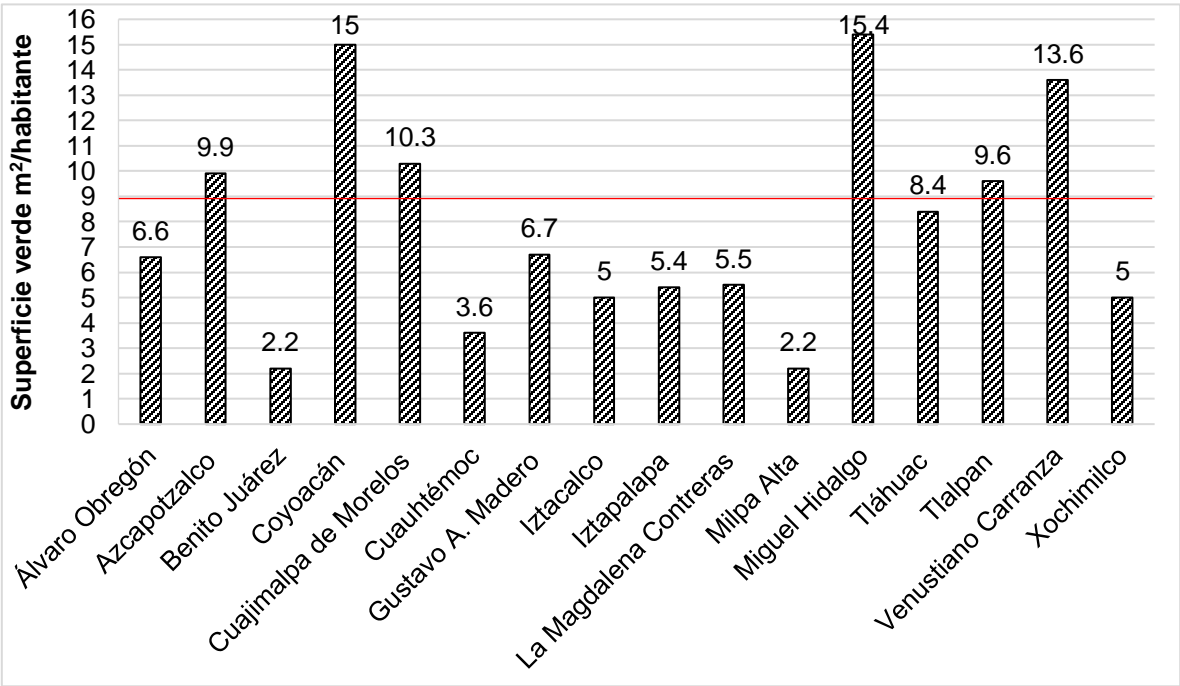


Fuente: Elaboración propia con información del INEGI (2015)

En la definición de las AVUs para la generación de estos datos no son consideradas Áreas de Valor Ambiental (AVA), Áreas Naturales Protegidas (ANP) y Suelo de Conservación. Además, del año 1998 al 2003 a pesar del aumento general en las AVUs de la CDMX, esto por el avance en la tecnología usando sistemas de información geográfica y de esta manera se generaron valores precisos. Se puede observar preliminarmente que en los últimos diez años tanto la alcaldía Gustavo A. Madero como la CDMX, han tenido una reducción en las AVU, mientras que la población sigue creciendo.

El último informe, establece que el promedio AVU por habitante es de 7.54 m² (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2017c), Gustavo A. Madero es la alcaldía número seis más grande de la CDMX y respecto a su superficie total se estima que tiene únicamente 8.4% de AVU, la siguiente gráfica muestra el reparto diverso del Índice Verde en la ciudad:

Gráfica 2. Índice verde en suelo urbano (m²/habitante)



Fuente: Elaboración propia con datos de Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), (2017b).

La mayoría de las alcaldías que conforman la CDMX, como se muestra en la gráfica anterior, están por debajo de la recomendación de la OMS y los indicadores nacionales establecidos en el artículo 10, numeral VII de la Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal (LAPTFD) descrita en el apartado del “Marco regulatorio”; resultado de estas ausencias son las soluciones implementadas por las administraciones de la CDMX, para fomentar la recuperación de áreas verdes con soluciones alternativas como la instalación de los techos verdes.

b. Techos verdes como mecanismo para la mitigación del cambio climático

El crecimiento de la urbanización ha generado la necesidad de enverdecer las ciudades, por lo que se han diseñado y aplicado técnicas que involucran la propagación de vegetación, estos pueden ser sistemas de naturación verticales o sistemas horizontales, los primeros son conocidos como muro verde, paredes verdes o jardines verticales, estos han sido utilizado a partir de la década de los noventa con fines ornamentales (Francis y Lorimer, 2011) mientras que los segundos son los techos verdes. Ambos respecto a su tipo y tamaño aportan beneficios como: reducción de GEI, adaptación al cambio climático y fomento a la biodiversidad urbana (Perini y Rosasco, 2013), todo lo anterior mejora las condiciones del ambiente en espacios urbanos.

De acuerdo con la vegetación y el soporte utilizado existen dos principales tipos de sistemas verticales: fachadas verdes cuya flora es conformada principalmente por plantas trepadoras que crecen sobre la pared además de requerir jardineras en la base o en la parte media de la pared a cubrir, su costo es estimado a partir de \$246/m² hasta \$19,686/m²; el segundo tipo son los muros vivos cuya infraestructura requiere de impermeabilización, una red de riego y módulos con sustrato y vegetación, el precio de estos varía entre \$7,380/m² a \$68,900/m² (Liberalesso, Oliveira, Matos, y Manso, 2020; Pérez-Urrestarazu, Fernández-Cañero, Franco-Salas, y Egea, 2015).

El techo verde es un sistema de naturación horizontal integrado por una serie de capas en superficies horizontales o inclinadas que previenen el daño a la estructura de la construcción y soporta a la vegetación, en donde flora, insectos o aves tienen un espacio para habitar. Existen dos tipos de techo verde: el extensivo con un precio aproximado entre \$1,230/m² a \$4,921/m² y el intensivo con un costo desde \$3,690/m² a \$12,300/m² (Liberalesso et al., 2020), la principal diferencia entre estos es el espesor del sustrato, la capacidad de carga y el mantenimiento.

El auge de los sistemas horizontales por la instalación de techos verdes comenzó en Alemania en los años setenta, cuando se diseñó el sistema de drenaje y protección de la estructura contra el enraizamiento (Breuning, 2015). Lo anterior permitió su aplicación a gran escala en ciudades del mundo como una forma de mejorar el ambiente de las zonas urbanas al compensar la pérdida de áreas verdes urbanas. La elección de los techos verdes sobre los sistemas verticales de naturación puede ser por sus costos y promoción por medio de ciertas políticas públicas como son incentivos económicos, subsidios fiscales y obligaciones definidas en leyes (Liberalesso et al., 2020), además de la disponibilidad favorable de las especies vegetales adaptables a las condiciones ofrecidas por el techo verde.

La implementación de los sistemas de naturación horizontales condujo a convertir a los techos verdes en un objeto de estudio. Las investigaciones realizadas y sus resultados respaldan a los techos verdes como una forma efectiva para atenuar los impactos producidos por el cambio climático en los centros urbanos. Algunos de los resultados son el ahorro de energía en las construcciones donde se instala, además del secuestro de carbono y CO₂ en el sustrato y las plantas, diversos beneficios reportados son expuestos en el Capítulo 1.

Es por lo que la instalación los techos verdes en las ciudades se considera como una solución para cumplir cuatro de los diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Naciones Unidas, 2015a), estos son:

- 3ro “Salud y bienestar”. La vegetación retiene partículas contaminantes presentes en el aire, se mejora la calidad del aire y es posible la prevención de enfermedades respiratorias.

- 11vo “Ciudades y comunidades sustentables”. Asimismo, la vegetación también colabora para la disminución de las emisiones de GEI y al aislar las temperaturas externas se produce un ahorro de energía en los inmuebles.
- 13vo “Acción por el clima”. El instalar un techo verde trae consigo diversos beneficios para mejorar el medio ambiente.
- 15vo “Vida de ecosistemas terrestres”. Los techos verdes son hábitats inducidos aprovechados por flora y fauna.

En la CDMX, durante el año 2007 la SEDEMA en cooperación con la Dirección de Manejo y Regulación de Áreas Verdes Urbanas instauraron la norma ambiental NADF-013-RNAT-2007 que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en la Ciudad de México, la cual tuvo una actualización en 2017, con el propósito de aportar una alternativa viable para compensar la disminución de áreas verdes por la ocupación de espacios con construcciones públicas y privadas.

El “Programa para Mejorar la Calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020” considera a los techos verdes como una alternativa en su estrategia 7 “Manejo de áreas verdes, reforestación y naturación urbanas” (Comisión Ambiental Metropolitana, 2011). La finalidad de esto es mejorar la calidad del aire e igualar las condiciones ambientales de los habitantes al fomentar las actividades de naturación en techos y fachadas en inmuebles públicos o privados.

Relacionado con lo anterior, la Secretaría de Finanzas de la CDMX otorga un beneficio fiscal del 10% al impuesto predial a las personas físicas que acrediten ser propietarias de inmuebles destinados a uso habitacional, en los cuales se realice la naturación del techo y que ocupe una tercera parte del total de superficie, además de cumplir con lo establecido en la norma ambiental NADF-013-RNAT-2017 (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2018b). Actualmente en las ciudades de México ya existen techos verdes, esto se detalla en el primer capítulo.

c. Optimización del techo verde

La estructura del techo verde se describe en el primer capítulo de este trabajo, esencialmente estos son construidos por seis capas en su estructura. Dentro de estas capas se localizan el impermeabilizante, la capa anti-raíz y la capa drenante, fabricados de materiales plásticos no renovables, los cuales durante su producción se emite CO₂ (Kuronuma et al., 2018) y generan una huella de carbono.

El contenido energético inicial de estos materiales es mayor que el retenido en el sustrato y la biomasa de la vegetación, por esta razón, se estima que durante 9 años la cantidad de emisiones disminuidas a causa del secuestro de carbono en el techo verde serán las generadas por estos materiales (Getter, Rowe, Robertson, Cregg, y Andresen, 2009) pero después de este período los beneficios serán netos. En la construcción de un techo verde los materiales vírgenes y/o importados tienen un mayor impacto ambiental, la disminución del uso de materiales como cemento, grava y plásticos es posible (Morau, Rabarison, y Rakotondramiarana, 2017). Los ejemplos mencionados a continuación permiten comprender la posibilidad de reducir el consumo de materiales prefabricados en el sistema del techo verde sustituyéndolos por componentes reutilizados o reciclados con la finalidad de disminuir el gasto de energía y de emisiones de GEI por su proceso de elaboración, así como de aumentar su eficiencia en términos de mejorar la calidad del aire en menor tiempo.

Los materiales amigables con el ambiente son aquellos con un impacto ambiental bajo, obtenidos de manera sustentable o cuyo procesamiento requirió un gasto mínimo de energía o donde el proceso de fabricación utilizó energía renovable, también los materiales locales son considerados (Borsani, 2011). Una solución para los centros urbanos es utilizar materiales o productos clasificados como residuos después de un primer uso con el objeto de proporcionar una nueva función como parte de los techos verdes y así lograr una construcción sustentable, en este caso como se ha mencionado se eligieron materiales de origen orgánico.

El modelo de economía circular es una alternativa que se enfoca en beneficiar a la sociedad en general, esto por medio de: 1. Diseñar priorizando la eliminación de residuos y contaminación; 2. Sostener el uso de materiales y productos y 3. Buscar la regeneración de sistemas naturales (Ellen MacArthur Foundation, 2017). La economía circular, también se define como el ciclo continuo de los recursos con la finalidad de optimizar los procesos y la disminución de los riesgos (Cerdá y Khalilova, 2016), pretende evitar la disposición final mediante su reintegración de materiales o productos a su proceso original o en algún otro procedimiento. La reutilización, reparación, re-manufactura y el reciclaje son consideradas estrategias de este tipo de economía.

La aplicación de diversos materiales alternativos reutilizados o reciclados en los techos verdes ha demostrado la capacidad de estos para formar parte de su estructura. En Londres evaluaron alternativas rentables para un sustrato que fomente la vegetación, es por esto que formaron su sustrato a partir de gránulos hechos de arcilla y lodos de depuradora, cenizas de papel y piedra caliza, el pH se redujo y favoreció el crecimiento de la flora (Molineux, Fentiman, y Gange, 2009; Molineux, Gange, Connop, y Newport, 2015).

En el jardín de la ciudad de Chengdu, China, el sustrato del techo verde fue compuesto por lodos de aguas residuales mixtas, en un año capturó 6,470 gC/m² (Luo et al., 2015). En Italia, los resultados de la caracterización de la mezcla de residuos granulares de concreto aireado con suelo natural demostró el cumplimiento con los lineamientos establecidos para incluirse en los techos verdes como sustrato ligero (Bisceglie, Gigante, y Bergonzoni, 2014).

En Michigan, Estados Unidos de América (E.U.A.) se reutilizaron vidrio espumado y porcelana triturada como sustrato en prototipos de techo verde, se reportó la mejora en la capacidad de retención de agua, en el crecimiento de la vegetación y las temperaturas internas fueron menores en comparación a un sustrato común (Eksi y Rowe, 2016; Matlock y Rowe, 2016). En Częstochowa, Polonia la retención de agua en el sustrato fue posible por el uso de hidrogel (Deska, Mrowiec, Ociepa, y Łacisz, 2018).

En Lérida, España y Bogotá, Colombia reciclaron el caucho de neumáticos para la capa drenante, este fue utilizado en forma de migajas y de tiras (Aragón Moreno y Espitia Gonzalez, 2018; Coma, Pérez, Castell, Solé, y Cabeza, 2014; G. Pérez, Coma, Solé, Castell, y Cabeza, 2012) estos análisis demostraron que el aprovechamiento de este residuo no altera el desempeño del techo verde al tener resultados similares a un material drenante convencional.

En Coímbra, Portugal se instalaron prototipos de techos verdes donde la capa drenante fue elaborada a base de corcho (Tadeu, Simões, Almeida, y Manuel, 2019) los resultados fueron un mejor aislamiento en la temperatura interna, crecimiento favorable de las plantas y gestión aceptable del agua respecto a los techos verdes convencionales.

En México el uso de materiales alternativos amigables con el medio ambiente es parte de la oferta de dos empresas “Plántica” y “Garden Central” ambos en sus sistemas modulares de techos extensivos, la primera utiliza tereftalato de polietileno (PET, por sus siglas en inglés) reciclado y residuos de aglomerados de concreto, la segunda emplea polipropileno (PP) reciclados (Garden Central, 2016; Plántica, 2018). En la Universidad Veracruzana se instaló exitosamente un techo verde extensivo con botellas de PET como capa drenante (Martínez, 2012).

Los diversos enfoques enunciados en términos de la aplicación de materiales reutilizados o reciclados en los techos verdes demostraron resultados favorables, es por lo que en este trabajo se propuso el empleo de los materiales orgánicos residuales: paja y fibra de coco, como parte de la estructura del techo verde en su capa drenante.

La paja, es un residuo de los cultivos de cereales como el arroz, maíz, trigos y otros utilizados como alimento o cama para animales (Suttie, 2003), pero estas aplicaciones están decreciendo por la división de sectores alimenticios y ganaderos en donde nutren al ganado con alimento especial procesado (González y Tapia, 2017). La paja tiene un tamaño de partícula de 1 a 2 mm, con una porosidad total del 90.7% y puede retener entre 20 y 30% de agua. La combinación en un sustrato de tezontle con paja contribuyó al crecimiento de la vegetación (Muratalla-Lúa et al.,

2006). En el techo verde ligero extensivo de estudio, la paja es el material utilizado como capa drenante y se mezcló al 50% con la fibra de coco para uno de los prototipos.

La fibra de coco proviene de la venta del agua de coco, bebida comercializada en los mercados sobre ruedas de la CDMX, la cubierta de este fruto es el residuo generado por su distribución y no siempre son dispuestos apropiadamente (Plácido, 2009). Aproximadamente de 1,000 cocos se obtienen 75 kg de fibra, esta se consigue a partir de la parte exterior del coco y es empleada para la elaboración de fibras textiles y aislantes térmicos, las hojas y troncos de este árbol frutal en sus lugares de origen son utilizados en la construcción (Granados y López, 2007).

El 35% del total del coco pertenece a la parte fibrosa, esta fibra es útil para la conservación de la humedad, es más corta en comparación con otras fibras además de ser dura, su diámetro promedio aproximado es de 1mm. La fibra de coco ha sido integrada como sustrato orgánico que favorece el crecimiento de las plantas siendo así una opción ecológica para la agricultura (Alvarado, K., Blanco, A. , Taquechel, 2008). En este trabajo de tesis la fibra de coco se instaló en los dos prototipos, conformando en su totalidad la capa drenante de uno de estos y el siguiente prototipo en mezcla al 50% con la paja.

Aprovechar los residuos: paja y la fibra de coco implicaría la disminución de estos en las calles y las emisiones generadas por su descomposición. Al darle un nuevo uso como capa drenante, en donde se fomenta la economía circular como un ciclo positivo al emplear sus propiedades y optimizar la tecnología del techo verde.

d. Marco Regulatorio

El marco regulatorio que justifica este trabajo engloba desde lo definido en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEM) en materia de medio ambiente y residuos, hasta las normas ambientales aplicables en la CDMX de apoyo para las actividades del cuidado de las áreas verdes urbanas y la instalación de los techos verdes. En la tabla 1 se presenta una síntesis de este marco.

En conformidad con lo referido, todos los habitantes de la CDMX tienen derecho a un medio ambiente apto y saludable, es por lo que el gobierno busca cumplirlo por medio del establecimiento de diversas leyes y normas. Las áreas verdes mejoran la calidad del ambiente urbano, la LAPTDF procura su mantenimiento y cuidado, por lo mencionado en la tabla 1, los techos verdes son considerados como un área verde propuesta como una solución para lograr, como mínimo, los 9 m²/hab. que indica esta misma ley.

Como se citó previamente, por lo general, los techos verdes en su estructura tienen elementos prefabricados que impactan negativamente al ambiente, un medio para reducirlo es reemplazar y examinar dichos elementos con fibras orgánicas residuales. El uso de fibras orgánicas obtenidas localmente es una opción que también puede reducir aquellos efectos negativos producidos por su poca o nula disposición y aprovechamiento.

Para una producción sustentable del techo verde se considera la disminución del uso de plásticos a través del aprovechamiento de las fibras naturales: paja y coco. La paja, según lo definido en la LGPGIR, se considera como residuo de manejo especial por ser generado en la agricultura, esta se reutiliza sin tratamiento previo. Es importante considerar las características fisicoquímicas de la paja y la fibra de coco para que cumplan con lo establecido en las normas ambientales, así como para su aplicación en techos verdes.

Los antecedentes planteados son la base de la figura 1, que corresponde al mapa transdisciplinario de este trabajo. En seguida de este se define la hipótesis, el objetivo general y los objetivos específicos que guiarán el desarrollo de esta tesis.

Tabla 1.Marco Regulatorio

Norma	Artículo	Contenido pertinente
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (Secretaría General, 2020).	4°	<i>...Toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho...</i>
	115°.	En el numeral III de este artículo se estipula que dentro de las funciones a cumplir por los municipios está el saneamiento, acopio, transferencia, procesamiento y disposición final de residuos.
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2003).	5°	De este artículo se consideran los conceptos: aprovechamiento de los residuos, residuo, reutilización, reciclado, residuos de manejo especial y residuos sólidos urbanos.
Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (LRSDF) (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2019).	3°	Las definiciones tomadas de este artículo son: plástico, producción sustentable y residuos orgánicos.
	51°	Este artículo delimita que los sitios de disposición final no podrán admitir materiales para reutilizar o reciclar, así como reducir su recepción de residuos orgánicos, de acuerdo con sus límites establecidos.
Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal (LAPTF) (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del DF (PAOT), 2017).	5°	Este artículo define el área verde como cualquier espacio en la CDMX que cuente con vegetación de forma natural o introducida.
	10°.	El numeral VIII de este artículo, decreta la responsabilidad de las Alcaldías para la preservación y aumento de las áreas verdes para que existan 9m ² de área verde por habitante.
	87°	Determina a las áreas verdes entre otras a las zonas con cualquier cubierta vegetal en los espacios públicos, además de cualquier construcción con techo o muro verde.
Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-006-RNAT-2016 (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2018b).	5	Define las condiciones y delimitaciones técnicas a cumplir por todo aquel que lleve a cabo acciones para la promoción, mejora y cuidado de las áreas verdes en la CDMX. Además, se toman los conceptos de: infraestructura urbana, medidas de mitigación y de compensación.
Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2017 (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2018c).	5	Plantea las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en la Ciudad de México. Incluye información y requerimientos sobre el sitio, la construcción y la vegetación; también incluye requerimientos generales y específicos sobre la instalación y mantenimiento de cada capa del techo verde.

Fuente: Elaboración propia

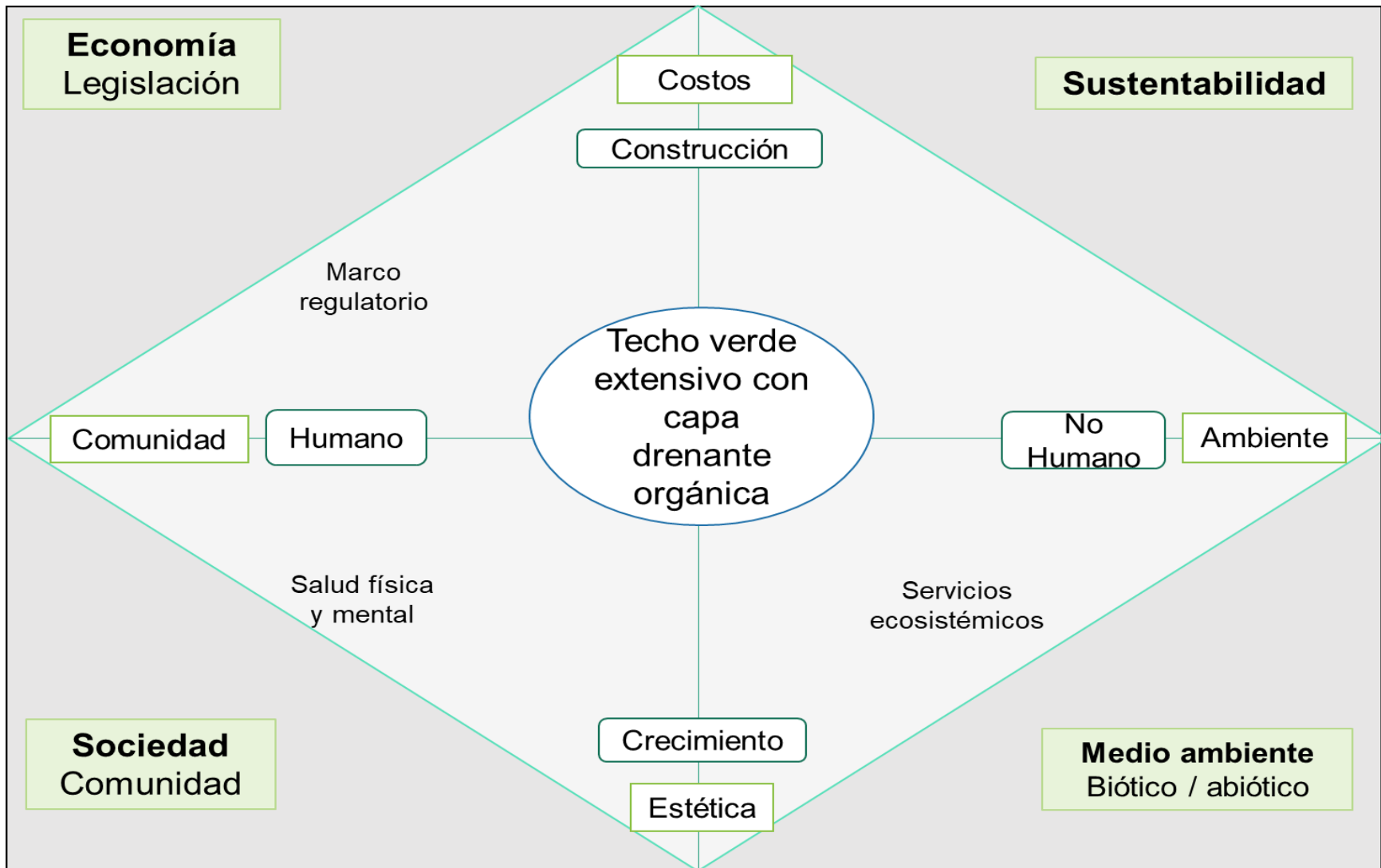


Figura 1. Mapa transdisciplinario del trabajo de tesis

Fuente: Elaboración propia

Mapa transdisciplinario

El mapa transdisciplinario que engloba esta investigación presenta como punto central la aportación científica propuesta: un techo verde extensivo con capa orgánica. El cual está soportado por los pilares de la sustentabilidad: economía, sociedad y medio ambiente; dentro de estos se consideran respectivamente: la legislación aplicable, el impacto a la comunidad y los factores tanto bióticos como abióticos. Lo descrito nos dirige a cuatro ejes que involucran, costos de la construcción, lo humano y lo no humano, así como la estética que se aporta al paisaje y el crecimiento al ser este un espacio donde se desenvolverá vida. Dentro de esto y como elementos que son considerados como uniones de los pilares y los ejes mencionados están componentes que estrechamente relacionados entre sí: el marco regulatorio asignados, los servicios ecosistémicos y la salud física y mental de las personas. Todo esto conforman un sistema de naturación innovador que traspasa las barreras de las disciplinas y requiere de sus diversos enfoques como para la adaptación al cambio climático.

Hipótesis

Reutilizar material orgánico residual en un techo verde extensivo en la capa drenante, generaría un área verde urbana que aporte servicios ecosistémicos, espacios para la biodiversidad y la captación de CO₂, a su vez impactará en el ámbito social.

Objetivo General

Diseñar e implementar un techo verde ligero extensivo y comprobar los beneficios del uso de un material orgánico residual en su capa drenante mediante su caracterización fisicoquímica para promover la economía circular, su empleo en la estructura con el fin de proporcionar un espacio de biodiversidad y favorecer la captación de CO₂, del mismo modo evaluar la respuesta de la sociedad hacia los techos verdes.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar las fibras naturales, consideradas como residuos, para su reutilización en la construcción de un techo verde ligero y estudiar su desempeño en dos prototipos de estudio.
2. Contrastar la función del techo verde extensivo de estudio en términos de captación de CO₂, con uno convencional para estimar su desarrollo.
3. Evaluar la aportación ambiental en el techo verde y los prototipos como un entorno único para el crecimiento de la biomasa vegetal y la fauna.
4. Valorar la perspectiva de la sociedad por los diversos aportes del techo verde al ambiente del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD).

La hipótesis y los objetivos presentados son la guía para realizar las actividades de este trabajo de tesis, cuyo objeto de estudio es el techo verde y con la finalidad de conocerlo este es descrito en el capítulo 1 de manera conceptual, sus antecedentes históricos, el estado de arte en términos de sus beneficios y aplicaciones en el país.

Capítulo 1.

TECHOS VERDES

El capítulo profundiza en el concepto, variaciones y fundamentos del techo verde, además se presenta la revisión documental de los precedentes al techo verde actual. También se enuncian los servicios ecosistémicos que proveen los techos verdes, así como los beneficios encontrados internacionalmente por su aplicación en zonas urbanas, finalmente se exhibe el panorama de los techos verdes en México.

1.1. Techo verde

Un concepto actual y general del techo verde, es el de Castleton, Stovin, Beck, y Davison (2010) donde se menciona que es un sistema de capas el cual incorpora vegetación a la parte superior de distintos tipos de construcciones desde edificios del tipo industrial hasta casas privadas, este aporta a las estructuras y a su entorno diversos beneficios. El techo verde es también conocido como jardín de techo, azotea verde o azotea naturada.

La NADF-013-RNAT-2017, lo define como cubierta naturada, de tipo extensiva, intensiva o semi-intensiva, esto depende del tipo de las características de las capas de sustrato y de vegetación (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2018c). Básicamente un techo verde se compone según lo mostrado en la imagen 2.



Imagen 2. Capas de un techo verde

Fuente: Elaboración propia

El techo verde es en promedio 12% más costoso que un techo convencional (Carter y Keeler, 2008), a pesar de esto los techos verdes tienen una recuperación a escala nacional de 6.2 años, con una tasa interna de retorno del 5.2%, de igual manera el tiempo de vida calculado para un techo verde son 40 años, mientras que de acuerdo con diversos estudios se estima en promedio solo 17 años para un techo común (General Services Administration (GSA), 2011), este es un valor considerado por la diversidad de materiales que existen para construir un techo, además no se toma en cuenta el reemplazamiento en su totalidad de un techo si no el mantenimiento requerido. El techo verde por lo múltiples aportes positivos al entorno urbano podría considerarse como un “handprint”, concepto introducido para referirse a todo aquel mecanismo que cause impactos ambientales positivos (Grönman et al., 2019).

1.2. Antecedentes históricos de los techos verdes

La investigación de Jim, (2017) relata los precedentes de los techos verdes siendo estos tan remotos como las culturas antiguas, alrededor del siglo XIII a.C. en los templos de Mesopotamia en las terrazas de los templos se colocaban árboles. En el año 500 a.C. se construyeron los jardines colgantes de Babilonia, conocidos como los primeros techos verdes, estos buscaban simular el paisaje de una montaña boscosa, para esto el techo fue impermeabilizado con capas de caña mezcladas con alquitrán y una capa espesa de tierra.

Otro antecedente son los techos de césped contruidos por vikingos en el norte de Islandia alrededor del año 1050, en la actualidad se preservan viviendas en Noruega con techos verdes de este mismo siglo; esta tradición evolucionó y llegó hasta Norte América en 1778 donde los indígenas armaron sus viviendas por medio de esta técnica. Un registro de 1862, describe a migrantes escandinavos en los Estados Unidos de América (E.U.A.), quienes ensamblaban sus casas a partir de ladrillos de césped con raíz.

Los techos verdes como se conocen actualmente se originaron en Alemania a finales del siglo XIX, en sus ciudades se comenzaron a construir edificios con techos planos recubiertos con alquitrán como impermeabilizante (Thuring y Dunnett, 2014).

El alquitrán por ser un material inflamable fue necesario colocar encima una base de arena y grava para evitar incendios, la combinación de estos materiales resultó ser un espacio ideal para la colonización de vegetación aportando servicios ambientales y paisajísticos a la zona urbana.

Lo mencionado condujo al estudio e innovación de los techos, fue en este momento que se creó la barrera anti-raíz y las capas drenantes de plástico (Thuring y Dunnett, 2014), para la preservación de los inmuebles y evitar el estancamiento del agua. El primer registro de la instalación de un techo verde data de 1867 durante la Exposición Mundial en París, donde Carl Rabitz presentó un proyecto sobre un techo plano de concreto con un innovador sistema que involucraba un sistema de drenaje (Elpiniki, Julia, y Declan, 2009), esto permitió operacionalizar aquel techo que solo presentaba vegetación circunstancial.

