



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
División Académica de Ciencias Biológicas



“CARACTERIZACIÓN DEL AGUA PROVENIENTE DE UN TECHO VERDE EXTENSIVO EMPLEADO COMO SISTEMA DE CAPTACIÓN PLUVIAL.”

Trabajo recepcional, en la modalidad de:

Tesis

Para obtener el título en:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

Wendy Isamar García Trinidad

Director:

Dr. José Roberto Hernández Barajas

Caracterización Del Agua Proveniente De Un Techo Verde Extensivo Empleado Como Sistema De Captación Pluvial

Por Wendy Isamar Garcia Trinidad

CANTIDAD DE PALABRAS 18331

HORA DE ENTREGA

01-JUL-2025 03:12P. M.

NÚMERO DE
IDENTIFICACIÓN DEL
TRABAJO

117019449

Caracterización Del Agua Proveniente De Un Techo Verde Extensivo Empleado Como Sistema De Captación Pluvial

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	www.researchgate.net Internet	943 palabras — 6%
2	www.itson.mx Internet	625 palabras — 4%
3	aducarte.weebly.com Internet	169 palabras — 1%
4	dspace.uazuay.edu.ec Internet	109 palabras — 1%
5	vanguardia.com.mx Internet	88 palabras — 1%
6	hdl.handle.net Internet	85 palabras — < 1%
7	docplayer.es Internet	80 palabras — < 1%
8	repositorio.ucundinamarca.edu.co Internet	77 palabras — < 1%
9	repositorio.unsm.edu.pe Internet	69 palabras — < 1%
10	www.inesa.com.mx Internet	56 palabras — < 1%

11	dgsa.uaeh.edu.mx:8080 Internet	52 palabras — < 1%
12	quimicadas.wordpress.com Internet	43 palabras — < 1%
13	ri.uagro.mx:8081 Internet	42 palabras — < 1%
14	www.scribd.com Internet	41 palabras — < 1%
15	www.elheraldodechihuahua.com.mx Internet	35 palabras — < 1%
16	era.ujat.mx Internet	31 palabras — < 1%
17	oldri.ues.edu.sv Internet	30 palabras — < 1%
18	www.ptolomeo.unam.mx:8080 Internet	29 palabras — < 1%
19	1library.co Internet	28 palabras — < 1%
20	prezi.com Internet	27 palabras — < 1%
21	itzamna.bnct.ipn.mx Internet	25 palabras — < 1%
22	rei.iteso.mx Internet	20 palabras — < 1%
23	ridum.umanizales.edu.co Internet	20 palabras — < 1%

24 www.eluniversal.com.mx
Internet

20 palabras — < 1%

25 es.coursera.org
Internet

18 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 18 PALABRAS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

OCTUBRE 09 DE 2019

**C. WENDY ISAMAR GARCÍA TRINIDAD
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"CARACTERIZACIÓN DEL AGUA PROVENIENTE DE UN TECHO VERDE EXTENSIVO EMPLEADO COMO SISTEMA DE CAPTACIÓN PLUVIAL"**, asesorado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar, Dra. Erika Escalante Espinoza, Dr. José Roberto Hernández Barajas, M. en C. Karla Cristel Cámara Moguel y M. en C. Adriana de la Cruz Uribe.

**A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCION EN LA FE**



**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

**UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

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

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis denominado: **“CARACTERIZACIÓN DEL AGUA PROVENIENTE DE UN TECHO VERDE EXTENSIVO EMPLEADO COMO SISTEMA DE CAPTACIÓN PLUVIAL”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

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

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

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 08 de Octubre de 2019

AUTORIZO



WENDY ISAMAR GARCÍA TRINIDAD

Dedicatoria

A mis padres.

A Papá por darme el ejemplo de constancia y responsabilidad en el trabajo.

A Mamá por su valentía y ayudarme a ver todo tipo de adversidades desde otra perspectiva.

Agradecimientos

Al mejor asesor y director de tesis Dr. José Roberto Hernández Barajas, gracias por la experiencia, apoyo, guía, confianza y consejos. Y más que ser excelente maestro, ser mi amigo.

A cada uno de mis sinodales por su tiempo y conocimiento para la mejora de este trabajo. M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar por el apoyo en mi formación académica. Dra. Erika Escalante Espinosa por sus ánimos, inspiración y buena vibra. M. en C. Karla Cristel Cámara Moguel quien conozco desde primer semestre, por ser mi inspiración a ser mejor estudiante. Y la M. en C. Adriana de la Cruz Uribe gracias por sentarse a platicar conmigo de todo un poco como amiga y compañera de cubículo.

A mi mejor amigo Martín Feria por su cariño, apoyo y motivación, básicamente por ser la canción de “Last Hope” como tonito de fondo de mi vida.

A todos los que en su momento se acercaron de curiosos a laboratorio y se ofrecieron a ayudarme, Selene, Luz, Libni, Jhoan... y los que no, pero de alguna manera influyeron.

RESUMEN

Un techo verde es una cubierta vegetal capaz de aportar beneficios sociales tales como proporcionar espacios verdes recreativos, económicos permitiendo ahorros energéticos y ambientales, como ayudar a reducir la contaminación del aire y contaminación acústica urbana. Ayudan al almacenamiento de agua de lluvia desacelerando los picos altos de descarga de agua pluvial, beneficiando de esta manera al alcantarillado público reduciendo posibles eventos de inundaciones locales. En esta investigación se evaluó la capacidad de un techo verde extensivo para mejorar la calidad del agua pluvial durante la temporada de frentes fríos. Para lograr este objetivo se emplearon bandejas modulares con dos diferentes proporciones de sustrato y vegetación. Se evaluó la calidad de la escorrentía de salida del techo verde en 9 eventos pluviales para determinar los parámetros pH, SDT, Turbiedad, Color, NO_3^- , $\text{NH}_3\text{-N}$, PO_4^{3-} y DQO, los cuales se compararon con la escorrentía del techo sin vegetación (techo convencional) y la precipitación pluvial. Los resultados mostraron que el techo verde fue superior al techo convencional (grupo control) en términos de neutralización del pH, mostrando diferencias significativas en elevar valores de pH ácidos a valores ligeramente alcalinos. En contraparte, el techo verde aumentó las concentraciones de nutrientes como PO_4^{3-} y DQO. Para las concentraciones de DQO en el techo verde, se encontró diferencias de concentraciones entre el tipo de vegetación. Asimismo, se hallaron diferencias en la concentración de nutrientes por intensidad de evento pluvial. No obstante, el agua recolectada procedente del techo verde puede ser empleada para fines de usos ambientales como la silvicultura, riego de áreas verdes como parques, campos deportivos y sectores del mismo ámbito. Se sugiere estudiar el comportamiento del techo verde para temporadas de nortes y el uso de otras especies vegetales para observar su adaptación y comportamiento con los nutrientes que en esta investigación fueron elevados.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.2. OBJETIVOS.....	4
1.3. HIPÓTESIS.....	4
2. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL	5
2.1. LOS TECHOS VERDES.....	5
2.2. CALIDAD DEL AGUA PLUVIAL.....	9
2.3. LLUVIA ÁCIDA.....	12
2.4. ANTECEDENTES.....	14
3. MÉTODOS	20
3.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	20
3.2. OBTENCIÓN Y PROPAGACIÓN DEL MATERIAL VEGETAL.....	20
3.3. PREPARACIÓN DEL SUSTRATO EXPERIMENTAL.....	21
3.4. PREPARACIÓN DE LA BANDEJA MODULAR DE TECHO VERDE EXTENSIVO.....	22
3.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN PLUVIAL.....	23
3.6. MONITOREO Y MUESTREO.....	25
3.7. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA.....	27
3.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	28
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1. MONITOREO DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL.....	29
4.2. DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN PLUVIAL.....	31
4.2.1. Precipitación promedio mensual.....	31
4.2.2. Determinación de la demanda mensual del agua en una vivienda.....	32

4.2.3. Determinación del volumen del tanque de almacenamiento.....	32
4.3. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	33
4.4. CAPACIDAD DE REDUCCIÓN DE NUTRIENTES	39
4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	48
5. CONCLUSIONES.....	52
REFERENCIAS	54

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de techos verdes según la FLL (2008).....	6
Tabla 2. Tratamientos experimentales (2×2) en función del tipo de vegetación y la proporción de sustratos.....	21
Tabla 3. Cantidades requeridas de cada componente del sustrato	22
Tabla 4. Frentes fríos en el periodo marzo-mayo de 2019	29
Tabla 5. Eventos pluviales en el periodo marzo-junio de 2019.....	30
Tabla 6. Resultados del sistema de captación pluvial	32
Tabla 7. Comparación de los tratamientos respecto al pH para evento pluvial 1	48
Tabla 8. Comparación de los tratamientos respecto al pH para evento pluvial 5	49
Tabla 9. Comparación de los tratamientos respecto al pH para evento pluvial 8	49
Tabla 10. Comparación estadística de los grupos experimentales contra el grupo control	50
Tabla 11. Diferencia de medias de nitratos con relación a la intensidad de eventos pluviales.....	51

Índice de Figuras

Figura 1. Unidad experimental del techo verde extensivo tipo modular.....	26
Figura 2. Tendencia temporal de la temperatura del aire y la precipitación pluvial en el área de estudio.....	31
Figura 3. pH y Sólidos Disueltos Totales en función del tiempo para el grupo control PP	33
Figura 4. pH y Sólidos Disueltos Totales en función del tiempo para el grupo control TC.....	34
Figura 5. pH y SDT en función del tiempo para los tratamientos experimentales.....	35
Figura 6. Turbiedad y Color en función del tiempo para el grupo control PP.....	36
Figura 7. Turbiedad y Color en función del tiempo para el grupo control TC.....	37
Figura 8. Turbiedad y Color en función del tiempo para los grupos experimentales.....	38
Figura 9. Nitratos y nitrógeno amoniacal en función del tiempo para el grupo control PP.....	40
Figura 10. Nitratos y nitrógeno amoniacal en función del tiempo para el grupo control TC... ..	40

Figura 11. Nitratos y nitrógeno amoniacal en función del tiempo para los cuatro grupos experimentales..... 42

Figura 12. DQO del agua pluvial (PP) y de la escorrentía del techo convencional (TC) en función del tiempo..... 43

Figura 13. DQO de *T. pallida* para dos mezclas..... 43

Figura 14. DQO de muestras de módulos de *T. spathacea* para ambas mezclas de sustrato... 44

Figura 15. PO_4^{3-} para el agua pluvial y para la escorrentía del techo convencional en función del tiempo 45

Figura 16. PO_4^{3-} de muestras provenientes de módulos de *T. pallida* para ambas mezclas de sustrato..... 46

Figura 17. PO_4^{3-} de muestras provenientes de bandejas de *T. spathacea* para las dos mezclas de sustrato..... 47

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un incremento o cambio variado de la temperatura a través del tiempo, el cual es atribuido principalmente por los gases de efecto invernadero (GEI) generado por las actividades humanas. El cambio climático no solo engloba el aumento de temperatura, también afecta a todo el equilibrio ambiental causando, por ejemplo, que en algunos lugares propicie la sequía mientras que en otros exista el incremento de precipitaciones pluviales o mayor frecuencia de eventos pluviales afectando la cantidad y calidad del agua, así como problemas en el alcantarillado público de grandes ciudades (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2009). Estas últimas también contribuyen al problema del cambio climático. Ruano (1998) señala que las áreas urbanas son el principal causante de problemas medioambientales. La urbanización ocasiona impactos negativos ambientales y entre los que más destaca se encuentran la llamada isla de calor urbana, mala calidad del aire, altos consumos de energía eléctrica, inundaciones, entre otros, que al generar daños ambientales provoca a su vez problemas sobre la salud de la población. Según La Comisión para la Cooperación Ambiental (2008), en México las edificaciones son responsables del 17% de consumo total de energía, 5% del consumo total de agua, 25% del consumo total de electricidad y 20% de las emisiones de dióxido de carbono, siendo especialmente profundo el impacto a las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, menciona que el escurrimiento de agua urbana es un impacto secundario importante, debido a que los edificios y la infraestructura de transporte que les da servicio reemplazan superficies naturales por materiales impermeables, lo que normalmente genera escurrimientos que arrastran los contaminantes y sedimentos al agua superficial. Todo ello nos da una idea del gran impacto que ocasionan las edificaciones, por esa razón es necesario optar por un desarrollo sustentable, el cual, nos proporciona acceso a los servicios ambientales sin dañar de manera desmedida el medio ambiente y protegiendo así el patrimonio de futuras generaciones.

En Tabasco, el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACC, 2011) menciona que los sucesos meteorológicos extremos (lluvias intensas) causados por el cambio climático,

genera una excedencia descontrolada de escorrentía, deslaves, desbordamientos de ríos y otros fenómenos. Si a ello agregamos el mal estado en que se encuentra la red de alcantarillado, se originan problemas de deficiencia en el desagüe del agua pluvial, que a su vez provoca encharcamientos o inundaciones en calles o zonas de alto riesgo. De esta manera, se generan riesgos a la población y pérdidas económicas cuantiosas, por lo que señala importante la implementación de programas, propuestas y políticas que ayuden a regular el manejo del agua.

Los techos verdes ofrecen una variedad de beneficios sociales, económicos y ambientales. Socialmente ofrece espacios verdes impactando favorablemente al problema de la urbanización y a su vez crea un paisaje estético urbano. En cuanto a los beneficios económicos, genera ahorros energéticos y en algunas ciudades brinda beneficios fiscales como lo es el descuento al pago del impuesto predial. Finalmente, la gama de beneficios ambientales que ofrecen los techos verdes y los cuales menciona la Sociedad Alemana de Construcción, Desarrollo e Investigación de Paisajes (acrónimo en alemán, FLL, 2008) son: contribuir a la disminución de la contaminación acústica urbana, reducir la contaminación del aire, promover la biodiversidad generando hábitats de cultivo nativo que éste a su vez atrae a especies de animales. Además, el techo verde ayuda a desacelerar los picos altos de descarga de agua pluvial amortiguando la descarga excesiva en la red de alcantarillado. En algunos lugares con problemas de intensidad de eventos pluviales o carencia de agua potable se han implementado los techos verdes como sistemas de captación pluvial (Vijayaraghavan *et al.*, 2019). Cabe mencionar que en ocasiones o en ciertos lugares con gran actividad industrial se puede presentar lluvia ácida, por ello, el techo verde ofrece al agua pluvial pasar por el sustrato de tal forma que puede funcionar como filtro con el cual propicia al cambio de las características originales con que desciende el agua pluvial.

El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad del agua pluvial proveniente de un techo verde extensivo durante la temporada de frentes fríos. Empleando un sistema de captación pluvial el cual permitió el eficaz monitoreo de cada evento pluvial. La capacidad del techo verde extensivo se comparó con la del techo sin vegetación (techo convencional). El estudio

también evaluó diferentes proporciones de sustrato y vegetación, con la finalidad de determinar de qué manera influyen en cuanto a la calidad del agua pluvial.

1.1. JUSTIFICACIÓN

La instalación de un techo verde en un edificio brinda una serie de beneficios ambientales tales como el ahorro energético, la reducción de carbono atmosférico y la retención de agua pluvial, de este último, el techo verde es capaz de retrasar, reducir el pico del evento pluvial y distribuir la precipitación, aunque son una tecnología pasiva aún poco difundida en Latinoamérica. En áreas urbanas, durante eventos pluviales, en un techo convencional, el agua es conducida directamente hacia sistemas de drenaje y alcantarillado; sin embargo, justo en los picos máximos de precipitaciones pluviales intensas, estos sistemas son incapaces de transportar toda el agua pluvial ocasionando inundaciones, encharcamientos, erosión y contaminación; por ello, los techos verdes pueden emplearse como una tecnología capaz de reducir el riesgo de estos fenómenos ambientales en áreas urbanas. Incluso se han realizado estudios donde el agua proveniente de un techo verde puede proporcionar una fuente de agua alternativa para fines no potables, desde el riego de jardines urbanos, lavado de patios y cocheras, hasta su uso en inodoros. En Tabasco, un estado con precipitaciones pluviales abundantes, no existen estudios sobre la capacidad de los techos verdes para retener agua pluvial, así como tampoco se han reportado investigaciones sobre la calidad del agua resultante del paso del agua pluvial por el techo verde. Por lo anterior, en este proyecto se propone diseñar e instalar un techo verde extensivo en el que se propagarán especies vegetales nativas de la región, adaptadas al clima tropical húmedo. Durante la temporada de frentes fríos, en el que no existen precipitaciones intensas, se analizará la capacidad de retención y la calidad del agua proveniente del techo verde, comparándose con el agua proveniente de un techo convencional.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Evaluar la capacidad de un techo verde extensivo para mejorar la calidad del agua pluvial durante la temporada de frentes fríos.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de captación pluvial para eventos pluviales de menor magnitud en una unidad experimental de techo verde.
- Determinar la calidad del agua pluvial proveniente de un techo verde experimental.
- Comparar la capacidad del techo verde para reducir nutrientes y contaminantes del agua.

