



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

BIOLOGÍA EXPERIMENTAL

**CAPTURA DE CO₂ POR PLANTAS DE *Sedum stahlii* y *Sedum griseum* EN
CONDICIONES DE RIEGO Y TEMPORAL EN UNA AZOTEA VERDE
EXTENSIVA**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

SERGIO CAMACHO MONTIEL

TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: DRA. MARGARITA COLLAZO ORTEGA

FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

COMITÉ TUTOR: DR. ULISES YUNUÉN ROSAS LÓPEZ

INSTITUTO DE BIOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR: DRA. CLARA LEONOR TINOCO OJANGUREN

INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.

NOVIEMBRE DEL 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

BIOLOGÍA EXPERIMENTAL

**CAPTURA DE CO₂ POR PLANTAS DE *Sedum stahlii* y *Sedum griseum* EN
CONDICIONES DE RIEGO Y TEMPORAL EN UNA AZOTEA VERDE
EXTENSIVA**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

SERGIO CAMACHO MONTIEL

TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: DRA. MARGARITA COLLAZO ORTEGA

FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

COMITÉ TUTOR: DR. ULISES YUNUÉN ROSAS LÓPEZ

INSTITUTO DE BIOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR: DRA. CLARA LEONOR TINOCO OJANGUREN

INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.

NOVIEMBRE DEL 2023

COORDINACIÓN DEL POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
OFICIO FCIE/DAIP/461/2023
ASUNTO: Oficio de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar, UNAM
P r e s e n t e

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **22 de mayo de 2023** se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en el campo de conocimiento de **Biología Experimental** del estudiante **CAMACHO MONTIEL SERGIO** con número de cuenta **309102784** con la tesis titulada **“Captura de CO₂ por plantas de *Sedum stahlii* y *Sedum griseum* en condiciones de riego y temporal en una azotea verde extensiva”**, realizada bajo la dirección de la **DRA. MARGARITA COLLAZO ORTEGA**, quedando integrado de la siguiente manera:

Presidente: **DRA. MARÍA DEL ROCIO CRUZ ORTEGA**
Vocal: **DRA. SILKE CRAM HEYDRICH**
Vocal: **DRA. OFELIA MORTON BERMEA**
Vocal: **DRA. CHRISTINA DESIREE SIEBE GRABACH**
Secretario: **DRA. CLARA LEONOR TINOCO OJANGUREN**

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

A T E N T A M E N T E
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 28 de agosto de 2023

COORDINADOR DEL PROGRAMA



DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA

c. c. p. Expediente del alumno
AGNS/AAC/GEMF/EARR/mnm



Agradecimientos Institucionales

Al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto y contribuir en mi formación académica

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico que me permitió llevar a término mis estudios de maestría

Al Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado (PAEP), por el apoyo económico brindado para la divulgación científica de algunos aspectos abordados en este proyecto.

A la Dra. Margarita Collazo Ortega, mi tutora principal, por brindar en todo momento su apoyo y aliento para llevar a término este trabajo. Muchas gracias por su calidez y disponibilidad de compartir siempre su conocimiento.

Al Dr. Ulises Yunuén Rosas López por acogerme en su laboratorio y brindarme todas las facilidades para la elaboración de este trabajo. Muchas gracias por su calidad humana y atinadas observaciones.

A la Dra. Clara Leonor Tinoco Ojanguren que a pesar de la distancia siempre se mostró con toda la disponibilidad de aportar a este trabajo. Gracias por cada una de sus anotaciones, que me permitieron llevar a buen término este proyecto.

Agradecimientos A Título Personal

Al Jardín Botánico del Instituto de Biología de la UNAM, por facilitar el acceso a las instalaciones donde se realizó el experimento.

Al Dr. Juan Gerardo Ortiz Montiel, por siempre mantener abiertas las puertas del laboratorio, por su invaluable apoyo con el equipo de medición y por alentarme en todo momento a continuar con el posgrado, se le estima mucho.

Al Biol. Jerónimo Reyes Santiago por su apoyo en la obtención del material biológico utilizado en este trabajo y al Dr. Salvador Arias Montes por la facilidad para utilizar de la azotea verde del Jardín botánico del IB de la UNAM

Al Dr. Bruno Manuel Chávez Vergara por su disponibilidad para ayudarme a comprender los aspectos principales de la infiltración del suelo y proporcionarnos el infiltrómetro utilizado en este trabajo.

Al grupo de trabajo del Laboratorio de Raíces que en todo momento me hicieron sentir como en casa al utilizar un poco de su espacio, en especial a la Pas. de Biol. María Guadalupe Nuñez Dávila y al Pas. de Quím. Jonatan Abdiel Castillo Herrera por su gran ayuda durante la ejecución de este trabajo, sobre todo por la calidez y apoyo moral en aquellas extensas jornadas de mediciones.