En Polonia, a inicios del siglo XVIII los techos verdes fueron aplicados sobre bunkers, los cuales permanecen en la actualidad, dentro de los beneficios encontrados por estos son: mitigación del efecto de calor, resguardo de vida silvestre y promoción a la educación ambiental (Pardela, Kowalczyk, Bogacz, y Kasowska, 2020), estos techos son casos de éxito al mantenerse por tanto tiempo y proveer de servicios ecosistémicos a los residentes de zonas aledañas.

En 1924 el reconocido arquitecto francés Le Corbusier, estableció cinco elementos para la arquitectura moderna dentro de los cuales incluyó la terraza-jardín con la finalidad de compensar la pérdida de naturaleza por la construcción de edificios nuevos y como extensión de la vivienda (Le Corbusier, 2007), esta idea es retomada también como referencia a los techos verdes contemporáneos. Hasta la década de los setentas en Alemania su aplicación obtuvo popularidad como una estrategia diseñada para la distribución del agua en las azoteas y la protección contra el ingreso de raíces a la estructura de los edificios, de esta forma fueron comercializados los primeros sistemas a gran escala (Breuning, 2015).

En México las primeras alusiones hacia el uso de vegetación para la fabricación de los techos son las viviendas prehispánicas (ver imagen 3 y 4) cuya técnica se ha conservado a la fecha aún después de la llegada de los españoles en el siglo XVI

(Sánchez, 2006). Esta técnica tradicional consiste en el uso de la fibra y hojas obtenidas de árboles de guano, de coco y diversas especies de palmera, según su localización, para la estructura del techo de sus viviendas; este tipo de construcciones no se limita al sureste del país, también se pueden encontrar en las costas de Colima y de Oaxaca (Granados y López, 2007; Rangel-Landa, Rivera-Lozoya, y Casas, 2014). La aplicación de las palmas como material para fabricar los techos de distintas instalaciones se ha preservado por las actividades actuales del turismo y ahora se utiliza en ciertos espacios de hoteles, también en restaurantes y bares (Caballero, Pulido, y Martínez-Ballesté, 2004).



Imagen 3. Casa de pared y techo de palma

Fuente: Rangel-Landa et al., 2014



Imagen 4. Casa con techo de palma

Fuente: Sánchez, 2006

Los antecedentes históricos descritos aportan una visión en la manera en que los elementos orgánicos disponibles del lugar eran utilizados para la construcción del techo verde, por lo que ahora, aunque este sistema evolucionó se puede mejorar al combinar la tecnología actual con materiales de origen natural. En la figura 2 se ilustra de manera general los precedentes de los techos verdes.

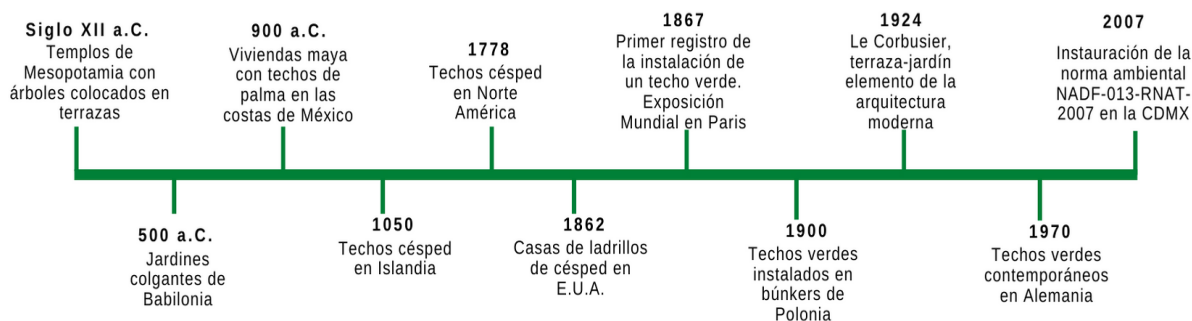


Figura 2. Línea del tiempo antecedentes de los techos verdes.

Fuente: Elaboración propia con información de Jim (2017), Thuting y Dunnet (2014), Elpiniki, Julia, y Declan (2009) y Le Corbusier (2007).

En el 2007 los techos verdes llegaron a la CDMX como un plan para mitigar ciertos efectos del cambio climático y mejorar el ambiente de la ciudad, fue entonces cuando se decretó la primera versión de la norma ambiental NADF-013-RNAT-2007, a partir de este suceso la tecnología de los techos verdes comenzó a difundirse en diversas ciudades del país.

1.3. Tipos de techos verdes

Los techos verdes se clasifican principalmente en dos tipos: el intensivo y el extensivo; de manera general se distinguen por el tamaño de su sustrato y por consiguiente el costo de mantenimiento, el primero se caracteriza por sus altos precios, mientras que el de tipo extensivo al tener un menor espesor en el sustrato puede albergar ciertos tipos de plantas que requieren menor mantenimiento lo que reduce su costo.

Complementario a estos dos tipos, existe el techo verde semi-intensivo, el cual según la NADF-013-RNAT-2017, requiere de un mantenimiento normal, el espesor de la capa de sustrato puede ser de hasta 30 cm y el peso de carga es de entre 200 a 350 kg/m². A continuación, en la tabla 2 se presenta una recopilación de definiciones referente a los dos principales tipos de techos verdes, propuestas por distintos autores de acuerdo con su contexto.

Tabla 2.Tipos de techos verdes.

Autores	Lugar	Techo Intensivo	Techo Extensivo
Erica Oberndorfer, Jeremy Lundholm, Brad Bass, Reid R. Coffman, Hitesh Doshi, Nigel Dunnett, Stuart Gaffin, Manfred Kohler, Karen K. Y. Liu y Bradley Rowe. (Oberndorfer et al., 2007)	Canadá	Es accesible, la profundidad promedio del sustrato es de 20 cm o más con alta porosidad, es funcional y estético, incrementa el espacio de vivienda. Sus plantas tienen necesitan un mantenimiento igual a un jardín a nivel del suelo.	Sustrato ligero de profundidad promedio de 2 a 20 cm, con alta porosidad, bajo contenido de materia orgánica; las plantas deben tener tolerancia al estrés; se requiere poco o ningún mantenimiento y accesibilidad únicamente para este.
Luckett, Kelly. (Luckett, 2009)	E.U.A	Requieren un suelo profundo para soportar una diversidad de plantas nativas, arbustos y árboles pequeños, puede tener pequeños cuerpos de agua, laberintos, juegos, etc. Están diseñados para techos de concreto con altas capacidades de carga.	La profundidad del medio de crecimiento es de 5 a 15 cm. Las plantas instaladas desarrollan sistemas radiculares grandes o profundos.
Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., y Davison, J. B. (2010) (Castleton et al., 2010)	Reino Unido	Los techos verdes intensivos tienen una capa de sustrato más profunda para permitir que sobrevivan plantas de extenso enraizamiento, como arbustos y árboles.	Los extensos techos verdes tienen una capa delgada de sustrato con plantación de bajo nivel, típicamente <i>sedum</i> o césped, y pueden tener una estructura muy liviana.
Administración General de Servicios de E.U.A. (GSA, 2011).	E.U.A.	Suelen tener una estructura más compleja ya que su finalidad es asemejar jardines o parques con árboles por lo que requiere más soporte estructural Necesita una mayor inversión inicial y un mayor mantenimiento	Su estructura es más sencilla, cuentan con una profundidad del sustrato de 4 a 6 in, con vegetación resistentes. Requiere menor cantidad de soporte estructural agregado ya que son livianos, y una vez instalado requiere de mínimo mantenimiento.
Gernot Minke (Minke, 2016)	Alemania	Cuentan con plantas vivaces, leñosas y césped, estas deben ser abastecidas periódicamente con agua, requieren cuidados intensivos y costosos. Es indispensable un espesor de sustrato de más de 30 cm.	Las plantas crecen naturalmente sin ser sembradas, con un espesor de sustrato de 3 a 15 cm, pueden ser musgos, suculentas, hierbas o pastos que sobrevivan sin cuidados, resistentes a sequías, heladas y con capacidad de regeneración. El peso debe ser menor a 160 kg/m ² . Accesibilidad sólo por motivos de mantenimiento y en su caso instalar caminos.
SEDEMA. NADF-013-RNAT-2017. (SEDEMA, 2018)	México	Cubierta de una construcción con acabado vegetal de tratamiento intensivo creado por capas de medio de crecimiento y vegetación con mantenimiento normal o frecuente, la capa de sustrato es mayor a 40 cm y el peso de dicha capa con la vegetación es superior a los 350 kg/m ² .	Cubierta de una construcción con acabado vegetal de tratamiento extensivo creado por capas de medio de crecimiento y vegetación con mantenimiento muy bajo o casi nulo, la capa de sustrato no debe ser mayor de 18 cm y el peso de dicha capa con la vegetación es de entre 110 y 140 kg/m ² .

Fuente: Elaboración propia con base en Carter y Keeler (2008b), Minke (2016), Luckett (2009), B. Rowe (2011), Oberndorfer et al., (2007a), Castleton et al., (2010) y SEDEMA (2018).

1.4. Estructura del techo verde

Generalmente un techo verde es un sistema compuesto por seis capas como se mostró anteriormente en la imagen 1. En conformidad con la NADF-013-RNAT-2017 los elementos básicos de un techo verde en el orden de su construcción son el desagüe, soporte estructural, membrana impermeabilizante anti-raíz, capa drenante, capa filtrante, capa de sustrato y capa de vegetación, a continuación, se describirán estas capas.

La membrana impermeabilizante anti-raíz es la primera capa posterior a la base del techo de la construcción esta tiene dos funciones la primera es evitar el paso del agua al interior del edificio y la segunda es impedir que las raíces penetren la estructura del inmueble.

La capa filtrante de materiales prefabricados evita el paso de las partículas finas de la capa de sustrato y permite el paso del agua hacia la capa drenante. Esta debe de ser compatible con los materiales, tener una permeabilidad alta, con estructura duradera y estable, adaptable al enraizamiento, resistente a la tensión compresión, intemperie, microorganismos y pH externos.

La capa drenante usualmente es de un material plástico prefabricado utilizado para direccionar la salida del agua y de esta forma evitar el estancamiento, también debe retener el agua de lluvia. Según la NADF-013-RNAT-2017 es posible hacer uso de cualquier material que garantice una estructura duradera y estable en su forma y funcionalidad, lo más ligero posible, inocuo para la vegetación (sales y carbonatos solubles) además de química y físicamente estables. Para fines de este trabajo se considera un techo verde convencional aquel que tiene en estas tres últimas capas materiales nuevos y no reciclados.

La capa de sustrato es la base para el crecimiento de la vegetación, por lo que su principal función es aportar un área rica en nutrientes, oxígeno y agua para las raíces de las plantas. Se compone por material orgánico que puede ser una mezcla de minerales, placas de tejidos industriales y otros elementos inertes, con una porosidad suficientemente resistente al agua, para un sistema extensivo la mezcla

debe tener al menos un 70% de material poroso con diámetro de 3.2mm. La profundidad mínima deberá de ser de 10 cm, este valor define el tipo de techo si es extensivo hasta 18 cm o intensivo mayor a 40 cm (Richter, 2016; Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2018c). Al sustrato se le puede agregar partículas de material poroso, esto permite reducir su peso, aumentar la aislación térmica y facilitar la respiración a las raíces.

La última capa es la de vegetación, la cual proporciona a la construcción un área verde de carácter ecológico al llevarse a cabo en esta el proceso natural de la fotosíntesis. Esta capa es integrada por una variedad de especies vegetales preferentemente plantas adaptables a las propiedades del sustrato y a las condiciones climatológicas de la zona.

La vegetación varía según el tipo de techo verde que se instale, por lo que en el caso de un techo verde intensivo pueden tener desde pastos hasta arbustos y árboles; en cambio por el espesor del sustrato del techo verde extensivo solo es posible plantar especies pequeñas estas pueden ser plantas del género *Sedum* de la Familia *Crassulaceae*, comúnmente conocidas con el nombre de suculentas, las cuales dentro de sus características es la resistencia a sequía (Dvorak y Volder, 2011). Así mismo es posible promover el crecimiento de plantas nativas en los techos verdes siempre que estas se adecuen a las condiciones de este (Monterusso, Bradley Rowe, y Rugh, 2005).

1.5. Servicios ecosistémicos

La implementación de los techos verdes como ecosistema inducido en la infraestructura de las áreas urbanas en la actualidad ha sido impulsada por los servicios ecosistémicos que brindan, los cuales se definen como los beneficios tangibles o intangibles que las personas obtienen de los ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment, 2003). Los beneficios del techo verde hacen de este una respuesta integral e ideal para las ciudades compactas. En particular los servicios ecosistémicos aportados por los techos verdes, tanto intensivos como extensivos, son mencionados en la tabla 3.

Tabla 3. Servicios Ecosistémicos

<p>Servicios culturales. Productos no materiales obtenidos de los ecosistemas</p>	<p>Diversidad cultural Valores educativos Valores espirituales Inspiración Valores estéticos Relaciones sociales Sentido de pertenencia Valores del patrimonio cultural Recreación y ecoturismo</p>
<p>Servicios regulatorios. Beneficios obtenidos de la regulación de los procesos del ecosistema</p>	<p>Regulación y purificación de agua Mejoría en la calidad del aire Climatológicos Regulación de enfermedades humanas Control biológico Polinización Protección contra tormentas</p>
<p>Servicios de aprovisionamiento. Productos obtenidos de los ecosistemas</p>	<p>Alimento y fibra Combustible: leña Bioquímicos Recursos ornamentales Agua fresca Recursos genéticos</p>
<p>Servicios de soporte. Necesarios para la producción de otros servicios ecosistémicos.</p>	<p>Ciclo de nutrientes Ciclo de oxígeno y de carbono Producción primaria</p>

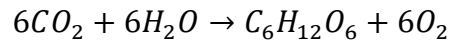
Fuente: Elaboración propia con base en (Millennium Ecosystem Assessment, 2003)

1.5.1. Fotosíntesis

Como se mencionó el techo verde aporta servicios de soporte durante los ciclos de oxígeno y de carbono, ya que la vegetación tiene la capacidad de secuestrar CO₂ esto se entiende como su eliminación directa de la atmósfera a través de la fotosíntesis y la fijación de carbono en la vegetación (Kuronuma et al., 2018).

La fotosíntesis es un proceso metabólico bioquímico, está relacionado con la física de la luz, de los organismos autótrofos, es esencial para la vida y en un techo verde se puede desarrollar en su vegetación. De manera general, durante la fotosíntesis, los compuestos orgánicos son obtenidos a partir de la energía procedente del sol. Consiste en dos reacciones, en la primera (reacción luminosa) se capturan luz y agua (H₂O) para generar energía química en forma de Adenosín trifosfato (ATP) y

Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADPH), liberándose oxígeno (O₂) como subproducto. En la segunda reacción (ciclo de Calvin) se utilizan los dos primeros productos (ATP y NADPH) para la generación de glucosa (Nabors, 2006), este proceso se expresa con la siguiente fórmula:



La fotosíntesis C₄ es un proceso en donde las plantas fijan CO₂ y genera un ácido dicarboxílico, esto usualmente se encuentra en plantas de climas cálidos y secos para compensar la pérdida de agua. Las hojas consiguen el CO₂ por medio de sus estomas los cuales se abren para permitir la difusión del CO₂ por un diferencial de concentración, el carbono se fija por la producción de azúcares de cuatro carbonos. Esta vía mantiene una gran concentración de CO₂ en las hojas, lo cual permite que las plantas continúen la generación eficaz de azúcares. Las plantas con fotosíntesis C₄ liberan el CO₂ a distintas partes de la planta donde existen enzimas del ciclo Calvin (Nabors, 2006).

Las plantas comúnmente utilizadas en un techo verde de tipo extensivo son las suculentas, por sus características y su metabolismo que las hacen resistentes a climas extremos. El metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, por sus siglas en inglés) es similar a la fotosíntesis C₄, pero en el CAM son reunidos y transformados diariamente ácidos orgánicos. El CAM se considera como un paso adicional y de preparación al ciclo de Calvin, en donde las células fotosintéticas tienen un crecimiento en la concentración de CO₂. Las plantas con CAM se encuentran en sitios cuyas características climatológicas son cálidos y secos por lo que estas no abren sus estomas durante el día para mantener su almacenamiento de agua, al anochecer y con la reducción de la temperatura, este tipo de plantas abren sus estomas para absorber grandes cantidades de CO₂ (Freeman, 2011; Monroy-Ata y Vázquez-Benitez, 2014).

La fijación del CO₂ ocurre por la reacción de carboxilación del ácido fosfoenolpirúvico mejor conocido como PEP, catalizada por PEP carboxilasa en el citosol incrustándose temporalmente en ácidos orgánicos y acumulados en las vacuolas centrales de las células fotosintéticas, durante el día se libera el CO₂ y

comienza el ciclo de Calvin. El CAM depende de las propiedades gruesas, blandas y jugosas de las plantas de la familia *Crassulaceae*, las cuales contribuyen al incrementar su cualidad de acumulación esto por la limitada conexión entre superficie y volumen con lo cual el cambio continuo de los gases es corto (Pérez-Urria, 2009).

1.6. Techos verdes en el mundo y sus servicios ambientales

La existente necesidad para adaptar las zonas urbanas al cambio climático y mitigar los efectos negativos al medio ambiente producidos por el aumento de las emisiones de GEI, emitidos usualmente por las actividades antropogénicas, han promovido la creación de diversas opciones una de ellas que ha tenido resultados positivos en algunas partes del mundo son los techos verdes. Algunos efectos son el embellecimiento del paisaje, aislamiento acústico, protección contra incendios y la generación de efectos psicológicos positivos en las personas (Minke, 2016). En distintos países la instalación de techos verdes en sus zonas urbanas ha posibilitado su estudio, la comprobación de los beneficios y su aprovechamiento.

La rentabilidad de un techo verde depende de muchos factores entre los que se encuentran la reducción de temperatura y el ahorro energético, estos se han comprobado en varias ciudades como Taiwán en China y Toronto en Canadá (Bass, 2008; Lin, Yu, Su, y Lin, 2013), ambos son beneficios que atraen la atención de la sociedad y el gobierno por significar una economización en las construcciones. En un centro social de usos múltiples en Valencia, España se redujo en un 30% y 15% el consumo de energía en época de verano y en invierno respectivamente (Peñalvo-López, Cárcel-Carrasco, Alfonso-Solar, Valencia-Salazar, y Hurtado-Pérez, 2020). En Latina, Roma, la simulación de un techo convencional comparado con un techo verde demuestra un comportamiento térmico estable por parte de este, con flujos de calor menores que en un techo convencional lo que genera un mejor confort térmico (Guattari, Evangelisti, Asdrubali, y De Lieto Vollaro, 2020).

En relación a estos beneficios está la disminución del efecto isla de calor, que ha sido comprobado a escala vecindario por medio de un programa de simulación en

Hong Kong, China (Peng y Jim, 2013). La evaluación comparativa de techos reflectivos con los techos verdes respecto a la disminución de la temperatura urbana, resultó en que estos disminuyen 130% más que el techo reflectivo (Alchapar, Correa, y Cantón, 2018).

Respecto a la modificación en temperaturas interiores y el comportamiento térmico se ha estudiado en las ciudades de La Rochelle, Francia; Atenas, Grecia; Estocolmo, Suecia y Lérida, España. Los resultados demostraron que en el interior de los inmuebles en temporadas cálidas se mantuvo una temperatura fresca y el calor se preservó en el interior durante la época de frío. (Bevilacqua et al., 2015; Bowler, Buyung-Ali, Knight, y Pullin, 2010; Jaffal, Ouldboukhitine, y Belarbi, 2012). En Israel un techo verde con plantas nativas anuales, disminuyó 8°C la temperatura interna del inmueble (Schindler, Blaustein, Vasl, Kadas, y f, 2019).

En relación a la actividad frente a la contaminación del aire por parte de los techos verdes, encontramos el secuestro de CO₂, el cual fue medido en la ciudad de Michigan, E.U.A. (Getter et al., 2009), en el mismo país pero en la ciudad de Chicago se determinó la eliminación exitosa de contaminantes como: ozono, bióxido de nitrógeno, bióxido de azufre y partículas PM₁₀ (Yang, Yu, y Gong, 2008) por la instalación de un techo verde.

En techos verdes de Copenhague, Dinamarca y de Ginebra, Suiza fue demostrada su capacidad como sumidero de carbono al secuestrar un promedio de 317 gC/m² anualmente (Auer, 2018). Asimismo por medio de modelación informática se estimó el mejoramiento en la calidad del aire en las ciudades de Seúl, Corea del Sur y de Kansas, E.U.A. (Baik, Kwak, Park, y Ryu, 2012; U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2018).

La capacidad de retención de agua de lluvia se ha demostrado en techos verdes de construcciones de Alemania y Misuri, E.U.A; (Harper, Limmer, Showalter, y Burken, 2015; Richter, 2016), también fue corroborado en módulos experimentales en la provincia de Gansu, China, y en países de América del Sur como Argentina, Colombia, Venezuela (Gomez, Galarza-Molina, y Torres, 2017; Liu et al., 2019). Se estima que los techos verdes pueden retener un 16% de la escorrentía urbana

(Lopez Machado, Barreto Cordero, Rodriguez Alvarado, y Romero Cabrera, 2020), por medio de simulaciones digitales se establecieron a los techos verdes como una estrategia eficaz para la gestión del agua pluvial en Buenos Aires, Chapinero y en Bruselas, Bélgica, se determina que mientras mayor cantidad de techos verdes existan en las ciudades las inundaciones tienden a disminuir (Contreras-Bejarano y Villegas-González, 2019; Mentens, Raes, y Hermy, 2006; Rosatto et al., 2013).

Las investigaciones en Basilea, Suiza y Hong Kong, China evidenciaron que los techos verdes son un espacio libre de actividades humanas lo cual favorece el hábitat para la flora y fauna (Brenneisen, 2006; Deng y Jim, 2017), en ambos casos la fauna llegó naturalmente al techo verde lo cual fomenta el regreso de la biodiversidad a las ciudades. En Bogotá, Colombia fue posible la proliferación de plantas nativas y suculentas (Pizón, 2017), asimismo en esta ciudad y en Utrecht, Países Bajos, instalaron techos verdes en paraderos de autobuses para fomentar la biodiversidad, enfocado a ser un espacio para las abejas; mientras que algunos techos verdes de Nueva York han sido acondicionados como espacios para la agricultura urbana (Harada y Whitlow, 2020; Hirsh, 2019), estos ejemplos permiten entender que en cualquier tipo de techo es posible crear un zona para que la flora y fauna exista.

No existe un dato específico respecto al área ocupada por techos verdes en el mundo, pero estos se pueden encontrar en distintos países, en construcciones tanto públicas como privadas. Algunos ejemplos son el centro Fukuoka en Japón, el Instituto del Cambio global en la Universidad de Queensland en la ciudad de Brisbane en Australia, el Centro de Convenciones de Vancouver en Canadá y la Universidad Tecnológica de Nanyang en Singapur (Somvichian-Clausen, 2016).

Lo expuesto permite entender que los techos verdes no aportan solo un beneficio por instalación, ofrecen múltiples beneficios todos estos contribuyen a la adaptación de las ciudades al cambio climático. Con el estado del arte mostrado se elaboró la tabla 4 donde se clasificaron seis beneficios obtenidos por los techos verdes.

Tabla 4. Beneficios de los techos verdes en el mundo.

Beneficio	Ciudad	País
Aislamiento de temperatura y ahorro energético	Taiwán	China
	Toronto	Canadá
	Valencia	España
Disminución del efecto isla de calor	Latina	Roma
	Hong Kong	China
Aislamiento de temperatura	Mendoza	Argentina
	La Rochelle	Francia
	Atenas	Grecia
	Estocolmo	Suecia
	Lérida	España
Mitigación contaminación del aire	Jerusalén	Israel
	Michigan	E.U. A
	Chicago	E.U. A
	Copenhague	Dinamarca
Retención de agua de lluvia	Ginebra	Suiza
	Hamburgo	Alemania
	Misuri	E.U. A
	Gansu	China
	Buenos Aires	Argentina
	Bruselas	Bélgica
	Barquisimeto	Venezuela
	Bogotá	Colombia
	Buenos Aires	Argentina
Chapinero	Colombia	
Biodiversidad	Basilea	Suiza
	Hong Kong	China
	Bogotá	Colombia
	Nueva York	E.U.A.
	Bogotá	Colombia

Fuente: Elaboración propia

1.7. Techos verdes en México

Los techos verdes también han sido objeto de estudio en México, en la literatura encontrada el beneficio más estudiado de manera tanto experimental como teóricamente es la reducción de temperatura al interior de los edificios con resultados que demuestran su funcionalidad en este ámbito como por ejemplo en Veracruz la evaluación de casas sin y con techo verde resultó en una disminución de hasta 4.5°C (Beltrán-Melgarejo, Vargas-Mendoza, Pérez-Vázquez, y García-Albarado, 2014). Otro caso es en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, donde se aminoró en un 28% el consumo de energía eléctrica por la reducción del uso de aire

acondicionado (Trujillo, Rangel, y Castañeda, 2015). El siguiente enfoque con mayor desarrollo es la aplicación de techos verdes para el mejoramiento de la calidad del aire, estos se describen en la tabla 5, en donde se puede observar que aún no existe un enfoque en modificar y evaluar los elementos que conforman un techo verde o estimar su impacto social.

Tabla 5. Estado del arte del techo verde como objeto de estudio en México

Enfoque	Metodología	Resultados	Sitio
Reducción de la temperatura interna	Modelo climatológico histórico	Reducción de temperaturas exteriores, oscilación térmica y consumo de electricidad	Tuxtla Gutiérrez (Trujillo et al., 2015)
	Aligeramiento del sistema del techo verde y encuesta	Mejoramiento del confort térmico y de la temperatura interna	Veracruz (Beltrán-Melgarejo et al., 2014)
	Monitoreo de temperaturas y análisis estadístico	Eficiencia del techo verde en un clima cálido seco por la disminución de temperatura interna	Baja California (Sahagun-Valenzuela, Camacho-Ixta, González-Treviso, y Armendáriz-López-José, 2018)
	Modelo matemático de la transferencia de calor	Mejoramiento del confort de térmico, reducción en la fluctuación de temperaturas y en la temperatura interna	CDMX (Polo-Labarrios, Quezada-García, Sánchez-Mora, Escobedo-Izquierdo, y Espinosa-Paredes, 2020)
	Modelo matemático de la transferencia de calor y monitoreo de temperaturas	Modelo matemático comprobado que puede estimar la transferencia de calor por un techo verde heterogéneo	CDMX (Quezada-García et al., 2017)
Mejoramiento de la calidad del aire	Modelo meteorológico.	Limitación en la dispersión de contaminantes.	CDMX (Vázquez et al., 2016)
	Estimación de GEI por ACV	Reducción de GEI, del consumo de energía, fijación de 69 kgCO ₂ eq en un techo verde con plantas sedum	Yucatán (Cerón-Palma et al., 2013)
	Estimación de la captación de CO ₂	Techos verdes de 100m ² plantas sedum captan 1.8X10 ⁸ ppmCO ₂	CDMX (Collazo-Ortega, Rosas, y Reyes-Santiago, 2017)
Espacio para vegetación nativa y suculentas	Sobrevivencia de especies vegetales y caracterización del sustrato	La sobrevivencia de las plantas no depende del sustrato. Crecimiento de cobertura positivo.	Yucatán (Ordóñez-López, Zetina-Moguel, y Pérez-Cortés, 2012)
Mejora en la calidad del agua	Análisis del agua de lluvia infiltrada en el techo verde	Reducción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	Estado de México (Arellano-Leyva, Hernández-Quiróz, Huerta-Guzmán, y Collazo-Ortega, 2017)

Fuente: Elaboración propia

El desarrollo innovador de aplicar otros materiales en la estructura del techo verde como lo propuesto en este trabajo de tesis al sustituir la capa drenante polimérica por el reúso de paja y fibra de coco considerados como materiales orgánicos drenantes no ha sido estudiado en el país.

En ciudades como Puebla, Querétaro, Guadalajara y Monterrey se pueden encontrar inmuebles con muros y techos verdes; actualmente existen empresas dedicadas a su instalación, pero por parte de los gobiernos municipales, estatales o federales no hay cifras oficiales que representen la superficie ocupada por techos verdes. Algunos casos exitosos de la implementación de los techos verdes se enlistan a continuación.

- La Universidad Autónoma de Querétaro tiene en distintas áreas de su infraestructura edificios con techos verdes (Calvo–Ramos, Gómez–De la Cruz, y Rodríguez–Hernández, 2016).
- Instalación de techos verdes de tipo extensivo en las plazas de Guadalajara, “Torres Andares Vida” y “Andares Palacio de Hierro” constituyendo una superficie total de 1,275 m² (Plántica., 2013; Plántica, 2011).
- La empresa “Enverde” establecida en Cholula, Puebla han realizado instalaciones en construcciones privadas, dentro de las cuales destaca un techo verde de 370m² (Enverde, 2019) .
- El Museo del Acero Horno 3, tiene dos techos verdes uno de tipo extensivo de 700m² y uno del tipo intensivo de 1000m², estos son parte del proyecto de restauración sustentable del horno de fundición (Yávar, 2014).

De acuerdo con el inventario de áreas verdes urbanas de la SEDEMA, se filtraron los datos de los techos verdes en la CDMX para conocer su superficie total, que es 23,511.05 m² (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2017b). Esta área se distribuye en 11 de las 16 alcaldías en la CDMX, la tabla 6 presenta las áreas de techos verdes por alcaldía de la Ciudad de México.