1.3. HIPÓTESIS

La calidad del agua proveniente de un techo verde extensivo es superior a la calidad del agua proveniente de un techo sin vegetación y a la calidad del agua pluvial.

2. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

2.1. LOS TECHOS VERDES

Un techo ecológico, conocido también como azotea o techo verde, techo viviente, techo-jardín o ecotecho, es un sistema liviano de techado para edificios urbanos que contiene suelo como sustrato de crecimiento para una capa de vegetación situada en el extremo superior y que ha sido empleado históricamente como un sistema de aislamiento en regiones templadas, y como un sistema de enfriamiento en regiones cálidas (Solcerova *et al.*, 2017).

2.1.1. Funciones de un techo verde

Entre las múltiples ventajas que la instalación de un techo ecológico ofrece sobresalen el mejoramiento del clima urbano, ahorro en gastos por energía eléctrica, disminución del efecto invernadero, captación de agua pluvial, protección a la biodiversidad, reducción del nivel de ruido en los alrededores y el ofrecimiento de un sitio de descanso, recreación y actividad social para los habitantes del edificio e incluso beneficio estético para el edificio (Melo *et al.*, 2019).

2.1.2. Tipos de techo verde

Los techos verdes se dividen de acuerdo con su uso, factores de construcción, tipo de cultivo y profundidad. De acuerdo con la Sociedad Alemana líder en construcción de techos verdes (FLL), los techos verdes se clasifican como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Tipos de techos verdes según la FLL (2008).

TIPO DE TECHO	TIPO DE CULTIVO	MANTENIMIENTO	PROFUNDIDAD
Intensivo	Plantas perennes, pastos, arbustos, bulbos y árboles	Regular: riego y fertilización	>30 cm
Semi-intensivo	Plantas perennes, pastos, herbáceas, arbustos y musgos	Básico: poco riego y fertilización	15-30 cm
Extensivo	Pastos, herbáceas, musgos, suculentas, bulbos y tubérculos	Poco: requiere de escasas aportaciones externas	10-15 cm

Generalmente los techos verdes extensivos son más económicos por unidad de área, por tal razón son los más implementados. De acuerdo con Carson (2014), dentro de la clasificación de techos verdes extensivos han surgido tres principales sistemas de construcción: alfombras de vegetación (*vegetated mat*), sistemas integrados o construidos en el sitio (*built-in-place*) y sistemas de bandeja modular (*modular tray*). El sistema modular requiere de una instalación simple, colocándose directamente sobre la membrana impermeable del techo, lo que facilita la condición estética que se desee crear y permite un adecuado acceso al techo (Korol & Shushunova, 2016).

2.1.3. El techo verde como sistema de captación pluvial

La recolección de agua pluvial es promovida en muchas ciudades para abordar problemas de suministro de agua asociadas con la urbanización, desarrollo industrial y cambios climáticos (Zhang *et al.*, 2019). El agua requerida para uso doméstico, como la limpieza del inodoro, la limpieza de la casa y el riego del jardín no necesariamente deben cumplir con una norma de agua potable. El uso de agua pluvial en edificios es apoyado por los gobiernos al proporcionar incentivos fiscales o reducciones en las facturas de consumo de agua. Al mismo tiempo se promulgan leyes y normas para hacer que la recolección del agua pluvial se más atractiva (Şahin & Manioğlu, 2019). Por ejemplo, en México existe el Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas Rurales (PROCAPTAR) el cual propone como solución la captación de agua pluvial para poblaciones rurales de México y tiene como objetivo promover el acceso al agua a zonas rurales de mayor marginación. La condición de este

programa es recibir lluvias anuales acumuladas igual o mayores a los 1,500 mm para proporcionar una dotación de 50 litros/hab/día (CONAGUA, 2017).

Una de las características más importantes de los techos verdes es su capacidad de retención de agua pluvial (Castaño, 2014), encontrándose como unas de las tecnologías más empleadas y prometedoras para reducir la escorrentía superficial (Zhang *et al.*, 2019) y es una de las mejores prácticas de manejo recomendadas por la USEPA en cuanto al uso sostenible de las aguas pluviales (Todorov *et al.*, 2018). Sin embargo, el rendimiento varía de acuerdo con el diseño, así como con las condiciones climáticas, características de la precipitación (tamaño, intensidad y distribución temporal), tipo de sustrato, profundidad y vegetación empleada (Liu *et al.*, 2019).

Una vez que el agua de lluvia precipita tiene tres maneras de abandonar el techo verde, a través de la evapotranspiración realizada por la vegetación, de la evaporación que produce el sustrato y a través del sistema de drenaje. Los sistemas de retención y reutilización de agua de lluvia mediante barriles o cisternas son utilizados principalmente para reducir el volumen de agua y el pico de flujo de desagüe, por lo que actúan como retardadores mientras la cisterna se llena, los cuales son efectos similares a los de un techo verde. Al emplear en serie un sistema de techos verdes, se reduciría de forma adicional el flujo de escurrimiento, ya que la misma estaría pasando por dos elementos, es decir, del techo verde hacia las cisternas, hasta salir del edificio. Estos sistemas pueden ser pasivos o activos. Los pasivos solo emplean barriles desde 200 L en viviendas familiares o edificaciones, mientras que los activos utilizan bombas para su reutilización. Todo esto con el fin de que el agua pueda ser utilizada para uso no potable o secundario (Castaño, 2014).

2.1.4. Componentes de un sistema de captación pluvial

Área de captación: Comprende el techo o área destinada para la captación del agua de lluvia y de las canaletas o dispositivos que recolecten y conduzcan para su almacenamiento y aprovechamiento (CONAGUA, 2016).

Canaletas: Elementos colocados aguas abajo del área de captación que recolectarán y dirigirán el agua captada hacia la tubería de conducción (CONAGUA, 2016).

Conducción: Conjunto de tuberías que reciben el agua de las canaletas y entrega el agua captada hasta el tanque o depósito de almacenamiento. En la conducción se deberá contar con un filtro tipo malla o un dispositivo equivalente separador de hojas y materiales similares, que evite el ingreso de sólidos arrastrados en la captación al interior del almacenamiento (CONAGUA, 2016).

Separador de primeras aguas: Elemento ubicado en cualquier punto de la conducción antes de la entrada al tanque o depósito de almacenamiento del agua pluvial. Su finalidad será eliminar, atrapar y separar los contaminantes arrastrados por un primer volumen de lluvia, para evitar su ingreso a los depósitos de almacenamiento (CONAGUA, 2016).

Dispositivos de lavado o filtro: Tendrá la finalidad de evitar el ingreso de agentes contaminantes al depósito o tanque de almacenamiento. Se pueden emplear de arenas o material graduado y estará ubicado antes de la entrada al tanque de almacenamiento (CONAGUA, 2016).

Depósito o tanque de almacenamiento: Estos tanques deberán tener el volumen necesario para garantizar el almacenamiento del agua y podrán ser de materiales prefabricados garantizando que no transmiten olor o sabor al agua almacenada, así como cualquier elemento contaminante que pudiera ser liberado por los radicales libres que se generan al material producto de los rayos UV del sol (CONAGUA, 2016).

2.2. CALIDAD DEL AGUA PLUVIAL

2.2.1. El agua pluvial

Son las aguas que proceden de la atmósfera, en forma de lluvia, nieve o granizo (NOM-015-CONAGUA-2007).

2.2.2. Parámetros fisicoquímicos del agua

Existen parámetros físicos químicos y biológicos establecidos a nivel nacional e internacional que permiten determinar la calidad del agua.

pH: Expresa la magnitud de acidez o alcalinidad en referencia a la actividad de los iones hidrógeno (Sawyer *et al.*, 2001).

Temperatura: Es una propiedad que indica la dirección de un flujo de energía a otros cuerpos, ésta fluye como calor a través de una pared rígida, térmicamente conductora (Atkins & de Paula., 2008). La NMX-AA-007-SCFI-2013 menciona que el valor de temperatura es un criterio de calidad del agua que indica el potencial o grado calorífico referido a un cierto cuerpo y es usual expresar la temperatura con base en la escala Celsius (°C), definida con relación a la temperatura termodinámica por la unidad Kelvin (K).

Sólidos suspendidos: La NMX-AA-034-SCFI-2015 señala que todas las aguas según su origen contienen sustancias disueltas en cantidades variables, estos se pueden clasificar por varios tipos de sólidos, entre ellos, sólidos suspendidos y pueden afectar adversamente la calidad del agua. Los sólidos suspendidos son un componente fundamental en el agua eutrófica, ya que presenta una fuerte correlación con la turbidez (Gargallo *et al.*, 2018).

Turbiedad: Se refiere a la calidad óptica del agua que hace que la luz se disperse y absorba en lugar de transmitirse en línea recta a través de una muestra (Twort *et al.*, 2000).

Color: El color en el agua puede deberse a la presencia del contenido natural de metales o iones metálicos en disolución, humus o residuos orgánicos, plancton o desechos industriales y

el principio de este método se basa en la medición del color verdadero y/o aparente en una muestra de agua natural, mediante su comparación visual con una escala estandarizada de platino-cobalto. (La unidad platino-cobalto es la que se produce al disolver un mg de platino/L en forma de ion cloroplatinato) de la NMX-AA-045-SCFI-2001.

Conductividad eléctrica: NMX-AA-093-SCFI-2018 la define como una medida de la concentración de solutos ionizables presentes. Su determinación es importante ya que ofrece una percepción del grado de mineralización del agua. Se puede expresar en unidades de Siemens por metro (S/m) o unidades equivalentes como $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Sólidos disueltos totales (SDT): En las aguas potables la mayor parte de la materia se encuentra en forma disuelta y está constituida principalmente por sales inorgánicas, pequeñas cantidades de materia orgánica y gases disueltos. Como regla heurística, la dureza aumenta con el contenido total de sólidos disueltos (Sawyer *et al.*, 2001).

Nitrato (NO_3^-): Es uno de los componentes más importantes en los líquidos atmosféricos y el agua superficial debido a que su fotólisis tiene un papel importante en la mejora de la fotooxidación de contaminantes naturales y antropogénicos mediante la formación de radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$). El nitrato y su ácido conjugado (HNO_3) son el producto oxidativo final del óxido nítrico y otras especies derivadas de éste. No sólo representa un importante flujo de nitrógeno de la atmósfera al agua superficial, sino que también contribuye a la acidez de la precipitación (Zuo *et al.*, 2006). Su determinación es una de las más difíciles para obtener resultados confiables (Sawyer *et al.*, 2001).

Nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$): Todo el nitrógeno que existe como ion amonio o en el equilibrio se considera nitrógeno amoniacal (Sawyer *et al.*, 2001). En aguas superficiales la fuente principal de nitrato amoniacal se origina de la degradación natural de la materia orgánica presente en la naturaleza, debido al ciclo natural del nitrógeno, de este modo el nitrógeno amoniacal resulta de la degradación del nitrógeno orgánico el cual es influido por la actividad bacteriana ocasionando que se oxiden a nitritos y nitratos (González, 2013). Típicamente, existen cuatro métodos para determinar el nitrógeno amoniacal: dos •

procedimientos colorímetros, uno volumétrico y un método instrumental (Sawyer *et al.*, 2001).

Ortofosfato (PO_4^{3-}): Generalmente el fósforo unido en forma estructural tiene poca importancia. Los compuestos inorgánicos del fósforo que interesan en la práctica de ingeniería son los fosfatos en sus formas moleculares deshidratadas, usualmente llamadas polifosfatos o fosfatos condensados. Todos los polifosfatos se hidrolizan gradualmente en solución acuosa y se revierten a la forma orto. El fósforo en forma de ortofosfato se puede medir cuantitativamente por métodos gravimétricos, volumétricos o colorimétricos. De este último se emplean tres métodos; el molibdofosfato forma un precipitado amarillo, pero cuando las concentraciones de fosfatos son bajas se forma un sol coloidal amarillo, que ha sido propuesto como base para mediciones colorimétricas de concentraciones intermedias. Con concentraciones menores a 30 mg/L, el color amarillo del sol coloidal no es detectable por lo que se necesitan otros medios para la formación de color. El vanadio forma un complejo ácido vanadomolibdofosfórico, con un color amarillo intenso, que permite el análisis del fósforo a una concentración de 1 mg/L o menor. El molibdeno contenido en el fosfomolibdato de amonio también es fácilmente reducido para producir un sol de color azul, que es proporcional a la cantidad de fosfato presente (Sawyer *et al.*, 2001).

Demanda Química de Oxígeno (DQO): La determinación de la DQO es utilizada como una forma de medir en un residuo la cantidad total de oxígeno que se requiere para la oxidación de la materia orgánica, convirtiéndola a dióxido de carbono y agua. La prueba consiste en que todos los compuestos orgánicos, con poca irregularidad, pueden ser oxidados por la acción de agentes oxidantes fuertes en condiciones ácidas. Debido a que todos los agentes oxidantes deben ser usados en exceso, es necesario medir el exceso que queda al final del periodo de la reacción con el fin de calcular la cantidad realmente utilizada para la oxidación de la materia orgánica. Uno de los reactivos más ideales para la determinación de la DQO es el dicromato de potasio, ya que permite medir con facilidad el exceso final de la reacción. Para que el dicromato de potasio oxide totalmente la materia orgánica, la solución debe ser fuertemente ácida y estar a temperatura elevada (Sawyer *et al.*, 2001).

2.2.3. Los frentes fríos

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2017) lo define como la parte frontal de una masa de aire polar, la cual provoca un descenso de temperatura en la región por donde transita. Los frentes fríos se forman cuando una masa de aire frío choca con una masa de aire caliente, al ser más denso, el aire frío transita por debajo del aire caliente, generando movimiento y provocando así inestabilidad en la atmósfera de esa zona como descensos de temperatura, vientos fuertes, nubosidad, intensas lluvias, entre otros. La mayoría de los frentes fríos que afectan nuestro país son originados cerca del polo norte, atraviesan los Estados Unidos de América, cruzan el territorio nacional, del noroeste al sureste y, conforme a la época del año y localización geográfica, pueden prolongarse de tres a siete días.

Aunque su frecuencia es muy variable, la temporada de frentes fríos en el país va de septiembre a mayo y en promedio se registran alrededor de 58 al año. En el periodo de noviembre a marzo, los frentes fríos cruzan el territorio mexicano en el Istmo y reciben el nombre de Tehuantepecos, vientos fuertes que originan anomalías térmicas en el golfo de Tehuantepec. Por su parte, cuando las masas polares atraviesan el Golfo de México dan origen a los llamados nortes.

2.3. LLUVIA ÁCIDA

La lluvia natural es algo ácida debido a la presencia en ella de dióxido de carbono atmosférico, que forma ácido carbónico (H_2CO_3) de acuerdo con la siguiente reacción química:



El H_2CO_3 se ioniza parcialmente liberando un ion hidrógeno, lo que reduce el pH del sistema, a partir de:



Debido a esto la lluvia natural, no contaminada, tiene un pH alrededor de 5.6, en caso de tener un pH menor de 5, es considerada realmente como lluvia ácida. Los dos ácidos predominantes en la lluvia ácida son el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido nítrico (HNO_3) ambos ácidos fuertes. Generalmente la lluvia ácida precipita lejos de la fuente que emite los contaminantes primarios, el dióxido de azufre (SO_2) y el óxido nítrico (NO). Aunque específicamente los contaminantes primarios no hacen el agua de lluvia ácida; sin embargo, parte de esta masa se convierte en un periodo de horas o días en los ácidos nítrico y sulfúrico (Baird & Cann., 2014).