Al Dr. Aldebaran Camacho Velázquez por su gran apoyo en el establecimiento de la azotea verde, su disponibilidad para ayudar en la realización de este trabajo y por compartir un poco de sus conocimientos, muchas gracias por todo.

A mi familia que me ha brindado su amor y confianza, que siempre estarán presentes en los momentos complicados para alentarme a continuar.

A mis amigos cercanos, por los días amenos y el tiempo de calidad, muchas gracias.

Dedicatoria

A Paola y Sebastián, mis amores y pilares en este mundo.

A mis padres, no importa como siempre estarán presentes en mi vida.

A mis abuelos, por mostrarme el valor de la vida.

El único pecado mortal es rendirse

S. King

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación mundial de emisiones de carbono para el 2018. (Tomado de Atlas del carbono. Global Carbon Project, 2021)	10
Figura 2. Capas de una azotea verde. (Tomado de Espinoza, 2021)	17
Figura 3. Tasa de asimilación diaria de CO ₂ en una planta MAC típica	18
Figura 4. <i>Sedum stahlii</i> (A) y <i>Sedum griseum</i> (B).	24
Figura 5. Limpieza (A), reubicación (B) y establecimiento(C) de la parcela experimental, azotea verde del Jardín Botánico, IBUNAM, Ciudad Universitaria.	25
Figura 6. Mapa de ubicación y diagrama de la distribución de especies en la azotea verde del Jardín Botánico, IBUNAM, Ciudad Universitaria (S. griseum (G) y S. stahlii (S)).	26
Figura 7. Parámetros ambientales y absorción mensual de CO ₂ en S. griseum, con temporal (A) y riego (B) a lo largo de 24 horas. ±S.D. n=5.	30
Figura 8. Parámetros ambientales y absorción mensual de CO ₂ en S. stahlii, con temporal (A) y riego (B) a lo largo de 24 horas. ±S.D. n=5.	31
Figura 9. Captura total por día en cada mes de CO ₂ por gramo de tejido fresco en S. griseum S. stahlii ±S.D. n=5. T= riego de temporal, R= riego	32
Figura 10. Acumulación diurna de ácidos orgánicos determinada en diferentes meses del año, en S. griseum, con Temporal (A) y Riego (B) a lo largo de 24 horas, ±S.D. n=5.	35
Figura 11. Acumulación diurna de ácidos orgánicos determinada en diferentes meses del año en S. stahlii, con Temporal (A) y Riego (B) a lo largo de 24 horas. ±S.D. n=5.	36
Figura 12. Biomasa seca mensual de S. griseum, con Temporal (A) y Riego (B), ±S.D. n=5.	39
Figura 13. Biomasa seca mensual de S. stahlii, con Temporal (A) y Riego (B), ±S.D. n=5.	40
Figura 14. Aspecto de la azotea verde del Jardín Botánico, derivado de la variación estacional. IBUNAM, Ciudad Universitaria. Octubre del 2021 (A); febrero del 2022 (B); septiembre de 2022 (C). Riego (línea azul) y temporal (línea amarilla).	41

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de las distintas vías de asimilación de carbono (Adaptado de Azcón-Bieto & Talón, 2013).	19
Tabla 2. Registro mensual de variables ambientales.	29
Tabla 3. Análisis de Varianza en consumo de CO ₂	33
Tabla 4. Captura anual promedio de CO ₂ por planta.	34
Tabla 5. Análisis de Varianza en la acumulación de Ácidos Orgánicos titulables.	38
Tabla 6. Análisis de Varianza de Biomasa Seca	42

Índice	
Resumen	1
Abstract	3
Introducción	5
Hipótesis	8
Objetivos	8
Objetivo general.....	8
Objetivos particulares.....	8
Antecedentes	8
Panorama mundial frente al cambio climático.....	8
Efecto del incremento de CO ₂ en la atmósfera.....	11
Problemática en la Ciudad de México por el aumento de CO ₂	14
Azoteas verdes: una alternativa para contrarrestar la contaminación atmosférica.....	15
Tipos de azoteas verdes.....	16
Tipos de plantas para las azoteas verdes.....	18
Captación de carbono por plantas en azoteas verdes.....	21
Metodología	23
Material biológico.....	23
Sitio de estudio y tratamientos.....	24
Variables.....	26
<i>Captura de CO₂</i>	26
<i>Ácidos orgánicos</i>	27
<i>Biomasa</i>	27
<i>Variables ambientales</i>	27
<i>Análisis estadístico</i>	28
Resultados	28
Absorción de CO ₂	29
Ácidos Orgánicos.....	35
Biomasa.....	38
Discusión	42
Conclusiones	47
Recomendaciones.....	48
Referencias bibliográficas	49

Resumen

Una de las principales problemáticas ambientales en la actualidad es el aumento de las emisiones de carbono hacia la atmósfera, las cuales contribuyen al incremento de la temperatura atmosférica, propiciando el desecamiento de cuerpos de agua, la pérdida de especies vegetales y animales, así como desfases en las estaciones del año. Durante 2019 México emitió cerca de 535 millones de toneladas netas de CO₂ a la atmósfera, siendo la Ciudad de México la entidad que más contribuye a estas emisiones con cerca de 22 millones de toneladas de CO₂ anuales.