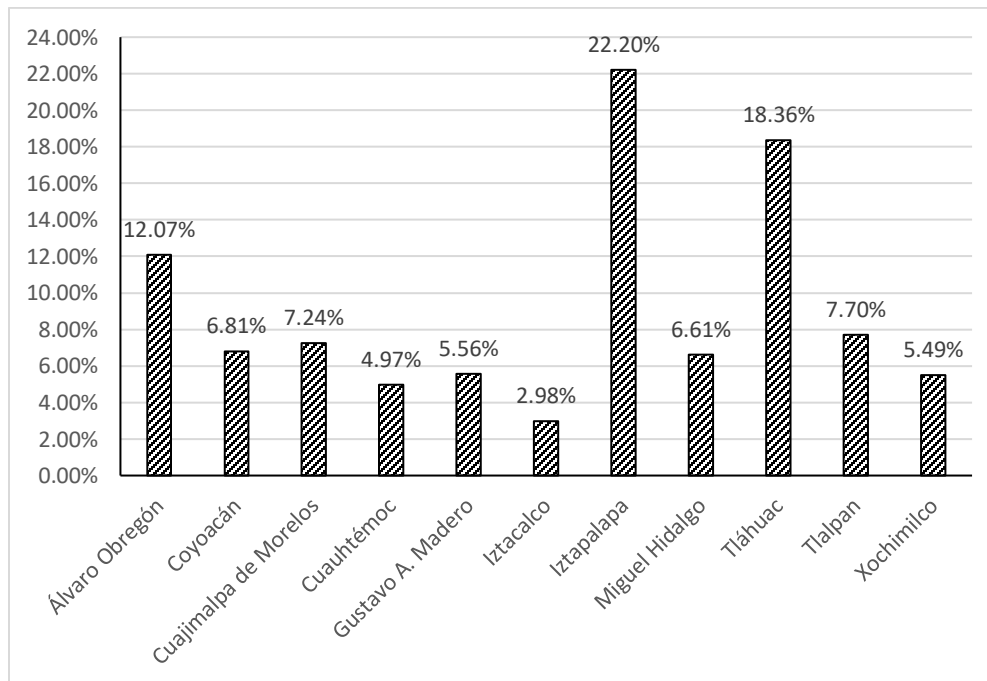
Tabla 6. Superficie de techos verdes por alcaldía

Alcaldía	Superficie techos verdes (m²)
Álvaro Obregón	2837.92
Coyoacán	1600.18
Cuajimalpa de Morelos	1702.85
Cuauhtémoc	1167.76
Gustavo A. Madero	1307.55
Iztacalco	700.41
Iztapalapa	5220.16
Miguel Hidalgo	1554.70
Tláhuac	4317.66
Tlalpan	1810.64
Xochimilco	1291.22

Fuente: Elaboración propia con información de SEDEMA (2017a)

La división porcentual por alcaldía respecto a los techos verdes y a su AVU, se exhibe en la siguiente gráfica, se destaca a Iztapalapa como la alcaldía con mayor porcentaje de superficie verde por azoteas naturadas.

Gráfica 3. Porcentaje de la superficie de techos verdes por alcaldía



Fuente: Elaboración propia con información de SEDEMA (2017a)

El trabajo de esta tesis se realiza en la alcaldía Gustavo A. Madero, con una superficie total de 87.78 km² de la cual solo el 8.9% es área verde urbana, dentro de este porcentaje, en la colonia Loma de la Palma existen cuatro techos verdes cuya área total es de 1,307.55 m² (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2017a).

Capítulo 2.

METODOLOGÍA

El capítulo describe la definición de las variables, así como las metodologías para evaluar los materiales orgánicos residuales propuestos para establecer la condición y evolución del techo verde de estudio, asimismo calcular la captura de CO₂ en la vegetación, describir el diseño y establecimiento de los prototipos de techo verde, por último, explicar la valoración de la apreciación de la sociedad al techo verde de estudio.

2.1. Generalidades de la metodología

El techo verde como se ha mencionado en los antecedentes y en el capítulo 1, es un recurso empleado en las zonas urbanas para adaptarse al cambio climático y disminuir ciertos impactos de este por sus múltiples beneficios los cuáles son aportados principalmente por su vegetación.

El proceso de la fotosíntesis es fundamental para la subsistencia de toda vida en el planeta, las especies vegetales, donde quiera que se encuentren, de forma natural por medio de este proceso utilizan la energía solar con el propósito de convertir materia inorgánica en orgánica. De tal manera que las plantas absorben CO₂ de la atmósfera y almacenan en su estructura una parte del carbono, expulsando oxígeno al ambiente. Es por lo descrito que la captación de carbono y CO₂ puede considerarse como una guía para valorar la aplicación medioambiental de los techos verdes.

La principal causa que pueden afectar la eficiencia en la captación de CO₂ en un techo verde es el índice de área foliar al ser este valor directamente proporcional a la capacidad de captura, otros factores que podrían impactar pueden ser la altura, su biomasa, su edad y las características del sustrato (Wan Ismail, Abdullah, y Che-Ani, 2019), debido a lo señalado se evaluará la condición de la flora en el techo verde.

Los techos verdes extensivos al ser un espacio no accesible para los humanos pueden propiciar un entorno de libre desarrollo para fauna como insectos y aves (Brenneisen, 2017); y al mismo tiempo pueden convertir el entorno donde se encuentran en un lugar con cualidades estéticas únicas (Tsantopoulos, Varras, Chiotelli, Fotia, y Batou, 2018) las cuales pueden ser apreciadas por la comunidad.

La metodología para comprobar la hipótesis planteada es de tipo mixta cualitativa-cuantitativa, con las variables señaladas en la tabla 7. Respecto a la evaluación de la captación de carbono y CO₂ se seleccionaron las plantas *S. dendroideum* y *S. rubrotinctum*, como comparativo con lo realizado en el techo verde del Jardín

Botánico de Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) al sur de la CDMX (Collazo-Ortega et al., 2017).

Tabla 7. Variables independientes y dependientes

Variables independientes	Variables dependientes
Especies seleccionadas de vegetación: <i>S. dendroideum</i> y <i>S. rubroinctum</i>	Captación de CO ₂
Techo verde ligero extensivo	Biodiversidad de insectos y plantas oportunistas
Paja y fibra de coco	pH, fracción orgánica y retención de agua
Sociedad de CIEMAD	Apreciación del techo verde

Fuente: Elaboración propia

El desarrollo de la metodología consta de seis principales análisis: a) caracterización fisicoquímica, b) inventario de la vegetación, c) cuantificación de CO₂, d) diseño e instalación de prototipos, e) estimación de la biodiversidad, f) análisis de ciclo de vida, g) análisis costo-beneficio, y h) la evaluación de la apreciación por la sociedad; en la tabla 8 se distingue su realización en los prototipos y en el techo verde de estudio.

Tabla 8. Análisis realizados en la metodología

Evaluación	Prototipos	Techo verde de estudio
Caracterización fisicoquímica de los materiales orgánicos:		
•pH	X	X
•Sales disueltas	X	X
•Retención de agua	X	X
Estimación de la captación de CO ₂ teórico en la vegetación	X	X
Cuantificación experimental en la vegetación para obtener:		
•Captación de carbono y CO ₂		X
Biodiversidad vegetal: crecimiento y sobrevivencia	X	X
Biodiversidad animal: abundancia específica		X
Análisis de ciclo de vida		X
Análisis costo-beneficio		X
Encuesta para el diagnóstico de la apreciación por la sociedad		X

Fuente: Elaboración propia

2.2. Caracterización de materiales orgánicos

Las propiedades de los materiales orgánicos residuales paja y fibra de coco, aportan información que sustenta su capacidad para proveer las condiciones requeridas en la capa drenante de un techo verde como lo son: almacenamiento y distribución de agua, protección mecánica de la superficie y espacio favorable para las raíces.

Entre las principales propiedades físicas para un sustrato idóneo que soporte la vegetación en un techo verde es una alta porosidad y una densidad menor a 140 kg/m², además de las propiedades químicas como un pH entre 5.5-6.8, una baja conductividad eléctrica (CE) y bajo contenido de sales disueltas (Barbaro, Soto, Sisaro, Karlanian, y Stancanelli, 2017). Resultado de lo anterior, los parámetros más esenciales por evaluar en los materiales orgánicos residuales y el sustrato son: la humedad, el pH, y las sales disueltas. A continuación, se especifican los materiales y procedimientos realizados, cabe mencionar que para cada material se realizó un tratamiento previo el cual consistió en su deshidratación, separación y homogeneización.

2.2.1. Medición de la humedad

El fundamento para determinar la humedad en los materiales orgánicos residuales es conocer la capacidad de retención de agua en estos por medio de un método gravimétrico diferencial donde el material seco es saturado por agua y posteriormente desecado.

El inicio de esta medición consta en tomar 10 g de cada muestra homogeneizada y humedecer con 100 ml de agua destilada durante 24 horas. Después de este tiempo retirar la fibra de la solución (referida en adelante como solución remanente) para remover de manera manual el exceso de agua con papel filtro, la muestra fue colocada en un desecador a temperatura ambiente durante 24 horas, al terminar este período se pesó en la balanza analítica, de acuerdo con la NMX-AA-16-1984, 1984 por diferencia de peso se obtiene la capacidad de retención de agua; de este

procedimiento se conserva la solución remanente con la finalidad de medir el pH y las sales disueltas, descritas a continuación.

2.2.2. Medición de pH

La evaluación del pH es un método del tipo galvanométrico el cual utiliza un equipo medidor conocido como pHmetro o potenciómetro basado en la diferencia de potencial de una celda electroquímica, esta a su vez se compone de dos celdas: un electrodo de medición (EM) y un electrodo de referencia, en donde el potencial del EM se atribuye al movimiento o actividad del ion hidrógeno de la solución de medición. De acuerdo con la NMX-AA-008-SCFI-2016, se define como una magnitud en función de la actividad relativa de los iones de hidrógeno en una disolución.

La evaluación de pH se realizó a temperatura ambiente y consistió en tomar de la solución remanente una alícuota de 10 ml y colocarla en un vaso de precipitados para introducir el potenciómetro marca HANNA y obtener el valor de pH.

2.2.3. Medición de Sales

La medición de sales es un método gravimétrico, el cual se fundamenta en la cuantificación de sólidos disueltos y de materia orgánica en un líquido, mediante la evaporación y calcinación de las muestras. La técnica sigue la norma mexicana NMX-AA-034-SCIFI-2015, se tomaron 10 ml de la solución remanente de cada muestra estas se depositaron en cápsulas de porcelana, a continuación, estas se ubicaron en la parrilla de calentamiento a 65°C, después se removió la humedad en la estufa a 105°C, por último las muestras fueron colocadas en el desecador, después el peso es registrado hasta obtener el peso constante.

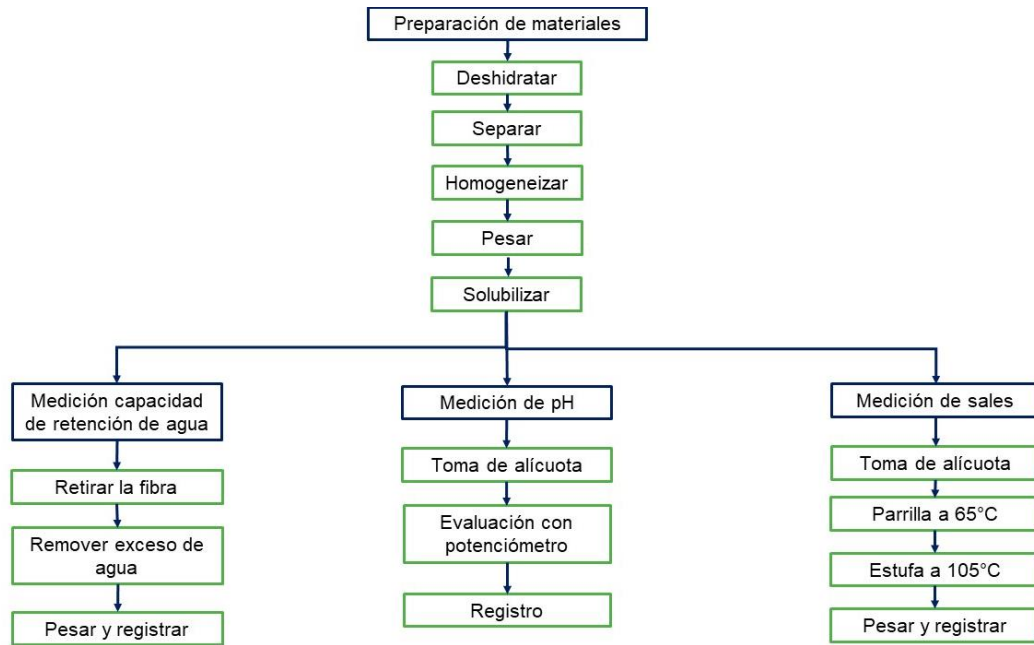


Figura 3. Diagrama caracterización fisicoquímica

Fuente: Elaboración propia

2.3. Biodiversidad vegetal en el techo verde de estudio

Las plantas suculentas fueron identificadas según su tipo con apoyo de las imágenes mostradas en la tabla A del anexo, así mismo fueron contadas y en su totalidad, para esto se colocaron etiquetas enumeradas en cada una y se registró el número total. También para evaluar su crecimiento se midió la talla de las plantas, los datos obtenidos se señalan en tabla B del anexo.

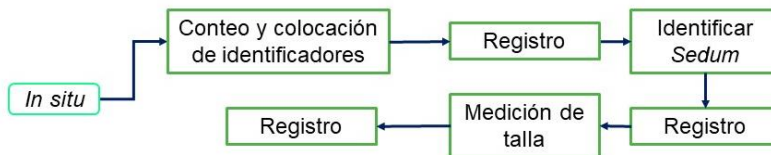


Figura 4. Diagrama inventario de vegetación

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos y las fórmulas 1 y 2 del Anexo se calcula la tasa de crecimiento (T_c) por especie y la tasa de sobrevivencia (T_s) por especie presente en el techo verde de estudio (Hastwell y Facelli, 2003).

2.4. Análisis para la cuantificación de la captación de CO₂ en el techo verde y prototipos

Existen diversas metodologías para medir CO₂ en la vegetación, algunas de estas son el incremento en la acidez tisular (Nobel, 1988) o la medición de isótopos estables del carbono (Goldstein et al., 1996; Squeo y Ehleringer, 2004; Santiago et al., 2005), también el carbono fijado en la flora se puede estimar por la composición química con análisis bromatológicos de los cuales por medio de una serie de etapas térmicas hasta la calcinación se obtiene la humedad, proteína, fibra y cenizas (Marcos Solorio, Martínez Campos, López Urquídez, López Orona, y Arteaga Reyes, 2016). En la siguiente tabla se presentan los equipos utilizados y los resultados de estudios enfocados en la captura de carbón de la vegetación en techos verdes, donde en la mayoría se utilizaron analizadores de gases elementales.

Tabla 9. Técnicas y resultados de captura de CO₂ y carbón en techos verdes

Equipo	Carbón capturado (gC/m ²)	Período de evaluación	Sitio
Analizador de gases elementales - Carlo Erba NA1500	168	2 años	Chicago, E.U.A. (Getter et al., 2009)
Analizador de carbón orgánico total - Multi C/N 2100 y HT 1300	6,470	1 año	Chengdu, China (Luo et al., 2015)
Analizador de gas infrarrojo (IRGA)	180,000	1 año	Ciudad de México, México (Collazo-Ortega et al., 2017)
Analizador de gases elementales - Carlo Erba NA1500	3,910	1 año	Michigan, E.U.A. (Whittinghill, Rowe, Schutzki, y Cregg, 2014)
Analizador de gases elementales – Flash EA 1112 S. Leco	36.52	9 meses	Murcia, España (Ondoño, Martínez-Sánchez, y Moreno, 2016)

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, todos los métodos anteriores parten del principio fundamental del intercambio de gases entre la planta y la atmosfera, así como en el caso de los análisis bromatológicos basados en la desintegración de la materia orgánica hasta obtener el carbono total. Para este trabajo se utilizó una metodología destructiva

para cuantificar la captación de CO₂ en *S. dendroideum* del techo verde de estudio esta es descrita a continuación.

2.4.1. Evaluación de la captación de CO₂ en la vegetación del techo verde a partir de la biomasa (método destructivo).

Esta medición consistió en adecuar la determinación analítica de humedad y de cenizas el fundamento de ambas determinaciones se basa en obtener un residuo seco después de someter a elevadas temperaturas de ignición y oxidación la muestra en este caso la planta o la porción de la planta (Nollet y Toldrá, 2015). Esto se compaginó con lo propuesto en Ruiz, Rodríguez, Leyva, y Enríquez, (2014) y por Eksi y Rowe, (2016b) sobre la estimación de biomasa y carbono aplicado para conocer la cantidad de carbono en árboles por medio de un método destructivo, que consiste en la separación del árbol en sus componentes, la medición de su altura, peso fresco o húmedo y el peso seco, este es un método gravimétrico, el cálculo se realizó por medio de la diferencia entre los pesos secos iniciales y los finales.

Las metodologías presentadas son la base para realizar el análisis térmico diferencial gravimétrico, donde el primer paso es la recolección de una planta *S. dendroideum* entera desde su raíz y seleccionar otras dos plantas de las cuales se tomó una muestra de la parte superior con ramas y hojas seccionadas desde el tallo, las cuales se dividieron en tres partes para su análisis. Tanto las plantas enteras como las muestras se resguardaron en bolsas herméticas para su traslado desde el techo hasta el Laboratorio de Análisis y Monitoreo Ambiental del CIEMAD

A continuación, de manera individual se midió y registro la longitud, inmediatamente se colocaron en la balanza gravimétrica y se registran los pesos iniciales a temperatura ambiente (p₀), estos valores son el peso húmedo inicial de la planta.

Las muestras se desecaron en una prensa botánica con material absorbente que se cambia continuamente durante cuarenta y cinco días, después se pesan (p₁). El siguiente paso para completar la deshidratación y eliminar por completo el agua de las muestras es el secado en estufa a 60°C, para ello se colocó cada muestra en

una charola de plástico, estas se introdujeron a la estufa, después de 23 horas se retiraron y fueron pesadas (p2).

A continuación, las muestras se ubicaron en cápsulas de porcelana previamente preparadas a peso constante e introducidas a la mufla programada a 250°C durante 1 hora, después de terminado el proceso se retiraron las cápsulas y se colocaron en un desecador, para permitir enfriar y registrar el peso total de cada cápsula (p3), las muestras al terminar este proceso pierden algunos compuestos volátiles y carbohidratos.

Para retirar la hemicelulosa, celulosa y lignina de las plantas, para obtener el carbón total acumulado en las muestras, estas se introducen nuevamente a la mufla, en esta ocasión preparada a 550°C durante 1 hora, una vez terminado el procedimiento, se retiran y colocan las cápsulas en un desecador, se enfrían y se pesan(p4).

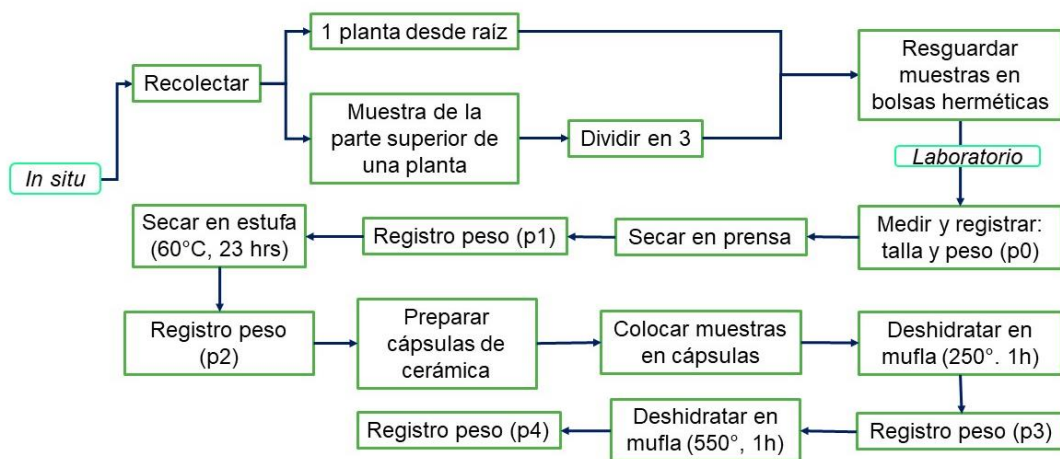


Figura 5. Diagrama medición de CO₂ por estimación de biomasa

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de los datos obtenidos se utilizó la memoria de cálculo presente en el anexo. A continuación, se muestra el diagrama del proceso estimación de biomasa en *S. dendroideum* con evidencia fotográfica.



Figura 6. Diagrama del proceso estimación de biomasa en *Sedum dendroideum*

Fuente: Elaboración propia con imágenes originales

2.5. Estructuración del control experimental (prototipos)

La propuesta de los prototipos sirve para conocer y aportar alternativas para la instalación de un techo verde ligero, se diseñó originalmente para la evaluación de residuos orgánicos: hoja de maíz, fibra de maguey y fibra de coco, como sustrato para ser utilizado en techos verdes (Martínez-Rodríguez, 2019).

El prototipo consta de un contenedor cuadrado fabricado de aluminio con superficie de 1 m², y base de acrílico que funciona como la capa impermeabilizante. Además, esta evaluación realizada también en el CIEMAD, demostró a la fibra de coco como un buen material para retener agua y apto para la sobrevivencia de plantas nativas (Martínez-Rodríguez, 2019).

Es por lo descrito anteriormente que se utilizaron estos prototipos, en la azotea contigua al techo verde de estudio, en este caso haciendo uso de los materiales orgánicos residuales como la capa drenante, la tierra como sustrato y la vegetación. El techo verde de estudio cuenta con 5 kg/m² de paja como material de la capa drenante, se propuso esta misma relación de drenante-superficie para los prototipos en las siguientes combinaciones.

Tabla 10. Detalle de prototipos propuestos

	Material orgánico drenante	Cantidad requerida (kg/m²)	Espesor (cm)
Prototipo A	Fibra de coco	5	10
Prototipo B	Paja	2.5	10
	Fibra de coco	2.5	

Fuente: Elaboración propia

En las imágenes 5 y 6, se ilustra la estructura de cada prototipo. Los materiales empleados fueron: dos prototipos vacíos, dos palas, una regadera con agua para plantas, 7.5 kilos de fibra de coco, 2.5 kilos de paja, 5 kilos de la tierra que funcionará como sustrato y plantas de la especie *S. dendroideum* y *S. rubroinctum*.

El prototipo A se montó en tres capas: la primera compuesta por 5 kilos de fibra de coco colocados homogéneamente en la superficie, encima de este se colocaron 5 kilos de la tierra, el paso siguiente fue sembrar las plantas de cada especie a analizar; finalmente se irrigaron las plantas desde la raíz con ayuda de la regadera.

Respecto a la instalación del prototipo B también consta de tres capas, en este caso se hizo primero la mezcla de 2.5 kilos de fibra de coco y 2.5 kilos de paja, a continuación, se acomodó uniformemente en la base del prototipo y se prosigue con

las siguientes dos capas como lo realizado para el prototipo A. El espesor total en ambos prototipos fue de 20 cm, contando el material orgánico drenante y el sustrato.

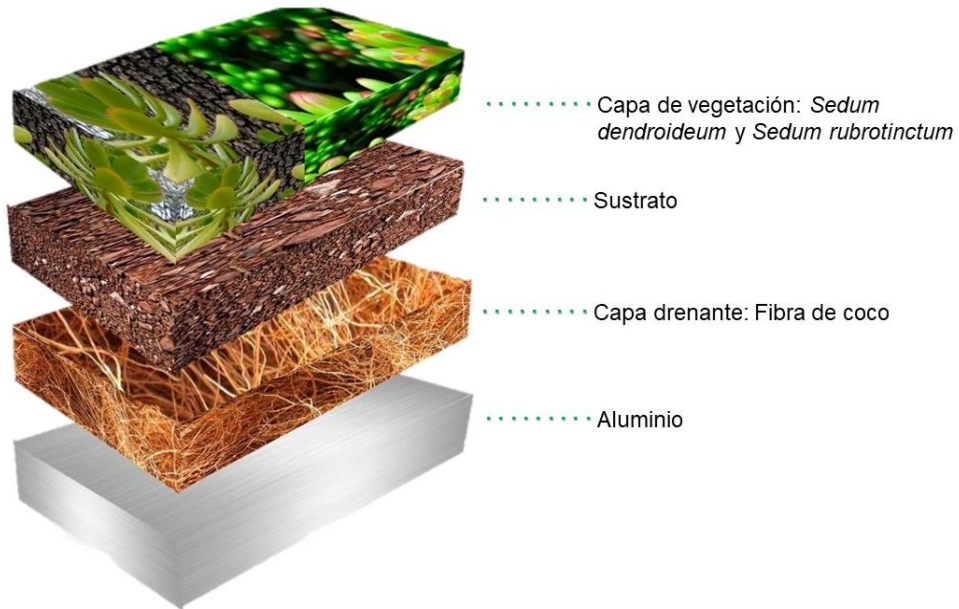


Imagen 5. Estructura prototipo A.

Fuente: Elaboración propia

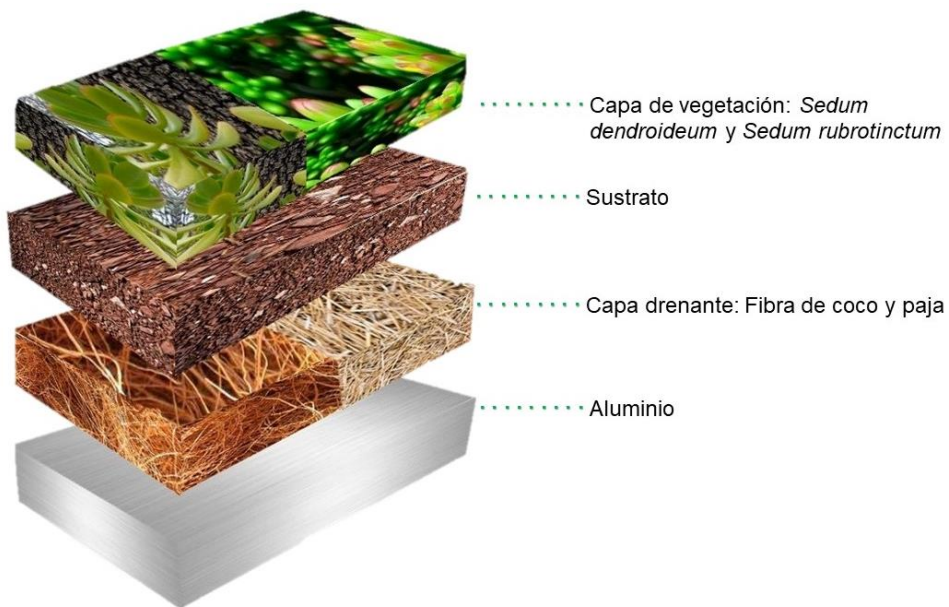


Imagen 6. Estructura prototipo B.

Fuente: Elaboración propia

Los prototipos colocados en el espacio adjunto al de techo verde de estudio, sirvieron como punto de comparación entre el funcionamiento de la fibra de coco y la mezcla de este con paja como drenante. Los prototipos se disponen de acuerdo a la tabla 11, el prototipo 1 fue conformado por 6 filas con plantas de la especie *S. dendroideum* y *S. rubroinctum* mientras que el prototipo 2, está constituido por 5 filas y 26 plantas de estas mismas especies.

Tabla 11. Vegetación de los prototipos

Prototipo	Planta	Cantidad	Promedio altura inicial (cm)
1	<i>S. dendroideum</i>	13	6.28
	<i>S. rubroinctum</i>	14	2.97
2	<i>S. dendroideum</i>	9	7.74
	<i>S. rubroinctum</i>	17	3.24

Fuente: Elaboración propia



Imagen 7. Prototipo 1

Fuente: Elaboración propia



Imagen 8. Prototipo 2

Fuente: Elaboración propia

La evaluación de la biodiversidad vegetal en los prototipos fue por medio del registro de la altura inicial, altura a los 5 y 6 meses después de su instalación, se aplican las fórmulas descritas en el apartado 2.3 para obtener tasa de crecimiento (Tc) y la tasa de sobrevivencia (Ts) en cada prototipo.

2.6. Estimación de la biodiversidad animal en el techo verde de estudio

La estimación de la biodiversidad se fundamenta en la abundancia específica, la cual se define como el número total de especies obtenido por un censo de la comunidad (Moreno, 2002) sin especificar su categoría taxonómica, se basa en la cantidad de especies presentes en un sitio prescindiendo del valor de importancia de estas.

La metodología propuesta es la captura de insectos, con lo cual es posible evaluar cuantitativamente la biodiversidad, los materiales utilizados fueron cuatro contenedores de plástico, ácido acético, una espátula, cuatro tubos de ensaye y una gradilla.

En cada cuadrante del techo se colocó un contenedor de plástico con 100 ml del ácido acético, a la semana se evaluó el estado de los contenedores, si estos tenían insectos se retiraron cuidadosamente con la espátula metálica y fueron guardados en un tubo de ensaye con alcohol etílico, los tubos fueron cerrados y colocados en una gradilla.

Esto se realizó una vez más, se rellenaron los contenedores y a la semana se volvió a tomar los insectos capturados con el mismo procedimiento. Para concluir con esta prueba, se contó la totalidad de los insectos obtenidos y se procedió a identificarlos hasta su orden entomológico con el apoyo de guías biológicas.

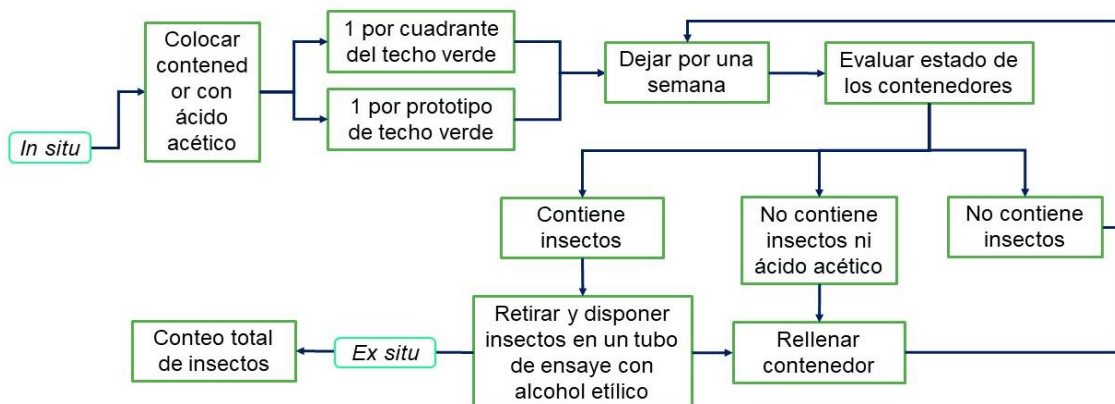


Figura 7. Diagrama captura de insectos

Fuente: Elaboración propia

2.7. Análisis de ciclo de vida

Un análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología utilizada para definir las características ambientales y los efectos potenciales relacionados a un producto, para ello se elabora un inventario con entradas y salidas de los recursos y energía empleados en el sistema de producción, dichos flujos también son evaluados y los resultados son interpretados en función de los objetivos planteados (International Organization for Standardization (ISO), 2006). Las categorías de impacto ambientales reportadas en un ACV pueden ser: a) potencial de calentamiento global, b) potencial de eutrofización, c) potencial de acidificación, d) ecotoxicidad terrestre; e) potencial de agotamiento del ozono, f) agotamiento de energía primaria; g) potencial de toxicidad humana; h) formación de oxidantes fotoquímicos, i) uso del suelo; j) potencial de agotamiento abiótico, k) ecotoxicidad acuática de agua dulce y l) ecotoxicidad acuática marina; cabe mencionar que no es necesario evaluar todas las categorías esto dependerá del objetivo de cada proyecto.

De acuerdo con la investigación de Shafique, et al.,(2020) los primeros ACV con techos verdes como objeto de estudio fueron entre 2006 y 2007 cuyos reportes describen la efectividad de este sistema durante un período mayor a 50 años; asimismo indica que desde 2010 a la fecha ha aumentado la generación de estos análisis para comparar los diversos tipos de techos verdes (intensivo, extensivo y semi-extensivo) y los materiales de las capas que lo componen, en diferentes etapas del ciclo de vida. El único documento encontrado acerca del desarrollo de ACV para techos verdes en México, es en Mérida, Yucatán, el resultado principal es el potencial de disminución de GEI en un 25% (Cerón-Palma et al., 2013).