Los ácidos fuertes H_2SO_4 y HNO_3 suelen ser el resultado del uso de combustibles fósiles. México es uno de los países más contaminados de Latinoamérica dado a la gran cantidad de vehículos y actividades industriales, lo cual ha provocado un gran impacto en el entorno global y regional generando una variación en los pH del agua de lluvia, reportando valores de 4.11. En cuanto al sur del país, en las zonas costeras, se investigó el pH de la lluvia ácida encontrándose que la acidez de la lluvia es mayor, con valores de pH tan bajos como 3.48, mostrando altos niveles de nitritos (Padilla *et al.*, 2015). Asimismo, en un estudio realizado de 2003 a 2014 en la costa del Golfo de México, en Veracruz, se encontró que el fenómeno de la lluvia ácida ha estado presente por más de una década a lo largo de la costa del Golfo de México con valores de pH de 4.78 a 5.40, encontrando niveles altos de nitratos, predominando en la época de secas. Los precursores principales de la lluvia ácida fueron las actividades costeras como la extracción, procesamiento y distribución de hidrocarburos, actividades portuarias y marítimas, instalaciones industriales, agricultura y pesca (Echeverría *et al.*, 2018).

2.4. ANTECEDENTES

2.4.1. Estudios sobre capacidad de retención de agua pluvial

Existen diversas investigaciones relacionadas al empleo de techos verdes como una estrategia para el manejo de escorrentías pluviales en las ciudades. Burszta-Adamiak (2012) estudió la capacidad de retención de aguas pluviales que posee un techo verde instalado en Polonia. Entre las variables determinadas se encuentra el retardo de escorrentía y el flujo máximo (caudal pico) durante eventos pluviales registrados bajo condiciones locales. Los resultados de esa investigación durante 153 eventos pluviales indican que los techos verdes poseen una capacidad significativa de reducir el volumen total de salida, así como a disminuir el tamaño del flujo máximo en comparación a la intensidad máxima registrada de lluvia. La capacidad de retención varió entre 82.5 y 85.7% y en el caso de eventos pluviales con precipitaciones menores a 1 mm/d, la capacidad de retención fue cercana al 100%. Por su parte, en un estudio posterior, Burszta-Adamiak y Mrowiec (2013) emplearon el simulador SWMM (Storm Water Management Model) de la USEPA, la agencia nacional de protección ambiental estadounidense, para analizar el desempeño de un techo verde establecido en Polonia para la retención de aguas pluviales. La conclusión de ese estudio indica la dificultad de emplear modelos hidrológicos genéricos para aplicaciones específicas en techos verdes. Algunos parámetros del techo no son satisfactoriamente representados en el simulador, tales como la pendiente de inclinación, la cobertura vegetal y el proceso de pérdida de agua durante periodos intermedios entre eventos pluviales. Por ello, los autores consideran necesario realizar más investigación experimental y teórico-numérica para considerar estos aspectos en la simulación hidrológica del techo verde.

Carson (2014) evaluó el desempeño de techos verdes como estrategia de control de escorrentías en la ciudad de Nueva York. En su estudio realiza un diagnóstico de la infraestructura urbana reconociendo el impacto de ésta sobre la calidad ambiental, los ecosistemas locales y el ciclo hidrológico. En particular, la ciudad de Nueva York ha invertido 1,500 millones de dólares en los últimos 20 años para mejorar la calidad ambiental de sus ecosistemas acuáticos. Como resultado, en la investigación de Carson se analiza el potencial de

los techos verdes como alternativas de manejo de aguas pluviales. En otro estudio realizado en la propia ciudad de Nueva York, la Agencia Ambiental de los Estados Unidos de América reportó el desempeño de diversos techos verdes extensivos, en tres variantes: bandeja modular (*modular tray*), alfombra de vegetación (*vegetated mat*) e integrado (*built-in*). Para estimar el desempeño en la retención de agua, se monitoreó el agua pluvial de cuatro techos verdes a gran escala para más de 100 eventos pluviales durante 23 meses (USEPA, 2014). Las conclusiones del estudio fueron: *i*) la escorrentía de techos verdes tiene una relación cuadrática con respecto a la cantidad de la precipitación (expresada como espesor de lámina de agua), *ii*) la relación entre la precipitación y la lámina de agua en el techo verde (volumen de agua pluvial dividido por el área de drenaje) puede describirse por una ecuación de escorrentía característica y específica para cada techo verde, *iii*) la ecuación de escorrentía puede emplearse con datos históricos de lluvia para reducir el sesgo en el desempeño de los techos verdes para la retención de agua pluvial, *iv*) el sistema de bandeja modular capturó la menor cantidad de precipitación para eventos entre 0 y 20 mm, y la mayor cantidad de precipitación para eventos de más de 30 mm, y *v*) las predicciones multianuales muestran que el sistema de capas superpuestas retendrá más lluvia que el sistema de bandeja modular, mismo que fue superior a los sistemas de alfombra vegetal. Por último, en este estudio se recomienda realizar un diseño técnico adecuado, considerar la capacidad de retención de agua por parte del sustrato y en función del tamaño del evento pluvial.

Por su parte, Li (2014) considera que el desempeño hidrológico de los techos verdes es difícil de predecir o controlar debido a la carencia de métodos para análisis cuantitativo. La relación entre la respuesta hidrológica y sus factores, tales como la configuración del techo verde, el sustrato de crecimiento, las características de la precipitación, las condiciones históricas y la evapotranspiración, son altamente no lineales. En su estudio, aplica por primera vez el modelo HYDRUS-2D a techos verdes, con el propósito de analizar diversos aspectos, tales como la evapotranspiración, la irrigación y los eventos pluviales, sobre el desempeño hidrológico. En particular, el autor propone diversos métodos, entre los que destacan: *i*) adquisición de propiedades hidráulicas del medio de crecimiento y parámetros de curvas de retención, *ii*) conceptualización de un dimensionamiento simplificado para facilitar la geometría empleada en las simulaciones hidrológicas, *iii*) calibración del modelo usando

mediciones experimentales del contenido de agua, monitoreo de la precipitación e irrigación, y cálculo de la evapotranspiración, iv) análisis del perfil hidrológico para planes de irrigación, entre otros. Posteriormente, Seidl (2015) analizó los factores que limitan la instalación de techos verdes como estrategia para retención de agua pluvial en Milwaukee, Estados Unidos. El autor concluyó que el factor limitante es la respuesta hidrológica impredecible a eventos pluviales de diversas características. Como en el estudio de la USEPA (2014) la investigación concluye que el método racional para estimar flujos pluviales no predice satisfactoriamente la respuesta hidrológica de los techos verdes, ya que existen diversos factores tales como la geometría, el tipo y profundidad del sustrato, las condiciones iniciales y el hietograma del evento pluvial. Por ello, el autor considera crítica la medición experimental de la respuesta hidrológica con el propósito de ajustar los modelos matemáticos existentes, así como para conocer el desempeño del techo verde para retener agua pluvial.

Viola *et al.* (2017) exploraron la capacidad de retención de los techos verdes de acuerdo con la profundidad y diferentes climas representativos de todo el mundo, estudiando principalmente la lluvia y la dinámica de la evapotranspiración. Los resultados destacan que conforme mayor profundidad del suelo mayor es la capacidad de agua retenida y, en consecuencia, se puede evaporar más agua del suelo y de la vegetación en sustratos poco profundos. En cuanto al clima, la eficiencia de un techo verde resulta mejor en climas subtropicales húmedos, debido a que la precipitación y la evapotranspiración potencial ocurren en la misma estacionalidad durante el año hidrológico, contrario a lo que ocurre en un clima mediterráneo. Por ello, concluyeron que los datos necesarios que permiten evaluar el rendimiento de cuánta agua retiene un techo verde o cuánta agua pluvial se libera al drenaje, está dado por la precipitación mensual, la distribución de la temperatura y la estacionalidad hidrológica de la zona. Sims *et al.* (2016) también mencionaron que el rendimiento de retención se ve afectado por el clima del lugar; es decir, su temperatura, humedad relativa, radiación relativa y las normales de precipitación. Además, examinaron el rendimiento de retención de techos verdes en tres climas diferentes, London, Ontario (húmedo continental), Calgary, Alberta (semiárido, continental) y Halifax, Nueva Escocia (húmedo, marítimo), encontrando que los climas más secos tienen mayor porcentaje acumulado de aguas pluviales, Calgary con un 67% significativamente mejor que London (48%) y Halifax (34%); sin •

embargo, bajo una base de volumen total, el techo verde en London retuvo la mayor cantidad de aguas pluviales (598 mm), en comparación con Halifax (471 mm) y Calgary (411 mm). Cabe destacar que la condición de humedad antecedente regula el rendimiento de retención y es un indicador relevante e importante para el desempeño de retención de agua pluvial para cualquier región climática.

Recientemente, Shafique (2018) analizó el desempeño de techos verdes en Seúl, Corea del Sur. Los resultados demostraron que el techo verde es capaz de retener agua pluvial retardando el pico máximo de caudal y disminuyendo la magnitud de este. El estudio concluye que la retención depende de la intensidad y duración de los eventos pluviales. Del análisis de resultados, se obtuvo que la capacidad de retención promedio varió entre 10% y 60%.

2.4.2. Estudios sobre calidad del agua pluvial proveniente de un techo verde

Con respecto a la calidad del agua, el estudio de la USEPA (2014) realizó un muestreo durante 16 meses en cinco techos verdes a gran escala instalados en la ciudad de Nueva York. Para comparar la calidad del agua proveniente de los techos verdes, se compararon los resultados con otros cinco techos convencionales (denominados techos grises) y con la precipitación pluvial, sin que ésta alcanzara el techo de los edificios. Después de analizar más de cien muestras, los resultados mostraron que el pH del agua proveniente de los techos verdes es consistentemente superior al de los techos grises. Los valores promedio de pH fueron 7.3, 6.3 y 4.8 para el agua de techos verdes, de techos grises y de la precipitación pluvial directa, respectivamente. Lo anterior implica que el techo verde es capaz de neutralizar los efectos de la lluvia ácida, típica en el estado de Nueva York. Por su parte, las concentraciones de nitratos (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) fueron menores en techos verdes, con excepción del techo verde tipo integrado, el cual presentó concentraciones de NO_3^- mayores a la de los techos grises. Con respecto al fósforo (PO_4), las concentraciones fueron mayores en las muestras de agua provenientes de techos verdes en comparación al grupo control (techos grises). En general, los resultados indican que la carga másica anual por unidad de área de NO_3^- , NH_4^+ y P presente en el agua proveniente de techos verdes es considerablemente menor a la carga en el agua

proveniente de techos grises, lo cual puede deberse a la capacidad de los techos verdes para retener nutrientes.

En los últimos años, Berndtsson (2010) realizó una revisión exhaustiva de diversos estudios sobre la calidad y cantidad de agua retenida en techos verdes. De acuerdo con la revisión, concluyó que los factores que afectan la dinámica de las escorrentías en techos verdes son: tipo de techo verde, geometría del techo (inclinación), características del sustrato, estacionalidad, climatología, meteorología, edad del techo verde, y el tipo de vegetación. Por su parte, los factores que influyen sobre la calidad del agua son revisados, aunque no existen conclusiones precisas. La revisión indica con claridad sobre la necesidad de mayores estudios sobre el desempeño de los techos verdes, particularmente aquellos que permitan el monitoreo y análisis a largo plazo.

En lugares como Syracuse, Nueva York se están implementando estrategias para la reducción de escorrentía de aguas pluviales, incluidas la disminución de contaminantes en sistemas de aguas residuales y aguas superficiales bajo la orden de la Corte para limitar los desbordamientos combinados de alcantarillas, por lo que Carpenter *et al.* (2016) realizaron un estudio en el que se examinó la cantidad y calidad de escorrentías producidas por 87 eventos pluviales desde un techo verde, con un periodo de 12 meses, durante 2011-2012, el cual se comparó con un experimento que comprendía el riego artificial del techo. Se evaluó la retención de agua anualmente durante las temporadas de crecimiento y no crecimiento, de los cuales entre sus resultados destaca que el techo verde fue efectivo para retener la cantidad de agua pluvial con un porcentaje de retención de 96.8% y un mínimo de 88% aunque, conforme el evento de tormenta aumentaba la retención de agua pluvial disminuía. De esta manera, los techos verdes favorecen la disminución de la descarga de agua pluvial al alcantarillado y ofrece retardos en descargas máximas. En cuanto a los nutrientes hubo una variación de retención conforme la temporada, siendo más eficaz la temporada de crecimiento, aunque se necesita mayor monitoreo para evidenciar si el techo verde continúa lixiviando concentraciones fuertes de nutrientes o si alcanza una condición constante.

Actualmente, Todorov *et al.* (2018) realizaron un estudio de cuatro años sobre la calidad del agua de escorrentía desde un techo verde extensivo cubierto de *Sedum*, en un edificio

comercial urbano de Nueva York. El monitoreo comenzó en la primera temporada de crecimiento de la vegetación, siete meses después de que se construyó. Se utilizaron muestras de los seis drenajes del techo, estas muestras surgieron de eventos de precipitación intensa suficiente para generar escorrentía. Dos de los drenajes tuvieron una pendiente de 15% sobre el techo verde, mientras que los otros cuatro la pendiente hacia el desagüe fue de 1%. La calidad del agua se comparó con un techo convencional ubicado dos pisos arriba del techo verde y sin ninguna influencia de cualquier otra vegetación. Los autores reportaron que el agua proveniente del techo verde presentó una alta concentración de nutrientes; sin embargo, estos disminuyeron conforme los techos verdes envejecían y variaban con las condiciones climatológicas. También se encontró que el techo verde es capaz de neutralizar rápido la acidez, ya que el agua de escorrentía presentó un pH ligeramente alcalino, por lo que se le puede dar uso de reutilización recreativa y dejar la dependencia de agua potable.

3. MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

La unidad experimental del techo ecológico está situada en las instalaciones de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Tabasco, localizada en las coordenadas 17°59'27" N, 92°58'22" W a una altitud de 11 msnm, en el municipio de Centro, en las inmediaciones de la ciudad de Villahermosa. El tipo de clima es tropical húmedo con temperaturas máximas normales de 35.4 y 27.9 °C, para mayo y enero respectivamente, y las temperaturas mínimas normales fueron de 24.5 y 19.5 °C, para los mismos meses del año (información recopilada en 30 años, desde 1981 hasta 2010). En particular, durante el mes de mayo suelen ocurrir temperaturas máximas diarias hasta de 43.5 °C. Con respecto a la precipitación pluvial, la precipitación normal mensual es de 34.4 mm para el mes de abril y 323.8 mm para el mes de octubre. La precipitación anual acumulada es de 1972 mm con 127 días del año presentando uno o más eventos pluviales.

El edificio sobre el que se encuentran instalados los módulos de techo verde es el edificio de los Laboratorios de Investigación, conocido como "Edificio H" y está localizado a un costado de la cancha de fútbol soccer de la División Académica de Ciencias Biológicas de la UJAT.

3.2. OBTENCIÓN Y PROPAGACIÓN DEL MATERIAL VEGETAL

Se seleccionaron dos especies del género *Tradescantia*, *T. pallida* comúnmente conocida como purpurina y *T. spathacea* conocida como maguey morado, tal y como proponen Cruz-Salaya y Córdova-Méndez (2013) y Canul-Gómez (2014).

3.2.1 Obtención del material vegetal

Los individuos de *T. pallida* se obtuvieron de plantas ubicadas en la parte trasera del edificio de CICART ubicado en la División Académica de Ciencias Biológicas, UJAT mientras que el resto de los individuos fueron propagados a partir de macetas obtenidas en un vivero comercial. Por su parte, todos los individuos de *T. spathacea* se adquirieron en un vivero comercial.

3.2.2 Propagación del material vegetal

La propagación de *T. pallida* se realizó a partir de esquejes de tallo, mientras que los individuos de *T. spathacea* fueron trasplantadas teniendo cuidado con las raíces debido a que son muy ramificadas. A las plantas se les permitió enraizar durante dos semanas, humectándose con agua de la red pública (agua del grifo) los cinco días de la semana, dos veces al día, por la mañana y mediodía. No se empleó ningún tipo de fertilizante y todo ello se realizó bajo condiciones de laboratorio, antes de ser instaladas en el techo del edificio. Una vez instaladas en el techo, el control de riego se redujo a tres veces por semana, preferentemente aplicado por las mañanas.