Como una forma de contribuir a la mitigación de esta problemática se propone la implementación de azoteas verdes en espacios urbanos, que han demostrado contribuir a la mejora del ambiente gracias a la captura de CO₂. Por ello, este trabajo tuvo el objetivo de estudiar a lo largo de un año, la captación de carbono por dos especies de crasuláceas (*Sedum stahlii* y *Sedum griseum*) establecidas en una azotea verde extensiva bajo dos condiciones de disponibilidad de agua: temporal y riego. Se analizó mensualmente la captura de CO₂, el contenido de ácidos orgánicos y la biomasa, y se registraron la precipitación, humedad relativa, carbono atmosférico y saturación de agua en el suelo.

Se realizó un análisis de varianza de tres vías para comparar las variaciones mensuales entre tratamientos (riego y temporal) y especies respecto al consumo total de CO₂ por gramo de tejido fresco, la concentración de ácidos orgánicos y biomasa. Respecto a la captura de CO₂, se observaron diferencias significativas al nivel de $p < 0.05$ para las especies analizadas [$F(1, 208) = 426.55, p = < 0.001$]. Las comparaciones post hoc utilizando la prueba Tukey HSD indicaron que el valor medio para *S. griseum* ($M = 7.75, SD = 0.0543$) fue significativamente diferente a *S. stahlii* ($M = 6.16, SD = 0.0543$), evidenciando con esto que *S. griseum* presenta una mayor capacidad en la captura de CO₂ que *S. Stahlii*.

De acuerdo con la acumulación de ácidos orgánicos, *S. griseum* y *S. stahlii* presentan un metabolismo ácido de las crasuláceas, donde se observaron diferencias significativas al nivel de $p < 0.05$ para las especies analizadas [$F(1, 208)$

=39.908, $p = <0.001$]. La temperatura ambiental y el porcentaje de humedad ambiental repercutieron directamente sobre la capacidad de captura de carbono e incremento de biomasa, resaltando que en la sección con riego *S. stahlii* fijó anualmente 1,395,821.7 ppm de CO₂ por cada metro cuadrado. A su vez *S. griseum* con riego fijó 2,043,185 ppm de CO₂•m² al año, colocándolas como una alternativa adecuada para la mitigación del incremento de CO₂ atmosférico en entornos urbanos.

Palabras clave

Metabolismo Ácido de las Crasuláceas, captura de carbono, ácidos orgánicos, naturación urbana.

Abstract

One of the main environmental problems at present is the increase in carbon emissions into the atmosphere; these contribute to the increase in atmospheric temperature, which favors the desiccation of water bodies, the loss of plant and animal species, as well as shifts in the begin of seasons of the year. During 2019, Mexico emitted close to 535 million net tons of CO₂ into the atmosphere, of which Mexico City is the major contributor, with close to 22 million tons of CO₂ per year.

To mitigate this problem, the implementation of green roofs in urban spaces is proposed, these have been shown to contribute to the improvement of the environment thanks to the capture of CO₂. For this reason, this work had the objective to studying, during one year, the capture of carbon by two species of crassulaceae (*Sedum stahlii* and *Sedum griseum*) established on an extensive green roof under two conditions of water availability: rainfed and irrigation. CO₂ capture, organic acid content, and biomass were analyzed monthly, and the temperature, precipitation, relative humidity, and atmospheric carbon were recorded, as well as water saturation in the soil.

A three-way analysis of variance was performed to compare the monthly variations between treatments (irrigated and seasonal) and species with respect to the total CO₂ consumption per gram of fresh tissue, the concentration of organic acids, and biomass. Regarding CO₂ capture, significant differences were observed at the $p < 0.05$ level for the species analyzed [$F(1, 208) = 426.55$, $p = < 0.001$]. Post hoc comparisons using the Tukey HSD test indicated that the mean value for *S. griseum* ($M = 7.75$, $SD = 0.0543$) was significantly different from *S. stahlii* ($M = 6.16$, $SD = 0.0543$), thus evidencing that *S. griseum* has a greater capacity to capture CO₂ than *S. stahlii*.