En este estudio se aplica el ACV para estimar la huella de carbono la cual ha surgido como un concepto para el entendimiento del aporte de los procesos al calentamiento global, es un indicador ambiental basado en este análisis siendo el resultado del potencial de calentamiento global (PCG). El PCG es el impacto de un producto en el calentamiento global por medio de los GEI emitidos al aire en el período de 100 años, se define que cada GEI es equivalente a 1kgCO₂ por kg de emisión (Kavehei, Jenkins, Adame, y Lemckert, 2018)

En este estudio se aplicará dicho análisis para comparar la huella de carbono del techo verde ligero extensivo de estudio con un techo verde convencional, por lo que se propone realizar un Análisis de Ciclo de Vida Simplificado (ACVS) de la cuna a la puerta (International Organization for Standardization (ISO), 2006), en donde se incluyen de manera general las entradas y salidas a partir de la extracción de materiales hasta el uso del producto, en este caso la instalación; las etapas de un ACV se establecen en el siguiente diagrama:



Figura 8. Marco de referencia del Análisis de Ciclo de Vida
Fuente: Elaboración propia basado en la ISO 14040

En conformidad con las etapas del ACV el objetivo del estudio es definir el impacto ambiental en la categoría de cambio climático generado por GEI en términos de kgCO₂ equivalente. El alcance establecido es realizar un análisis por cada elemento que conforma las primeras cinco capas del techo verde, desde su producción, transporte y establecimiento; lo anterior no incluye:

- a) La capa de vegetación valorado como un conjunto de elementos que reducen las emisiones de CO₂, lo cual se considera no impacta negativamente al ambiente.
- b) El mantenimiento del techo al plantear que el sistema tiene la capacidad de subsistir sin un riego o fertilización constante, esto también para disminuir los costos.

- c) La disposición final del techo verde por el tiempo de vida considerado cabe destacar que varios estudios proponen el reciclado como escenario final.

La unidad funcional propuesta para este estudio se basa en la revisión de Shafique et al., (2020) donde la mayoría de los ACV para techos verdes definieron 1m^2 , de igual manera la estimación del tiempo de vida desde 30 hasta 50 años, por lo que para términos de este trabajo se define 40 años como tiempo de vida del techo verde ligero extensivo. Los límites geográficos de este trabajo se presentan en el capítulo 3.

Los criterios de corte son aquellas consideraciones por las cuales ciertos elementos no entran en un ACV, descritos en el alcance. En cuanto a las primeras tres capas integradas por materiales de la marca Bauder son importados desde Europa, por lo que en el rubro de transporte se establece únicamente el envío desde Berlín, Alemania hasta la Ciudad de México. Respecto a la capa drenante orgánica (paja) y el sustrato fueron de dos distintos orígenes locales, por lo que su transporte no se toma en cuenta para el estudio.

El mantenimiento no se incluye ya que después de las primeras irrigaciones para el asentamiento del techo verde, este solo obtuvo agua directamente de la lluvia y no existió alguna irrigación externa a esto.

Para el análisis se utiliza el software SimaPro, con el método ReCiPe 2016 Midpoint, y la base de datos EcolInvent. La siguiente fase del ACV es el análisis de inventario, para lo cual se presenta la figura con el diagrama general de flujo del ciclo de vida del techo verde de estudio.

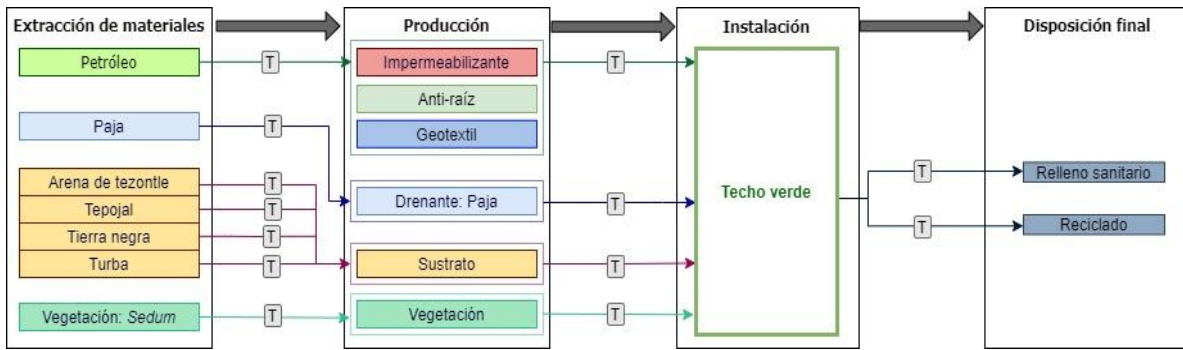


Figura 9. Proceso general del ACV del techo verde de estudio
Fuente: Elaboración propia

Conforme al alcance definido desde la extracción de los materiales hasta la instalación del techo verde se elaboró el siguiente diagrama para ser usado como guía del análisis. Este mismo fue aplicado para elaborar un ACV de un techo verde convencional para comparar el desempeño en términos de generación de kgCO_2 , la única diferencia fue la sustitución del drenante orgánico por el drenante convencional.

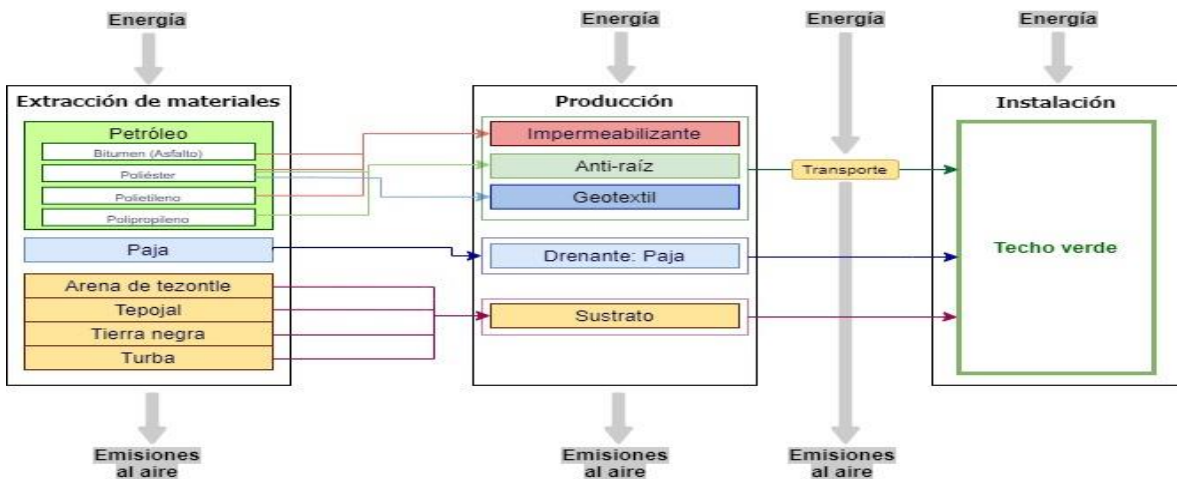


Figura 10. Diagrama de flujo simplificado del ciclo de vida del techo verde de estudio
Fuente: Elaboración propia

Se utilizaron los datos generales de bases de datos, EcoInvent, con ajustes a la escala que se trabaja con respecto al componente principal de cada componente, se utiliza la tabla 12 para el ingreso de los valores en el software SimaPro.

Tabla 12. Materiales requeridos para la elaboración de los ACV comparativos

#	Componente	Material / Proceso	Cantidad unitaria (kg/m ²)	Cantidad total (kg/m ²)	Comentario
1	Impermeabilizante (Bauder)	Bitumen (asfalto)	2	6	Estimado equitativamente para cada material
		Poliéster hilado	2		
		Polietileno termofusible	2		
2	Anti raíz (Bauder)	Mezcla de fibras de poliéster y polipropileno	0.6	0.6	Valores del diseño del techo verde ligero extensivo de estudio
3	Geotextil tejido (Bauder)	Poliéster	0.2	0.2	
4	Drenante paja	Paja	5	5	Drenante orgánico del techo de estudio
5	Drenante DSE40 (Bauder)	Polietileno de alta densidad	1.8	1.8	Drenante convencional propuesto
6	Sustrato	Arena de tezontle	40	100	Valores del diseño del techo verde ligero extensivo de estudio
		Tepojal	40		
		Tierra negra	10		
		Turba	10		

Fuente: Elaboración propia

2.8. Análisis de costo-beneficio

Existen diversos métodos para valoración y selección de un proyecto cuyo objetivo es la mitigación de las emisiones producidas por los GEI, uno de estos es el análisis costo–beneficio (ACB)(Naciones Unidas, 2010; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), 2017). El ACB es un estudio económico cuantitativo que determina la rentabilidad de ejecutar una alternativa u otra en términos monetarios, idealmente un proyecto se realiza cuando los beneficios totales son mayores a los costos totales.

El índice costo-beneficio (ICB) es la relación entre el valor presente neto con los costos totales y se define como la ganancia neta por unidad monetaria invertida (Aguilera Díaz, 2017). El valor presente neto (VPN), ayuda a comprender la ganancia por la realización de un proyecto a largo plazo y ubicar el valor del dinero en un período de tiempo determinado (Krugman & Wells, 2006).

Los resultados de este tipo de análisis incluyen todos los costos empleados para el diseño, desarrollo, administración y seguimiento del producto. Para este trabajo

únicamente se considera los costos de compra e instalación, en tanto que al mantenimiento se le da un costo 0 y se toma en cuenta el tiempo de 40 años de vida del techo verde.

Así como en el ACVS, en esta evaluación también se realiza la comparación entre el techo verde de estudio y un techo verde convencional propuesto, donde la distinción principal entre uno y otro es el material polimérico drenante convencional.

Sobre los beneficios obtenidos por el techo verde se utilizarán aquellos resultados en la bibliografía consultada. La unidad funcional de este estudio es en pesos mexicanos por área de techo verde (\$/m²).

Como se ha descrito los techos verdes proveen múltiples beneficios, como lo pueden ser la retención de aguas pluviales, mejoramiento de la calidad del aire o disminución del efecto isla de calor son complejos de cuantificar para establecerles un valor económico, y por el tamaño de nuestro techo verde de estudio son considerados los valores obtenidos en la literatura para el cálculo económico. Los datos fueron adecuados de dólares (\$1USD=\$20.15M.N.) o euros (€1=\$23.9M.N.), a pesos mexicanos, aunado a esto se convirtieron del año base al 2021 conforme a la fórmula 3 del anexo; en la tabla 13 se presentan los valores. Se propone realizar la estimación de los beneficios netos con la fórmula 4 del anexo.

Tabla 13. Datos utilizados para el ACB

Beneficio	Precio (\$/m²*año)	Fuente
A la salud pública	\$360.71	(Clark, Adriaens, y Talbot, 2008)
Ahorro en energía	\$432.39	
Mejoramiento de la calidad de aire	\$228.20	(Nurmi, Votsis, Perrels, y Lehvävirta, 2016)
Aislamiento de sonido	\$600.54	
Gestión de agua de lluvia	\$309.28	
Emisiones evitadas de CO ₂	\$16.38	(Peng y Jim, 2015)
Disminución del efecto isla del calor	\$74.83	

Fuente: Elaboración propia

Se calcula el Valor presente neto (VPN) del techo verde de estudio y del techo verde convencional propuesto con un período de vida de 40 años y de acuerdo con la literatura consultadas una tasa de descuento del 4.5% (Blackhurst, Hendrickson, y

Matthews, 2010; Carter y Keeler, 2008; Nurmi et al., 2016), con las fórmulas 5 y 5 del anexo:

2.9. Diagnóstico de la apreciación por la sociedad

De acuerdo con lo definido en el capítulo 1, en el apartado de servicios ecosistémicos obtenidos por el techo verde también se encuentran los servicios culturales, estos relacionan las diversas experiencias de las personas con el entorno natural. En esta sección de la metodología se busca conocer la percepción general de parte de la comunidad del CIIEMAD, únicamente es para el techo verde de estudio, ya que por el tamaño de los prototipos no fueron considerados para este análisis.

Diversas técnicas de investigación se han aplicado para evaluar cualitativamente la percepción general de trabajadores, estudiantes, visitantes y ciudadanos respecto a los beneficios de los techos verdes en distintas partes del mundo los cuales se presentan en la tabla 14.

Tabla 14. Revisión de literatura respecto a la evaluación cualitativa de techos verdes

Técnica	Características del techo verde de estudio	Resultados
1.Introducción general a los techos verdes. 2.Encuesta con adjetivos comparativos y preguntas abiertas.	Techo verde accesible en el Centro de Lenguas en la Universidad de Helsinki, Finlandia (Mesimäki, Hauru, y Lehvävirta, 2019)	Experiencias: restaurativas y recreativa. Sentimientos positivos: felicidad, alegría, amor, simpatía, admiración, entusiasmo, sorpresa, curiosidad, sorpresa, admiración y esperanza, seguridad y confort.
Cuestionario con preguntas cerradas y abiertas.	Techo verde privado intensivo en Helsinki, Finlandia (Subiza-Pérez, Hauru, Korpela, Haapala, y Lehvävirta, 2019)	Cualidades estéticas percibidas: armonía, misterio relacionado con entusiasmo, multisensorial relacionado con sonidos y olores, la diversidad natural, espacio y diversidad visual, sensación de alegría
1. Concientización sobre techos verdes. 2.Cuestionario estructurado por entrevistas personales.	Techo verde hipotético en el área metropolitana de Atenas, Grecia (Tsantopoulos et al., 2018)	Actitudes y opiniones: positiva debido a los beneficios económicos, visuales y ecológicos. Disposición a la construcción
1.Visualización de imágenes mentales de un techo verde. 2. Creación de representaciones gráficas. 3.Aplicación de encuesta en línea.	Techo verde extensivo hipotético en Amberes, Bélgica y Toronto, Canadá (Vanstockem, Vranken, Bleys, Somers, y Hermy, 2018)	La percepción visual y la preferencia varía con el diseño, cuidado, cantidad de la vegetación.
Entrevistas semi estructuradas.	Techos verdes en diversos edificios en Newcastle, Reino Unido (Everett y Lamond, 2019)	Percepción positiva los dueños de construcciones con y sin techos verdes por el costo-beneficio de estos
Encuesta en línea, esta incluyo imágenes de techos verdes, respondieron con escala	Techos verdes hipotéticos en Melbourne, Australia (Lee, Williams, Sargent, Farrell, y Williams, 2014)	Preferencia de oficinistas por techos verdes con densa vegetación que incluya flores y de estos en general por encima de los techos comunes
Entrevistas semi estructuradas	Diversos techos verdes extensivos en oficinas del sector público y privado en Toronto, Canadá y Chicago, E.U.A. (Loder, 2014)	Percepción y asociación de oficinistas con efectos positivos ambientales, fomento del pensamiento creativo, sensaciones de asombro y bienestar.

Fuente: Elaboración propia

Los estudios mostrados, aunque son pocos en comparación a los realizados en términos de otros beneficios (ver tabla 4), permiten entender que en los últimos años los techos verdes al ser elementos de las ciudades han sido utilizados para conocer el vínculo de los seres humanos con la naturaleza dentro de los entornos urbanos. De acuerdo con Nurmi et al., (2016) el valor de la presencia de un parque urbano a nivel de suelo es comparable con el de un techo verde, pero se debe considerar la reducción de la visibilidad, a pesar de ello, podemos observar los diferentes tipos

de aplicación de técnicas utilizadas donde no en todos los estudios se llevaron a cabo con los encuestados en el sitio, si no que exploraron la percepción visual desde su espacio de trabajo, con imágenes mentales o reales.

El techo verde es definido por la legislación como un AVU, considerando esto existe una basta diversidad de estudios que comprueban a los espacios verdes urbanos como proveedores de efectos positivos a la salud mental, los cuales pueden producirse conviviendo de manera directa con la naturaleza o por medio de la simple observación de estas áreas (Sugiyama, Leslie, Giles-Corti, y Owen, 2008). En concordancia con lo anterior, estudios informan que personas cuyos centros de trabajo tienen ventanas con vista a espacios verdes, reportan tener mayor satisfacción con la vida y el trabajo que realizan (Dravigne, Waliczek, Lineberger, y Zajicek, 2008), esto respalda la posibilidad de obtener la percepción de la sociedad sin que esta tenga contacto directo con el techo verde.

Entre los elementos para el análisis y caracterización del paisaje se encuentra la vegetación, la percepción cultural y el recurso visual, el conjunto de estos permiten la interpretación del paisaje y de la misma manera el impacto de las personas que cohabitan con el paisaje de estudio (Molina, Aponte, y Escobar, 2017), lo anterior justifica a la selección de la comunidad estudiantil y de trabajadores del CIEMAD quienes convivían diariamente cerca del techo verde para contestar la herramienta.

La herramienta propuesta para medir la apreciación del techo verde por parte de la sociedad es la encuesta de campo al proveer una perspectiva de como el paisaje es visto por las personas; se elaboró una encuesta con organización y preguntas fundamentadas en la literatura revisada en la tabla 14, la cual estaba propuesta a realizar en dos etapas, la primera es una sesión informativa y la segunda es el cuestionario. A causa de las restricciones implementadas por la actual pandemia de COVID-19, se ajustó, diseñó e implemento esta herramienta en línea.

La herramienta “Formularios de Google” fue empleada para realizar esta metodología de manera virtual se dividió en tres partes:

1. Datos generales del encuestado: Correo electrónico, Principal área de trabajo en CIEMAD, Puesto en CIEMAD, Rango de edad, Cantidad aproximada de horas que pasa al día en el CIEMAD.
2. Video descriptivo: con el objetivo de presentar a los encuestados los principios generales, los beneficios de un techo verde e imágenes del techo verde de estudio.
3. Sección de preguntas divididas para su análisis de la siguiente manera:

El propósito de las primeras preguntas es dimensionar el conocimiento de los encuestados respecto a techos verdes “1.1 ¿Conocía los techos verdes?” y “1.2. ¿Sabe que en el CIEMAD hay un techo verde?”.

Las preguntas con objetivo de evaluar el grado de aceptabilidad son: “2. Considera usted ¿que el techo verde se podría volver un elemento característico del CIEMAD?”, “3. Desde su percepción, seleccione el número para calificar de manera negativa o positiva el valor que le da al entorno del CIEMAD el techo verde”, y “7. Conociendo los beneficios ambientales que tienen los techos verdes, de ser posible, ¿usted instalaría uno en su hogar?”.

Con el fin de estimar los sentimientos positivos o negativos generados por la visualización respecto a la estética del techo verde (Menéndez, 2016) se elaboraron las preguntas: “4. Marque la emoción que le provoca ver el techo verde.” y “5. Marque la emoción que le provoca, ver los vídeos y las imágenes del techo verde mostradas en la presentación”. Para ello se colocaron cinco emociones definidas como positivas: tranquilidad, sorpresa, amor, alegría y asombro; y cinco emociones negativas: ira, miedo, asco, nerviosismo y tristeza.

Las preguntas 6, 8 y 9 buscan conocer la impresión de la sociedad respecto a los servicios ecosistémicos y sus efectos en las zonas urbanas: “6. Seleccione el beneficio ambiental aportado por el techo verde que le importa más a usted”, “8. Considera usted, ¿qué está es una solución posible para recuperar áreas verdes en la Ciudad de México?” y “9. Desde su percepción, piensa que una ciudad con construcciones con techos verdes, ¿sería una ciudad saludable?”.

La última pregunta se basa en la investigación de (Mesimäki, Hauru, Kotze, y Lehvävirta, 2017) donde la descripción de techos verdes futuros creó las imágenes mentales en los ciudadanos, “10. ¿Le gustaría vivir en una ciudad cuyos techos estuvieran cubiertos por vegetación?” y permite comprender la principal valoración hacia un espacio para la naturaleza en centros de trabajo y viviendas.

Las respuestas son enviadas de manera inmediata al finalizar la encuesta, para su almacenaje y posterior análisis. Las herramientas creadas y aplicadas para estas actividades se presentan en la imagen A. del anexo.

Capítulo 3.

CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se describe de la necesidad de implementar esta tecnología en el espacio urbano de la alcaldía Gustavo A. Madero, se ilustran las características del sitio de estudio, una breve exposición de la construcción del techo verde ligero extensivo de estudio y su estructura.

3.1. Antecedentes de la zona del caso de estudio

A partir de 1940, la instalación de una diversidad de industrias en el territorio de la alcaldía comenzó, sus principales zonas de establecimiento fueron Vallejo, Bondojito, Aragón, esto llevó a la formación de abundantes colonias populares como lo son: la Nueva Tenochtitlán, Mártires de Río Blanco y La Joya. En tanto que las colonias de nivel medio y tipo residencial prosperaron en las colonias de Lindavista, Zacatenco, Guadalupe Insurgentes y Guadalupe Tepeyac. En 1970 se conformó la Unidad Habitacional San Juan de Aragón, esta fue el comienzo del establecimiento de las colonias de la zona oriente de la alcaldía, en su mayoría son asentamientos irregulares. Para las décadas de los 80 y 90 el área urbana se expande hasta la Sierra de Guadalupe en la zona de Cuauhtepac (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2016), es aquí donde han surgido problemas por asentamientos irregulares, los cuales continúan hasta la actualidad.

La alcaldía Gustavo A. Madero actualmente cuenta con 1,173,351 habitantes y tiene 340,115 viviendas particulares ocupadas en una superficie total de 8,708.56 ha, esto la convierte en la segunda demarcación territorial con mayor cantidad de población y en el ámbito de casa-habitación, el primer lugar en ambos rubros es Iztapalapa (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2020) (INEGI, 2021), genera una alcaldía aglomerada con pocos espacios de esparcimiento.

El uso de suelo de la alcaldía de manera general se distribuye en suelo urbano con un 85.38% y suelo de conservación con 14.62% dentro de estas solo existen dos áreas naturales protegidas: el Parque Nacional El Tepeyac y la Sierra de Guadalupe, en esta última los asentamientos humanos se han extendido por la invasión a la zona de reserva ecológica (Secretaría de Protección Civil, 2014), aunado a lo anterior se deben considerar los 6.7 m²/hab. de AVU lo cual demuestra una necesidad en esta alcaldía por mejorar sus condiciones ambientales, con ello los techos verdes podrían funcionar como una respuesta efectiva a pesar de los espacios reducidos y su densidad poblacional.

3.2. Características de la zona del caso de estudio

El techo ligero extensivo de estudio se ubica en esta alcaldía, dentro de la colonia La Laguna Ticomán en el interior del CIEMAD específicamente en la parte superior de los sanitarios contiguos a la caseta de vigilancia de la entrada principal del centro. La alcaldía está localizada al noreste de la CDMX limita con tres alcaldías de la ciudad y cuatro municipios del Estado de México, tiene climas: seco semiseco templado y templado subhúmedo su temperatura más baja suele ser de 1°C mientras que la más alta puede ser de 34.3°C, los meses con mayor precipitación son julio, agosto y septiembre con una precipitación anual promedio de 893 mm (Secretaría de Protección Civil, 2014).

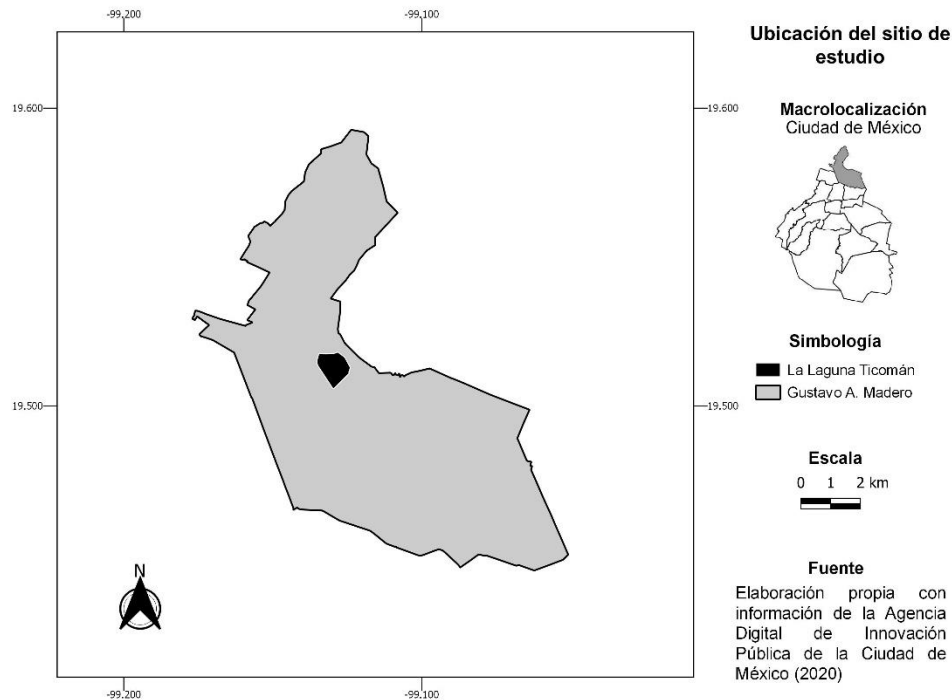


Imagen 9. Ubicación del sitio de estudio

Fuente: Elaboración propia con información de Agencia Digital de Innovación Pública de la Ciudad de México (2020)

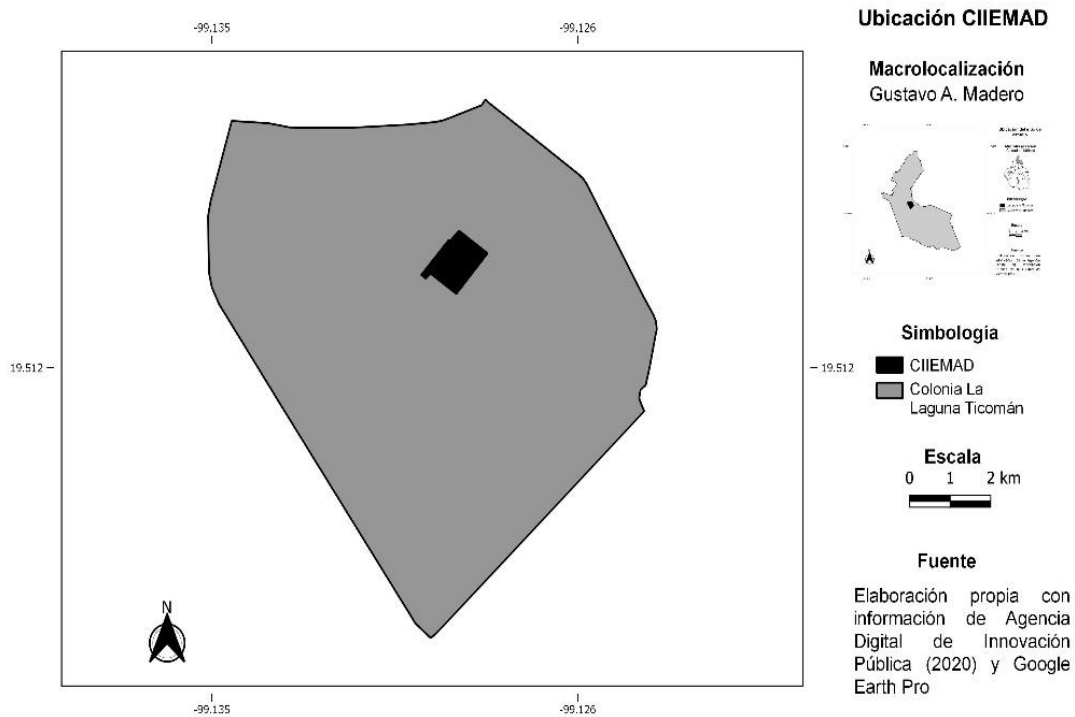


Imagen 10. Ubicación CIIEMAD

Fuente: Elaboración propia con información de Agencia Digital de Innovación Pública, (2020)



Imagen 11. Localización del objeto de estudio, vista superior

Fuente: Elaboración propia



Imagen 12. Localización del objeto de estudio, vista desde nivel el edificio principal de CIEMAD

Fuente: Elaboración propia

3.3. Propiedades del techo verde de estudio

El techo verde tiene un área de 8.22m^2 , en el centro del área cuenta con un tragaluz, previo a la instalación del techo verde, el pretil fue elevado para asegurar la profundidad del sustrato de 15 cm. El montaje del techo fue durante los días 5 y 6 de febrero del 2019, se compone por una capa impermeabilizante, membrana anti-raíz certificada (Bauder Plant E 4mm), membrana geotextil (200 gr/m^2), 15 cm de grava alrededor del tragaluz, 5 kg/m^2 de paja (como capa drenante), sustrato compuesto por 40% arena de tezontle, 40% tepojal (material pétreo blanco), 10% tierra negra y 10% turba (Hohmann, 2019a). En la imagen 13 se ilustra la estructura del techo verde de estudio:

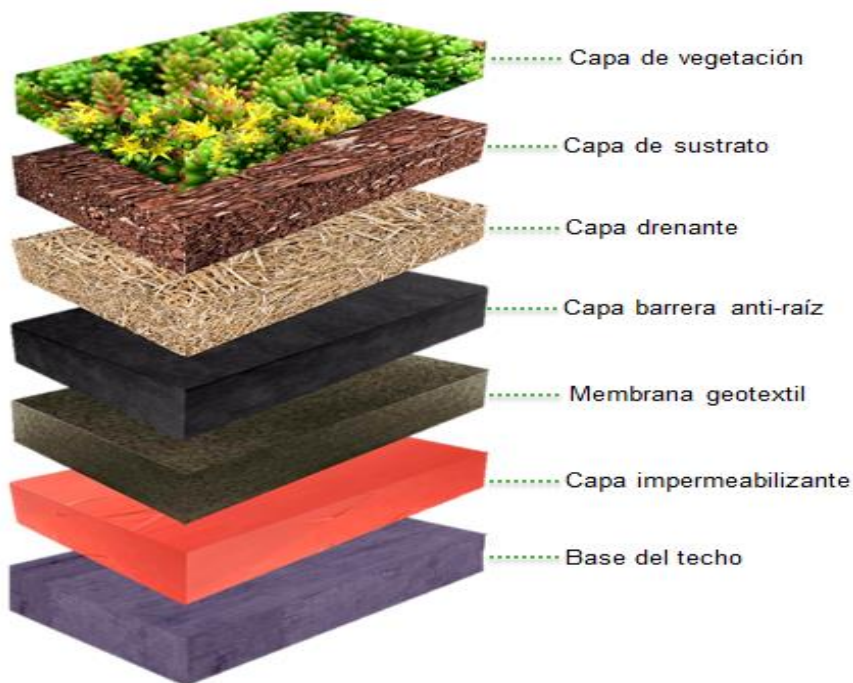


Imagen 13. Estructura techo verde de estudio

Fuente: Elaboración propia

En la última capa se colocó la vegetación la cual incluye dos troncos para fomentar espacios donde puedan vivir insectos (Hohmann, 2019b). Las plantas fueron sembradas con una altura de entre 3 hasta 7.5 cm dependiendo de la especie.