3.3. PREPARACIÓN DEL SUSTRATO EXPERIMENTAL

Los materiales empleados para el sustrato fueron agrolita y fibra de coco, con los que se propusieron dos diferentes proporciones experimentales como se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Tratamientos experimentales (2×2) en función del tipo de vegetación y la proporción de sustratos.

TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES	SUSTRATO	VEGETACIÓN	PROPORCIÓN (%v/%v)
A6P	Agrolita/Fibra de coco	<i>T. pallida</i>	60/40
A6S	Agrolita/Fibra de coco	<i>T. spathacea</i>	60/40
F6P	Agrolita/Fibra de coco	<i>T. pallida</i>	40/60
FC6S	Agrolita/Fibra de coco	<i>T. spathacea</i>	40/60

De la tabla anterior surgen los cuatro tratamientos experimentales, que consisten en combinar las dos especies vegetales propuestas con las dos proporciones de mezcla de sustratos seleccionados. Por ejemplo, el grupo experimental A6P se refiere a aquellas bandejas modulares de techo verde que contienen 60% de agrolita mezclados con 40% de fibra de coco y en ellos se propagaron individuos de *T. pallida*. Adicionalmente a estos tratamientos experimentales, se consideraron dos grupos control: la precipitación pluvial (PP) y la escorrentía de lluvia proveniente del techo convencional (TC), el cual es un techo con membrana impermeable de estireno-butadieno-estireno recubierto de gravilla.

3.4. PREPARACIÓN DE LA BANDEJA MODULAR DE TECHO VERDE EXTENSIVO

Se implementaron 12 bandejas modulares para techos verdes extensivos de la marca LiveRoof® modelo estándar, con una anchura de 0.305 m por 0.11 m de altura y 0.610 m de longitud. Con base a las longitudes de la bandeja modular, las proporciones y propiedades de cada sustrato, estas últimas proporcionadas por Moguel (2016) se calculó la cantidad total requerida para cada módulo, obteniendo los resultados de la **Tabla 3**.

Tabla 3. Cantidades requeridas de cada componente del sustrato

SUSTRATO	PROPORCIÓN (% v)	MASA REQUERIDA
Agrolita (6 - 8 mm)	60	1.50 kg
Fibra de coco (50% fibras/50% polvo)	40	0.47 kg
Agrolita (6 - 8 mm)	40	1.00 kg
Fibra de coco (50% fibras/50% polvo)	60	0.71 kg

Debido a que las bandejas modulares LiveRoof del modelo estándar están diseñadas principalmente para plantas suculentas y bulbos, no requieren almacenar gran cantidad de agua, y su diseño cuenta con muchos orificios de drenaje por lo que se optó en sellar aproximadamente el 80% de estos e insertar una tela para jardines con la función de conservar mayor humedad y evitar pérdida de sustrato por medio de los orificios.

Las 12 bandejas modulares de techo verde extensivo fueron divididas en cuatro segmentos de acuerdo con la proporción del sustrato experimental y el tipo de vegetación correspondiente

(nomenclatura señalada en la **Tabla 2**), por lo que a cada unidad experimental corresponden tres bandejas modulares.

3.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN PLUVIAL

Para diseñar el sistema de captación pluvial se consideró el enfoque de un estado estacionario por lo que se requiere únicamente el valor promedio de la precipitación pluvial.

El diseño para el sistema de captación pluvial está basado en la Guía de diseño para captación del agua de lluvia de la Organización Panamericana de la Salud, (2004). El cual se requiere el valor promedio de la precipitación pluvial. Además, se toman como datos complementarios el número de habitantes que residen en la vivienda o número de personas beneficiadas, demanda mensual por habitantes, área del techo y el coeficiente de escorrentía característico del tipo de material del techo. A partir de lo anterior se puede determinar el volumen del tanque de almacenamiento.

El valor promedio mensual de la precipitación pluvial se puede determinar a partir de los datos promedios mensuales de los últimos 10 o 15 años:

$$Pp_i = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} p_i}{n} \quad (3)$$

donde n es el número de años evaluados, p_i es el valor de precipitación mensual del mes " i " (mm), Pp_i Precipitación promedio mensual del mes i de todos los años evaluados. Este valor puede ser expresado en mm/mes, L/m²/mes, capaz de ser recolectado en la superficie horizontal del techo.

La demanda mensual por habitantes determina la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de los usuarios beneficiados y se calcula con la siguiente ecuación:

$$D_i = \frac{N_u N_a Dot}{1000} \quad (4)$$

Donde N_u es el número de usuarios que se benefician del sistema, N_d es el número de días del mes analizado, Dot es la dotación (L/persona por día), D_i es la demanda mensual (m^3).

Para calcular el volumen del tanque de almacenamiento es necesario calcular la oferta de agua mensual, por lo que se requiere tomar en consideración los promedios mensuales de precipitaciones de todos los años evaluados y el coeficiente de escorrentía de acuerdo al material del techo, con ello se procede a determinar la cantidad de agua captada para diferentes áreas de techo y por mes:

$$A_i = \frac{Pp_i C_e A_c}{1000} \quad (5)$$

donde Pp_i es la precipitación promedio mensual (L/m^2), C_e es el coeficiente de escorrentía, A_c es el área de captación (m^2) y A_i es la oferta de agua en el mes i (m^3).

A partir de los valores obtenidos de la demanda mensual del agua y oferta mensual, se calcula el acumulado de cada uno mes por mes, comenzando por el mes de mayor precipitación u oferta de agua. A continuación, se procede a calcular la diferencia de los valores acumulados de oferta y demanda de agua pluvial de cada uno de los meses. El acumulado de oferta en el mes " i " podrá determinarse por:

$$Aa_i = Aa_{(i-1)} + \frac{Pp_i C_e A_c}{1000} \quad (6)$$

donde Aa_i es la oferta acumulado al mes i . Mientras que la demanda en el mes " i " se calcula por:

$$Da_i = Da_{(i-1)} + \frac{N_u N_{di} D_{di}}{1000} \quad (7)$$

donde Da_i es la demanda acumulada al mes i . Finalmente se obtiene el volumen del tanque:

$$V_i = A_i - D_i \quad (8)$$

donde V_i es el volumen del tanque de almacenamiento necesario para el mes i , A_i es el volumen del agua que se captó en el mes i , D_i es el volumen de agua demandada por los usuarios para el mes i .

Es necesario señalar que las áreas de techo que presenten diferencias acumulativas negativas en alguno de los meses del año se descartan debido a que no son capaces de captar la cantidad de agua demandada por los usuarios. El área mínima de techo corresponde al análisis que proporciona una diferencia acumulativa cercana a cero y el volumen de almacenamiento corresponde a la mayor diferencia acumulativa. Techos con áreas mayores al mínimo darán mayor seguridad para el abastecimiento de los usuarios.

El dimensionamiento del sistema de captación se refiere a la especificación del número, diámetros y longitudes de las tuberías empleadas en la conducción del agua recolectada en el techo verde y, además, considera el cálculo del volumen necesario para los tanques de almacenamiento.

3.6. MONITOREO Y MUESTREO

El primer grupo control (PP) constó de tres contenedores en las mismas inmediaciones del techo verde con capacidad de 19 litros, estos tienen el propósito de recolectar el agua pluvial de manera directa, sin contacto con las superficies del techo. El segundo grupo control (TC) correspondió al agua pluvial captada por el techo convencional. Cada bandeja modular recolectó agua pluvial de cada individuo de *T. pallida* y *T. spathacea* (**Figura 1**). Con la ayuda de los contenedores de los dos grupos control, se monitorearon precipitaciones recolectadas durante eventos de norte ocurridos el 18, 19 y 20 de marzo correspondientes al frente frío número 44, el cual se extendió con características de estacionario en el sureste de México. De igual manera se monitoreó el evento norte ocurrido el 2 de abril generado por el frente frío número 48, estacionario sobre el Golfo de México y el Sureste del país y su masa de aire frío. El

resto de los nortes que transitaron por Villahermosa no generaron precipitaciones pluviales representativas.



Figura 1. Unidad experimental del techo verde extensivo tipo modular.

Después de cada evento pluvial, se recolectó la precipitación pluvial de los contenedores, midiendo y registrando el volumen de agua recolectado. Así mismo, se recolectó la escorrentía del techo convencional al final de la bajante del mismo edificio. En el caso de las bandejas modulares, se prepararon muestras compuestas de cada tratamiento experimental, empleando proporciones iguales de agua acumulada en las bandejas de cada tratamiento. Cada muestra de los grupos control y de los tratamientos experimentales fue etiquetada y analizada el mismo día de su recolección.

3.7. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

Los parámetros que se analizaron para los dos grupos control y los cuatro tratamientos experimentales fueron pH, conductividad eléctrica (CE), turbiedad, color, nitratos (NO_3^-), amonio (NH_4^+), ortofosfato (PO_4^{3-}) y demanda química de oxígeno (DQO). El pH y la CE se determinaron con medidores portátiles (Hanna Instruments). Para la turbiedad y el color se empleó el colorímetro portátil DR 900 (Hach Company). Los nitratos fueron determinados con el método del ácido cromotrópico (Method 10020, Hach Company) el cual indicaba presencia de nitratos si la muestra se tornaba de color amarillo. Para el amonio se empleó el método salicilato (Method 10031, Hach Company), utilizando como reactivos el salicilato de amoniaco y cianurato de amoniaco. Los ortofosfatos se midieron con el método del ácido ascórbico (Method 8048, Hach Company), de tal forma que desarrollaba un color azul si existía la presencia de fósforo en la muestra. Este método se encuentra aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA, Ascorbic Acid Method, Hach Company). Finalmente, la DQO se analizó con el Método de Digestión del Reactor (Method 8000), de igual forma método aprobado por la USEPA (Reactor Digestion Method, Hach Company), para este análisis, como su nombre lo indica, se empleó el reactor de digestión DRB200 el cual permitió la reacción química a alta temperatura, también se empleó el colorímetro portátil DR 900, ambos de Hach Company.

3.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.8.1. Análisis de varianza

En primera instancia, se verificó el cumplimiento de dos condiciones para la aplicación del análisis de varianza (ANDEVA) de una sola vía para comparaciones múltiples: *i*) que los datos se comporten normalmente y *ii*) que exista igualdad de varianza entre los grupos experimentales. Para la condición de normalidad se empleó la prueba de Shapiro-Wilk mientras que una prueba F es utilizada para revisar el supuesto de homocedasticidad.

El ANDEVA de una sola vía se empleó para determinar diferencias significativas entre los diversos grupos experimentales. Las pruebas estadísticas se realizaron en tres etapas, en la primera se aplicó la prueba de Tukey para encontrar diferencias significativas entre los grupos control y los cuatro tratamientos experimentales con respecto a los parámetros fisicoquímicos, pH y turbiedad. En la segunda etapa se empleó la prueba de Dunnett para comparar los tratamientos experimentales contra su grupo control correspondiente con respecto a la DQO y, finalmente, para los nutrientes (nitratos, fosfatos y nitrógeno amoniacal) se realizaron pruebas T, para conocer si existen diferencias significativas entre las medias de los grupos experimentales con relación a la intensidad de los eventos pluviales.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MONITOREO DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL

En la **Tabla 4** se muestra el total de eventos pluviales muestreados por mes comparados con los ocurridos según la CONAGUA y se evidencia un mayor número de eventos pluviales ocurridos en contraste con los muestreados, esto a causa de que no todos los frentes fríos arribaron la ciudad de Villahermosa, en algunos casos solo se presentó el descenso de temperatura, nubosidad o llovizna, por ello, al tener menor cantidad de eventos analizados respecto a los ocurridos, se decidió muestrear el evento pluvial del mes de Junio, con fin de obtener más datos, aunque no es considerado como frente frío, presentó características de serlo y ocurrió a principios del mes.

Tabla 4. Frentes fríos en el periodo marzo-mayo de 2019

MES	HISTÓRICOS	FRENTE FRÍOS		MUESTREADOS
		PROYECTADOS	OCURRIDOS 2019	
Marzo	8	2	7	5
Abril	5	5	5	1
Mayo	5	4	7	2
Junio				1

De igual forma se presentan las fechas de los eventos pluviales muestreados (**Tabla 5**) reportando la cantidad (mm) de precipitación generada y de acuerdo con ello se clasifica la intensidad de la lluvia en baja o elevada; considerando como baja a precipitaciones acumuladas menores o iguales a 10 mm y como alta, a precipitaciones mayores de 10 mm. Esta clasificación se basó de acuerdo con el término de lluvia de la CONAGUA; es decir, se considera lluvia con precipitaciones mayores de 0.5 mm y las lluvias fuertes poseen precipitaciones mayores a 25 mm, dado que en época de frentes fríos se presentan pocos eventos pluviales mayores a 25 mm, para este estudio se optó en reducir el umbral de lluvias fuertes tomando en cuenta los datos de cantidad de lluvia reportados en el muestreo.

Tabla 5. Eventos pluviales en el periodo marzo-junio de 2019

MES	CANTIDAD DE PRECIPITACIÓN (mm)	INTENSIDAD DE LLUVIA
Marzo		
05/03/2019	13.48	Elevada
06/03/2019	16.50	Elevada
18/03/2019	8.90	Baja
19/03/2019	2.39	Baja
20/03/2019	38.30	Elevada
Abril		
02/04/2019	2.15	Baja
Mayo		
30/05/2019	3.20	Baja
31/05/2019	11.41	Elevada
Junio		
03/06/2019	30.19	Elevada

Las escalas grises de la **Figura 2** muestran la relación entre el descenso de temperatura y los eventos pluviales muestreados que se señalan en la **Tabla 5**, conforme la línea de precipitación asciende las líneas de temperatura del aire descienden. Incluso se puede apreciar que existen otros descensos de temperatura y nulo ascenso en la línea de precipitación, reiterando que para esos casos no se presentaron precipitaciones.

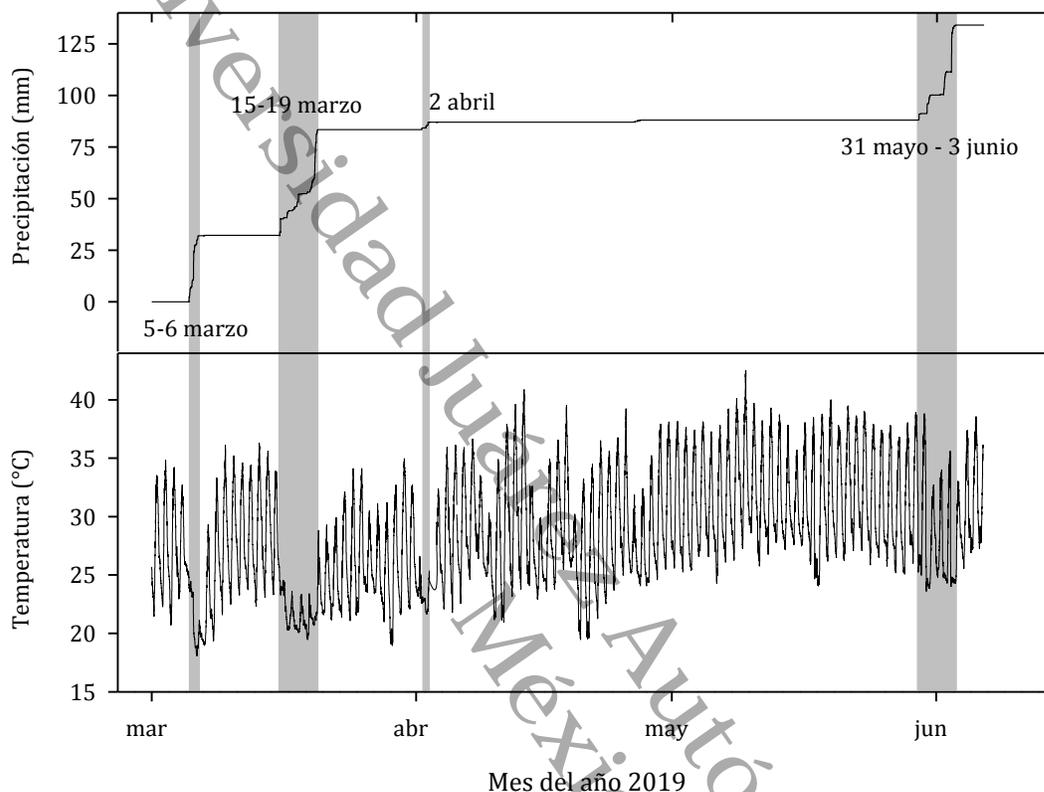


Figura 2. Tendencia temporal de la temperatura del aire y la precipitación pluvial en el área de estudio.