According to the accumulation of organic acids, *S. griseum* and *S. stahlii* present an acid metabolism of crassulaceae, where significant differences were observed at the level of $p < 0.05$ for the analyzed species [$F(1, 208) = 39.908$, $p = < 0.001$]. The environmental temperature and the percentage of environmental

humidity had a direct impact on the carbon capture capacity and biomass increase, highlighting that in the section with irrigation *S. stahlii* fixed annually 1,395,821.7 ppm of CO₂ for each square meter. At the same time, *S. griseum* with irrigation fixed 2,043,185 ppm of CO₂•m² per year, positioning them as a suitable alternative for mitigating the increase in atmospheric CO₂ in urban environments.

Keywords

Acid metabolism of Crassulaceae, carbon capture, organic acids, urban
naturation

Introducción

En la Ciudad de México y área metropolitana el programa ProAire establece medidas y acciones que contribuyan a mejorar las condiciones en la calidad del aire; dicho programa se mantiene activo desde 1995 (SEMARNAT, 2018), a pesar de ello en los últimos años se han declarado contingencias ambientales por periodos en los cuales la calidad del aire en la ciudad es mala, con concentraciones de ozono (O₃) superiores a 110 ppm, contaminante utilizado como criterio en los índices de calidad del aire en la ciudad. Desafortunadamente desde 2016 la concentración promedio de O₃ es de 150 ppm por lo que se considera que el problema de contaminación atmosférica se torna cada vez más grave (Navarro, 2019). Lo anterior pone en evidencia la falta de estrategias para la gestión de la calidad del aire en la ciudad, como por ejemplo, la implementación de zonas con cero emisiones, incentivos económicos por implementación de espacios verdes, o bien tarifas por reducción de emisiones que promuevan en la población el interés por mejorar ciertos aspectos de la ciudad (Soto, 2021).

La principal causa de esta problemática es el incremento poblacional, que ha propiciado una disminución de las áreas verdes en las ciudades, las edificaciones irrumpen el equilibrio dentro de los ecosistemas urbanos afectando la composición y abundancia de las especies en la región, además de generar alteraciones en los ritmos circadianos de los organismos que ahí habitan (Oberndorfer *et al.*, 2007). En la actualidad la presencia de espacios verdes se considera un elemento fundamental para mejorar la calidad ambiental de las ciudades y la vida de sus habitantes, por lo que se recomienda un mínimo de 9 m² de espacios verdes por habitante, densidad que en la mayoría de los países desarrollados no se cumple (ONU-Hábitat, 2015).

El aumento de las emisiones de carbono hacia la atmósfera por actividades antrópicas representa una de las principales problemáticas medioambientales, fenómeno que ha traído como consecuencia un incremento en la temperatura media global, generando cambios estacionales e incluso problemas de salud pública, por lo que la mitigación de estos efectos representa uno de los principales retos para la comunidad científica actual (Oreskes, 2004). Una de las alternativas planteadas para

mitigar estas problemáticas es la implementación de azoteas verdes en espacios urbanos, las cuales han demostrado que contribuyen a mejorar el ambiente gracias a la captura de CO₂ (Getter *et al.*, 2009; Kuronuma *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2008).

Una azotea verde se define como una cobertura vegetal sobre una edificación que se implementa sobre un sistema de distintas capas de sustrato y drenaje que permiten su desarrollo sin comprometer la integridad estructural de la edificación sobre la que se encuentran (Ibáñez, 2008). Se ha señalado la importancia de implementar especies nativas en este tipo de espacios, cumpliendo con la función de reservorio de especies que no contribuyan al desequilibrio ecológico de la región por posibles dispersiones (Padela *et al.*, 2020).

Para la construcción de estos espacios se ha sugerido la utilización de plantas nativas y xerófitas ya que tienen una baja demanda de agua para su mantenimiento, haciendo su establecimiento más sencillo, además de que la fauna local puede preferir este tipo de especies debido a su historia natural, contribuyendo a la generación de corredores biológicos dentro de la ciudad (Espinoza, 2021; Li & Yeung, 2014).

Dada esta problemática, se realizó una investigación sobre la captura de CO₂ por plantas en azoteas verdes, como una alternativa para mitigar la contaminación atmosférica, así como incrementar el conocimiento sobre la importancia del establecimiento de azoteas verdes en la Ciudad De México. En el presente estudio se evaluó la captación de carbono de *Sedum griseum* y *S. stahlii* bajo condiciones de riego y temporal en una azotea verde extensiva.

Justificación

El incremento poblacional en la Ciudad de México y zonas conurbadas acarrea la construcción de edificaciones, con la consecuente pérdida de áreas verdes, que provoca, a su vez, una serie de problemáticas medioambientales causadas en principal medida por la emisión de contaminantes hacia la atmósfera. Dentro de estos contaminantes, el CO₂ es el que se genera en mayor proporción y el principal causante del incremento de la temperatura en las ciudades. Los techos de la mayoría

de las edificaciones están cubiertos por asfalto o concreto, que no retienen el agua de lluvia y, gran parte de esta se pierde en el alcantarillado urbano. Estos problemas provocan una disminución de la humedad ambiental de la región y acrecientan fenómenos de isla de calor urbano.