Tabla 15. Características de la vegetación del techo verde de estudio

Nombre científico	Nombre común	Cantidad	Altura inicial (cm)
<i>S. dendroideum</i>	Chisme	102	6
<i>S. griseum</i>	Cardoncillo o jaspalache	28	6.5
<i>S. moranense</i>	Dedos	14	3
<i>S. pachyphyllum</i>	Dedos de Dios	77	7.5
<i>S. rubrotinctum</i>	Siempreviva o lágrima de María	99	4

Fuente: Elaboración propia con información de INaturalist, (2020a, 2020b, 2020c, 2020d); Pérez-Calix, (2008)

El diseño del techo verde es en cuatro cuadrantes identificados según la codificación C1, C2, C3 y C4, cada uno con diferente composición, esto se presenta en la imagen 14. El cuadrante C1 tiene el mayor porcentaje de vegetación cuenta con cuatro de las cinco especies, *S. rubrotinctum* es la más abundante y únicamente en este cuadrante se encuentra la especie *S. griseum*. El cuadrante C2, contiene exclusivamente dos especies *S. moranense* y *S. pachyphyllum*, esta última predomina la vegetación del cuadrante con el 95%. Los cuadrantes con menor porcentaje de vegetación respecto al total son el C4 y C3 con 10.68% y 19.18% respectivamente, en ambos cuadrantes la especie que domina es *S. dendroideum*. Cabe resaltar que la especie *S. moranense* está presente y distribuida homogéneamente en todos los cuadrantes, por encontrarse en la parte central del techo verde.



Imagen 14. Distribución del techo verde

Fuente: Elaboración propia

La biodiversidad de la vegetación originaria del lugar se promueve al colocar estas plantas ya que todas son especies nativas de México (Plants of the World Online, 2016a, 2016b, 2016c, 2016d, 2017), con excepción *Sedum rubrotinctum* que es una planta híbrida. Las características aquí presentadas del objeto de estudio permiten estimar ciertas particularidades como la observación preliminar del crecimiento de la vegetación originalmente plantada y la presencia de plantas oportunistas, un análisis extenso sobre el desempeño del techo verde de estudio se presenta el Capítulo 4 en donde se reportan los productos de la metodología definida.

Capítulo 4.

RESULTADOS Y DISCUSIONES.

El propósito de este capítulo es presentar los datos obtenidos de cada parámetro evaluado en la metodología, además del análisis de estos con el comportamiento de los materiales utilizados en los prototipos y en el techo verde de estudio, para la comprobación de la hipótesis.

En la literatura existe una tendencia a estudiar una sola variable o beneficio del techo verde, mientras que en este trabajo se presentan, varios enfoques respecto a lo que un techo verde ligero y modificado en su estructura por utilizar material orgánico residual aporta, esto nos provee de información que permite entender su multifuncionalidad.

4.1. Caracterización de los materiales

La sobrevivencia de las plantas depende de la capacidad de retención de agua por parte del material propuesto, los resultados de la caracterización de los materiales demuestran la capacidad de cada material orgánico propuesto y el sustrato. A continuación, se presentan tres tablas con los resultados obtenidos por la medición de humedad, de pH y sales disueltas respectivamente.

Tabla 16. Resultados de la medición de humedad en los materiales orgánicos residuales

Muestra	Material	Humedad ($\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{material}}$)	Promedio	Desviación
1	Fibra de coco	2.73	3.12	0.34
2	Fibra de coco	3.34		
3	Fibra de coco	3.28		
1	Paja	4.02	3.87	0.14
2	Paja	3.73		
3	Paja	3.87		
1	Sustrato	0.11	0.14	0.14
2	Sustrato	0.13		
3	Sustrato	0.18		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Resultados de la medición de pH en los materiales orgánicos residuales

Muestra	Material	pH	Promedio	Desviación
1	Fibra de coco	5.80	5.31	0.7447
2	Fibra de coco	4.45		
3	Fibra de coco	5.67		
1	Paja	6.15	5.94	0.1976
2	Paja	5.90		
3	Paja	5.76		
1	Sustrato	7.40	7.43	0.1527
2	Sustrato	7.60		
3	Sustrato	7.30		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Resultados de la medición de sales disueltas en los materiales orgánicos residuales

Muestra	Material	Sales disueltas (ppm)	Promedio	Desviación
1	Fibra de coco	1,700.00	1573.34	219.39
2	Fibra de coco	1,700.00		
3	Fibra de coco	1,320.00		
1	Paja	931.00	933.34	5.86
2	Paja	929.00		
3	Paja	940.00		
1	Sustrato	240.00	248	7.21
2	Sustrato	254.00		
3	Sustrato	250.00		

Fuente: Elaboración propia

Los valores de pH tanto de la fibra de coco como de la paja, si se encuentran dentro del rango establecido 5.5-6.8 (± 0.5) en Barbaro et al., (2017). La paja fue el material con mayor capacidad de retención de humedad y valores bajos de las sales disueltas, lo cual evita problemas de toxicidad, además de mantener las concentraciones de nutrientes.

La fibra de coco también tuvo una mejor capacidad de retención de agua, pero con una mayor cantidad de sales y por lo tanto esto podría alterar los nutrientes de la vegetación. Tanto la paja como la fibra de coco tienen propiedades ideales para ser un material drenante que termina combinándose con el sustrato. El sustrato tuvo la menor capacidad de retención de agua, tiene un pH de 7.43 y sales disueltas de 247 ppm, de acuerdo con la literatura requiere ser un poco ácido para su uso.

De manera preliminar se puede concluir que el uso de estos materiales como sustitutos del material polimérico podría aportar un buen espacio de soporte para el sustrato y puede ser más beneficioso para el desarrollo de la vegetación por los nutrientes que su lenta descomposición podría aportar.

4.2. Estado actual del techo verde de estudio

Actualmente la paja como material drenante orgánico ha demostrado ser eficiente, ya que la estructura del edificio no ha presentado daños estructurales. En la siguiente imagen se puede observar el crecimiento de plantas oportunistas las cuales proliferaron en todo el techo verde, en especial en los cuadrantes 3 y 4. El inventario del estado actual del techo verde de estudio demostró la sobrevivencia y crecimiento durante un año y 10 meses de la vegetación que se sembró originalmente.



Imagen 15. Cuadrantes del techo verde a medio año de su instalación

Fuente: Elaboración propia

Respecto al estado del techo verde se midió la altura de cada planta en el techo verde, con los valores de la altura inicial de la vegetación original y los datos obtenidos de cada altura actualizada, se seleccionaron las plantas que estaban por arriba de estos valores y se definieron como la vegetación inicial. Además, durante esta medición se identificaron brotes de cuatro especies. La especie que mayor cantidad de brotes tuvo es *S. rubrotinctum*, seguido de *S. dendroideum*, *S. griseum* y *S. pachyphyllum*, mientras que *S. moranense* no tuvo ningún brote esto podría ser porque una de las características de esta especie es crecer de manera abundante y rastrera, por lo que no fue posible observar algún brote.

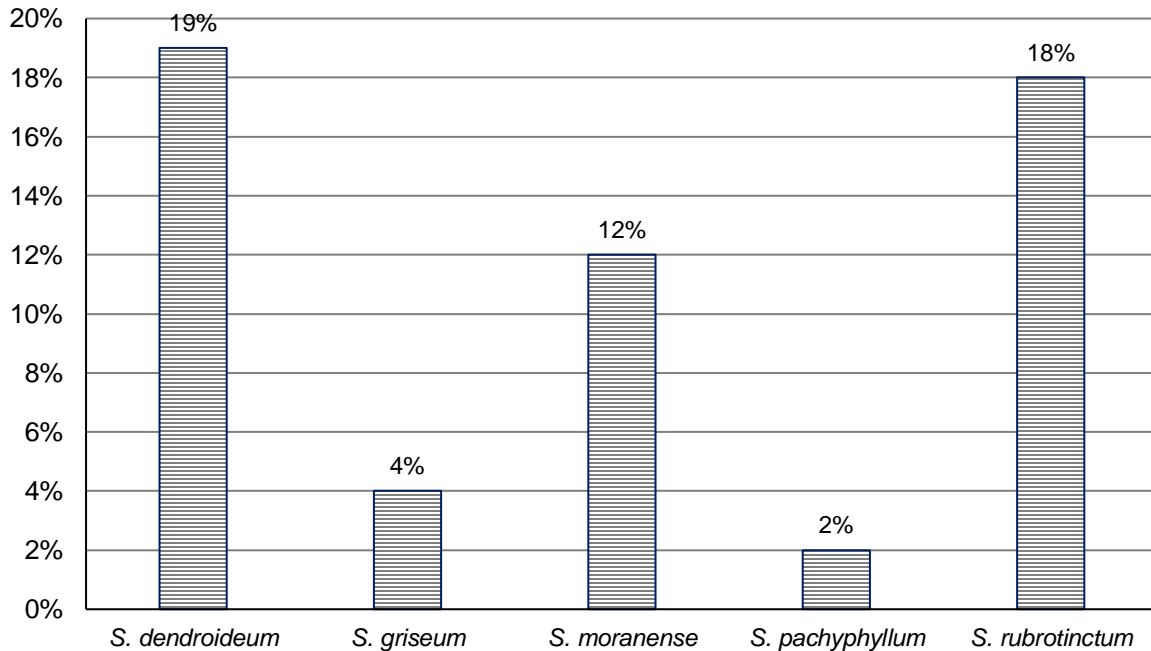
Tabla 19. Estado actual de la vegetación del techo verde

Especie	Cantidad de plantas		Altura promedio de las plantas			Densidad (planta/m ²)	Tasa de crecimiento mensual	Tasa de sobrevivencia
	Brotos	Total	Total (cm)	Adultas (cm)	Brotos (cm)			
<i>S. dendroideum</i>	12	114	27.47	30.23	3.96	13.87	19%	112%
<i>S. griseum</i>	9	37	10.03	12.3	11.69	4.50	4%	132%
<i>S. moranense</i>	0	14	10.8	10.8	0	1.70	12%	100%
<i>S. pachyphyllum</i>	7	84	10	10.57	3.8	10.22	2%	109%
<i>S. rubrotinctum</i>	17	116	16.56	19.05	2.07	14.11	18%	117%

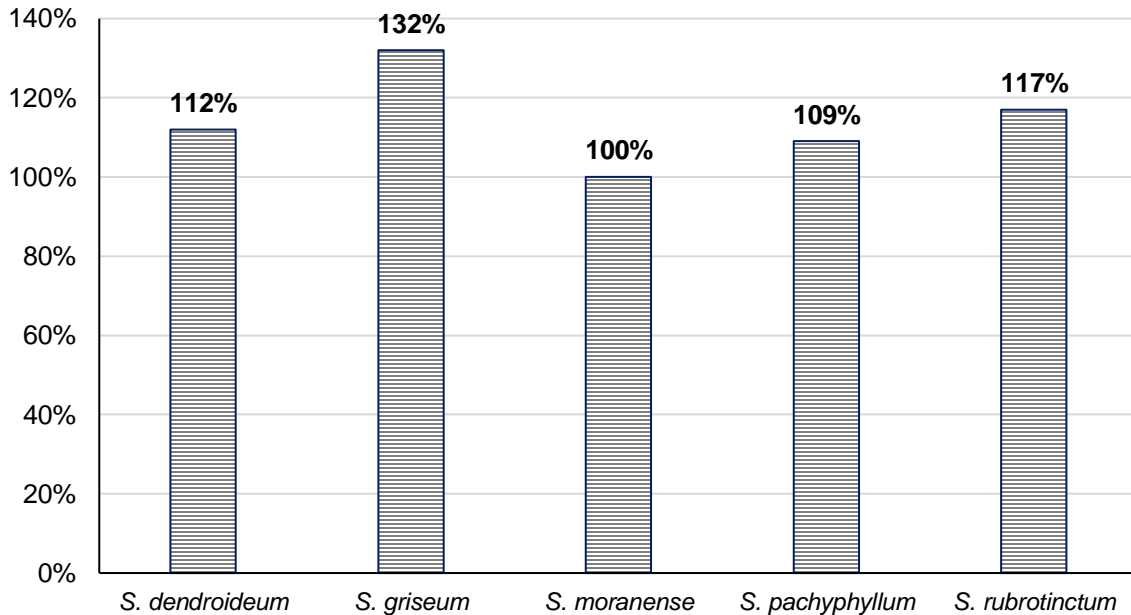
Fuente: Elaboración propia

La especie *S. dendroideum* tiene la mayor tasa de crecimiento promedio mensual, durante 22 meses, registrada es del 19% y le sigue *S. rubrotinctum*, además los porcentajes de Ts en todas las especies fueron mayor o igual al 100%, esto representa un comportamiento positivo del techo verde con la paja como capa drenante y ser parte del sustrato, al aportar propiedades adecuadas no solo para la permanencia de la vegetación, si no, también para su proliferación.

Gráfica 4. Tasa de crecimiento (Tc) de la vegetación en el techo verde de estudio



Gráfica 5. Tasa de sobrevivencia (Ts) de la vegetación en el techo verde de estudio



Adicionalmente el techo verde de estudio es un lugar idóneo para la llegada de plantas oportunistas, estas son temporales por lo que crecen y mueren en el sitio, podemos observarlas principalmente en los cuadrantes C3 y C4, esto significa que a pesar de que inicialmente la flora se conforme por plantas suculentas, el techo verde promueve un área para la adaptación e integración de la biodiversidad vegetal.

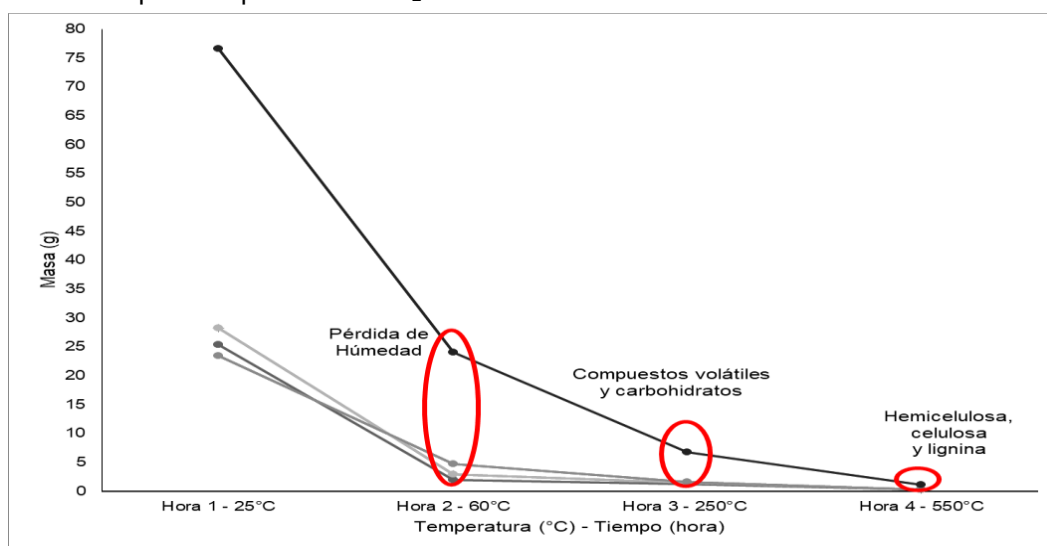
4.3. Cuantificación de la captación de CO₂ en la vegetación del techo verde

De acuerdo con el método destructivo de biomasa se evaluó la captación de CO₂ en *S. dendroideum* tomado del techo verde, se obtuvieron los valores de la tabla 20. También se graficó la pérdida de masa en las muestras y se identificó los compuestos eliminados durante el proceso de cuantificación de CO₂ captado por destrucción de la biomasa. Una planta completa de *Sedum dendroideum* (ID:4) con altura de 28 cm almacenó en un período de diez meses aproximadamente 270,300 ppm de CO₂.

Tabla 20. Valores obtenidos de la evaluación de CO₂ captado en *Sedum dendroideum* por estimación de la biomasa

ID	Muestra a 25°C (g)	Muestra a 60°C (g)	% Humedad	Muestra a 250°C (g)	% Volátiles	Muestra a 550°C (g)	% Carbón total acumulado	%CO ₂ dentro del carbono total
1	25.34	1.92	7.60	1.19	62.07	0.23	88.15	49.28
2	28.26	2.89	10.24	1.41	48.68	0.27	90.49	38.52
3	23.44	4.71	20.12	1.55	32.79	0.30	93.67	24.79
4	76.53	24.05	31.42	6.69	27.83	1.05	95.62	16.78

Gráfica 6. Análisis térmico diferencial durante la estimación experimental de CO₂ en *S. dendroideum* de la evaluación por la captación de CO₂.



Fuente: Elaboración propia

Adicional a la estimación experimental, se realizó una valoración teórica de la cantidad de captación de CO₂, por las *S. dendroideum* y *S. rubrotinctum* del techo verde de estudio. De acuerdo con Collazo-Ortega et al., (2017), ambas plantas tienen procesos metabólicos parecidos por lo que anualmente cada planta capta 5.24×10^5 ppmCO₂; para nuestro estudio se asume lo mismo considerando el período desde el mes de febrero 2019 hasta diciembre 2020 y únicamente la vegetación cuya altura está dentro del rango establecido en la literatura de 15 a 20 cm (± 5 cm) para *S. rubrotinctum* y de 20 a 30 cm (± 5 cm) para *S. dendroideum*.

Tabla 21. Resultados de la estimación teórica de la captación del CO₂ en el techo verde

Especie	Cantidad	Captura (ppmCO ₂)
<i>S. dendroideum</i>	68.00	6.61x10 ⁷
<i>S. rubrotinctum</i>	77.00	7.48 x10 ⁷
Total	145.00	1.41 x10 ⁸

Fuente: Elaboración propia

Respecto a estos valores podemos contextualizarlo en relación con la respiración del ser humano, en la cual se expiran en promedio 35,000ppmCO₂ (Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 2000), esto significaría que es posible la mitigación de más de 4,000ppmCO₂, por la presencia de estas dos especies de Sedum en un techo verde.

4.3. Biodiversidad vegetal en el control experimental (prototipos)

Los prototipos fueron instalados en invierno (noviembre 2020) y evaluados a inicios de primavera (marzo 2021). Conforme a la metodología para definir la factibilidad de cada prototipo, la vegetación fue medida, el primer registro se realizó después de cinco meses del establecimiento de los prototipos y la segunda al 6to mes, el promedio del crecimiento por especie en cada prototipo se muestra en la tabla 22.

Tabla 22. Resultados del desempeño de prototipos

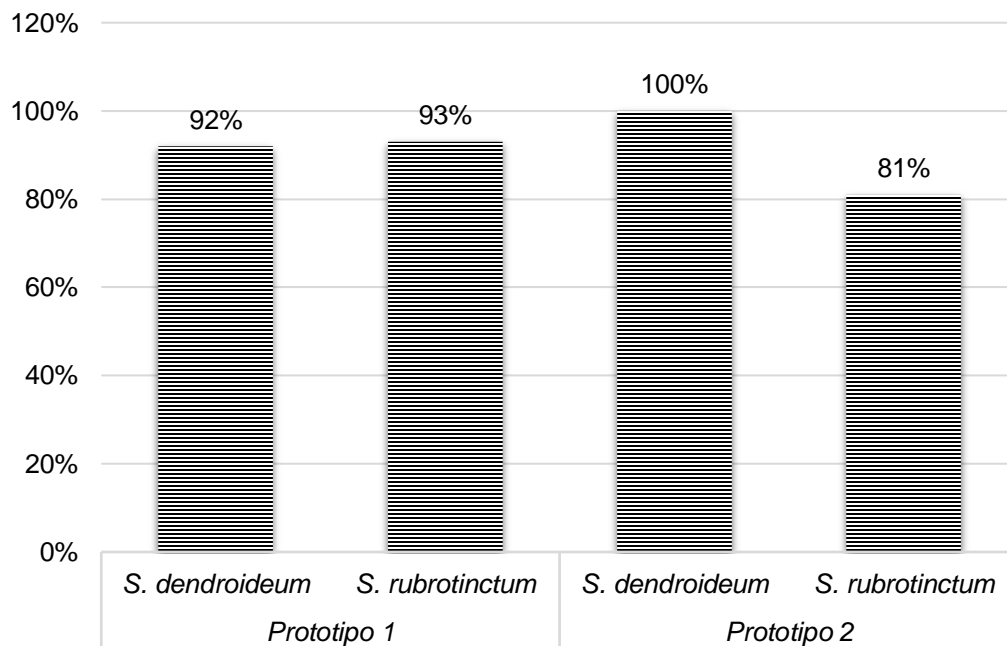
	Especie	Prototipo 1		Prototipo 2	
		<i>S. dendroideum</i>	<i>S. rubrotinctum</i>	<i>S. dendroideum</i>	<i>S. rubrotinctum</i>
Crecimiento (cm)	Promedio	1.64	1.61	2.04	1.50
	Máximo	3.10	3.40	4.90	3.50
	Mínimo	1.45	0.30	0.90	0.20
	Desviación	0.8392	0.8822	1.2670	1.0007
Tasa de crecimiento (Tc)	Promedio	6%	14%	7%	12%
	Máximo	14%	38%	16%	39%
	Mínimo	5%	1%	1%	1%
	Desviación	4%	11%	6%	10%
Tasa de sobrevivencia (Ts)		92%	93%	100%	81%

Fuente: Elaboración propia

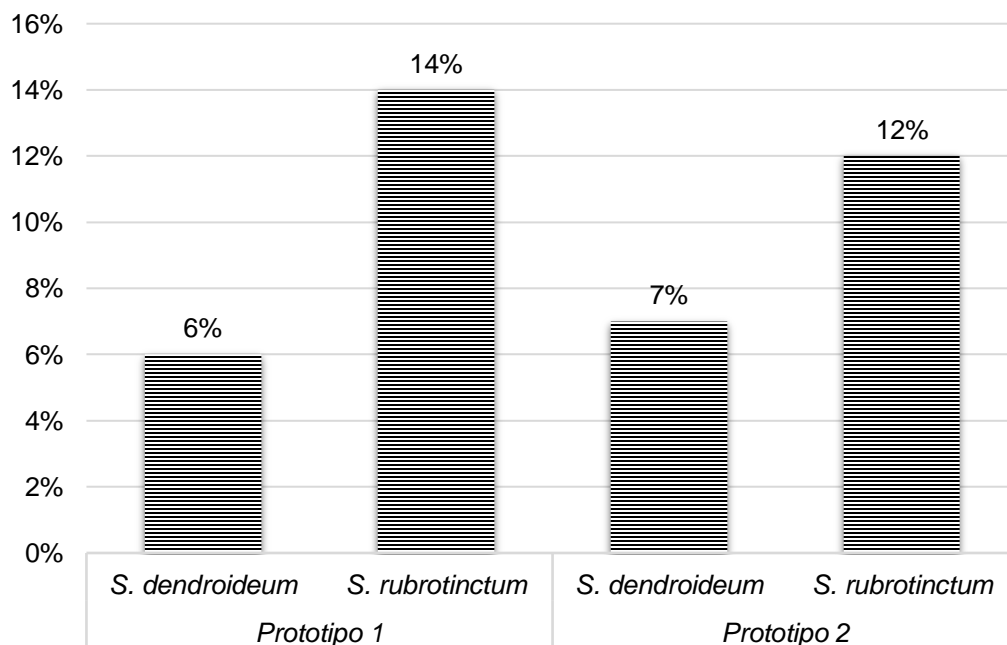
Al considerar la vegetación total en ambos prototipos, estos tuvieron una Tc promedio del 10%, en los dos prototipos la especie *S. rubrotinctum* tuvo las mayores Tc, siendo 2% mayor en el prototipo 1, mientras que para *S. dendroideum* el

prototipo 2 presento por 1% un Tc superior. La Ts general el prototipo 1 es la más grande con 92.52%, en comparación con la del prototipo 2 de 88%, esto a consecuencia de que 3 plantas *S. rubrotinctum* no sobrevivieron, en cambio en este mismo prototipo es el único donde todas las plantas *S. dendroideum* subsistieron.

Gráfica 7. Tasa de sobrevivencia (Ts) de la vegetación en los prototipos



Gráfica 8. Tasa de crecimiento (Tc) promedio de la vegetación en los prototipos



La cantidad de plantas muertas es mínima, esto puede ser a causa de las condiciones climatológicas del lugar, de acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2020a, 2020b), los meses de noviembre y diciembre tuvieron precipitaciones bajas en la Ciudad de México con 1.5 y 0.5mm respectivamente, mientras que la precipitación promedio es de 4.94 mm durante estos cinco meses, así mismo en la G.A.M. se registraron temperaturas de 2°C mínima, 17°C media y 31°C, lo anterior describe un período con tendencias a la sequía con pocas lluvias y altas temperaturas. El cambio físico en la vegetación se nota en las siguientes imágenes donde se evidencia el desarrollo de cada prototipo, en cada uno se observa que la vegetación perdió su coloración verde tornándose café rojizo, sus propiedades de ser plantas del tipo suculentas han permitido su subsistencia a pesar del clima

A pesar de lo anterior, los materiales propuestos: fibra de coco y paja, en combinación e individualmente demostraron ser elementos orgánicos drenantes que eventualmente se vuelven parte del sustrato y cuyas propiedades no interfieren negativamente con el desarrollo de la flora. Las dos propuestas permiten convertir al techo verde en un espacio donde se favorece la evolución de la flora por medio la economía circular con el aprovechamiento de materiales orgánicos residuales.



Imagen 17. Prototipo 1 a 6 meses de su instalación

Fuente: Elaboración propia



Imagen 16. Prototipo 2 a 6 meses de su instalación

Fuente: Elaboración propia

4.4. Estimación de la biodiversidad animal en el techo verde de estudio

Una función del techo verde es proveer a la fauna un espacio libre de los seres humanos donde puedan habitar, los resultados de esta evaluación ilustran este beneficio, al encontrar en todo el techo verde de estudio insectos de siete ordenes diferentes. La abundancia específica es de 80 insectos, el 50% está conformado por hormigas del orden *Hymenoptera*, estos se encontraron en los cuadrantes C1, C2 y C3. La trampa localizada en el cuadrante C3 fue de donde se recuperaron 38% de los especímenes, le siguen los cuadrantes 2 y 4 ambos con 24% de los insectos, y por último C1 con 15%. En la trampa del C2, se encontraron un ejemplar de escarabajo y uno de abejorro ambos favorecen la polinización (Escobar Sarria, 2017; Hernández Huerta y Equihua Zamora, 2017; López García y Deloya, 2013), además se encontró una araña en esta trampa y en la del C4, asimismo durante las visitas al techo verde de estudio se hallaron telarañas. Todo lo descrito permite comprender que el techo verde de estudio se ha convertido en un lugar con las condiciones físicas propicias para que una diversidad de insectos pueda alojarse y con esto preservar sus funciones que son indispensables para la conservación de la vida en la tierra como se conoce.

Tabla 23. Biodiversidad presente en el techo verde de estudio

Orden	Totales	Cantidad	Nombre común	Cuadrante
<i>Díptera</i>	5	1	Mosco	C1
		1		C3
		2		C4
		1	Mosquito	C4
<i>Hymenoptera</i>	41	1	Abejorro	C2
		8	Hormiga	C1
		12		C2
		20		C3
<i>Aphididae</i>	24	4	Pulgón	C2
		2		C1
		11		C4
		7		C3
<i>Araneae</i>	2	1	Araña	C4
		1	C2	
<i>Coleópteros</i>	1	1	Escarabajo	C2
<i>Hemíptera</i>	2	1	Ahuautle	C3
		1		C1
<i>Lepidoptera</i>	5	1	Polilla	C3
		4		C4

Fuente: Elaboración propia

Las imágenes presentadas a continuación fueron tomadas durante las visitas de trabajo en el techo verde de estudio, en donde se captaron mariposas, hormigas y arañas, catarinas vivas, lo cual es una evidencia más de la disposición del techo verde hacia los insectos como un sitio seguro y adecuado a sus requerimientos para su existencia.

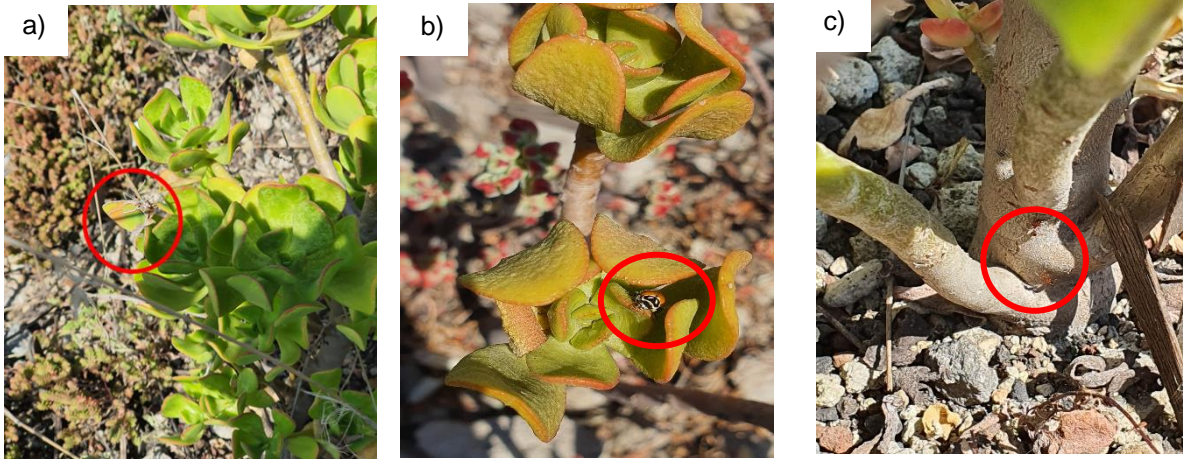


Imagen 18. Evidencia de la presencia de insectos: a) mariposa, b) catarina, c) hormigas, en el techo verde de estudio

Fuente: Elaboración propia

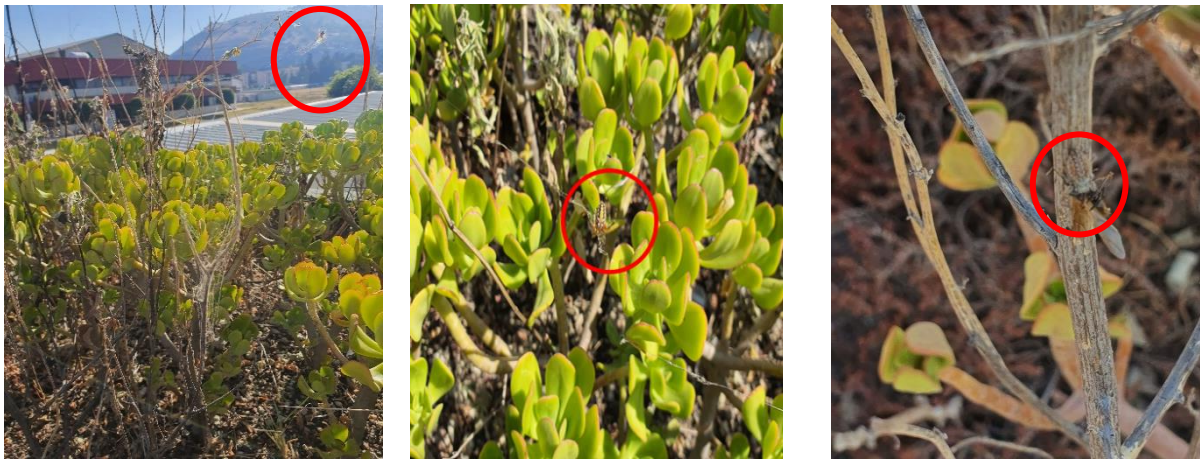


Imagen 19. Evidencia de presencia de arañas en el techo verde de estudio

Fuente: Elaboración propia

4.5. Análisis de ciclo de vida simplificado

La reducción de la cantidad de CO₂ acumulado en la atmósfera es posible por medio del aprovechamiento de la capacidad de almacenamiento de este en la vegetación, como es registrado en los datos obtenidos en este estudio.