4.2. DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN PLUVIAL

De acuerdo con el método de cálculo de la Organización Panamericana de la Salud, (2004) se requiere conocer la precipitación promedio mensual para determinar la demanda mensual y el volumen de almacenamiento.

4.2.1. Precipitación promedio mensual

Para la ejecución del análisis matemático la guía propone promediar los valores de los últimos 10 a 15 años como se indica en la ecuación (3) sin embargo no fue necesaria su ejecución debido a que esta información es pública para la ciudad de Villahermosa y se obtuvo de los

datos normales históricos de la CNA Servicio Meteorológico nacional, a partir de la precipitación (mm) normal histórica de 1981 a 2010.

4.2.2. Determinación de la demanda mensual del agua en una vivienda

El cálculo de la demanda mensual se realizó a partir de la ecuación (4), en donde el número total de usuarios beneficiados es 4 por el número de días muestreados correspondientes a cada mes por la dotación (L/hab/día) y la dotación correspondiente a cada beneficiado del sistema de captación.

4.2.3. Determinación del volumen del tanque de almacenamiento

Para poder determinar el volumen del tanque de almacenamiento es necesario calcular la oferta de agua correspondiente a cada mes, para ello se empleó la Ec. (5), considerando la precipitación promedio mensual por el coeficiente de escorrentía igual a 0.6 proporcionado por De Cuyper *et al.* (2004). Después, se supone un área de techo de 100 m². Finalmente, a partir de los resultados del cálculo anterior se realizó la Ec. (8) para determinar el volumen del tanque de almacenamiento. Los resultados se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Resultados del sistema de captación pluvial

	PRECIPITACIÓN NORMAL HISTÓRICA 1981-2010 (Estación Villahermosa DGE)											
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
1. Precipitación promedio mensual												
Precipitación promedio mensual (L/m ² = mm)	297.1	183.6	149.5	127.9	84.6	40.9	34.4	101.9	216	170	242.7	323.8
2. Determinación de la demanda mensual de agua en una vivienda												
Número de días del mes analizado	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30
Número de usuarios beneficiados	4											
Dotación (L/hab/día)	135.7	83.5	64.3	53.8	36.4	11.7	8.9	41.2	99.7	74.2	109.4	153.6
Demanda mensual (m ³) Ec. (4)	16.8	10.0	8.0	6.7	4.1	1.5	1.1	5.1	12.0	9.2	13.6	18.4
3. Determinación del volumen del tanque de almacenamiento												
Coficiente de escorrentía (-)	0.6											
Área de captación (m ²)	100											
Oferta de agua en el mes (m ³) Ec. (5)	17.83	11.02	8.97	7.67	5.08	2.45	2.06	6.11	12.96	10.2	14.562	19.428
Volumen del tanque de almacenamiento (m ³) Ec. (8)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

4.3. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

Con respecto al pH (**Figura 3**), el agua pluvial presentó valores variando en un intervalo entre 4 y 7.6, siendo particularmente observable que los valores de pH ácidos se alternaron con los valores de pH neutros o ligeramente alcalinos. En referencia a los SDT, varió entre 12 y 130 ppm, y se encontró que no existe una correlación directa con el pH, ya que el pH permite conocer solo la actividad de los iones hidrógenos e hidroxilos (OH^-) presentes en el medio, los cuales son causantes de la acidez o alcalinidad (Romero, 2008). En tanto, SDT expresa el contenido de sales solubles y en su caso existe una correlación directa con la conductividad eléctrica (Sawyer *et al.*, 2001).

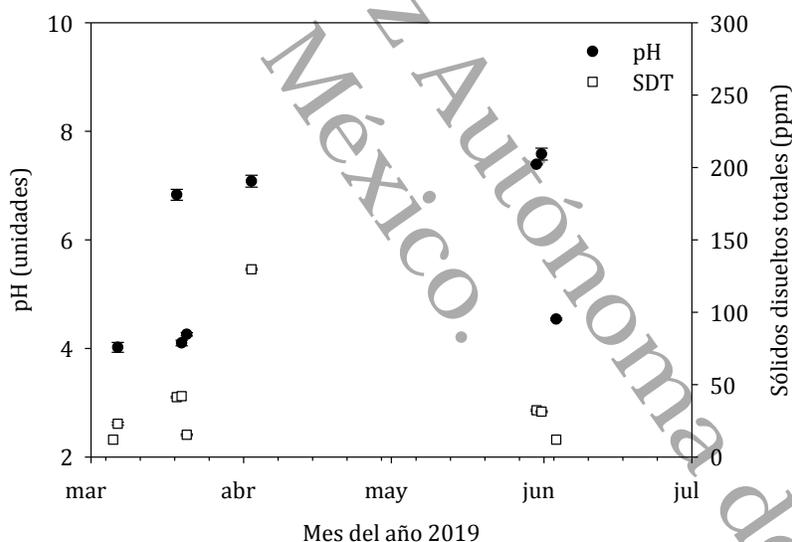


Figura 3. pH y Sólidos Disueltos Totales en función del tiempo para el grupo control PP

En cuanto a la esorrentía del techo convencional el pH osciló entre 6.4 y 7.5 (**Figura 4**). A pesar de que el rango fue mayor que la precipitación pluvial, es decir, no presentó pH menores a 5, sí se presentaron eventos pluviales donde el pH de la precipitación pluvial fue alto mientras que el pH de la esorrentía del techo convencional fue menor en dos unidades. Los

SDT por su parte, se mantuvieron en un rango por debajo de los 130 ppm, obteniéndose datos a partir de 24 y 130 ppm.

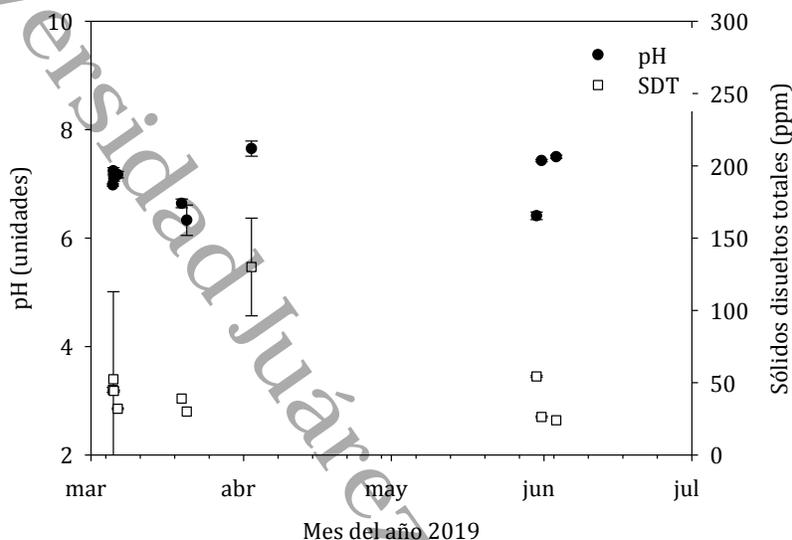


Figura 4. pH y Sólidos Disueltos Totales en función del tiempo para el grupo control TC.

El pH de la escorrentía proveniente de cada uno de los tratamientos experimentales del techo verde fue significativamente más alto que la precipitación pluvial y que la escorrentía del techo convencional, con una tendencia a mantenerse en un rango de 7 y 8.3, una posibilidad es la lixiviación de cationes formadores de bases de sustratos, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ , lo que resulta en un aumento del valor del pH en el lixiviado (Chi-Feng *et al.*, 2018), esto se le atribuye por su composición química a la agrolita (Figura 5). En contraste, la cantidad de SDT fue más alta que la precipitación pluvial y el techo convencional, encontrándose que la proporción fibra de coco y la especie *T. pallida*, era más alta al inicio del muestreo, arrojando datos elevados siendo el más alto 1159 ppm para FC6P; sin embargo, conforme ocurrían los eventos pluviales la cantidad de SDT disminuyó en todos los tratamientos experimentales, lo cual podría explicarse como consecuencia de la intemperización del sustrato.

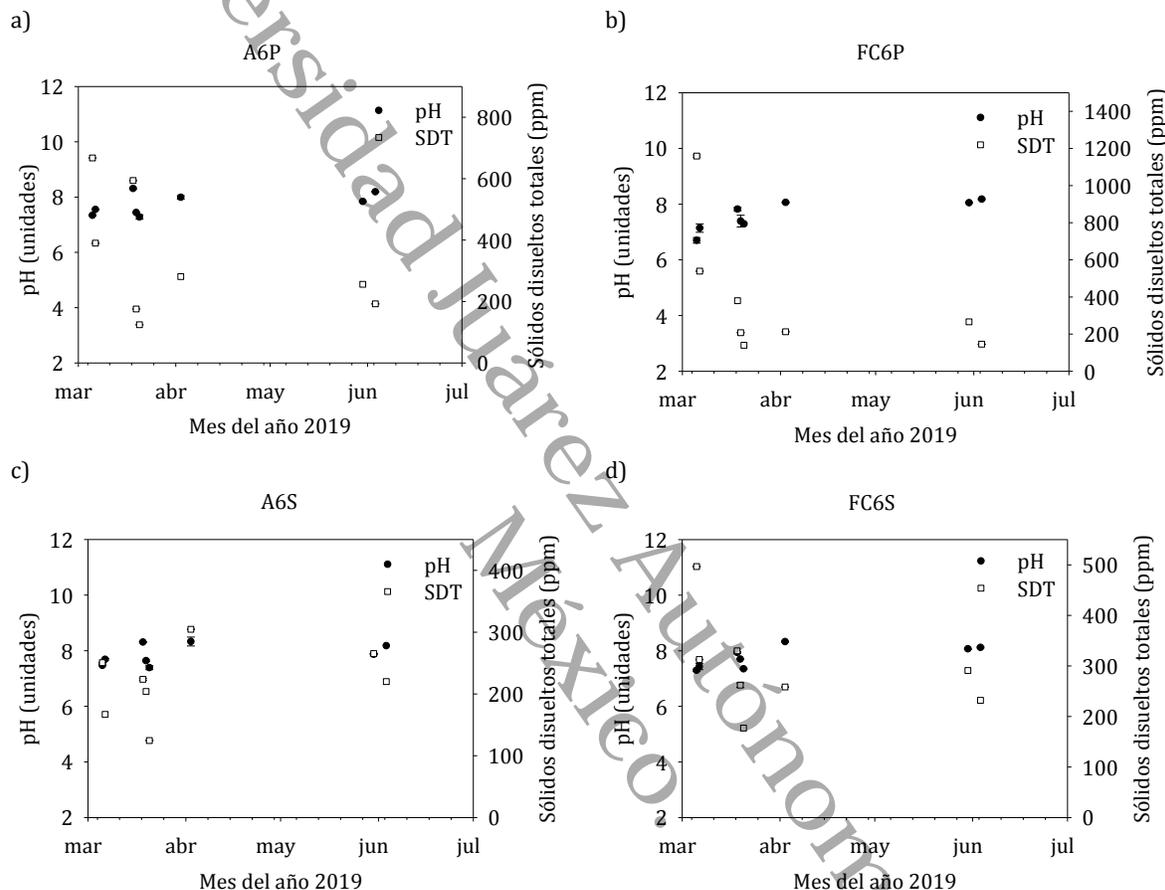


Figura 5. pH y SDT en función del tiempo para los tratamientos experimentales.

Con respecto a la turbiedad y el color del agua pluvial (PP), la precipitación pluvial presentó turbiedades menores a 5 FAU (Figura 6). Debe notarse que la turbiedad tendía a aumentar cuando el lapso entre eventos pluviales era mayor. Referente al color del agua, varió entre 7.7 y 84.7 U.C. Pt-Co. Como en el caso de la turbiedad, los registros más altos se presentaron después de un periodo de tiempo grande entre eventos pluviales.

En referencia a la turbiedad y color del techo convencional (TC), la turbiedad aumentó de 0 a 43 FAU, de la misma forma el color varió entre 45 y 480 U.C. Pt-Co (Figura 7). Probablemente

este aumento se debe a que el techo verde se convierte en un reservorio de material particulado que se deposita por vía húmeda o seca.

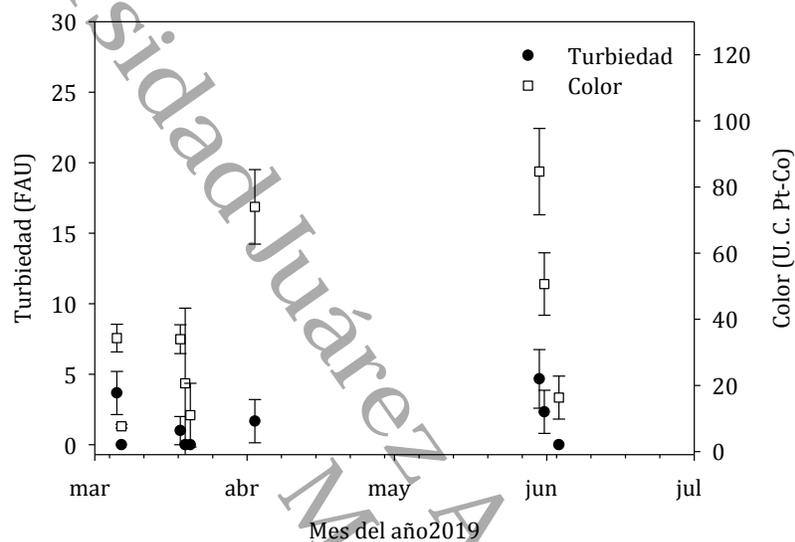


Figura 6. Turbiedad y Color en función del tiempo para el grupo control PP.

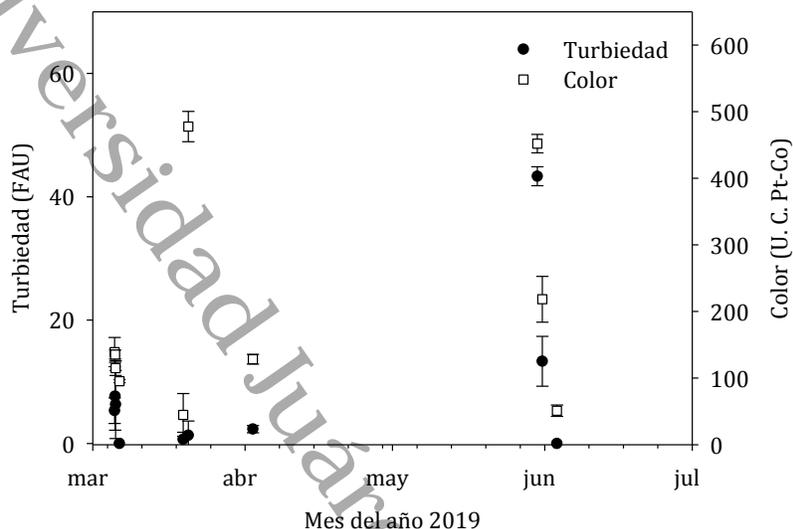


Figura 7. Turbiedad y Color en función del tiempo para el grupo control TC.

En la **Figura 8** se presentan los perfiles de turbiedad y color para los cuatro grupos experimentales. Con respecto a la turbiedad, en los cuatro grupos experimentales se presentaron turbiedades más altas con respecto a los grupos control, variando entre 10 y 130 FAU, siendo *T. pallida* la especie vegetal que presentó mayores valores de turbiedad. En cuanto al sustrato, la mezcla predominante de fibra de coco mostró mayores valores de turbiedad y de color. Los datos de color mantuvieron un rango de 208 y 1813 (U. C. Pt-Co.) siendo el más bajo para la proporción de agrolita y el más alto para fibra de coco. De igual forma, la especie vegetal *T. pallida* mantuvo altas medidas de color. Esto podría atribuirse a que cuando las partículas finas presentes en el sustrato se agotan y las plantas crecen, el sustrato se compacta mejor y la concentración de partículas disminuye conforme sucede cada evento pluvial (Chi-Feng *et al.*, 2018).