El establecimiento de espacios verdes contribuye a mitigar los efectos de su pérdida ocasionados por el incremento poblacional y resultan de gran importancia para mantener un equilibrio entre las emisiones de carbono y su captura. Una forma de establecer áreas verdes es la implementación de azoteas verdes, debido a los beneficios ecosistémicos que prestan, como la captura de contaminantes (CO₂, metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos). Algunos de estos contaminantes pueden almacenarse en las plantas, el sustrato o el agua. Por ello es importante conocer cuales especies son capaces de capturar contaminantes, en este caso, la captura de carbono atmosférico. Otros beneficios de las azoteas verdes son: disminuir la temperatura interna de las edificaciones sobre las cuales son colocadas, reduciendo el uso excesivo de aires acondicionados; permiten la captura del agua de lluvia evitando que esta se pierda en el alcantarillado, favoreciendo su reincorporación al ciclo hídrico, además de contribuir a incrementar la humedad ambiental y generar sitios para el establecimiento de la fauna local.

A pesar de los beneficios señalados, existe poca información al respecto de cuáles son las especies que se deban plantar en función de su capacidad para fijar carbono, su tolerancia a la falta de un aporte hídrico y su adecuación para crecer bajo las condiciones que este tipo de espacios pueden proporcionar a lo largo de un año. Por estos motivos resulta imperante brindar información que permita conocer las especies nativas más adecuadas para establecer azoteas verdes sin que estas representen un riesgo en el equilibrio ecológico de la región y brinden una mayor captura del carbono atmosférico para contribuir a la mitigación de los efectos causados por la emisión de contaminantes hacia la atmósfera.

Hipótesis

Las azoteas verdes extensivas se caracterizan por la ausencia de riego y estar sujetas a la lluvia de temporal. Se conoce que algunas crasuláceas utilizadas contribuyen con la captura de CO₂, por lo que se espera que al suministrar agua periódicamente las plantas establecidas tendrán un mayor crecimiento y con ello una mayor capacidad de captura de CO₂ en comparación con plantas sometidas al aporte hídrico estacional.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar durante un año la captura de bióxido de carbono por *Sedum stahlii* y *Sedum griseum* plantadas en una azotea verde extensiva en condiciones de riego y temporal en la Ciudad de México.

Objetivos particulares.

- Cuantificar la variación de la asimilación de CO₂ por *Sedum stahlii* y *Sedum griseum* sometidas a riego y temporal.
- Determinar el efecto del riego continuo o la lluvia estacional en el incremento de biomasa anual en ambas especies y el tipo de metabolismo fotosintético que presentan.

Antecedentes

Panorama mundial frente al cambio climático

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha estimado que entre 1970 al 2004 existió un aumento de gases de efecto invernadero de un 70%, lo cual trajo consigo incrementos en la temperatura media global, aumento de los niveles del mar y disminución en la cobertura de nieve del

hemisferio norte (IPCC, 2007). También, caracterizaron al periodo de 1983 al 2012 como el más cálido en los últimos 800 años con un aumento de 0.85°C, debido principalmente al incremento de CO₂ (40%). Este incremento proviene de diferentes sectores como el de la energía (47%), la industria (30%), el transporte (11%) y la construcción (3%), posicionando al crecimiento económico y poblacional como el primer impulsor de estos fenómenos (IPCC, 2014).

En respuesta a esta problemática, durante el 2015 se estableció un tratado internacional sobre el cambio climático, conocido mundialmente como “El Acuerdo de París”, que fue adoptado por 196 Países en la 21° Conferencia de Partes (COP21) del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), con el objetivo de contener el aumento de la temperatura media global por debajo de 2°C para el 2100, y continuar con el desarrollo de estrategias para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (UNFCCC, 2015). Este acuerdo internacional demuestra una clara preocupación frente a las crecientes emisiones atmosféricas actuales y la necesidad de planificar estrategias favorables a futuro.

Por lo anterior, ha surgido la integración de tecnologías bioenergéticas para la captura y almacenamiento de carbono (BECCS) que tengan el potencial de eliminar CO₂ de la atmósfera mitigando sus efectos (Azar *et al.*, 2010). Entre las principales tecnologías utilizadas está el desarrollo de combustibles renovables o biocombustibles, forestación y reforestación que permitan la captura y almacenamiento de carbono, el almacenamiento en forma directa del aire, meteorización controlada, generación de biocarbón y secuestro de carbono en el suelo (Gasser, *et al.*, 2015).