Con la finalidad de estimar el ahorro de las emisiones por los componentes del techo verde de estudio respecto a los de uno convencional, se realizó un ACVS conforme a lo descrito en la metodología, obteniendo el potencial de calentamiento global (kgCO₂) para cada capa, material y transporte requerido en la instalación de un techo verde. Al utilizar la base de datos EcoInvent fue necesario realizar ciertas consideraciones para la elección de materiales utilizados en la evaluación una de estas es la del sustrato donde el material turba, se estimó con la cantidad de 80 kg/m², esto porque la base de datos no cuenta con la información necesaria para los materiales tepojal o tezontle los cuales contiene el sustrato aplicado.

En la tabla presentada a continuación se describen los resultados de dicho análisis, todas las capas son aplicables para ambos tipos de techos, excepto por la capa drenante ya que se establece al techo convencional como aquel que utiliza un material drenante de polietileno de alta densidad, por lo que también se agrega su transporte.

Podemos observar un ahorro a causa de la sustitución de materiales generadores de emisiones GEI por materiales orgánicos residuales sin disposición final como residuo, esto puede ser una opción rentable para mitigar algunos de los efectos del cambio climático.

Tabla 24. Resultados del análisis de ciclo de vida por material utilizado

Capa	Material	Potencial de calentamiento global (kgCO ₂)	
		Potencial particular de calentamiento global (kgCO ₂)	Potencial total de calentamiento global (kgCO ₂)
Impermeabilizante	Resina de poliéster, insaturada producción	12.45	18.23
	Polietileno granulado de alta densidad producción	4.17	
	Bitumen, V60 producción	1.60	
Anti-raíz	Resina de poliéster, insaturada producción	1.87	2.50
	Polipropileno, granulado producción	0.6317	
Geotextil	Resina de poliéster, insaturada producción	1.24	1.24
Drenante orgánico	Paja producción de trigo	0.2171	0.2171
Drenante convencional	Polietileno granulado de alta densidad producción	3.76	3.76
Sustrato	Turba producción de turba para uso hortícola	2,646.05	2,646.12
	Piedra pómez* explotación de canteras	0.0666	
	Tierra elevadora de pH tratamiento de lodos de la producción de pasta y papel, agricultura terrestre	0	

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se presenta el impacto ambiental del transporte, de las capas y el total, donde podemos observar que de manera general los valores del techo verde convencional son mayores y esto es a causa del tipo de drenante seleccionado.

Tabla 25. Resultados totales del ACVS

Techo verde	Potencial de calentamiento global (kgCO ₂)		
	Capas	Transporte de materiales	Total
De estudio (CIIEMAD)	2,668.31	1.05	2,669.36
Convencional	2,671.85	1.32	2,673.18

Fuente: Elaboración propia

El mayor impacto ambiental observado en tanto en el techo verde de estudio como en el convencional propuesto es en la capa de sustrato, específicamente en el tepojal, una propuesta para sustituir la turba como parte del sustrato es la composta la cual se estima genera entre 7.44 y 7.60 kgCO₂ como parte de un sustrato para techo verde (Bozorg Chenani, Lehvävirta, y Häkkinen, 2015); la composta también fomenta la economía circular al ser obtenida a partir de residuos orgánicos y de esta manera disminuir el impacto ambiental.

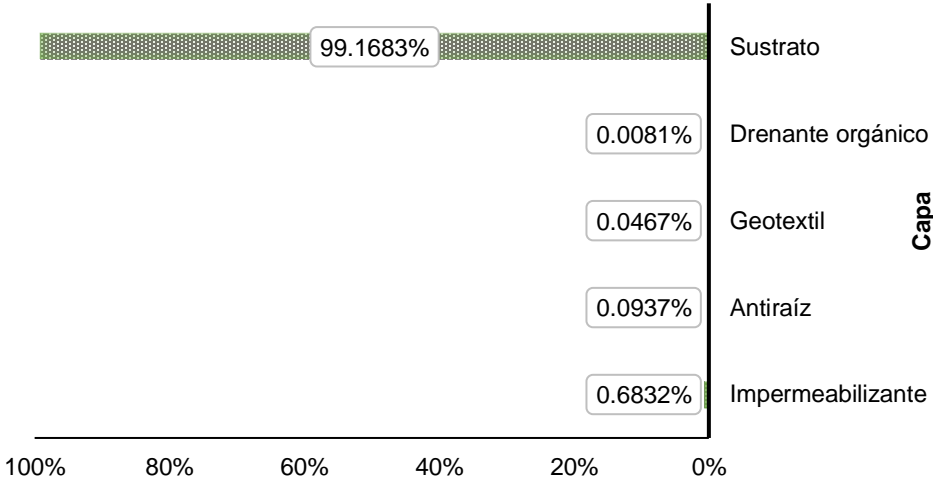
Asimismo, se debe tomar en cuenta que el sustrato puede secuestrar CO₂, por lo que en una siguiente investigación se debe medir su capacidad de almacenamiento de carbono y CO₂, siendo estos indicadores importantes (Lee, Hopmans, Rolston, Baer, y Six, 2009), lo anterior permitiría evaluar con mejores bases el tipo de sustrato y su papel dentro de la captación de CO₂ del techo verde.

A pesar de que la cantidad generada de emisiones por el transporte se podría pensar que es mínima, y esta se podría eliminar al utilizar en las primeras tres capas materiales de origen nacional, además de promover de esta manera la industria mexicana.

Todos los materiales utilizados desde su extracción tienen un impacto ambiental negativo, conforme se adicionan los pasos de producción y transporte este impacto aumenta. En las gráficas 9 y 10 se ilustra la distribución de la huella de carbono en cada capa generada de los dos tipos de techos verdes analizados respecto a la cantidad total. El sustrato en ambos casos es el recurso que causa una huella más grande, debido a que, en la base de datos del software SimaPRO, no se encontraron todos los componentes requeridos por ser la mayoría materiales originarios de México, entonces se eligió el material con mayor similitud a los elementos utilizados en el techo verde de estudio, este material es “peat moss”, conocido como turba. En un siguiente estudio se podrían generar los valores necesarios de la arena de tezontle, el tepojal, la tierra negra y la turba para obtener datos más cercanos a la realidad y tener una base de datos propia.

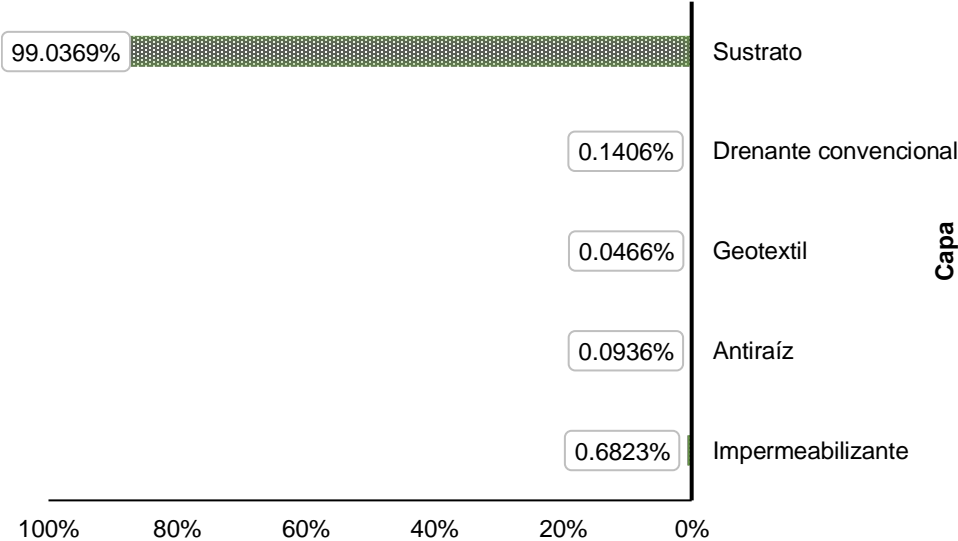
Enfocándonos específicamente en la capa drenante podemos notar que existe una gran diferencia de más de 3kgCO₂ por parte del material convencional. Contextualizando este valor, podemos considerar la distancia entre la CDMX y Puebla es de 132 km, recorriendo está en un auto compacto se emiten 3.3kgCO₂ (MyClimate.org, 2021), entonces podemos considerar el techo verde de estudio ahorra aproximadamente un viaje a Puebla desde la CDMX.

Gráfica 9. Distribución de la huella de carbono del techo verde de estudio (CIEMAD)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 10. Distribución de la huella de carbono del techo verde convencional propuesto



Fuente: Elaboración propia

4.6. Análisis costo-beneficio

La literatura revisada permite comprender que tanto los costos como los beneficios de los techos verdes de manera general tiene múltiples variables estas pueden ser: su tamaño y vegetación, las condiciones climatológicas, las características de la construcción o la zona geográfica, está última es un factor determinante que se refleja en el VPN; la inflación, la tasa de descuento, los precios de instalación, el ahorro de energía cambian de un país a otro, aunado a esto por el desarrollo tecnológico de cada país en la industria de los techos verdes. Es por lo anterior que en la tabla 26 se definen los valores unitarios en moneda nacional (M.N.) por área (m²), de acuerdo con la cantidad necesaria para la instalación del techo verde de estudio y el techo verde convencional propuesto para contrastarlos entre ellos.

Tabla 26. Costos iniciales de instalación del techo verde de estudio y el convencional propuesto

Componente	Presentación	Cantidad necesaria	Valor unitario (\$/m ²)
Impermeabilizante	5L	2L	\$ 199.50
Anti-raíz	10m ²	8m ²	\$ 446.82
Geotextil	150m ²	8m ²	\$ 57.26
Drenante orgánico (paja)	18kg	40 kg	\$ 36.11
Drenante convencional (membrana drenante)	42 m ²	8m ²	\$ 219.85
Sustrato	5kg	800kg	\$ 64.00
Vegetación	20 plantas	320 plantas	\$ 11.50

Fuente: Elaboración propia con información de Bauder, (2020), y comunicación personal con las empresas ENVERDE y Verde360.

Con estos valores fue posible obtener el costo inicial para cada tipo de techo y realizar una comparación entre ellos, donde se puede observar tomando el costo promedio inicial por metro cuadrado de México de un techo verde extensivo como el 100%, el techo verde de estudio es 41.36% más económico.

Tabla 27. Comparación costos iniciales

Concepto	Costo inicial (\$/m ²)
Techo verde ligero extensivo de estudio	615.69
Techo verde convencional propuesto	998.93
Precio promedio en México	1,050

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de los beneficios netos anuales por m², concuerdan con lo previamente mostrado, en donde el total del techo verde de estudio nos permite observar que aún a su bajo costo inicial los beneficios obtenidos son económicamente mejores, ya que se está pagando un menor precio por la misma cantidad de beneficios que se pueden recibir en comparación con el techo verde convencional propuesto.

Cabe mencionar que por las características del sitio donde se encuentra el techo verde de estudio no se reciben directamente todos los beneficios, por lo que estos resultados son para exponer los ahorros que se podrían obtener por instalar un techo verde como el de estudio en un inmueble donde requieran disminuir su gasto en energía por uso de aires acondicionados, las temperaturas internas o ruidos externos. En un siguiente estudio se podría establecer el valor económico específico del techo verde con respecto a las características del edificio al ser el techo instalado en un espacio el cual no es ocupado las 24hrs y donde el uso de energía por aire acondicionado no sería un referente, el cual es uno de los indicadores más frecuentes en los estudios de ahorro económico por el techo verde.

Tabla 28. Beneficio neto

Beneficio	Techo verde de estudio	Techo verde convencional
A la salud pública	\$2,039.83	\$5,105.74
Ahorro en energía	\$1,466.43	\$4,532.35
Mejora en la calidad de aire	\$3,099.89	\$6,165.81
Emisiones evitadas de CO ₂	\$4,794.48	\$7,860.40
Disminución del efecto isla del calor	\$4,326.88	\$7,392.80
Aislamiento de sonido	\$121.23	\$3,187.15
Gestión de agua de lluvia	\$2,451.31	\$5,517.23
Total	\$18,300.05	\$39,761.48

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 28 se observa la comparación de beneficios entre el techo convencional y el del estudio, es claro que el costo por beneficio es menor en el caso del techo verde de estudio, un claro ejemplo es en la “Mejora en la calidad de aire”, ya que ese beneficio, aportado por ambos tipos de techo, tiene un costo de casi el 50% menos para el techo verde del estudio en comparación con el del techo verde convencional

En conformidad con los lineamientos establecidos y la comparación realizada para la elección de un proyecto u otro, el techo verde de estudio es el que logra la maximización del VPN de los costos y beneficios, esto significa que la inversión inicial genera ganancias mayores a la rentabilidad establecida.

Tabla 29. VPN de los techos verdes

Concepto	VPN \$/m²
Techo verde ligero extensivo de estudio	5,008.24
Techo verde convencional propuesto	8,125.65

Fuente: Elaboración propia

Los resultados aquí obtenidos únicamente nos presentan que es económicamente viable el sustituir el material polimérico por uno orgánico, ya sea la paja o fibra de coco ya que al ser un residuo su costo es reducido en comparación con el drenante convencional al ser un material fabricado desde 0, además de impulsar la economía circular.

El costo de los techos verdes varía por su diseño, que contempla el tamaño, la vegetación y el tipo, además del propósito principal, por lo que se deben contemplar las limitaciones de los beneficios que se pueden obtener por donde se instale. Aún existen impactos no reportados en términos económicos para México, por lo que es importante que en próximas investigaciones tengan el enfoque de dar a conocer el valor monetario de los servicios ecosistémicos aportados por los sistemas de techos verdes.

En Alemania existe una especialización y producción de materiales para techos verdes la cual se refleja en los bajos costos de instalación en comparación con los que se pueden encontrar en México, hay algunas empresas que son distribuidores de productos alemanes importados, lo anterior incrementa el precio total; con una industria de techos verdes más grande en México permitiría hacer crecer la eficiencia y reducir costos.

Los resultados obtenidos acerca de los beneficios económicos obtenidos tanto públicos como privados por ejemplo el mejoramiento a la salud y la disminución del efecto isla de calor o el aumento de la longevidad del impermeabilizante y el aislamiento del sonido, pueden superar los costos iniciales.

Además, una parte angular de este trabajo es la economía circular ayuda a cerrar el ciclo de los materiales y evitar el desperdicio de materiales, evitar la explotación de los recursos naturales, sustituir los materiales nuevos con reutilizados o reciclados. Cabe resaltar que un producto nunca fabricado, cuya procedencia es natural y no es aprovechado adecuadamente, al ser utilizado este evitará por completo los posibles impactos ambientales negativos que pueda generar su desecho como residuo.

4.6. Diagnóstico de la apreciación del techo verde por la sociedad

La encuesta para el diagnóstico de apreciación por la sociedad del CIEMAD fue diseñada para recolectar la mayor cantidad de información con las respuestas, esta fue enviada a 72 personas que son parte de la comunidad del CIEMAD, solo se recibieron 33 respuestas de las cuales el 57.58% fueron estudiantes de posgrado (EP), 27.27 % profesores investigadores (PI) y 12.12% por Personal de Apoyo y Asistencia a la Educación (PAAE). Cada encuesta se respondió individualmente, de manera preliminar en la tabla 20 se puede observar y manifestar que la sociedad encuestada tiene una recepción positiva hacia el techo verde y lo que involucra tenerlo como parte del centro, además conforme a los 5 grupos de preguntas creados se realizó un análisis particular para cada uno.

Tabla 30. Resultados del diagnóstico de la apreciación por la sociedad

Pregunta	Respuestas
1.1. ¿Conocía los techos verdes?	97% Respondió afirmativamente
1.2. ¿Sabe que en el CIEMAD hay un techo verde?	78.8% Respondió afirmativamente
2. Considera usted ¿que el techo verde se podría volver un elemento característico del CIEMAD?	87.9% Respondió afirmativamente
3. Desde su percepción, seleccione el número para calificar de manera negativa o positiva el valor que le da al entorno del CIEMAD el techo verde	72.7% Valor positivo
4. Marque la emoción que le provoca ver el techo verde	87.9% Sentimientos positivos
5. Marque la emoción que le provoca, ver los vídeos y las imágenes del techo verde mostradas en la presentación	90.9% Sentimientos positivos

6. Seleccione el beneficio ambiental aportado por el techo verde que le importa más a usted	60.6% % Consumo de CO ₂
7. Conociendo los beneficios ambientales que tienen los techos verdes, de ser posible, ¿usted instalaría uno en su hogar?	84.8 % Respondió afirmativamente
8. Considera usted, ¿qué está es una solución posible para recuperar áreas verdes en la Ciudad de México?	75.8 % Respondió afirmativamente
9. Desde su percepción, piensa que una ciudad con construcciones con techos verdes, ¿sería una ciudad saludable?	78.8% Respondió afirmativamente
10. ¿Le gustaría vivir en una ciudad cuyos techos estuvieran cubiertos por vegetación?	97% Respondió afirmativamente

Fuente: Elaboración propia

4.4.1 Conocimiento de los encuestados respecto a los techos verdes

La mayoría de las personas encuestadas están al tanto de lo que es un techo verde, solo una persona (EP) que no conocía los techos verdes de la misma manera desconocía que en el CIEMAD existe uno, no considera poner uno en su casa y tampoco que sea una solución para recuperar las AVU en la CDMX.

El 85.7% de quienes desconocían la existencia del techo verde en CIEMAD, son estudiantes de posgrado, de los cuales uno no pasa tiempo en el centro, uno en el laboratorio, estos espacios no tienen ventana con vista hacia el techo verde. Mientras que las 5 personas restantes realizan sus actividades en el 1er o 2do piso del edificio principal, pero al no especificarse en qué parte podrían encontrarse en oficinas donde no tengan una vista en dirección al techo verde, estas son algunas de las razones por las cuales no se percataron de la existencia del techo verde.

4.4.2. Grado de aceptabilidad

Los participantes comparten un alto consenso de aceptación sobre la compatibilidad del techo verde con el entorno del CIEMAD, de la misma manera es considerado como una opción a instalar en sus propias viviendas y el deseo de una ciudad con techos verdes.

Específicamente aquellos participantes que respondieron negativamente fueron dos PI, un PAAE y un EP, quienes no aprueban al techo verde como particularidad del CIEMAD, de estos solo un encuestado no considera tener un techo verde en su vivienda y califico con un valor negativo los aportes del techo verde de estudio. La pregunta 2 debería reforzarse con un apartado de respuesta abierta con la finalidad de conocer las condiciones generales del techo de su vivienda lo cual justifique el rechazo de los techos verdes.

Para analizar las respuestas de la pregunta 3 se considera como valor negativo la puntuación de 1 o 2, opinión imparcial con el tres y valor positivo con calificación 4 o 5. 2 EP, 1 PI y 1 PAAE, designaron una valoración negativa a los aportes del techo verde en el CIEMAD. En comparación 15 EP, 4 PAAE y 5 PI positivo una aceptación por los valores aportados del techo verde de estudio a su entorno, solo se presentaron 5 participantes con una impresión neutral respecto al valor proporcionado por el techo verde.

4.4.3. Sentimientos positivos o negativos generados por el tipo de visualización respecto a la estética del techo verde

La selección de sentimientos no estuvo limitada a solo uno por lo que existieron combinaciones. En ambas preguntas de la sección los sentimientos positivos con mayor preferencia fueron "tranquilidad" y "alegría", mientras que la preferencia por sentimientos negativos fue notablemente menor con la elección de "tristeza".

El sentimiento positivo más elegido individualmente (38%) y en combinación fue la "tranquilidad" (26%), combinaciones: "tranquilidad + alegría", "tranquilidad + sorpresa + alegría + asombro, tranquilidad + amor+ alegría", cabe mencionar que existió la elección de "tranquilidad + tristeza", esta mezcla contrapone sentimiento positivo con uno negativo. El siguiente sentimiento fue "alegría" individual y en combinación, con sentimiento ya mencionados, además de "alegría + asombro"; le sigue "sorpresa", "asombro" y con solo una elección individual de sentimiento encontramos "amor".

En el caso de los sentimientos elegidos generados por la visualización de videos o imágenes del techo verde, "alegría" fue el sentimiento positivo más preferido de manera individual (27%) y en combinación (27%) alegría + asombro, alegría + sorpresa, "alegría+ tranquilidad", le sigue "tranquilidad" tanto individualmente como en combinación con "tranquilidad + amor + alegría" y "tranquilidad + sorpresa + alegría + asombro", después los sentimientos restantes seleccionados de forma singular son la opción de "sorpresa" y le continua "asombro". Existieron dos respuestas con "tristeza" de un EP y un PI ambos coinciden laborar en el segundo piso edificio principal; un caso particular en estas respuestas fue la abstinencia de un participante contestar, esto se consideró como un sentimiento negativo mismo que fue único en seleccionar "nerviosismo" en la pregunta 4.

4.4.4. Impresión de la sociedad respecto a los servicios ecosistémicos y sus efectos en las zonas urbanas.

En este apartado se analizan las respuestas de las preguntas 6, 8 y 9, en el caso de la referente a los beneficios proveídos por los techos verdes no existieron limitaciones para la selección que más les interesarán a los participantes, entonces también se describirán las conjunciones entre los beneficios.

El principal beneficio tanto individual como en combinación fue la producción de oxígeno y consumo de CO₂, se presentaron conjunciones con todas las opciones continúa la selección de "espacio vital para flora y fauna" con 45.5%. Después encontramos "retención de partículas" con el 36.4%, posterior "aislamiento de temperaturas externas" con 30.3% y con 24.2% "retención de agua de lluvia" este se eligió solo una vez como beneficio único por un participante el cual contesto negativamente a las preguntas 8 y 9.

Tres beneficios fueron seleccionados únicamente en combinación, estos son: "aislación acústica" con un caso particular en cruce con el "aislamiento de temperatura", esto fue seleccionado por el mismo participante que contesto negativamente a las preguntas 8 y 9, lo cual podría ayudar a comprender el rechazo hacia los techos verdes ya que no estima que sus beneficios sean importantes hacia el exterior del edificio, considerando solo aquellos que afectan el interior y podrían

significar un ahorro económico. El siguiente es "efectos positivos psicológicos" de este cabe destacar su combinación con el "embellecimiento de los alrededores", ambos elegidos por un participante que percibe positivamente a los techos verdes en las zonas urbanas del mundo y como solución para recuperar áreas verdes, este es un ejemplo donde se relaciona favorablemente los beneficios generados con el techo verde y la apreciación de este.

Del 24.24% que no cree que los techos verdes puedan ser una solución en la CDMX el 75% se conforma por EP y el porcentaje restante son PI, pero respecto a la pregunta 9 contestaron afirmativamente solo 33% EP y el 50% PI, lo cual podría significar que en efecto piensan que un techo verde es una solución para las ciudades, pero no para la CDMX.

En la pregunta 9, existió un menor porcentaje de respuestas desfavorables en relación con los techos verdes en los espacios urbanos, esto compuesto por EP y PI, de lo cual el 26% de los participantes encuentran viable como solución a los techos verdes para rescatar o aumentar las áreas verdes de la CDMX, pero no creen que esto se pueda generalizar en las ciudades del mundo.

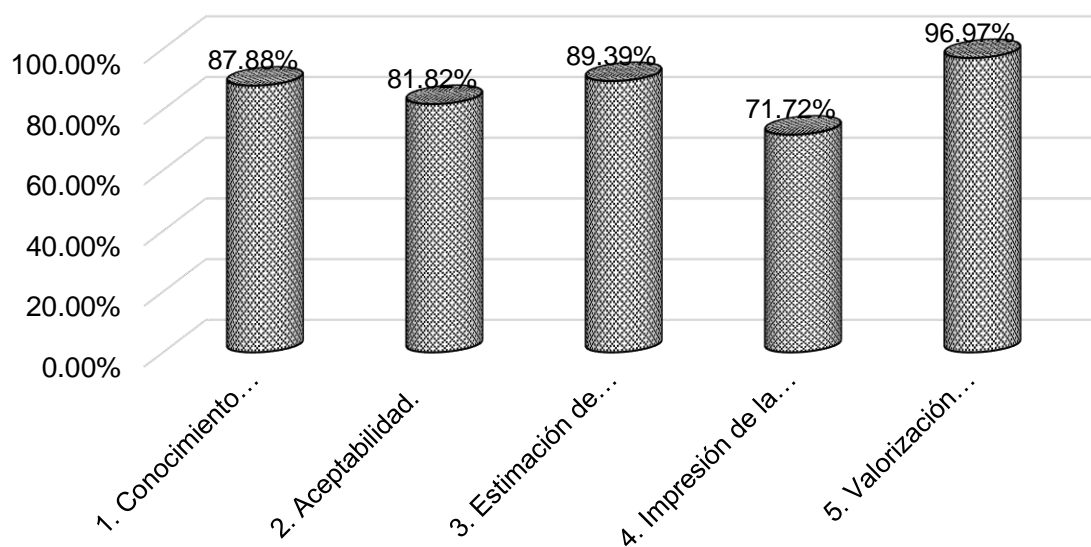
4.4.5. Valorización positiva o negativa por escenarios futuros.

El 97% de los encuestados quisiera vivir en una ciudad cuyos techos estuvieran cubiertos por vegetación, lo que refleja una necesidad de estar cerca de la naturaleza, esto puede estar relacionado con la teoría de la biofílica, la cual propone que los seres humanos por su evolución se sienten atraídos de forma innata hacia la naturaleza, esto por una conexión única e individual (Hofmann y Javed, 2018). Con respecto a lo anterior es razonable mencionar un campo emergente llamado "urbanismo biofílico" que respalda el uso de techos verdes como una solución y parte de las ciudades sustentables, este concepto combina el principio de la teoría biofílica, antes mencionado, con el diseño de una ciudad que debe tener como eje la incorporación de sistemas naturales en las construcciones urbanas con la finalidad de proteger a cada residente, ya que se debe considerar a los seres

humanos como parte del ecosistema (El-Baghdadi y Desha, 2017; Reeve, Desha, Hargreaves, y Hargroves, 2015).

En esta sección solo un participante, contesto negativamente, desconocía la existencia del techo verde en CIEMAD, además este selecciono estas mismas opciones negativas a las preguntas 7, 8 y 9. Asimismo, considero un solo beneficio aportado por el techo verde le provocó un sentimiento de "nerviosismo" el techo verde y ningún sentimiento por ver las imágenes de este. Se puede observar un caso único donde podríamos considerar que este participante no tiene una estrecha relación con los elementos naturales incorporados a las estructuras urbanas en específico a los techos verdes, a pesar de esto consideraría instalar uno en su vivienda y darle un valor positivo al techo verde como parte del entorno del CIEMAD. A partir de las secciones y su análisis presentado se estimó el promedio de respuestas positivas para cada una, esto se exhibe en la gráfica 4.

Gráfica 11. Apreciación positiva por parte de la sociedad del CIEMAD hacia el techo verde



Fuente: Elaboración propia

El grupo de encuestados tiene una característica en cuanto a la profesión direccionada a los estudios ambientales por estudiar o trabajar en el CIEMAD, a pesar de esto existió un pequeño porcentaje que desconocía de los techos verdes y su utilidad de manera general; adicionalmente a esta encuesta se debe de

considerar replicarse con alguna comunidad no familiarizada con este tipo de tecnologías ya que las experiencias con enfoque ambiental pueden manifestar diversas respuestas, de acuerdo con Kaltenborn y Bjerke (2002) las diferentes actitudes ambientales pueden impactar en la selección y preferencia de un paisaje más natural. En investigaciones futuras la encuesta debe considerar la influencia del contexto en donde viven los participantes ya que podrían habitar en alguna zona donde carezcan de áreas verdes o no, además de la percepción general hacia las áreas verdes urbanas.

4.4.6. Relevancia de los techos verdes con la actual pandemia por COVID-19

El 11 de marzo de 2020, la OMS declaró pandemia mundial por la enfermedad coronavirus COVID-19, a causa de la cantidad de contagios y distribuyó recomendaciones para su contención (Secretaría de Gobierno (SEGOB), 2020). Desde el viernes 13 de marzo 2020 con la cancelación de la mayoría de las actividades en todo el país, limitando la movilidad, permitiendo realizar únicamente actividades esenciales. El gobierno federal implemento un semáforo de riesgo epidemiológico con la finalidad de monitorear la regulación de la utilización de los espacios públicos conforme al posible riesgo de contagio de COVID-19 (Gobierno de México, 2020). La CDMX se ha encontrado en semáforo epidemiológico rojo y naranja, en este último se permite el acceso a espacios abiertos públicos aún con restricciones (Gobierno de México, 2020). En diferentes países del mundo estas restricciones no se aplicaron lo cual posibilitó que la población visitará las áreas naturales y bosques urbanos considerando importante el acceso a estas para distintas actividades como ejercicio hasta la observación de aves, también lo relacionan con la reducción del estrés en una época de incertidumbre global (Grima et al., 2020; Venter, Barton, Gundersen, Figari, y Nowell, 2020).

Las enfermedades y trastornos mentales como estrés, depresión, agresión, obesidad son frecuentes en las áreas urbanas, aunque estas pueden ser ocasionadas por múltiples factores, una de esta es la falta de naturaleza, por lo que el diseño de una ciudad verde puede ser clave para mejorar la salud pública (Hartig

y Kahn, 2016) ya que está comprobada la optimización del sistema inmunológico (Frumkin et al., 2017) y la reducción del estrés con un mínimo de 20 minutos en contacto con espacios verdes (Hunter, Gillespie, y Chen, 2019).

De acuerdo con Riechers, Strack, Barkmann, y Tschardtke, (2019) las áreas verdes urbanas proporcionan espacios para actividades culturales y sociales, como reuniones, ejercicio individual, recreación, entre otros es por ello que en un futuro los techos verdes podrían ser un buen lugar de encuentro en edificios residenciales o de trabajo.

Según estudios recientes derivados de la actual pandemia (Soga, Evans, Tsuchiya, y Fukano, 2020), demuestran que el simple hecho de observar los espacios verdes desde una ventana en tiempos de aislamiento social puede traer beneficios tales como mayores niveles de autoestima, satisfacción con la vida y felicidad subjetiva, además de reducción de niveles de sentimiento de soledad y depresión. Esta es una razón más por la cual los techos verdes podrían ser una solución a las ciudades que tienen pocos espacios verdes tanto privados como públicos.