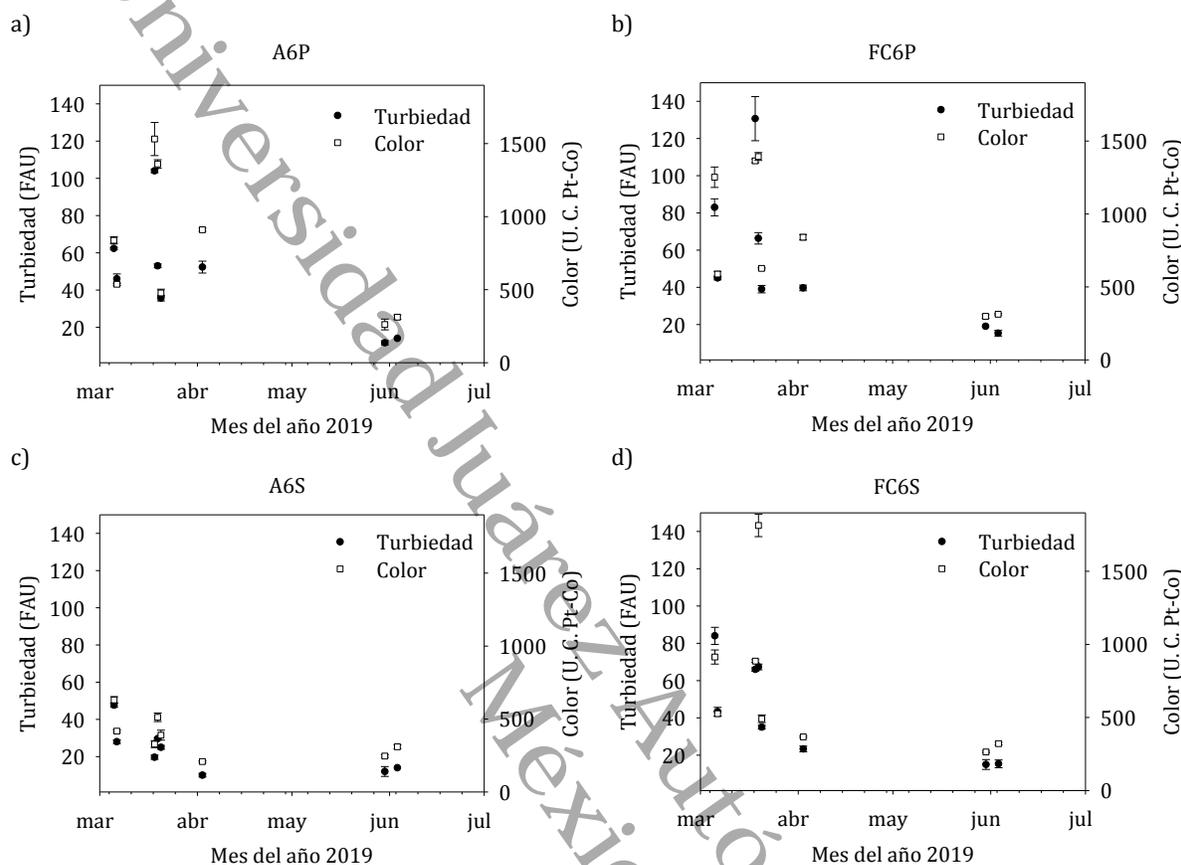


Figura 8. Turbiedad y Color en función del tiempo para los grupos experimentales

Algo similar sucedió en el estudio de Chi-Feng *et al.* (2018), ellos estudiaron tres tipos de sustratos y tres tipos de especies vegetales y hallaron diferencias significativas para cada uno, lo que sugieren que plantas con raíces delgadas y poco profundas, que crecen en sustratos de partículas gruesas pueden no compactar el sustrato, lo que genera mayores concentraciones de sólidos y una mayor pérdida de sustratos.

4.4. CAPACIDAD DE REDUCCIÓN DE NUTRIENTES

En la **Figura 9** se resumen los resultados de la determinación de nitratos y nitrógeno amoniacal en el grupo control de precipitación pluvial. En los primeros muestreos del mes de marzo los niveles de nitratos (NO_3^-) eran mayores al nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$); sin embargo, a partir del mes de abril esta tendencia se invirtió, siendo más altos los niveles del nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$). El evento pluvial ocurrido en el mes de abril fue el que presentó mayor cantidad de nutrientes, 2.8 mg/L para NO_3^- y 12 mg/L para $\text{NH}_3\text{-N}$. Conforme a los datos obtenidos en este estudio, el evento pluvial del mes de abril registró menor cantidad de precipitación pluvial con respecto al resto de los demás eventos, teniendo un valor de 2.15 mm. De acuerdo con datos de la CONAGUA (2019), en abril, la lluvia acumulada promedio mensual nacional es de 18.6 mm en base a la climatología 1981-2010. Para abril de 2019 se previó una lámina de 15.5 mm, que representa un 16.6% por debajo del promedio mensual. Y condiciones por debajo del promedio para estados como Tabasco.

Por su parte, en muestras del mes de marzo el techo impermeable (**Figura 10**) no fue capaz de reducir considerablemente la concentración de nitratos (NO_3^-) que contenía originalmente el agua pluvial. Para el evento pluvial de abril la escorrentía del techo impermeable redujo la concentración de nitratos (NO_3^-) a solo 1.7 mg/L (2.8 mg/L para el caso del agua pluvial). En el primer evento pluvial del mes de mayo aumentó la concentración de NO_3^- a 1 mg/L y el resto del muestreo se mantuvo igual que los niveles de la precipitación pluvial. En tanto al nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) sucedió algo similar, en los muestreos de marzo la concentración fue la misma que la del agua pluvial, mientras que en el evento pluvial del mes de abril el techo convencional redujo al $\text{NH}_3\text{-N}$ a 6 mg/L (12 mg/L encontrado para el agua pluvial). En contraste, el primer evento pluvial ocurrido en mayo aumentó la concentración de $\text{NH}_3\text{-N}$ a 7 mg/L, siendo ésta la concentración más alta reportada para la escorrentía del techo convencional.

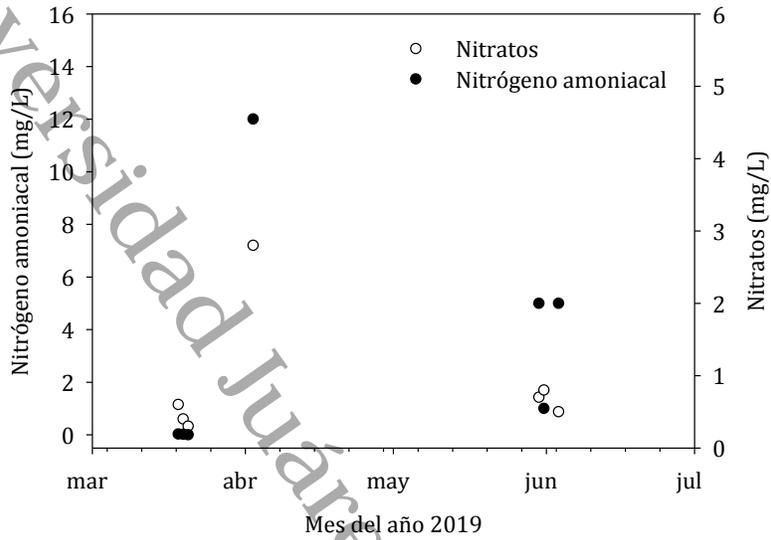


Figura 9. Nitratos y nitrógeno amoniacal en función del tiempo para el grupo control PP.

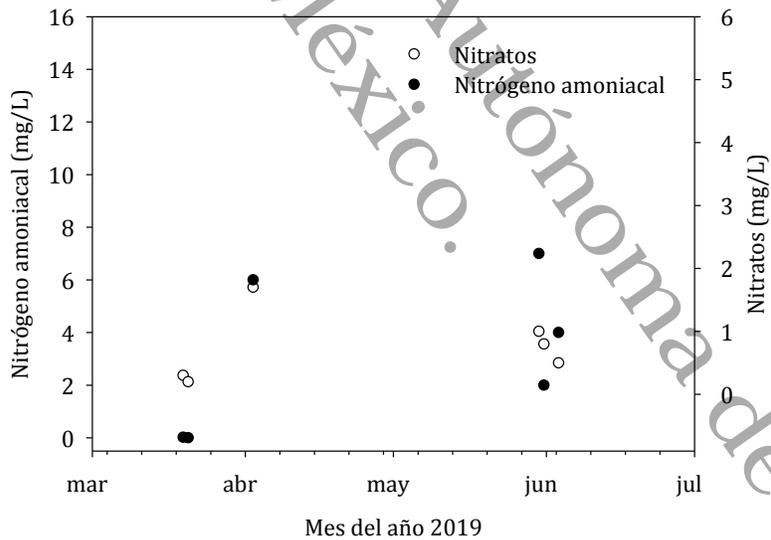


Figura 10. Nitratos y nitrógeno amoniacal en función del tiempo para el grupo control TC.

En la **Figura 11** se compendian las concentraciones de NO_3^- y $\text{NH}_3\text{-N}$ para los cuatro grupos experimentales. Los grupos experimentales presentaron menores cantidades de estos nutrientes en comparación al agua pluvial e iguales o menores respecto a la escorrentía del

techo convencional. A excepción del grupo experimental FC6S que reportó 0.02 mg/L de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) en el muestreo del mes de marzo, el resto de los grupos presentaron valores cercanos a 4 mg/L de $\text{NH}_3\text{-N}$ ocurrido en el muestreo del mes de junio. En el evento pluvial destacado del mes de abril, el grupo experimental A6P redujo la cantidad de nitratos (NO_3^-) a 0.3 mg/L y la cantidad más alta reportada para éste fue de 0.5 mg/L NO_3^- en el muestreo del mes de junio. El grupo FC6P reportó 0.2 mg/L NO_3^- para el mes de abril y al igual que A6P, el rango más alto fue de 0.5 mg/L NO_3^- en el muestreo de junio. Por su parte A6S en el evento pluvial de abril redujo a 0.1 mg/L NO_3^- y su rango más alto reportado fue de 0.5 mg/L NO_3^- para el mes de mayo. Finalmente, FC6S en el evento del mes de abril reportó 0.1 mg/L NO_3^- mientras que la cantidad más alta reportada fue 0.4 mg/L NO_3^- en los muestreos de los meses de mayo y junio. Chi-Feng *et al.* (2018), también encontraron concentraciones de $\text{NH}_3\text{-N}$ más altas en el agua de lluvia, mientras que la concentración de $\text{NH}_3\text{-N}$ capturado por el techo verde mostró concentraciones bajas (<0.1 mg/L) en todos los tipos de sustratos y no cambiaron con el tiempo. Lo que implica que parte del $\text{NH}_3\text{-N}$ en el agua de lluvia fue capturado por el techo verde. Referente a NO_3^- detectaron diferencias según el tipo de sustrato y especies vegetales, teniendo diferencias más claras en las plantas que el sustrato. En sus sustratos “normal” (sustrato comercialmente común en Taiwán) y “mezclado” (vidrio reciclado y sustrato común de Taiwán) los NO_3^- disminuyeron inicialmente, aunque después aumentó ligeramente, mientras que en su sustrato “ligero” (humus, zeolita, fibra reciclada y franco arenoso) el NO_3^- aumentó significativamente con el tiempo, posiblemente debido a la fuerte nitrificación en los sustratos, lo que indica un uso aparente de N por parte de plantas. De la misma manera Todorov *et al.* (2018), en su estudio de cuatro años sobre la calidad de la escorrentía de un techo verde extensivo descubrieron que para el $\text{NH}_3\text{-N}$ la concentración promedio de la escorrentía del techo impermeable (techo convencional) era más bajas que la precipitación pluvial, también reportaron que las concentraciones en la escorrentía del techo verde fueron significativamente más bajas que las entradas de la precipitación pluvial y techo impermeable, incluso, obtuvieron diferencias estadísticamente significativas en la pérdida de masa de $\text{NH}_3\text{-N}$ por el techo verde con vegetación en temporada de crecimiento y no crecimiento, siendo más bajas en la temporada de no crecimiento. Finalmente, para los NO_3^- al igual que en este estudio, ellos reportaron que las concentraciones promedio de NO_3^- en el agua pluvial, por deposición global y en el techo impermeable durante el período de cuatro

años, fueron inferiores a las concentraciones en el drenaje del techo con vegetación, aunque la diferencia no fue estadísticamente significativa.

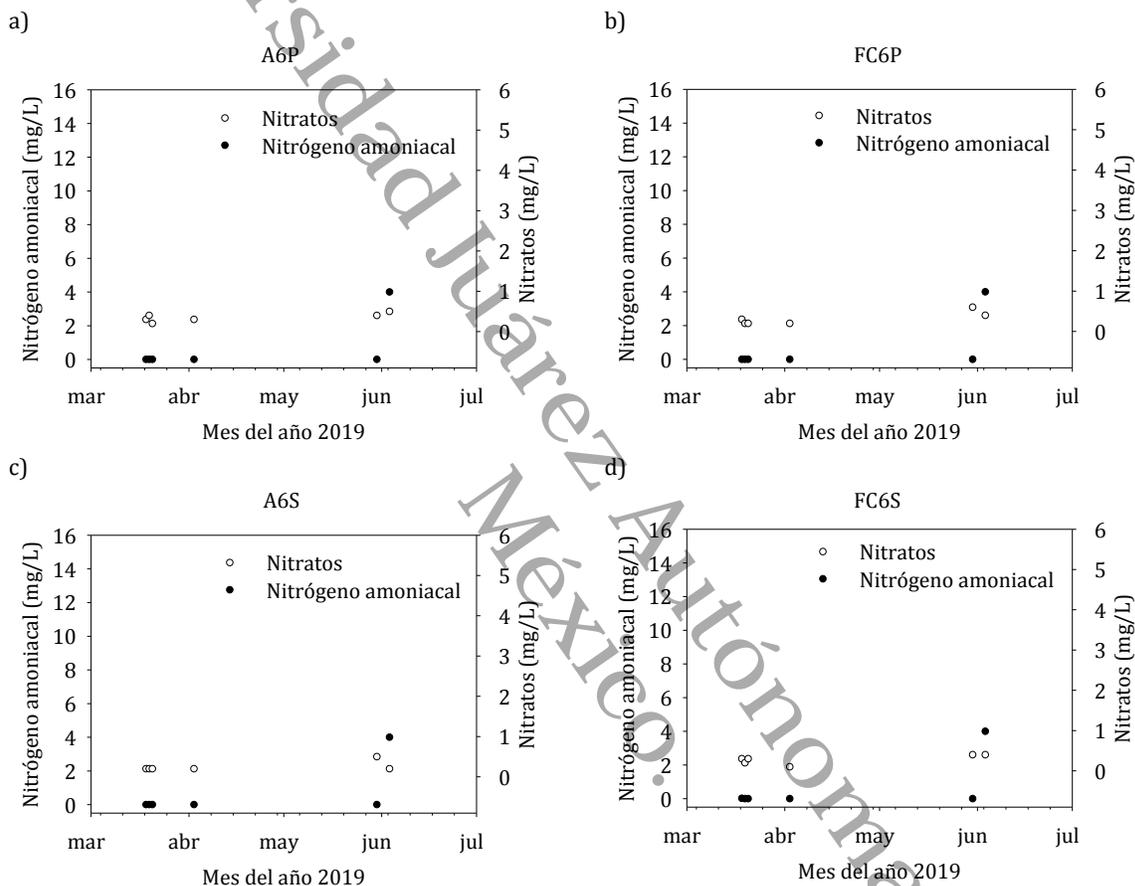


Figura 11. Nitratos y nitrógeno amoniacal en función del tiempo para los cuatro grupos experimentales.

Con respecto a la demanda química de oxígeno (Figura 12), la precipitación pluvial reportó valores de DQO menores a 45 mg/L, este último ocurrido en el mes de abril, mientras que la escorrentía del techo convencional varió entre 3 mg/L y 98 mg/L.