Debido a la industrialización en el mundo hay países que se han posicionado a la cabeza como los principales emisores de contaminantes; China es el país que más aporta a las emisiones directas e indirectas de CO₂ a la atmósfera mundial, contribuyendo con el 41% de las emisiones totales a nivel global en relación con la industria de la construcción (Cheng *et al.*, 2022), debido en principal medida a la demanda y producción de cemento, industria que aporta cerca del 25% de las emisiones industriales mundiales de CO₂, lo que posiciona a los países en vías de desarrollo como potenciales productores de gases de efecto invernadero en un futuro

cercano (Chen *et al.*, 2022). De acuerdo con la clasificación mundial emitida por el Atlas Global de Carbón (Fig. 1), para el 2018 China se encontraba como el mayor emisor a nivel mundial con 10,354 Mt CO₂, seguido por E.U.A con 5,377 Mt CO₂ e India con 2,600 Mt CO₂. Los únicos países de América Latina que se encuentran entre los primeros veinte lugares son, Brasil en el puesto número doce con 477 Mt CO₂ y México en el décimo tercer puesto con 475 Mt CO₂ (Friedlingstein *et al.*, 2021; Andrew & Peters, 2021).

Posición	Ciudad	MtCO ₂
1	China	10354
2	Estados Unidos de América	5377
3	India	2600
4	Rusia	1701
5	Japón	1143
6	Alemania	754
7	Irán	701
8	Corea del Sur	670
9	Arabia Saudita	626
10	Indonesia	604
11	Canadá	584
12	Brasil	477
13	México	475
14	Sudáfrica	435
15	Turquía	423
16	Australia	416
17	Reino Unido	380
18	Italia	349
19	Polonia	337
20	Kazajistán	332

Figura 1. Clasificación mundial de emisiones de carbono para el 2018. (Tomado de Atlas del carbono. Global Carbon Project, 2021)

Debido a la emisión de gases efecto invernadero se estima que en estos últimos años la temperatura en México ha incrementado cerca de 4°C, lo que ha desencadenado una serie de problemas como el desecamiento de cuerpos de agua, pérdida de especies vegetales y animales, así como desfases en las estaciones del año (SEMARNAT, 2016). Tan solo en el 2019 México emitió cerca de 535 Mt de CO₂

a la atmósfera (SEMARNAT, 2022), este gas corresponde al 71% de los gases totales liberados en el territorio nacional, seguido de las emisiones de metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, hexafluoruro de azufre y carbono negro (INECC, 2018). De este total, la ciudad de México aporta cerca de 22 millones de toneladas de CO₂ al año (SEDEMA, 2018).

Este deterioro en la calidad del aire deriva en gran parte del proceso de urbanización y crecimiento poblacional, que demanda una mayor cantidad de servicios urbanos que lamentablemente están carentes de regulación y de programas para enfrentar los problemas ambientales (Lezama, 2010). De acuerdo con el informe de la situación del medio ambiente en México se considera que las emisiones anuales de CO₂ por habitante (3.64 t) no lo ubican dentro de los primeros lugares a nivel mundial (SEMARNAT, 2018). Aun así, México se posiciona en el onceavo puesto, como una de las naciones más pobladas del mundo, con poco más de 126 millones de habitantes (INEGI, 2020).

Tan solo en la zona centro del país se alberga a más de 32 millones de habitantes y el avance territorial de la mancha urbana continua en crecimiento, considerando que en los últimos 16 años este se ha incrementado en un 170% alcanzando una superficie de casi 236 mil Has (CAME, 2018; INEGI, 2017). A su vez este crecimiento ha restringido el tamaño de las áreas verdes urbanas a 78.2 km² de arbolado y 34.8 km² de pastos, arbustos y áreas deportivas, de los cuales el 60% son espacios privados. Aun así, se contabiliza un aproximado de 14.4 m² de áreas verdes por habitante en la ciudad, siendo la principal causa de pérdida del arbolado el incremento de construcciones urbanas (Núñez, 2021).

Efecto del incremento de CO₂ en la atmósfera

La atmósfera mantiene un dinamismo que favorece una temperatura adecuada para el desarrollo de la vida en la Tierra, cercana al suelo es cálida y disminuye conforme se asciende en altitud, esto debido a fenómenos termodinámicos que permiten la disipación de la radiación (albedo) o su captura, que dependen de la composición de gases a distintas altitudes. Por su parte, los principales gases que favorecen el incremento de temperatura atmosférica son el dióxido de carbono y el vapor de agua.

Debido a ellos se retiene el calor suficiente para favorecer los procesos bióticos en la superficie terrestre (Martínez & Fernández, 2004). Al filtrar la radiación, la atmósfera permite que ciertas longitudes de onda sean absorbidas por la superficie terrestre, la cual reemite esta energía gradualmente a lo largo del día (radiación terrestre), esta radiación es detenida por la atmósfera y las nubes, las que se calientan y reemiten la energía en todas sus direcciones, este fenómeno que mantiene la temperatura cálida sobre la tierra es conocido como efecto invernadero (IPCC, 2001).