La falta de utilizar espacios verdes públicos por las restricciones de la pandemia, ha generado efectos adversos que afectan directamente al comportamiento de la sociedad al aumentar el estrés, la ansiedad y otras enfermedades mentales, es por esto que es necesaria una planificación y diseño adecuado para que exista una disponibilidad general de áreas verdes (Ahmadpoor y Shahab, 2020).

Las condiciones derivadas de la pandemia resaltaron las diferencias en el acceso a parques y espacios verdes para poblaciones vulnerables y desatendidas (Slater, Christiana, y Gustat, 2020) y han forzado a reevaluar y considerar la importancia de las AVUs en todo el mundo, así como las alternativas para aumentarlas y procurar la biodiversidad. En el caso particular de la CDMX algunas de las condiciones desiguales de vivienda son por la construcción de grandes edificios con espacios limitados donde sea posible tener jardines o áreas verdes privadas, esto provoca que la población busque y dependa de espacios verdes públicos, esto recae en la proporción desigualdad de áreas naturales urbanas en las alcaldías, pero dichas

poblaciones podrían verse beneficiadas por la inclusión de un techo verde ligero y eco amigable en su vivienda.

4.4.7. Futuras investigaciones

En conformidad con los resultados de este trabajo de tesis, podrían sentar las bases para siguientes investigaciones las cuales involucren: la posibilidad y las ganancias de implementar techos verdes a gran escala en la CDMX; diseño y evaluación de techos verdes con otras tecnologías que promueven el ahorro energético como lo son paneles solares y captación de agua de lluvia y por último el análisis a nivel químico del uso de techos verdes como huertos urbanos.

CONCLUSIONES

El diseño, implementación y evaluación tanto del techo verde ligero extensivo como de los prototipos con la reutilización de materiales orgánicos residuales demuestra que es posible su funcionalidad como un AVU. Se comprobó que el techo verde ligero extensivo de estudio con paja en su capa drenante tiene una aportación ambiental favorecedora en cuanto a la biomasa vegetal y a la fauna. Para las cinco especies evaluadas se encontró una tasa de sobrevivencia de más del 100%; mientras que para la fauna se encontraron siete órdenes entomológicos distintos, entre los cuales se distinguen escarabajos y abejorros cuya función polinizadora es vital.

De manera inicial se observa la estructuración de un ecosistema, con plantas como productores, algunos consumidores como los polinizadores y también arañas como depredadoras; esto es de alto valor dado que la línea base fue de cero, ahora existen primeros brotes en un espacio libre y con condiciones propicias para el desenvolvimiento de entomofauna.

Los resultados obtenidos en cuanto al desarrollo y sobrevivencia de la vegetación del techo verde de estudio, permiten confirmar la subsistencia y continua aportación de diversos servicios ecosistémicos; asimismo, este techo verde propuesto ofrece un ahorro económico por el nulo mantenimiento y la integración del material orgánico en su estructura que fortalecen el crecimiento de una manera natural, con solo agua de lluvia. A 2 años y 4 meses de la instalación del techo verde se confirmó al mantener su vegetación original y sin dañar la estructura donde se encuentra, a pesar de las condiciones drásticas urbanas y extremas climáticas.

La caracterización de la paja con, un pH de 5.94, bajos niveles de sales 934.50ppm y alta capacidad de retención de agua $3.87 \text{ gH}_2\text{O/g}_{\text{material}}$, fueron ideales para una tasa de crecimiento de entre el 18-19% de *S. dendroideum* y *S. rubrotinctum* presente en el techo verde ligero extensivo, en consecuencia, se comprobó su capacidad para asimilar CO_2 al estimar que cada planta captó 1.3gCO_2 mensuales. Lo que contribuye a la mejora de la calidad del aire y justifica la existencia del

incremento de proyectos de revegetación de espacios como los techos verdes para incrementar las AVUs de la ciudad.

El análisis de la paja y fibra de coco permitió entender porque son buenos materiales para un techo verde, y ampliar la oferta para aplicar materiales residuales orgánicos con características de pH entre 5.31 y 5.94, 934.50 a 1573.33ppm de sales y entre 3.12 a 3.87 gH₂O/g_{material}, que a la vez reducen la huella de carbono por el desuso de polímeros y fomento de la economía circular con el aprovechamiento de los residuos propuestos en la capa drenante del techo verde, por lo que existe una oportunidad de mejora en la industria de los techos con enfoque a la disminución de su huella de carbono.

La comparación del techo verde ligero extensivo con uno convencional en el análisis de ciclo de vida simplificado y de costo beneficio, el resultado demostró que el techo de estudio fue la mejor opción, la huella de carbono disminuyó en 3.82kgCO₂ respecto a un techo verde convencional; en términos monetarios se obtuvo un valor presente neto de \$5,008.24/m² por lo que es más rentable que un techo verde convencional.

En el ámbito social, se demostró que la existencia de un techo verde ligero extensivo en la comunidad del CIIEMAD impacta positivamente en un 85.5%. Lo que resulta beneficio, en un área urbana como la alcaldía G.A.M. cuyos espacios verdes han disminuido con el paso del tiempo, este tipo de techo verde económico es una posibilidad para que la comunidad pueda acceder a zonas verdes que les generen impactos positivos a su salud mental y física.

Las AVUs son sumideros de carbono y reservorios de biodiversidad, por añadidura, los techos verdes son lo mismo a una escala menor en nuestra ciudad, pero al observar los resultados obtenidos tanto teóricos como experimentales se estima el alto beneficio que traería expandir su aplicación a los techos de la CDMX.

Asimismo, el trabajo comprueba la conexión entre los seres humanos y la naturaleza una investigación futura podría encontrar la asociación entre enfermedades como estrés o ansiedad y un área verde. Con los efectos a la salud mental y física

causados por la pandemia de Covid-19 que comenzó en 2019 y que continua hasta la fecha, es importante reverdecer las ciudades y procurar el medio ambiente urbano, a través de techos verdes ligeros.

La presente investigación permite ver que la propuesta de implementar materiales orgánicos residuales los revalora y reutiliza dentro de un esquema de una economía circular como elementos esenciales de la composición del techo verde, respalda que este pueda ser considerado como un mecanismo para la adaptación al cambio climático.

La importancia del diseño de este techo verde es ser ligero en su composición, adaptable a la infraestructura de los inmuebles de la alcaldía G.A.M. que a pesar de algunos ser básicos en su material de construcción son capaces de resistir este tipo de techo verde. Lo mismo aplica al resto de la CDMX, ya que en ella podemos encontrar infraestructura nueva o antigua la cual resistiría este sistema de naturación ligero.

El techo verde de estudio cumple con la Agenda 2030 y sus ODS, en el ámbito social, económico y ambiental, como se mencionó en los antecedentes para el 3ro, 11vo, 13vo y 15vo. Los resultados estiman que no solo aporta a estos ODS, también al 1ro “Fin de la pobreza” y al 8vo “Trabajo decente y crecimiento económico” al fomentar la venta de materiales orgánicos residuales y la creación de nuevos empleos esenciales para la instalación de un techo verde, como son: un director de obra, un instalador, un jardinero, al menos tres ayudantes para cada uno de ellos, estos son solo algunos y se pueden generar muchos más por la cadena de valor. En el objetivo 7° “Energía asequible y no contaminante”, de los ODS, el techo verde por sí solo genera ahorros energéticos en los edificios, ahora con los materiales propuestos también se ahorra energía por disminuir la producción de polímeros que son materia prima de los techos verdes.

Cuadro de congruencia

Título	Problema	Hipótesis	Objetivo General	Objetivos de investigación
<p>Techo verde como estrategia para el desarrollo urbano sustentable</p>	<p>Construcción de techos verdes ligeros para la CDMX para el aprovechamiento de fibras residuales con la finalidad de utilizarse como una opción para recuperar áreas verdes urbanas</p>	<p>Reutilizar material orgánico residual en un techo verde extensivo en la capa drenante, generaría un área verde urbana que aportaría servicios ecosistémicos, espacios para la biodiversidad y la captación de CO₂, con posibilidad de promover la economía circular, a su vez permitirá medir el grado de aceptación por la sociedad que coexiste en la zona de estudio.</p>	<p>Implementar un techo verde ligero extensivo y comprobar los beneficios del uso de un material orgánico residual en su capa drenante mediante su caracterización fisicoquímica para promover su empleo en la estructura con el fin de proporcionar un espacio de biodiversidad y favorecer la captación de CO₂, del mismo modo evaluar la respuesta de la sociedad hacia los techos verdes.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Caracterizar las fibras naturales, consideradas como residuos, para su revalorización en la construcción de un techo verde ligero y estudiar su desempeño en dos prototipos de estudio. 2. Contrastar la función del techo verde extensivo de estudio en términos de captación de CO₂, con uno convencional para estimar su desarrollo. 3. Evaluar la aportación ambiental del techo verde y en los prototipos como un entorno único para el crecimiento de la biomasa vegetal y la fauna. 4. Valorar la perspectiva de la sociedad por los diversos aportes del techo verde al ambiente del CIEMAD.

Objetivos de investigación	Metodología de la investigación: Cualitativa	Actividades
<p>1. Caracterizar las fibras naturales, consideradas como residuos, para su revalorización en la construcción de un techo verde ligero y estudiar su desempeño en dos prototipos de estudio.</p>	<p>Caracterización fisicoquímica de la fibra de coco y la paja</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión estado del arte: uso de materiales alternativos en la estructura de los techos verdes • Investigación en la literatura de las propiedades de la fibra de coco y la paja. • Medición de pH, sales y capacidad de retención de agua de la fibra de coco, paja y sustrato • Diseño y colocación de los prototipos: -Instalar dos prototipos de techo verde cuyas capas drenantes se compondrán de: 1.- fibra de coco, 2.- combinación: 50% fibra de coco y 50% paja; y su vegetación será compuesta por <i>S. dendroideum</i> y <i>S. rubroinctum</i>
<p>2. Contrastar la función del techo verde extensivo de estudio en términos de captación de CO₂, con uno convencional para estimar su desarrollo.</p>	<p>Medición de cuantitativa del CO₂ captado por las plantas <i>Sedum</i> de la familia <i>Crassulaceae</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Investigación en la literatura de las propiedades de la fibra de coco y la paja. • Medición de pH, sales y capacidad de retención de agua de la fibra de coco, paja y sustrato • Diseño y colocación de los prototipos: -Instalar dos prototipos de techo verde cuyas capas drenantes se compondrán de: 1.- fibra de coco, 2.- combinación: 50% fibra de coco y 50% paja; y su vegetación será compuesta por <i>Sedum dendroideum</i> y <i>Sedum rubroinctum</i> -Durante seis meses utilizar el equipo portátil medidor de CO₂, para registrar la cantidad de CO₂ consumido -Registro y análisis de resultados
<p>3. Evaluar la aportación ambiental del techo verde y en los prototipos como un entorno único para el crecimiento de la biomasa vegetal y la fauna.</p>	<p>Cuantificación de la biodiversidad: abundancia específica de la fauna presente y captura de insectos Investigación teórica: Sistemas de naturación y techos verdes. Revisión y síntesis del estado del arte: investigación y desarrollo en techos verdes. Búsqueda y selección de información pertinente a la zona de estudio: superficie, áreas verdes por habitante, azoteas verdes. Investigación de las propiedades de los materiales utilizados en el techo verde</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cuantificar la presencia de fauna en el techo verde de estudio y en los prototipos: • Método 1: Preparación, colocación y supervisión de trampas en el techo verde estudio. Método 2: Observación y registro digital de la actividad por parte de la fauna en el techo verde y en los prototipos • Registro de la cantidad de fauna presente en ambos métodos <ul style="list-style-type: none"> • Revisar la literatura en general: manuales, legislación nacional, artículos científicos, proyectos, etc. que engloben los techos verdes. • Revisar la literatura científica en bases de datos acotando la búsqueda a techos verdes, sus tipos, su estructura y sus servicios ecosistémicos y su aplicación a nivel internacional y nacional. Búsqueda en bases de datos acerca de uso de materiales alternos usados en techos verdes y de las propiedades de los materiales orgánicos. • Búsqueda del estado del arte del análisis de ciclo de vida de los materiales utilizados el techo verde y la huella de carbono generada. • Definir el concepto de techo verde. • Caracterizar el techo verde de estudio: - Establecer las características del lugar donde se localiza el techo verde de estudio. -Detallar las propiedades de los materiales utilizados en el techo verde. -Realizar un registro del estado de la vegetación del techo verde: plantas en su totalidad y su clasificación: suculentas (de origen) y oportunistas
<p>4. Valorar la perspectiva de la sociedad por los diversos aportes del techo verde al ambiente del CIEMAD.</p>	<p>Medición cualitativa por medio de aplicación de encuestas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión del estado del arte: estudios sobre la relación y apreciación entre la sociedad con los techos verdes -Elaborar encuesta -Elaboración de la presentación informativa sobre los techos verdes y el techo verde de estudio -Envío de la encuesta a la comunidad de CIEMAD -Recepción de respuesta -Análisis de resultados

Objetivos de investigación	Preguntas que orientan la investigación o Hipótesis	Resultados esperados de la investigación
<p>1. Caracterizar las fibras naturales, consideradas como residuos, para su revalorización en la construcción de un techo verde ligero y estudiar su desempeño en dos prototipos de estudio.</p>	<p>¿Se podrá mejorar el desempeño del techo verde al utilizar un material orgánico residual? ¿Cuánto económicamente se puede ahorrar al instalar un techo verde amigable con el medio ambiente en comparación con un techo verde convencional?</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Propiedades fisicoquímicas de: la paja, la fibra de coco y el sustrato utilizado en los prototipos de techo verde. •Respaldar la instalación de este tipo de techos como estrategia para la recuperación de áreas verdes urbanas
<p>2. Contrastar la función del techo verde extensivo de estudio en términos de captación de CO₂, con uno convencional para estimar su desarrollo.</p>	<p>¿Cuál es la capacidad de almacenamiento y secuestro de carbono y CO₂ registrado en los techos verdes? ¿Se podrá disminuir el tiempo de retorno de la cantidad de carbono consumido en la elaboración de un techo verde, utilizando materiales orgánicos? ¿Cómo puede aportar un techo verde eco amigable a la captación de CO₂ y como herramienta para disminuir el cambio climático?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de carbono y CO₂ capturado por metro cuadrado en el techo verde de estudio. • Mayor cantidad de CO₂ capturado que en el estudio del techo verde del jardín botánico de C.U.
<p>3. Evaluar la aportación ambiental del techo verde y en los prototipos como un entorno único para el crecimiento de la biomasa vegetal y la fauna.</p>	<p>¿Los organismos (insectos, reptiles y aves pequeñas) desplazados por instalaciones humanas regresarán de manera natural al área urbana si cuentan las construcciones tienen un techo verde integrado? ¿Qué es un techo verde? ¿Cuál es el origen de los techos verdes? ¿Un techo verde puede mejorar las condiciones ambientales de una ciudad? ¿Cómo ha sido el desarrollo de los techos verdes en el mundo y en México? ¿Se puede optimizar un techo verde al hacerla amigable con el medio ambiente y reducir las emisiones generadas durante el proceso de fabricación de sus capas prefabricadas? ¿Como convertir el techo verde un sistema sostenible que involucre la economía circular y el aprovechamiento de residuos? ¿Se puede aligerar el peso del techo verde?</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Cantidad de organismos presentes en el techo verde y en los prototipos. •Evidencia de la utilidad de los techos verdes como un espacio para la biodiversidad • Un marco general que involucre el concepto de techo verde, sus antecedentes y sus beneficios. • El contexto del techo verde de estudio el cual integre la cantidad total de plantas incluyendo las oportunistas que llegaron después de la instalación del techo verde así como las plantas suculentas que se proliferaron de manera natural.
<p>4. Valorar la perspectiva de la sociedad por los diversos aportes del techo verde al ambiente del CIIEMAD.</p>	<p>¿Qué tanto la sociedad conoce acerca de los beneficios del techo verde? ¿Si la sociedad conociera los beneficios y la técnica en que un techo verde es instalado, la cantidad de techos verdes en la ciudad aumentaría? ¿O al menos procuraría la instalación de estos? ¿Cómo recibe la comunidad del CIIEMAD al techo verde?</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Evidencia de la apreciación positiva por parte de la sociedad hacia el techo verde.

REFERENCIAS GENERALES

- Agencia Digital de Innovación Pública. (2020). Portal de datos de la Ciudad de México. Retrieved June 5, 2020, from Límite de las Alcaldías website: <https://datos.cdmx.gob.mx/explore/dataset/limite-de-las-alcaldias/table/>
- Aguilera Díaz, A. (2017). El costo-beneficio como herramienta de decisión en la inversión en actividades científicas. *Cofín Habana*, 12(2), 322–343.
- Ahmadpoor, N., & Shahab, S. (2020). Realising the value of greenspace: a planners' perspective on the COVID-19 pandemic. *Town Planning Review*, 1–7. <https://doi.org/10.3828/tpr.2020.37>
- Alchapar, N. L., Correa, E., & Cantón, A. (2018). ¿Techos reflectivos o verdes? Reflective or Green Roofs? *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 11(2), 1–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu11-22.trvi>
- Alvarado, K., Blanco, A., Taquechel, A. (2008). Fibra de coco: Una alternativa ecológica como sustrato agrícola. *Agricultura Organica*, 3, 30–31.
- Aragón Moreno, J. A., & Espitia Gonzalez, J. D. (2018). Evaluación térmica de la sustitución del material de la capa de drenaje en techos verdes por llantas usadas - análisis experimental en el II periodo húmedo climático del 2016, Bogotá. *AVANCES
Investigación En Ingeniería*, 14, 21. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1275>
- Arellano-Leyva, E., Hernández-Quiróz, M., Huerta-Guzmán, R. G., & Collazo-Ortega, M. (2017). Extensive Green Roofs as a Means to Capture Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 37(4), 280–291. <https://doi.org/10.1080/10406638.2015.1105827>
- Auer, A. (2018). *Estimation of green roofs' carbon sequestration potential*. Roskilde University.
- Baik, J. J., Kwak, K. H., Park, S. B., & Ryu, Y. H. (2012). Effects of building roof greening on air quality in street canyons. *Atmospheric Environment*, 61, 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.076>
- Barbaro, L. A., Soto, M. S., Sisaro, D., Karlanian, M. A., & Stancanelli, S. (2017). *Sustratos para techos verdes sustentables (extensivos)* (1ra Edición; E. I. I. de F. CNIA, Ed.). Buenos Aires.
- Bass, B. (2008). Should you put your energy into green roofs to reduce energy consumption in your building. *Journal of Green Building*, 3(2), 26–40. <https://doi.org/10.3992/jgb.3.2.26>
- Bauder. (2020). Technical Centre. Retrieved February 10, 2021, from Products website: <https://www.bauder.co.uk/technical-centre/products/accessories>
- Beltrán-Melgarejo, A., Vargas-Mendoza, M., Pérez-Vázquez, A., & García-Albarado, J. C. (2014).

- Confort térmico de techos verdes con *Cissus verticillata* (Vitaceae) en viviendas rurales tropicales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (9), 1551–1560. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263137781003>
- Bevilacqua, P., De Simone, M., Coma, J., Pérez, G., Solé, C., Cabeza, L. F., ... Juárez, A. (2015). Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs. *Building and Environment*, 92, 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.026>
- Bisceglie, F., Gigante, E., & Bergonzoni, M. (2014). Utilization of waste Autoclaved Aerated Concrete as lighting material in the structure of a green roof. *Construction and Building Materials*, 69, 351–361. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.083>
- Blackhurst, M., Hendrickson, C., & Matthews, H. S. (2010). Cost-effectiveness of green roofs. *Journal of Architectural Engineering*, 16(4), 136–143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000022](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000022)
- Borsani, M. S. (2011). MATERIALES ECOLOGICOS: estrategias, alcance y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles.
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Bozorg Chenani, S., Lehvävirta, S., & Häkkinen, T. (2015). Life cycle assessment of layers of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, 90, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.070>
- Brenneisen, S. (2006). Space for urban wildlife : designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban Habitats*, 4(1), 27–36.
- Brenneisen, S. (2017). *The benefits of biodiversity from green roofs*. (January 2003).
- Breuning, J. (2015). Green Roof Technology. History.
- Caballero, J., Pulido, M. T., & Martínez-Ballesté, A. (2004). Capítulo 19. El uso de la palma de guano (*Sabal spp.*) en la industria turística de Quintana Roo, México. In *Productos forestales, medios de subsistencia y Conservación. Estudios de caso sobre sistemas de manejo de productos forestales no maderables*. (pp. 365–385). CIFOR.
- Cabrera, G. R. (2017). *El boom de las plazas comerciales en la Ciudad de México*. Centro de Investigación y docencia económicas, A.C.
- Calvo-Ramos, D., Gómez-De la Cruz, A., & Rodríguez-Hernández, P. (2016). Techos verdes: un estilo ecoamigable. *DIGITAL CIENCIA@UAQRO*, 1–10.

- Carter, T., & Keeler, A. (2008). Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management*, 87(3), 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.024>
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; Building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42(10), 1582–1591. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004>
- Cerdá, E., & Khalilova, A. (2016). Economía circular. *Economía Circular, Estrategia y Competitividad Empresarial*, (401), 11–20. <https://doi.org/10.1590/s0034-75901995000500012>
- Cerón-Palma, I., Sanyé-Mengual, E., Oliver-Solà, J., Montero, J. I., Ponce-Caballero, C., & Rieradevall, J. (2013). Towards a green sustainable strategy for social neighbourhoods in Latin America: Case from social housing in Merida, Yucatan, Mexico. *Habitat International*, 38(1), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2012.09.008>
- Clark, C., Adriaens, P., & Talbot, F. B. (2008). Green roof valuation: A probabilistic economic analysis of environmental benefits. *Environmental Science and Technology*, 42(6), 2155–2161. <https://doi.org/10.1021/es0706652>
- Collazo-Ortega, M., Rosas, U., & Reyes-Santiago, J. (2017). Towards Providing Solutions to the Air Quality Crisis in the Mexico City Metropolitan Area: Carbon Sequestration by Succulent Species in Green Roofs. *PLoS Currents*, 1–19. <https://doi.org/10.1371/currents.dis.bb66ae4f4f3c6eb118a019a29a9ce80f>
- Coma, J., Pérez, G., Castell, A., Solé, C., & Cabeza, L. F. (2014). Green roofs as passive system for energy savings in buildings during the cooling period: use of rubber crumbs as drainage layer. *Energy Efficiency*, 7(5), 841–849. <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9262-x>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis. (2018). Afrontando el reto de la movilidad sustentable en la ZMVM. Retrieved May 5, 2020, from <https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/afrontando-el-reto-de-la-movilidad-sustentable-en-la-zmvm>
- Comisión Ambiental Metropolitana. (2011). Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020. 2012, 388. Retrieved from <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020a). *Precipitación (mm) por Entidad Federativa y Nacional 2020*. Retrieved from [https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Pronóstico climático/Temperatura y Lluvia/PREC/2020.pdf](https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Pronóstico%20climático/Temperatura%20y%20Lluvia/PREC/2020.pdf)

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020b). Servicio Meteorológico Nacional. Retrieved March 15, 2020, from Monitor de sequía en México website: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Contreras-Bejarano, O., & Villegas-González, P. A. (2019). Techos verdes para la gestión integral del agua: caso de estudio Chapinero, Colombia. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(5), 282–318. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-11>
- Deng, H., & Jim, C. Y. (2017). Spontaneous plant colonization and bird visits of tropical extensive green roof. *Urban Ecosystems*, 20(2), 337–352. <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0596-3>
- Deska, I., Mrowiec, M., Ociepa, E., & Łacisz, K. (2018). Investigation of the Influence of Hydrogel Amendment on the Retention Capacities of Green Roofs. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 25(3), 373–382. <https://doi.org/10.1515/eces-2018-0025>
- Dravigne, A., Waliczek, T. M., Lineberger, R. D., & Zajicek, J. M. (2008). The effect of live plants and window views of green spaces on employee perceptions of job satisfaction. *HortScience*, 43(1), 183–187. <https://doi.org/10.21273/hortsci.43.1.183>
- Dvorak, B. D., & Volder, A. (2011). Green Roof Plants: Strategies for Success. CELA, (Urban Nature). Los Angeles.
- Eksi, M., & Rowe, D. B. (2016a). Green roof substrates: Effect of recycled crushed porcelain and foamed glass on plant growth and water retention. *Urban Forestry and Urban Greening*, 20, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.08.008>
- Eksi, M., & Rowe, D. B. (2016b). Green roof substrates: Effect of recycled crushed porcelain and foamed glass on plant growth and water retention. *Urban Forestry and Urban Greening*, 20, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.08.008>
- El-Baghdadi, O., & Desha, C. (2017). Urban Forestry & Urban Greening Conceptualising a biophilic services model for urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27, 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.10.016>
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *Introduction to the Circular Economy* (p. 15). p. 15. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/presentation/e596/5f046f0a12854e0301e8139fce7cddc7f065.pdf>
- Elpiniki, C., Julia, G., & Declan, R. (2009). Roof gardens: an opportunity to expand the art of landscape architecture. *Energy, Environment, Ecosystems, Development and Landscape Architecture*, (June), 317–321. Retrieved from papers2://publication/uuid/A76F003C-67D1-4483-BA71-3373D53BE416

- Enverde. (2019). Enverde. Retrieved May 25, 2020, from Galería. Techos verdes website: <http://www.enverde.mx/galeria-s.php?categoria=5>
- Escobar Sarria, F. (2017). Instituto de Ecología (INECOL). Retrieved March 14, 2020, from Las hormigas, pequeños habitantes de la ciudad de Xalapa website: <http://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/component/content/article/17-ciencia-hoy/141-las-hormigas-en-xalapa>
- Francis, R. A., & Lorimer, J. (2011). Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management*, 92(6), 1429–1437. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.012>
- Freeman, S. (2011). Capítulo 10. Fotosíntesis. In *Biología* (pp. 200–221).
- Frumkin, H., Bratman, G. N., Breslow, S. J., Cochran, B., Kahn, P. H., Lawler, J. J., ... Wood, S. A. (2017). Nature contact and human health: A research agenda. *Environmental Health Perspectives*, 125(7), 1–18. <https://doi.org/10.1289/EHP1663>
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2016). *Programa de Desarrollo Delegacional de Gustavo A. Madero 2016-2018*.
- Garden Central. (2016). Muros verdes. Retrieved July 8, 2020, from Azoteas verdes website: <https://garden-central.mx/tecnologias/azoteas-verdes/>
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2008). Media depth influences Sedum green roof establishment. *Urban Ecosystems*, 11(4), 361–372. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0052-0>
- Getter, K. L., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Cregg, B. M., & Andresen, J. A. (2009). Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science and Technology*, 43(19), 7564–7570. <https://doi.org/10.1021/es901539x>
- Gobierno de México. (2020). Covid-19. Retrieved from Semáforo website: <https://coronavirus.gob.mx/semaforo/>
- Gomez, A., Galarza-Molina, S., & Torres, A. (2017). Propuesta de mejoramiento tecnológico de techos verdes para el clima tropical andino. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 28(1), 73–99. <https://doi.org/10.18359/rcin.2672>
- González, V., & Tapia, M. (2017). Manual bovino de carne. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)*, 1(N°4), 173. Retrieved from <http://www.inia.cl/wp-content/uploads/ManualesdeProduccion/04 Manual Bovino.pdf>
- Granados, D., & López, G. (2007). Manejo de la palma de coco (cocos nucifera L.) en México. *Revista Chapingo*, 8(Serie Ciencias Forestales y del Ambiente), 39–48.