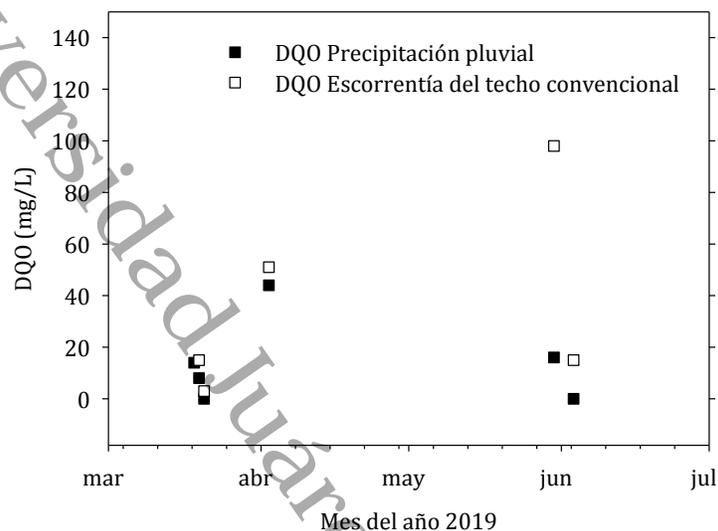


Figura 12. DQO del agua pluvial (PP) y de la escorrentía del techo convencional (TC) en función del tiempo

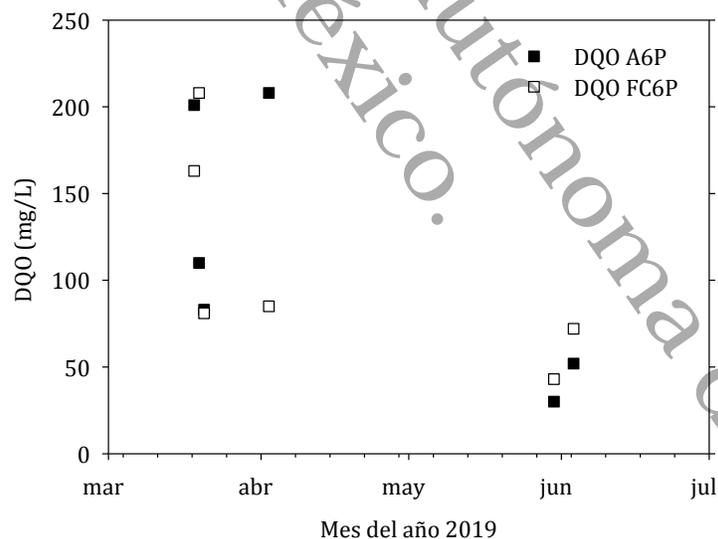


Figura 13. DQO de *T. pallida* para dos mezclas.

Los grupos experimentales aumentaron considerablemente las cantidades de DQO (Figura 13), para el caso del grupo A6P su rango varió entre 30 mg/L y 208 mg/L, presentándose el valor más alto en el mes de abril. Por su parte, el grupo FC6P mostró valores entre 43 mg/L y

208 mg/L presentando el valor más alto en el mes de marzo. Así mismo, Chi-Feng *et al.* (2018) reportaron cargas elevadas de DQO en la esorrentía del techo verde y examinaron que la concentración de DQO se ve afectada por el medio de sustrato y no tiene relación directa con la capa de vegetación. En sus resultados demuestra que en un sustrato ligero la concentración de DQO se eleva mucho más que con otros materiales de sustrato. La fuente de DQO, como sugieren Zhang *et al.* (2015), pudiera deberse a la materia orgánica del sustrato y a la descomposición vegetal.

De todos los grupos experimentales (Figura 14), A6S fue el que presentó menores cantidades de DQO, con un rango de entre los 33 mg/L a 92 mg/L, al igual que A6P su rango más alto ocurrió en el mes de abril. Esta disminución de DQO en el grupo A6S pudiera deberse a la composición del sustrato (60% agrolita/40% fibra de coco) siguiendo con lo mencionado de Zhang *et al.* (2015), al no haber mayor proporción de materia orgánica en este caso fibra de coco, se vio mayormente favorecido por la agrolita. Finalmente, el grupo FC6S mostró concentraciones en el intervalo de 39 mg/L a 209 mg/L, siendo este último valor, el correspondiente al mes de marzo.

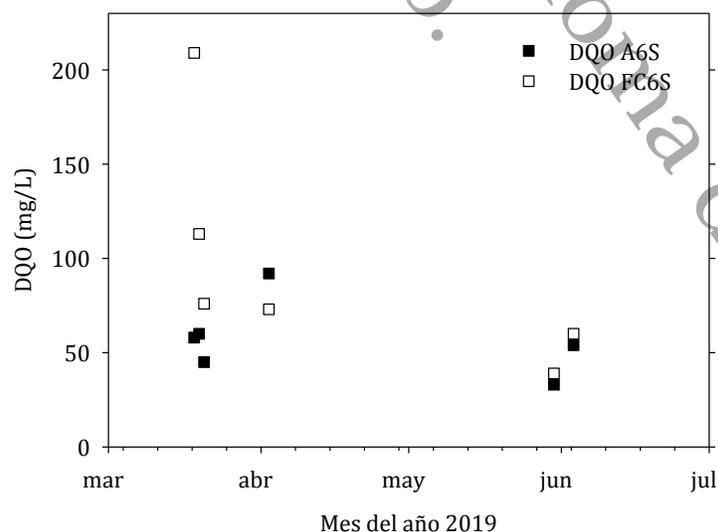


Figura 14. DQO de muestras de módulos de *T. spathacea* para ambas mezclas de sustrato.

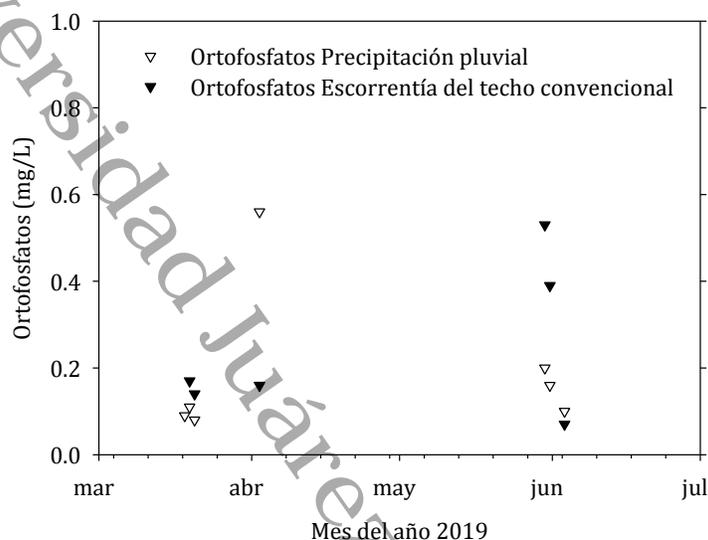


Figura 15. PO_4^{3-} para el agua pluvial y para la escorrentía del techo convencional en función del tiempo

En lo que respecta a los ortofosfatos (PO_4^{3-}) obtenidos en las muestras de precipitación pluvial (**Figura 15**), estos variaron entre 0.08 mg/L y 0.56 mg/L mientras que la escorrentía del techo convencional, a pesar de que no excedió el rango de PO_4^{3-} obtenidos en la precipitación pluvial fue similar (de 0.07 mg/L a 0.53 mg/L). El agua pluvial por lo general contiene fósforo en concentraciones muy bajas, mientras que en el caso de la escorrentía esta puede estar contaminada por fósforo que se origina a partir de la excreta de aves y animales (Czemiel, 2010).

Por su parte, los grupos experimentales A6P y FC6P aumentaron notablemente las cantidades de ortofosfatos (PO_4^{3-}), el grupo A6P presentó un intervalo de 0.12 mg/L a 3.38 mg/L, mientras que FC6P varió entre 0.24 mg/L y 4.43 mg/L (**Figura 16**). Estudios realizados sobre la escorrentía a partir de techos verdes indican que estos elevan la concentración de fósforo (P), Czemiel *et al.* (2006) sugieren que el fósforo en la escorrentía del techo con vegetación aparece principalmente en forma de ortofosfato, lo que podría significar que proviene de los fertilizantes aplicados previamente y, en general, los techos relativamente nuevos y

comúnmente fertilizados recientemente parecen contribuir con más fósforo a la escorrentía que los techos más viejos. A pesar de ello, en particular en este estudio no se utilizó ningún tipo de fertilizante, pero existe la posibilidad de que la especie vegetal *T. spathacea* al ser obtenida de un vivero comercial y a pesar de que fue lavada antes de su plantación a la bandeja modular, quedaran restos de algún fertilizante en sus raíces por lo que explicaría por qué en los primeros muestreos se hallaron mayores concentraciones de PO_4^{3-} , además, las bandejas modulares de techo verde están expuestas libremente a material particulado que pudieron depositarse sobre estas.

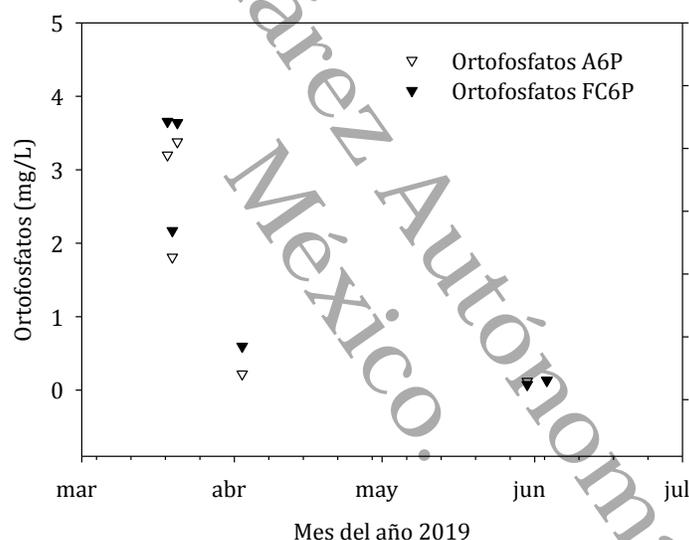


Figura 16. PO_4^{3-} de muestras provenientes de módulos de *T. pallida* para ambas mezclas de sustrato.

Con respecto a la especie *T. spathacea* (**Figura 17**), el grupo A6S destacó de entre todos los grupos experimentales al presentar menores concentraciones de ortofosfato (PO_4^{3-}), manteniéndose en un rango entre 0.22 mg/L y 0.73 mg/L. El grupo FC6S varió en el intervalo de 0.27 mg/L y 3.77 mg/L. Cabe destacar que las concentraciones de PO_4^{3-} fueron disminuyendo en todos los grupos experimentales con respecto al tiempo, lo mismo que sucedió con Chi-Feng *et al* (2018), sus tendencias altas de PO_4^{3-} también difirieron a lo largo del tiempo entre los tipos de sustrato. Todorov *et al.* (2018) detectaron que la concentración

de PO_4^{3-} en la precipitación pluvial, global y escorrentía del techo impermeable fue significativamente menor que la concentración de la escorrentía del techo verde, en su investigación la variabilidad de año a año de PO_4^{3-} en el drenaje del techo con vegetación durante los años de estudio fue alta, siguiendo patrones de concentración. La acumulación de PO_4^{3-} en el techo verde aumentó significativamente en los primeros años y se mantuvo elevada en el resto de los años del estudio. Representativamente observaron menor exportación de PO_4^{3-} durante los eventos de la temporada de no crecimiento en comparación con la temporada de crecimiento.

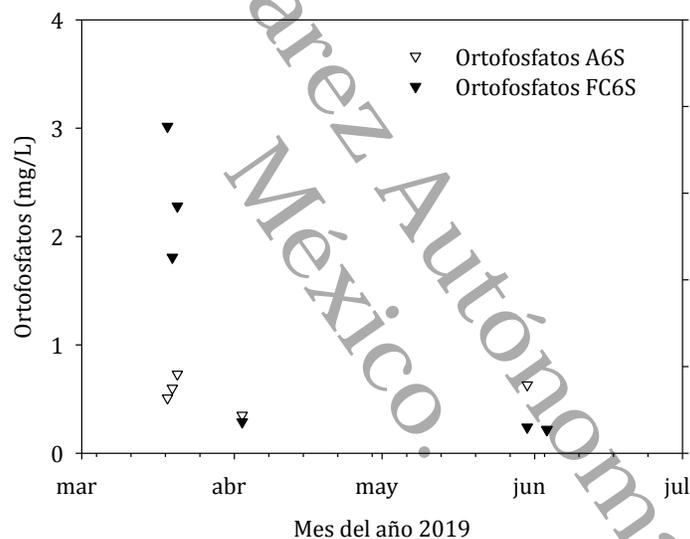


Figura 17. PO_4^{3-} de muestras provenientes de bandejas de *T. spathacea* para las dos mezclas de sustrato.

4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.5.1. Comportamiento del pH

Se realizó un ANDEVA de una sola vía por el método Tukey de comparaciones múltiples para identificar diferencias significativas entre todos los grupos experimentales, cada prueba se realizó para cada evento pluvial registrado. Para el primer evento pluvial (**Tabla 7**), el análisis de varianza del pH del agua demostró que todos los grupos experimentales, e inclusive el grupo control de la escorrentía del techo convencional (TC), mostraron diferencias significativas con respecto a la precipitación pluvial (PP), a modo que, se incrementaron los valores de pH con respecto al pH de la precipitación pluvial. El grupo control TC mostró diferencia significativa con respecto a la PP y a los grupos experimentales. Los grupos experimentales A6S, A6P y FC6S no presentaron ninguna diferencia entre sí; esto es, el valor del pH fue similar en los tres casos. Finalmente, el grupo experimental FC6P presentó diferencia significativa con respecto a los otros tres grupos experimentales en vista de que no mantuvo un rango similar, esto es, no aumentó significativamente el pH en comparación a los otros tres grupos.

Tabla 7. Comparación de los tratamientos respecto al pH para evento pluvial 1

Evento 1	Grupos comparados	Diferencia de medias	q	P	P<0.050
05/marzo/2019	A6S vs. PP	1.96	68.586	<0.001	Sí
	A6S vs. FC6P	0.77	26.944	<0.001	Sí
	A6S vs. TC	0.49	17.146	<0.001	Sí
	A6S vs. FC6S	0.17	5.949	0.012	No
	A6S vs. A6P	0.13	4.549	0.063	No
	A6P vs. PP	1.83	64.037	<0.001	Sí
	A6P vs. FC6P	0.64	22.395	<0.001	Sí
	A6P vs. TC	0.36	12.597	<0.001	Sí
	A6P vs. FC6S	0.04	1.4	0.913	No
	FC6S vs. PP	1.79	62.637	<0.001	Sí
	FC6S vs. FC6P	0.6	20.996	<0.001	Sí
	FC6S vs. TC	0.32	11.198	<0.001	Sí
	TC vs. PP	1.47	51.439	<0.001	Sí
	TC vs. FC6P	0.28	9.798	<0.001	Sí
	FC6P vs. PP	1.19	41.641	<0.001	Sí

Para el evento pluvial 5 (**Tabla 8**) el grupo control TC y los grupos experimentales presentaron diferencia significativa en relación con la PP. Sin embargo, no hubo diferencia significativa entre los cuatro tratamientos A6S, FC6S, A6P y FC6P.

Tabla 8. Comparación de los tratamientos respecto al pH para evento pluvial 5

Evento 5	Grupos comparados	Diferencia de medias	q	P	P<0.050
20/marzo/2019	A6S vs. PP	3.13	43.925	<0.001	Sí
	A6S vs. TC	1.06	14.875	<0.001	Sí
	A6S vs. A6P	0.11	1.544	0.876	No
	A6S vs. FC6P	0.10	1.403	0.912	No
	A6S vs. FC6S	0.04	0.561	0.998	No
	FC6S vs. PP	3.09	43.363	<0.001	Sí
	FC6S vs. TC	1.02	14.314	<0.001	Sí
	FC6S vs. A6P	0.07	0.982	0.979	No
	FC6S vs. FC6P	0.06	0.842	0.989	No
	FC6P vs. PP	3.03	42.521	<0.001	Sí
	FC6P vs. TC	0.96	13.472	<0.001	Sí
	FC6P vs. A6P	0.01	0.140	1	No
	A6P vs. PP	3.02	42.381	<0.001	Sí
	A6P vs. TC	0.95	13.332	<0.001	Sí
	TC vs. PP	2.07	29.049	<0.001	Sí

Los resultados del ANDEVA para el evento pluvial 7 (**Tabla 9**) indican también diferencias significativas entre la mayoría de los grupos experimentales, a excepción de la comparación de los grupos A6S y A6P y los grupos FC6S y FC6P.