A pesar de que esta dinámica atmosférica es ideal para los procesos terrestres, el incremento en las concentraciones de CO₂ por actividades humanas en cantidades no habituales, genera problemáticas y es la principal causa del calentamiento global. El CO₂ es un gas que absorbe y retiene energía en el infrarrojo, generando que el aire se caliente a más del doble de su temperatura habitual, lo que a su vez dificulta a los organismos fotosintéticos reincorporar CO₂ a su metabolismo, agravando aún más la situación (Useros, 2013).

En el caso de las ciudades sobrepobladas se presenta un aumento de la temperatura local y la disminución de la humedad ambiental debido a la sustitución de espacios verdes por una alta densidad de construcciones urbanas que acumulan la radiación y no permiten una buena ventilación, lo que provoca un fenómeno conocido como isla de calor urbano (Barradas, 2013). La eliminación de la vegetación y el aumento de la temperatura deriva en la alteración del ciclo hidrológico, logrando modificar la abundancia y temporalidad de las precipitaciones en una región, que se traduce en problemáticas por sequía, inundación, disponibilidad de agua, disminución en la nubosidad, que favorece la alteración de los ciclos circadianos en los seres vivos y aumenta la tasa de incendios forestales (Martínez & Fernández, 2004).

Todo apunta a que muchos sistemas biológicos serán impactados por el aumento de CO₂. En relación con los sistemas marinos, cuando el CO₂ entra en contacto con la dinámica de las aguas genera acidificación de los océanos por la producción de ácido carbónico (H₂CO₃) e iones hidrógeno, provocando pérdida o lesiones en las cubiertas de carbonato de calcio de los organismos marinos (Sabine

et al., 2004). En relación con los animales se reporta que los incrementos de temperatura por exceso de CO₂ atmosférico y el aumento a la exposición a rayos UV están correlacionados positivamente con el envejecimiento de animales por la oxidación de lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, ocasionado por la inducción de especies reactivas de oxígeno derivando en una mayor susceptibilidad a enfermedades. También se observó que esto puede acelerar el ciclo celular y su señalización bioquímica contribuyendo al envejecimiento prematuro de los organismos (Paital *et al.*, 2016).

En plantas se ha observado que altos niveles de CO₂ inicialmente causan aumento de la actividad fotosintética y una reducción de la fotorrespiración, pero después de un periodo de tiempo la eficiencia fotosintética disminuye. No obstante, este aumento se puede traducir en el incremento del crecimiento en estructuras no deseables de algunas especies con interés comercial, por ejemplo: frutos pequeños con una abundancia de hojas, ramas y cáscara, pues la limitante de nutrientes puede afectar su crecimiento, lo que también apunta que podría dificultar la interacción con herbívoros y polinizadores (Hunter, 2001). En particular, para el cultivo de arroz se ha observado que el incremento de la temperatura y del CO₂ atmosférico genera un estrés que reduce su crecimiento y productividad, además de disminuir la concentración de micronutrientes como hierro y zinc que este puede almacenar en el grano (Chumley & Hewlings, 2020). En el Reino Unido se han planteado posibles efectos a futuro sobre la incidencia de enfermedades en cultivos, pues en los últimos años se observa una mayor incidencia en plantas de la familia Brassicaceae afectadas por hongos patógenos como el *Leptosphaeria maculans*, causante de la podredumbre seca de las crucíferas; se ha pronosticado un aumento en el alcance y gravedad de este tipo de enfermedades debido al incremento de la temperatura provocado por el hombre, lo cual repercute directamente en la economía de la región al tratarse de especies de interés comercial (Evans *et al.*, 2008).

La aceleración del cambio climático trae consigo amenazas a la salud pública pues, sumado a los eventos meteorológicos extremos, se crean condiciones que propician el incremento de enfermedades transmitidas por insectos, roedores y el agua (Epstein, 2001). Se ha apuntado inclusive a que el aumento gradual de la

temperatura en estos últimos años tiene repercusiones sobre aspectos en la vida humana, acrecentando enfermedades infecciosas, pues la interacción entre el huésped humano y el agente infeccioso se ve afectada, cambiando su distribución y abundancia, incrementando la recurrencia de enfermedades en regiones donde anteriormente no se presentaban, como la malaria, el dengue, ciertos virus que ocasionan síndromes encefálicos y la recurrencia de infecciones en vías urinarias son enfermedades que han mostrado un aumento en relación con el incremento de temperaturas derivado del calentamiento global (Khasnis & Nettleman, 2005).