- Grima, N., Corcoran, W., Hill-James, C., Langton, B., Sommer, H., & Fisher, B. (2020). The importance of urban natural areas and urban ecosystem services during the COVID-19 pandemic. *PLoS ONE*, *15*(12). <https://doi.org/10.31235/osf.io/sd3h6>
- Grönman, K., Pajula, T., Sillman, J., Leino, M., Vatanen, S., Kasurinen, H., ... Soukka, R. (2019). Carbon handprint – An approach to assess the positive climate impacts of products demonstrated via renewable diesel case. *Journal of Cleaner Production*, *206*, 1059–1072. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.233>
- Guattari, C., Evangelisti, L., Asdrubali, F., & De Lieto Vollaro, R. L. (2020). Experimental evaluation and numerical simulation of the thermal performance of a green roof. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(5). <https://doi.org/10.3390/app10051767>
- Harada, Y., & Whitlow, T. H. (2020). Urban Rooftop Agriculture: Challenges to Science and Practice. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*(June), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00076>
- Harper, G. E., Limmer, M. A., Showalter, W. E., & Burken, J. G. (2015). Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri, USA. *Ecological Engineering*, *78*, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.004>
- Hartig, T., & Kahn, P. H. (2016). Living in cities, naturally. *Urban Planet*, *352*(6288), 938–940. <https://doi.org/10.1126 / science.aaf3759>
- Hastwell, G. T., & Facelli, J. M. (2003). Differing effects of shade-induced facilitation on growth and survival during the establishment of a chenopod shrub. *Journal of Ecology*, *91*(6), 941–950. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00832.x>
- Hernández Huerta, A., & Equihua Zamora, M. (2017). Instituto de Ecología. Retrieved March 14, 2021, from ¿Quién es el rey del Jitomate? website: <http://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/component/content/article/17-ciencia-hoy/545-quien-es-el-rey-del-jitomate#:~:text=Los abejorros no sólo aportan,una amplia gama de plantas.>
- Hirsh, S. (2019). Green Matters. Retrieved June 11, 2019, from Bees Can Take Refuge on These Bus Stop “Green Roofs” website: <https://www.greenmatters.com/p/bus-stops-for-bees>
- Hohmann, L. (2019a). *Report IZA of Mexico City*.
- Hohmann, L. (2019b). Report IZA of Mexico City. In *Report Internship*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hunter, M. C. R., Gillespie, B. W., & Chen, S. Y. P. (2019). Urban nature experiences reduce stress in the context of daily life based on salivary biomarkers. *Frontiers in Psychology*, *10*(APR), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00722>

- INaturalist. (2020a). Siemprevivas. Retrieved May 21, 2020, from Jaspalache (*Sedum moranense*) website: <https://www.naturalista.mx/taxa/203990-Sedum-moranense>
- INaturalist. (2020b). Siemprevivas. Retrieved May 21, 2020, from Dedos (*Sedum x rubrotinctum*) website: <https://www.naturalista.mx/taxa/276077-Sedum---rubrotinctum>
- INaturalist. (2020c). Siemprevivas. Retrieved May 21, 2020, from Dedos de Dios (*Sedum pachyphyllum*) website: <https://www.naturalista.mx/taxa/246053-Sedum-pachyphyllum>
- INaturalist. (2020d). Siemprevivas. Retrieved May 21, 2020, from Lágrima de María (*Sedum dendroideum*) website: <https://www.naturalista.mx/taxa/208245-Sedum-dendroideum>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Encuesta Intercensal 2015. Retrieved April 25, 2020, from <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/default.html#Tabulados>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de la Ciudad de México 2017. *Anuario Estadístico y Geográfico de Los Estados Unidos Mexicanos*, 506. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2006.04.080>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Vehículos de motor registrados en circulación.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Presentación de resultados. Ciudad de México*.
- International Organization for Standardization (ISO). (2006). *ISO 14040:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia* (pp. 6–27). pp. 6–27.
- IQAir Group. (2019). *2019 WORLD AIR QUALITY REPORT. Region & City PM2.5 Ranking*. Retrieved from <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities>
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S. E., & Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.004>
- Jim, C. Y. (2017). An archaeological and historical exploration of the origins of green roofs. *Urban Forestry and Urban Greening*, 27(January), 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.014>
- Kaltenborn, B. P., & Bjerke, T. (2002). Associations between environmental value orientations and landscape preferences. *Landscape and Urban Planning*, 59, 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00243-2](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00243-2)
- Kavehei, E., Jenkins, G. A., Adame, M. F., & Lemckert, C. (2018). Carbon sequestration potential for

- mitigating the carbon footprint of green stormwater infrastructure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94(March), 1179–1191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.002>
- Krugman, P. R., & Wells, R. (2006). Agentes y mercados. In Reverté (Ed.), *Introducción a la Economía. Microeconomía* (pp. 170–180).
- Kuronuma, T., Watanabe, H., Ishihara, T., Kou, D., Touda, K., Ando, M., & Shindo, S. (2018). CO₂ Payoff of extensive green roofs with different vegetation species. *Sustainability (Switzerland)*, 10(7), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su10072256>
- Le Corbusier. (2007). *Toward an architecture* (2nd ed.). Los Angeles: Getty Publications.
- Lee, J., Hopmans, J. W., Rolston, D. E., Baer, S. G., & Six, J. (2009). Determining soil carbon stock changes: Simple bulk density corrections fail. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 134(3–4), 251–256. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.07.006>
- Liberalesso, T., Oliveira, C., Matos, C., & Manso, M. (2020). Land Use Policy Green infrastructure and public policies : An international review of green roofs and green walls incentives. *Land Use Policy*, 96(June 2019), 104693. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104693>
- Lin, B. S., Yu, C. C., Su, A. T., & Lin, Y. J. (2013). Impact of climatic conditions on the thermal effectiveness of an extensive green roof. *Building and Environment*, 67, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.026>
- Liu, W., Feng, Q., Chen, W., Wei, W., Si, J., & Xi, H. (2019). Runoff retention assessment for extensive green roofs and prioritization of structural factors at runoff plot scale using the Taguchi method. *Ecological Engineering*, 138(March), 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.033>
- López García, M., & Deloya, C. (2013). Instituto de Ecología (INECOL). Retrieved March 14, 2021, from Escarabajos: Los buenos somos más website: <http://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2013-06-05-10-34-10/17-ciencia-hoy/932-escarabajos-los-buenos-somos-mas#:~:text=Una de las labores más,de nutrientes en los suelos.>
- Lopez Machado, N. A., Barreto Cordero, W. J., Rodriguez Alvarado, E. D., & Romero Cabrera, J. R. (2020). Evaluacion del impacto de un techo verde sobre la escorrentia urbana usando un modelo a escala. *Revista Tecnica De La Facultad De Ingenieria Universidad Del Zulia*, (1), 26–34. <https://doi.org/10.22209/rt.ve2020a04>
- Luo, H., Liu, X., Anderson, B. C., Zhang, K., Li, X., Huang, B., ... Jiang, M. (2015). Carbon sequestration potential of green roofs using mixed-sewage-sludge substrate in Chengdu World Modern Garden City. *Ecological Indicators*, 49, 247–259.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.10.016>

Marcos Solorio, B., Martínez Campos, Á. R., López Urquidez, G. A., López Orona, C. A., & Arteaga Reyes, T. T. (2016). La biomasa de los sistemas productivos de maíz nativo (*Zea mays*) como alternativa a la captura de carbono. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(3), 361–367. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.10>

Martínez-Rodríguez, M. C. (2019). *Desarrollo de un sistema de sustrato alternativo para techo*. SIP: 20182336. Ciudad de México.

Matlock, J. M., & Rowe, D. B. (2016). The suitability of crushed porcelain and foamed glass as alternatives to heat-expanded shale in green roof substrates: An assessment of plant growth, substrate moisture, and thermal regulation. *Ecological Engineering*, 94, 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.044>

Menéndez, P. P. (2016). *Ambiente humano para ciudades felices*. (ECOEDIC). Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>

Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>

Mesimäki, M., Hauru, K., Kotze, D. J., & Lehvävirta, S. (2017). Neo-spaces for urban livability? Urbanites' versatile mental images of green roofs in the Helsinki metropolitan area, Finland. *Land Use Policy*, 61, 587–600. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.11.021>

Millennium Ecosystem Assessment. (2003). *Ecosystems and Human Well-being*. Washington DC: Island Press.

Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. (2000). *NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior*.

Minke, G. (2016). *Techos Verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*. <https://doi.org/10.2307/j.ctv893j57.6>

Molina, C. A., Aponte, G., & Escobar, L. M. (2017). Exploración de metodologías para la valoración del paisaje. *Bitacora Urbano Territorial*, 28(January), 45–60. <https://doi.org/10.15446>

Molineux, C. J., Fentiman, C. H., & Gange, A. C. (2009). Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K. *Ecological Engineering*, 35(10), 1507–1513. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.06.010>

Molineux, C. J., Gange, A. C., Connop, S. P., & Newport, D. J. (2015). Using recycled aggregates in green roof substrates for plant diversity. *Ecological Engineering*, 82(July), 596–604.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.036>

- Monroy-Ata, A., & Vázquez-Benitez, B. (2014). Jardín xerófito para divulgación científica. *Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 17(2), 155–159.
- Monterusso, M. A., Bradley Rowe, D., & Rugh, C. L. (2005). Establishment and persistence of *Sedum* spp. and native taxa for green roof applications. *HortScience*, 40(2), 391–396. <https://doi.org/10.21273/hortsci.40.2.391>
- Morau, D., Rabarison, T., & Rakotondramiarana, H. (2017). Life Cycle Analysis of Green Roof Implemented in a Global South Low-income Country. *British Journal of Environment and Climate Change*, 7(1), 43–55. <https://doi.org/10.9734/bjecc/2017/30796>
- Moreno, C. E. (2002). Métodos para medir la biodiversidad. *Acta Zoológica Mexicana*, (85), 195–196.
- Muratalla-Lúa, S., Rodríguez-Mendoza, N., Sánchez-García, P., TijerinaChávez, L., Santizo-Rincón, J., & López-Jiménez, A. (2006). Paja de maíz como sustrato en el crecimiento de plántulas de jitomate. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 319–325.
- MyClimate.org. (2021). CO2 emissions calculator for your car. Retrieved May 28, 2021, from https://co2.myclimate.org/en/car_calculators/new
- Nabors, M. W. (2006). *Introducción a la Botánica* (1st ed.). España: Addiso-Wesley.
- Naciones Unidas. (2010). Costes y beneficios de las opciones de adaptación : Una revisión de la literatura existente Informe técnico. *Framework Convention on Climate Change*, 1–91.
- Naciones Unidas. (2015a). Agenda Para El Desarrollo Sostenible. *Comunidad y Salud*.
- Naciones Unidas. (2015b). Temas Hábitat III N° 11 Espacio Público. In *Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible* (pp. 1–9). Nueva York.
- NMX-AA-008-SCFI-2016, & Secretaría de Economía. (2016). *Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016. Análisis de agua. - Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - Método de prueba* (pp. 7–11). pp. 7–11. Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166765/NMX-AA-006-SCFI-2010.pdf>
- NMX-AA-034-SCIFI-2015, & Secretaría de Economía. (2015). *Norma Mexicana. NMX-AA-034-SCIFI-2015. Análisis De Agua - Medición De Sólidos Y Sales Disueltas En Aguas Naturales , Residuales Y Residuales Tratadas – Método De Prueba* (p. 16). p. 16. Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
- NMX-AA-16-1984. (1984). *Norma Mexicana NMX-AA-16-1984. Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de la humedad* (p. 2).

p. 2.

- Nollet, L. M. L., & Toldrá, F. (2015). *Handbook of food analysis* (Tercera). Retrieved from https://books.google.com.mx/books?id=KtAdCgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=ash&f=false
- Nurmi, V., Votsis, A., Perrels, A., & Lehvävirta, S. (2016). Green Roof Cost-Benefit Analysis: Special Emphasis on Scenic Benefits. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 7(3), 488–522. <https://doi.org/10.1017/bca.2016.18>
- Ordóñez-López, E. E. ., Zetina-Moguel, C. ., & Pérez-Cortés, M. (2012). Sobrevivencia y cobertura de plantas en techos verdes durante el estiaje en Yucatán. *Ingeniería*, 16(2), 93–107.
- Pardela, Ł., Kowalczyk, T., Bogacz, A., & Kasowska, D. (2020). Sustainable green roof ecosystems: 100 years of functioning on fortifications-A case study. *Sustainability (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/su12114721>
- Peñalvo-López, E., Cárcel-Carrasco, J., Alfonso-Solar, D., Valencia-Salazar, I., & Hurtado-Pérez, E. (2020). Study of the improvement on energy efficiency for a building in the mediterranean area by the installation of a green roof system. *Energies*, 13(5), 1–14. <https://doi.org/10.3390/en13051246>
- Peng, L. L. H., & Jim, C. Y. (2013). Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation. *Energies*, 6(2), 598–618. <https://doi.org/10.3390/en6020598>
- Peng, L. L. H., & Jim, C. Y. (2015). Economic evaluation of green-roof environmental benefits in the context of climate change: The case of Hong Kong. *Urban Forestry and Urban Greening*, 14(3), 554–561. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.05.006>
- Pérez-Calix, E. (2008). Crassulaceae. Flora del Bajío y de regiones adyacentes. *Flora Del Bajío y de Regiones Adyacentes*, 156, 1–141.
- Pérez-Urrestarazu, L., Fernández-Cañero, R., Franco-Salas, A., & Egea, G. (2015). Vertical Greening Systems and Sustainable Cities Vertical Greening Systems and Sustainable Cities. *Journal of Urban Technology*, 22(4), 65–85. <https://doi.org/10.1080/10630732.2015.1073900>
- Pérez-Urria, E. (2009). Fotosíntesis: Aspectos Básicos. *Reduca (Biología)*, 2(3), 1–47.
- Pérez, E., & Martínez, M. C. (2016). La planeación de las áreas verdes como una expresión del derecho a la ciudad: análisis de caso de Atizapán de Zaragoza, Estado de México. In *El derecho a la ciudad en América Latina. Visiones desde la política* (Consejo La, pp. 431–450).
- Pérez, G., Coma, J., Solé, C., Castell, A., & Cabeza, L. F. (2012). Green roofs as passive system for energy savings when using rubber crumbs as drainage layer. *Energy Procedia*, 30, 452–460.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.054>

- Perini, K., & Rosasco, P. (2013). Cost- benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, 70, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012>
- Pizón, L. (2017). Propagación vegetativa de tres especies nativas de páramo en dos sustratos, para su posible implementación en techos verdes. *Convención Internacional Sobre Medio Ambiente y Desarrollo, VI Congreso Sobre Manejo de Ecosistemas y Biodiversidad*, 1. La Habana, Cuba.
- Plácido, A. (2009). Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, A.C. Retrieved May 1, 2020, from La basura y el “coco” de las colonias: sobre ruedas website: <http://www.ciceana.org.mx/web/contenido.php?cont=410>
- Plántica. (2013). Plántica. Ciudades Vivas. Retrieved May 25, 2020, from Proyectos. Andare Palacio de Hierro website: <https://www.plantica.mx/andares-palacio-de-hierro>
- Plántica. (2011). Plántica. Ciudades vivas. Retrieved May 25, 2020, from Proyectos. Torre Andares Vida website: <https://www.plantica.mx/torre-andares-vida>
- Plántica. (2018). Plántica. Ciudades vivas. Retrieved May 22, 2020, from ¿Qué ofrecemos? Azoteas verdes extensivas website: <https://www.plantica.mx/azoteas-verdes-ecotejados-extensivo>
- Plants of the World Online. (2016a). *Sedum L.* Retrieved November 25, 2019, from *Sedum griseum* website: <http://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:231734-2>
- Plants of the World Online. (2016b). *Sedum L.* Retrieved November 25, 2019, from *Sedum moranense* website: <http://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:275718-1>
- Plants of the World Online. (2016c). *Sedum L.* Retrieved November 24, 2019, from *Sedum pachyphyllum* website: <http://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:231817-2>
- Plants of the World Online. (2016d). *Sedum L.* Retrieved November 24, 2020, from *Sedum dendroideum* website: <http://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:275310-1>
- Plants of the World Online. (2017). *Sedum*. Retrieved November 24, 2019, from *Sedum rubrotinctum* website: <http://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:275989-1>
- Polo-Labarrios, M. A., Quezada-García, S., Sánchez-Mora, H., Escobedo-Izquierdo, M. A., & Espinosa-Paredes, G. (2020). Comparison of thermal performance between green roofs and conventional roofs. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21(June). <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100697>
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del DF (PAOT). (2017). *LEY AMBIENTAL DE PROTECCIÓN A LA TIERRA EN EL DISTRITO FEDERAL* (p. 146). p. 146.

- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del DF (PAOT). (2018). *Las áreas verdes de la Ciudad de México. Una visión integral*.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2017). *Análisis costo-beneficio de medidas de adaptación al cambio climático en áreas urbanas de América Latina* (pp. 1–60). pp. 1–60.
- Quezada-García, S., Espinosa-Paredes, G., Escobedo-Izquierdo, M. A., Vázquez-Rodríguez, A., Vázquez-Rodríguez, R., & Ambriz-García, J. J. (2017). Heterogeneous model for heat transfer in Green Roof Systems. *Energy and Buildings*, 139, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.015>
- Rangel-Landa, S., Rivera-Lozoya, E., & Casas, A. (2014). Uso y manejo de las palmas *Brahea* spp. (Arecaceae) por el pueblo ixcateco de Santa María Ixcatlán Oaxaca, México. *Gaia Scientia, Especial.*, 62–78. <https://doi.org/10.21707/gaia.v8i2.22424>
- Reeve, A. C., Desha, C., Hargreaves, D., & Hargroves, K. (2015). Biophilic urbanism: contributions to holistic urban greening for urban renewal. *Smart and Sustainable Built Environment*, 4(2), 215–233. <https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2014-0057>
- Richter, M. (2016). *Evaluation of green roof hydrologic performance for rainwater run-off management in Hamburg*. (March).
- Riechers, M., Strack, M., Barkmann, J., & Tschardt, T. (2019). Cultural ecosystem services provided by urban green change along an urban-periurban gradient. *Sustainability (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/su11030645>
- Rosatto, H., Meyer, M., Laureda, D., Cazorra, L., Barrera, D., Gamboa, P., ... Quintenne, E. (2013). Eficiencia en la retención del agua de lluvia de cubiertas vegetadas de tipo “extensivo” e “intensivo.” *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 45(1), 169–183.
- Ruiz, C., Rodríguez, G., Leyva, J. C., & Enríquez, J. R. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México. *Naturaleza y Desarrollo*, 12(1), 28–45. <https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2005.09.007>
- Sahagun-Valenzuela, M., Camacho-Ixta, I., González-Treviso, M., & Armendáriz-López-José. (2018). Techo verde como elemento reductor de transferencia de calor en clima cálido seco extremo Green roof as a heat transfer reducing element in extreme dry hot weather. *Revista de Ingeniería Biomédica y Biotecnología*, 2(6), 1–10.
- Sánchez, A. (2006). La casa maya contemporánea. Usos, costumbres y configuración espacial. *Península*, 1(2), 81–105.

- Schindler, B. Y., Blaustein, L., Vasl, A., Kadas, G. J., & Seifan, M. (2019). Cooling effect of Sedum sediforme and annual plants on green roofs in a Mediterranean climate. *Urban Forestry and Urban Greening*, 38(January), 392–396. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.01.020>
- Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU), Consejo Nacional de Población (CONAPO), & Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*.
- Secretaría de Gobierno (SEGOB). (2020). ACUERDO DEL CONSEJO GENERAL DEL INSTITUTO NACIONAL ELECTORAL POR EL QUE SE DETERMINA LA REANUDACIÓN DE PLAZOS PARA ATENDER LAS TAREAS SUSTANTIVAS Y PROCEDIMENTALES ATINENTES A LA MATERIA DE FISCALIZACIÓN, BAJO LA MODALIDAD A DISTANCIA O SEMIPRESENCIAL, CO. *DOF - Diario Oficial de La Federación 21/10/2020*, p. 8. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5284148&fecha=04/01/2013
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2003). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*.
- Secretaría de Protección Civil. (2014). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México. Actualización de los Mapas de riesgo. Gustavo A. Madero*. Retrieved from http://www.atlas.cdmx.gob.mx/mapas/MR_Gustavo_A_Madero.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA); (2018). *Informe anual. Calidad del aire 2018. Ciudad de México*.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2015). Norma ambiental NADF-024-AMBT-2013, que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos. *Gaceta Oficial Del Distrito Federal*, pp. 22–43.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2017a). *Actualización del Inventario de Áreas Verdes Urbanas de la Ciudad de México*. Retrieved from <https://sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/inventario>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2017b). Áreas verdes de la Ciudad de México. Retrieved January 10, 2020, from Azoteas verdes website: https://datos.cdmx.gob.mx/explore/dataset/cdmx_areas_verdes_2017/map/
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2017c). Programas. Retrieved May 1, 2020, from Inventario de Áreas Verdes website: <https://sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/inventario>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2018a). *Inventario de residuos*

sólidos de la Ciudad de México (p. 139). p. 139. Retrieved from <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/sedema/index.php/temas-ambientales/programas-generales/residuos-solidos>

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2018b). *Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-006-RNAT-2016, que establece los requisitos, criterios, lineamientos y especificaciones técnicas que deben cumplir las autoridades, personas físicas o morales que realicen actividades de fomento, mejoramiento* (pp. 4–26). pp. 4–26.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2018c). *Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2017, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en la Ciudad de México.*

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2019). *Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal* (pp. 1–50). pp. 1–50.

Secretaría General. (2020). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.* <https://doi.org/10.29057/icea.v4i7.201>

Shafique, M., Azam, A., Rafiq, M., Ateeq, M., & Luo, X. (2020). An overview of life cycle assessment of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119471>

Slater, S. J., Christiana, R. W., & Gustat, J. (2020). Recommendations for keeping parks and green space accessible for mental and physical health during COVID-19 and other pandemics. *Preventing Chronic Disease*, 17(17), 1–5. <https://doi.org/10.5888/PCD17.200204>

Soga, M., Evans, M. J., Tsuchiya, K., & Fukano, Y. (2020). A room with a green view: the importance of nearby nature for mental health during the COVID-19 pandemic. *Ecological Applications*, 0(0), 1–10. <https://doi.org/10.1002/eap.2248>

Somvichian-Clausen, A. (2016). The official blog of american forests. Loose leaf. Retrieved May 4, 2020, from Impressive Green Roofs around the World website: <https://www.americanforests.org/blog/impressive-green-roofs-around-the-world/>

Suttie, J. . (2003). Residuos Secos de los Cultivos. In *Conservación de Heno y Paja para pequeños productores y en condiciones pastoriles.* Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/007/x7660s/x7660s00.htm#Contents>

Tadeu, A., Simões, N., Almeida, R., & Manuel, C. (2019). Drainage and water storage capacity of insulation cork board applied as a layer on green roofs. *Construction and Building Materials*, 209, 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.073>

- Thuring, C. E., & Dunnett, N. (2014). Vegetation composition of old extensive green roofs (from 1980s Germany). *Ecological Processes*, 3(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/2192-1709-3-4>
- Trujillo, R., Rangel, Y., & Castañeda, G. (2015). Potencial del techo verde, para ahorrar electricidad por aire acondicionado en la edificación. *Revista Electrónica Nova Scientia*, 7(3), 577–596.
- Tsantopoulos, G., Varras, G., Chiotelli, E., Fotia, K., & Batou, M. (2018). Public perceptions and attitudes toward green infrastructure on buildings: The case of the metropolitan area of Athens, Greece. *Urban Forestry and Urban Greening*, 34(June 2017), 181–195. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.06.017>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2018). Estimating the environmental effects of Green roofs: A case study in Kansas City, Missouri. In *EPA 430-S-18-001*. Retrieved from www.epa.gov/heat-islands/using-green-roofs-reduce-heat-islands.
- Vázquez, W., Jazcilevich, A., Reynoso, A. G., Caetano, E., Gomez, G., & Bornstein, R. D. (2016). Influence of green roofs on early morning mixing layer depths in Mexico City. *Journal of Solar Energy Engineering*, 138(6), 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.4034807>
- Venter, Z. S., Barton, D. N., Gundersen, V., Figari, H., & Nowell, M. (2020). Urban nature in a time of crisis: Recreational use of green space increases during the COVID-19 outbreak in Oslo, Norway. *Environmental Research Letters*, 15(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb396>
- Wan Ismail, W. Z., Abdullah, M. N., & Che-Ani, A. I. (2019). A review of factors affecting carbon sequestration at green roofs. *Journal of Facilities Management*, 17(1), 76–89. <https://doi.org/10.1108/JFM-11-2017-0069>
- Wolfgang, W. W., & Hauck, T. E. (2017). *Animal-Aided Design – in cities and elsewhere* (p. 14). p. 14. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1101/150359>
- World Health Organization (WHO). (2016). *Urban green spaces and health*.
- Yang, J., Yu, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, 42(31), 7266–7273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.003>
- Yávar, J. (2014). *Arquitectura y Paisaje: las cubiertas verdes del Museo del Acero Horno 3, un ícono de la industrialización en México*. Retrieved from <https://www.archdaily.mx/mx/623215/arquitectura-y-paisaje-las-cubiertas-verdes-del-museo-del-acero-horno-3-un-icono-de-la-industrializacion-en-mexico>

REFERENCIAS MARCO REGULATORIO

- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del DF (PAOT). (2017). *LEY AMBIENTAL DE PROTECCIÓN A LA TIERRA EN EL DISTRITO FEDERAL* (p. 146). p. 146.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2003). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2018b). *Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-006-RNAT-2016, que establece los requisitos, criterios, lineamientos y especificaciones técnicas que deben cumplir las autoridades, personas físicas o morales que realicen actividades de fomento, mejoramiento* (pp. 4–26). pp. 4–26.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2018c). *Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2017, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en la Ciudad de México*.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2019). *Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal* (pp. 1–50). pp. 1–50.

Secretaría General. (2020). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. <https://doi.org/10.29057/icea.v4i7.201>

ANEXO

Biodiversidad vegetal en el techo verde de estudio

$$T_C = \frac{(C_f - A_0)}{(A_0 * n)} \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

T_C = Tasa de crecimiento relativo

C_f = Crecimiento final

A_0 = Altura inicial

n = Período del experimento

$$T_S = \frac{(N_0 - N_f)}{(N_0)} * 100 \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

T_S = Tasa de sobrevivencia

N_0 = Número de plantas totales al inicio del experimento

N_f = Número de plantas totales al final del experimento

Análisis de costo-beneficio

$$V_f = V_p * (1 + i)^n \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

V_f = Valor futuro

V_p = Valor presente

i = Tasa de interés anual = 4.67% (Inflación anual BANXICO)

n = Número de periodos entre el valor presente y valor futuro

$$B_N = B - C \dots\dots\dots(4)$$

Donde

$B_N = \text{Beneficio Neto}$

$B = \text{Beneficio}$

$B = \text{Costo}$

$$Vt = \frac{Io}{(T_D)^n} \dots\dots\dots(5)$$

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{Vt}{(1+k)^k} - Io \dots\dots\dots(6)$$

Donde

$n = \text{Cantidad de períodos}$

$k = \text{Tipo de interés}$

$Io = \text{Inversión inicial}$

$T_D = \text{Tasa de descuento}$

$Vt = \text{Flujo del período}$

Memoria de Cálculo para la obtención de %C y %CO₂

$$\frac{p_5}{p_0} * 100 [=] \%C \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

p₀ es el peso húmedo registrado posterior al muestreo [=] g.

p₅ es la diferencia entre el peso después de mufla 250°C, 1hr y el peso después de mufla 550°C, 1hr [=] gC.

%C es el porcentaje del carbón respecto al peso húmedo de la muestra.

Para la obtención de p7 que será el peso a CO₂ se utilizan las siguientes formulas:



$$p_7 = 1 \text{ gC} * \frac{1 \text{ mol}}{12 \text{ gC}} * \frac{44.010 \text{ gCO}_2}{1 \text{ mol}} [=] \text{gCO}_2 \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

$$C = 12 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \qquad O_2 = 32 \text{ g/mol} \qquad CO_2 = 44.010 \text{ g/mol}$$

P₇ es el peso del CO₂ [=] gCO₂


A continuación, se presentan una serie de tablas, utilizadas durante la metodología.




Tabla A. Estado actual del techo verde


Vegetación	Cuadrante	Cantidad	Talla promedio (cm)
<i>Sedum griseum</i>	1	37	10.03
<i>Sedum moranense</i>	1, 2, 3 y 4	14	14
<i>Sedum rubrotinctum</i>	1 y 4	116	16.56
<i>Sedum pachyphyllum</i>	2	84	10
<i>Sedum dendroideum</i>	1,3 y 4	114	30.23

Fuente: Elaboración propia

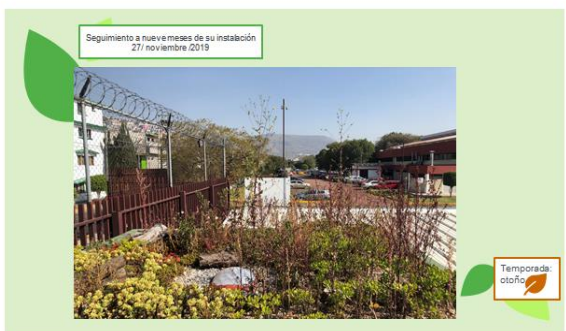
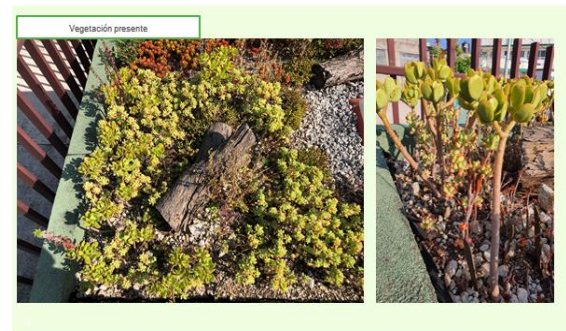
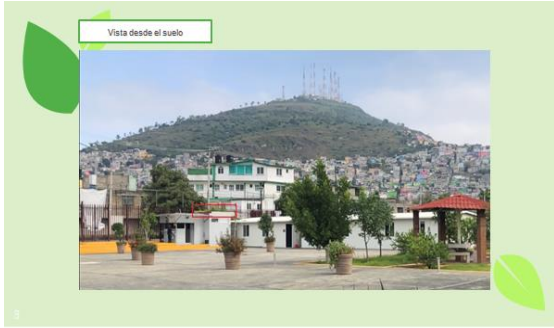
Tabla B. Identificación y contabilización de plantas *Sedum*

Imagen	Especie	Cantidad
	<i>Sedum griseum</i>	37

 <p>A photograph of Sedum moranense, a succulent with small, green, pointed leaves and clusters of tiny red flowers, growing on a grey rock.</p>	<p><i>Sedum moranense</i></p>	<p>14</p>
 <p>A close-up photograph of Sedum rubrotinctum, showing its thick, green, rounded leaves and bright yellow flowers.</p>	<p><i>Sedum rubrotinctum</i></p>	<p>116</p>
 <p>A photograph of Sedum pachyphyllum, featuring thick, green, rounded leaves and reddish-brown stems.</p>	<p><i>Sedum pachyphyllum</i></p>	<p>84</p>

		<i>Sedum</i> <i>dendroideum</i>	114
Total			

Fuente: Elaboración propia, imágenes de (INaturalist, 2012, 2015, 2017, 2018, 2020a)





Fuente: Elaboración propia

Imagen A. 1. Encuesta en "Formularios de Google"

Encuesta para el trabajo de tesis:
"Evaluación de un techo verde de tipo extensivo con materiales eco amigables en la alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México"

***Obligatorio**

Dirección de correo electrónico *

Tu dirección de correo electrónico _____

Gracias por responder esta encuesta

Notas:
Contestar esta encuesta requiere máximo de 20 min, pero no hay límite de tiempo para responderla.
La información obtenida de esta encuesta será tratada confidencialmente.

Principal área de trabajo en CIIEMAD

Laboratorio

Segundo piso edificio principal

Primer piso edificio principal

Anexo

Puesto en CIIEMAD

Estudiante de posgrado

Profesor investigador

PAE

Rango de edad

21-29 años

30-39 años

40-49 años

50-59 años

60-69 años

Más de 70 años

Cantidad aproximada de horas que pasa al día en el CIIEMAD

8 Horas

Más de 8 horas

Antes de continuar, favor de ver el siguiente video

1.1. ¿Conocía los techos verdes?

Si

No

1.2. ¿Sabe que en el CIIEMAD hay un techo verde?

Si

No

2. Considera usted ¿que el techo verde se podría volver un elemento característico del CIIEMAD?

Si

No

3. Desde su percepción, seleccione el número para calificar de manera negativa o positiva el valor que le da al entorno del CIIEMAD el techo verde

1 2 3 4 5

No le da valor Le aporta un gran valor

4. Marque la emoción que le provoca ver el techo verde.

Tranquilidad

Ira

Sorpresa

Miedo

Amor

Asco

Alegría

Nerviosismo

Asombro

Tristeza

5. Marque la emoción que le provoca, ver los videos y las imágenes del techo verde mostradas en la presentación

Tranquilidad

Ira

Sorpresa

Miedo

Amor

Asco

Alegría

Nerviosismo

Asombro

Tristeza

6. Seleccione el beneficio ambiental aportado por el techo verde que le importa más a usted

- Producción de oxígeno, consumo de CO2
- Retención de partículas, limpieza del aire
- Aislación acústica
- Protección contra incendios
- Retención de agua de lluvia
- Espacio vital para flora y fauna
- Efectos positivos psicológicos
- Aislamiento de temperaturas externas
- Embellecimiento de la estructura y los alrededores

7. Conociendo los beneficios ambientales que tienen los techos verdes, de ser posible, ¿usted instalaría uno en su hogar?

- Sí
- No

8. Considera usted, ¿qué está es una solución posible para recuperar áreas verdes en la Ciudad de México?

- Sí
- No

9. Desde su percepción, piensa que una ciudad con construcciones con techos verdes, ¿sería una ciudad saludable?

- Sí
- No

10. ¿Le gustaría vivir en una ciudad cuyos techos estuvieran cubiertos por vegetación?

- Sí
- No

Se enviará una copia de tus respuestas por correo electrónico a la dirección que has proporcionado.

Enviar

Fuente: Elaboración propia

Liga: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeve_7aaZHvI4U49-Lmw2b6nLYAPnky55492TPpZ97oa6HL3Q/viewform?usp=sf_link