Tabla 9. Comparación de los tratamientos respecto al pH para evento pluvial 8

Evento 7	Grupos comparados	Diferencia de medias	q	P	P<0.050
30/mayo/2019	FC6S vs. TC	1.66	88.731	<0.001	Sí
	FC6S vs. PP	0.68	36.348	<0.001	Sí
	FC6S vs. A6P	0.23	12.294	<0.001	Sí
	FC6S vs. A6S	0.2	10.69	<0.001	Sí
	FC6S vs. FC6P	0.02	1.069	0.97	No
	FC6P vs. TC	1.64	87.662	<0.001	Sí
	FC6P vs. PP	0.66	35.278	<0.001	Sí
	FC6P vs. A6P	0.21	11.225	<0.001	Sí
	FC6P vs. A6S	0.18	9.621	<0.001	Sí
	A6S vs. TC	1.46	78.04	<0.001	Sí
	A6S vs. PP	0.48	25.657	<0.001	Sí
	A6S vs. A6P	0.03	1.604	0.858	No
	A6P vs. TC	1.43	76.437	<0.001	Sí
	A6P vs. PP	0.45	24.054	<0.001	Sí
	PP vs. TC	0.98	52.383	<0.001	Sí

4.5.2. Comportamiento de la DQO

El ANDEVA de comparación múltiple contra el grupo control (prueba de Dunnett) permitió conocer la diferencia significativa de la PP y los grupos experimentales contra el grupo control TC con respecto a la demanda química de oxígeno. Para el análisis de varianza, se promediaron los datos de DQO de todos los eventos pluviales. Los resultados se encuentran en la **Tabla 10** donde se muestra que la DQO de la PP y los grupos experimentales FC6S y A6S no son estadísticamente diferentes a la DQO medida para el grupo TC; esto es, los valores de DQO se mantuvieron en concentraciones similares. La PP por naturaleza no presenta grandes concentraciones de DQO; sin embargo, como menciona Zaho *et al.* (2019) la calidad del agua pluvial depende de las condiciones atmosféricas y climáticas locales, resultado de contaminantes antropogénicos. Para los grupos FC6S y A6S se considera que fueron atribuidos por la especie vegetal *T. spathacea* al poseer abundantes hojas rígidas se produjo un efecto tipo sombrilla que disminuyó la velocidad de precipitación pluvial antes de que ésta ingresara a la unidad experimental. Lo anterior redujo el efecto de lavado del sustrato disminuyendo así la disolución de materia oxidable. Para los grupos A6P y FC6P se encontró diferencia estadísticamente significativa en comparación al grupo TC, estos grupos experimentales destacaron en aumentar la concentración de DQO, a lo que se atribuye que la planta *T. pallida* al tener una ramificación menor, el agua de lluvia tuvo mayor contacto directo con el sustrato.

Tabla 10. Comparación estadística de los grupos experimentales contra el grupo control

Comparación	Diferencia de las medias	Estadístico q'	P<0.050
TC vs. A6P	81.5	2.843	Sí
TC vs. FC6P	76.17	2.657	Sí
TC vs. FC6S	62.5	2.18	No
TC vs. A6S	24.5	0.855	No
TC vs. PP	19.2	0.695	No

4.5.3. Comportamiento de los nutrientes

Para determinar si existen diferencias significativas de nitratos en relación con la intensidad de eventos pluviales se realizó una diferencia de medias por el método T-test encontrándose los resultados de la **Tabla 11**. La intensidad de los eventos pluviales se dividió en precipitaciones bajas y elevadas. Se encontró diferencia de 0.23 en relación de concentración de nitratos de acuerdo con la intensidad del evento pluvial.

Tabla 11. Diferencia de medias de nitratos con relación a la intensidad de eventos pluviales

Intensidad de eventos pluviales comparados	N	Media	Desviación estándar	Error estándar
Precipitaciones bajas	18	0.59	0.44	0.104
Precipitaciones elevadas	18	0.36	0.12	0.0283

Diferencia: 0.23

5. CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó la capacidad de un techo verde extensivo para mejorar la calidad del agua pluvial durante la temporada de frentes fríos con un total de nueve eventos pluviales muestreados. Se compararon las pruebas de calidad del agua de la precipitación pluvial, la escorrentía del techo convencional y el drenaje de las unidades experimentales del techo verde. Se concluye lo siguiente:

De acuerdo con los valores de pH, el techo con vegetación fue capaz de mitigar eventos de lluvia ácida, siendo superior al techo convencional (grupo control).

En términos de nutrientes, el techo verde disminuyó las concentraciones de NO_3^- y $\text{NH}_3\text{-N}$ a pesar de ello, no se demostró una diferencia significativa. Por el contrario, elevó las concentraciones de DQO y PO_4^{3-} .

El techo convencional, a pesar de aumentar las concentraciones de DQO, fue superior al techo verde; no obstante, los grupos experimentales que contenían la vegetación de *T. spathacea* no fueron estadísticamente diferentes contra el techo convencional, comportándose en concentraciones similares. En contraste, los grupos que comprendían la vegetación de *T. pallida* fueron los que más elevaron las concentraciones de DQO. Aun cuando no se realizó la aplicación de ningún tipo de fertilizante se detectaron altas concentraciones de PO_4^{3-} en la descarga del techo verde mismas que fueron disminuyendo conforme ocurrían los eventos pluviales.

Además, se observó que existe una diferencia de medias estadísticamente significativa en las concentraciones de NO_3^- según la intensidad del evento pluvial. Así mismo, existen evidencias de que el material empleado como sustrato y la vegetación tienen una influencia importante en la calidad de la escorrentía.

La especie *T. spathacea* mostró mejor adaptación a las condiciones ambientales del techo, como temperaturas elevadas, radiación solar elevada, eventos de lluvia y sequía. Durante el estudio, *T. pallida* presentó problemas de adaptación. Finalmente, las dos mezclas de sustrato permiten el crecimiento de las especies vegetales, si bien, la proporción agrolita/fibra de coco (60/40) mostró mejores resultados, ya que la escorrentía de esta mezcla presentó menores niveles de nutrientes.

Conforme a los resultados de este estudio se concluye que la calidad del agua de la escorrentía del techo verde se ve afectada por el mayor contenido de nutrientes; por tanto, se acepta parcialmente la hipótesis que la calidad del agua proveniente de un techo verde extensivo es superior a la calidad del agua proveniente de un techo sin vegetación y a la calidad del agua pluvial ya que el techo verde es capaz de amortiguar el pH del agua pluvial, lo que permite su utilización directa con propósito de riego de áreas verdes como parques, campos deportivos y áreas residenciales. Sin embargo, el transporte del agua pluvial a través del sustrato incrementó los niveles de DQO y PO_4^{3-} lo que podría representar la necesidad de un tratamiento posterior.

REFERENCIAS

- Atkins P., & de Paula J. **2008**. *Atkins Química Física*. 8^{va} edición. Buenos Aires: Médica panamericana. 1096 p.
- Baird C. & Cann M. **2014**. *Química Ambiental* 2^{da} edición. España: Reverté. 776 p.
- Berndtsson J.C. **2010**. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering* 36(4), 351-360.
- Burszta-Adamiak E. **2012**. Analysis of the retention capacity of green roofs. *Journal of Water and Land Development* 16(I-VI): 3-9.
- Burszta-Adamiak E, Mrowiec M. **2013**. Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM. *Water Science and Technology* 68(1): 36-42.
- Canul Gómez, WA. **2014**. *Efecto de las Condiciones Ambientales Sobre el Establecimiento y Crecimiento de Especies Nativas en un Techo Verde*. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, México.
- Carpenter M.G.C., Todorov D., Driscoll T.C., Montesdeoca M. **2016**. Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. *Environmental Pollution* 218, 664-672.
- Carson TB. **2014**. *Evaluating green roof stormwater management in New York City: observations, modeling, and design of full-scale systems*. PhD Dissertation, Columbia University, USA.
- Castaño P. **2014**. *Techos verdes y sistemas de procesamiento de agua de lluvia*. Proyecto final de ingeniería industrial, Universidad Argentina De la Empresa. Argentina.
- Chi-Feng C., Shyh-Fang K., & Ji-Hao L. **2018**. Effects of recycled glass and different substrate materials on the leachate quality and plant growth of green roofs. *Ecological Engineering* 112, 10-20.
- Comisión Nacional del Agua. **2016**. Lineamientos técnicos: Sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda.
- Comisión Nacional del Agua. **2017**. *¿Sabes qué son los frentes fríos?* Recuperado de: <https://is.gd/xGPbqF>

- Comisión Nacional del Agua. **2017**. *Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas Rurales* (PROCAPTAR). Recuperado de: <https://is.gd/zhvzwz>
- Comisión Nacional del Agua. **2019**. *Precipitación*. Recuperado de: <https://is.gd/zHapKm>
- Comisión para la Cooperación Ambiental. **2008**. *Edificación sustentable en América del Norte*. Informe del Secretariado al Consejo conforme al artículo 13 del Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte.
- Cruz-Salaya NA., Córdova-Méndez EA. **2013**. *Efecto del Sustrato sobre el Crecimiento de Especies Tropicales para su Uso Potencial en Techos Verdes*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México.
- Czemiel J., Emilson T. & Bengtsson L. **2006**. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of the Total Environment* 355, 48-63.
- Czemiel J. **2010**. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering* 36, 351-360.
- De Cuyper, K, Dinne, K., Van De Vel, L. **2004**. *Rainwater Discharge from Green Roofs*. Symposium CIB W062 30th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings, Rotterdam, Netherlands.
- De Cuyper, K, Kuborn, X, Van den Bossche, P. **2010**. *A Standardized method for measuring the attenuating effect of green roofs on storm water discharge*. Symposium CIBW062, 36th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings, Sydney, Australia.
- Echeverría R., Álvarez H., Jiménez A., Barrea M., Palomera M., Álvarez P., Hernández E. **2018**. Acid rain in a Mexican site on the coast of the Gulf of Mexico. *Atmósfera* 4, 317-330.
- FLL, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau. **2008**. *Guidelines for the planning, construction and maintenance of green roofing – Green roof guideline*. FLL e.V., Bonn, Germany.
- Gargallo S., Solimeno A. & Martin M. **2018**. Which are the most sensitive parameters for suspended solids modelling in free water surface constructed wetlands? *Environmental Modelling & Software* 102, 115-119.
- González L. **2013**. Nitrógeno amoniacal, importancia de su determinación. *Mente & Materia* 4, 12-13.

- Li Y. **2014**. *Hydrologic performance analyses, modeling, and design tool development for green roof systems*, PhD Dissertation, University of Hawaii, USA.
- Korol E. & Shushunova N. **2016**. Benefits of a Modular Green Roof Technology. *Procedia Engineering* 161, 1820-1826.
- Liu W., Feng Q., Chen W., Wei W., Deo R. **2019**. The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments. *Journal of Hydrology* 569 230-238.
- May RWP. **2003**. Manual for the design of roof drainage systems. *A guide to the use of European Standard BS EN 12056-3:2000*, Report SR 620, HR Wallingford Group Ltd, England.
- Ministerio de Relaciones Exteriores. **2009**. *El vivir bien como respuesta a la crisis global*. 2^{da} edición. Bolivia: Diplomacia por la vida, 162 p.
- Melo S., Ferreira J., Chaves G., Martins P., Gavazza S. **2019**. Integrating conventional and green roofs for mitigating thermal discomfort and water scarcity in urban areas. *Journal of Cleaner Production* 219, 639-648.
- Moguel-Yanes J. **2016**. *Selección de Sustratos Orgánicos Sustentables para su Uso en un Techo Verde Extensivo con base en los Efectos sobre la Capa Vegetal*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, México.
- NMX-AA-007-SCFI-2013. Análisis de agua -Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 23 de enero de 2014.
- NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua -Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 11 de febrero de 2016.
- NMX-AA-045-SCFI-2001. Análisis de agua -Determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 01 de agosto de 2001.
- NMX-AA-093-SCFI-2018. Análisis de agua -Medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 26 de junio de 2018.

- NOM-015-CONAGUA-2007. Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 18 de agosto de 2009.
- Organización Panamericana de la Salud. **2004**. Guía de diseño para la captación del agua de lluvia.
- Padilla E., Carillo M., de los Rios J., Medina M., Margulis R., Sánchez M., de la Torre G., Gómez L., Nava J., Villafañe A. **2015**. Corrosion study of Fe-Al Intermetallic Alloys in Simulated Acid Rain. *Electrochemical Science* 10, 2141-2154.
- Programa Estatal de Acción Ante el Cambio Climático. **2011**. Programa de Acción ante el cambio climático del Estado de Tabasco, edición 2011.
- Romero I. **2008**. Medición de pH y dureza. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. SEMARNAT.
- Ruano M. **1998**. *Ecourbanismo, Entornos humanos sostenible: 60 proyectos*. Barcelona: Gustavo Gili. 188p.
- Şahin N. & Manioğlu G. **2019**. Water conservation through rainwater harvesting using different building forms in different climatic regions. *Sustainable Cities and Society* 44, 367-377.
- Sawyer C., McCarty P & Parkin G. **2001**. *Química para ingeniería ambiental*. 4^{ta} edición. Colombia: McGraw-Hill.
- Seidl J. **2015**. *Monitoring and Modeling the Hydrological Performance of Extensive Green Roof Systems*. Master of Science Thesis, University of Wisconsin-Milwaukee, USA.
- Shafique M, Kim R, Kyung-Ho K. **2018**. Green Roof for Stormwater Management in a Highly Urbanized Area: The Case of Seoul, Korea. *Sustainability* 10 (584).
- Sims W.A., Robison E.C., Smart C.C., Voogt A.J., Hay J.G., Lundholm T.J., Powers B., O'Carroll M.D. **2016**. Retention performance of green roofs in three different climate regions. *Journal of Hydrology* 542, 115-124.
- Solcerova A, Van F, Wang M, Rijdsdijk M, Van N. **2017**. Do Green roofs cool the air?. *Building and Environment* 111, 249-255.
- Todorov D, Driscoll T, Todorova S, Montesdeoca M. **2018**. Water quality function of an extensive vegetated roof. *Science of the Total Environment* 625, 928-939.

- Twort, A., Ratnayaka D & Brandt M. **2000**. *Water Supply*. 5^{ta} edición. USA: Butterworth-Heinemann.
- United States Environmental Protection Agency, USEPA. **2014**. *Evaluation of Green Roof Water Quantity and Quality Performance in an Urban Climate*. Report No. EPA/600/R-14/180, Office of Research and Development, September.
- Vijayaraghavan K., Harikishore D. & Yun Y. **2019**. Improving the quality of runoff from green roofs through synergistic biosorption and phytoremediation techniques: A review. *Sustainable Cities and Society* 46, 101-381.
- Viola F., Hellies M., Deidda R. **2017**. Retention performance of green roofs in representative climates worldwide. *Journal of Hydrology* 553, 763-772.
- Zhang Q., Miao L., Wang X., Liu D., Zhu L., Zhou B., Sun J. & Liu J. **2015**. The capacity of green roof to reduce stormwater runoff and pollution. *Landscape and Urban Planning* 144, 142-150.
- Zhang S., Zhang J., Yue T., Jing X. **2019**. Impacts of climate change on urban rainwater harvesting systems. *Science of the Total Environment* 665, 262-274.
- Zhang Z., Szota C., Fletcher T., Williams N., Farrell C. **2019**. Green roof storage capacity can be more important than evapotranspiration for retention performance. *Journal of Environmental Management* 232, 404-412.
- Zhao Y., Wang X., Liu C., Wang S., Wang X., Hou H., Wang J., Li H. **2019**. Purification of harvested rainwater using slow sand filters with low-cost materials: Bacterial community structure and purifying effect. *Science of the Total Environment* 674, 344-354.
- Zuo Y., Wang C., Van T. **2006**. Simultaneous determination of nitrite and nitrate in dew, rain, snow and lake water samples by ion-pair high-performance liquid chromatography. *Talanta* 70, 281-285.