Problemática en la Ciudad de México por el aumento de CO₂

Los efectos derivados del incremento de CO₂ en la ciudad son muy diversos, pero aquellos que generan una mayor repercusión en la población son los relacionados con el incremento de la temperatura y la disminución de precipitaciones, la presencia de edificaciones provoca cambios en los flujos de materia y energía, que afectan severamente la disponibilidad de agua en la ciudad, la cual se pierde por escorrentía hacia el alcantarillado debido a la gran cantidad de superficies impermeables (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Debido a la demanda de agua, la falta de infiltración hacia el subsuelo, la pérdida de áreas verdes y suelo de conservación, dentro y en la periferia de la ciudad, los mantos acuíferos y sistemas de abastecimiento del Valle de México se encuentran sobrexplotados en diferentes grados, generando en los últimos años la problemática de desabasto (Perló y Gonzáles, 2005; Esparza, 2014). Con ello las propiedades del suelo en zonas de riesgo se modifican haciéndolo más propenso de sufrir deslaves y, en adición a esto, la necesidad del gobierno por racionar este servicio a la población ocasiona pérdidas económicas, principalmente agrícolas y ganaderas (CEDRSSA, 2020).

Sumado a los problemas en la disponibilidad de agua, el aumento de la temperatura en la Ciudad de México ha incrementado la frecuencia de las llamadas olas de calor que en la última década han pasado de 6 a 16 eventos por año, entre los meses de marzo a mayo, cuando la humedad ambiental se encuentra por debajo

del 20% y la temperatura ambiental alcanza entre 25° a 30°C en periodos de tres días o más (Jáuregui, 2009).

En conjunto, el crecimiento de la mancha urbana, el aumento de la contaminación ambiental, la escasez de agua y agudización de los efectos de isla de calor urbano, representan el desafío más grande para el establecimiento de espacios verdes urbanos, pues gran parte del agua disponible es utilizada en el consumo humano, industria y cultivos hortícolas cercanos (Azeñas *et al.*, 2019).

Azoteas verdes: una alternativa para contrarrestar la contaminación atmosférica

La implementación de azoteas verdes en áreas urbanas tiene la función de generar espacios que permitan la captación de contaminantes y emisiones de carbono, además de brindar otros beneficios ecosistémicos como la gestión mejorada del agua de lluvia, la regulación de la temperatura dentro de edificios, la reducción de los efectos de isla de calor urbano y propiciar un mayor hábitat para la fauna silvestre urbana (Obendorfer, 2007; Getter *et al.*, 2009). Se ha documentado que la implementación de espacios verdes en edificios genera sistemas naturales para la captación y aprovechamiento del agua (Contreras-Bejarano, 2020).

En el caso de servicios de captación y mejoramiento de agua de lluvia, su construcción implica materiales para su conducción, almacenamiento, infiltración y retención de humedad en el ambiente mejorando su calidad, resultando en la disminución de inundación y escasez (Arrellano-Leyva *et al.*, 2021; Contreras-Bejarano & Villegas-González, 2019; Ulacia, 2018).

Se considera que este tipo de construcciones, de acuerdo con su grosor y cobertura vegetal, logran retener entre un 40 y 80% de las precipitaciones anuales disminuyendo los flujos hacia el alcantarillado (Zielinski *et al.*, 2012). Además de que un espacio irradiado por el sol al ser cubierto por especies vegetales en el 50% de su superficie logran disminuir hasta en 2°C la temperatura durante los periodos más cálidos del año, enfatizando con ello la necesidad de planificar este tipo de espacios en el contexto urbano (Colunga *et al.*, 2015).

La Ciudad de México tiene una extensión territorial de 1,485 km², de los cuales cerca de 617.7 km² son áreas verdes, aunque tan solo 112.9 km² pertenecen a áreas verdes urbanas (considerando camellones, parques y bosques dentro de la ciudad) y el restante a áreas verdes en suelo de conservación (GOCDMX, 2017). Al respecto la ley ambiental de protección a la tierra en la CDMX establece que cada alcaldía debe contar con al menos 9 m² de área verde por habitante intentando con ello mitigar los efectos de las emisiones de carbono atmosférico, por lo que propone la construcción de azoteas verdes (PAOT, 2016).

En ese mismo contexto, el gobierno de la ciudad promueve en la actualidad el “Programa ambiental y de cambio climático para la ciudad de México 2019-2024”, con el cual se pretende revegetar espacios de la ciudad con la intención de mejorar la calidad del aire, además de promover el rescate de cuerpos de agua y su manejo sustentable (GCDMX, 2019). Lo anterior en respuesta a la “Ley de mitigación y adaptación al cambio climático y desarrollo sustentable para la ciudad de México, publicada en el 2011 y reformada durante el 2017, la cual surge frente a la necesidad de generar estrategias frente al cambio climático por la presencia de gases de efecto invernadero y en la cual se señala la importancia de fomentar la instalación de sistemas de naturalización en azoteas (GOCDMX, 2017).

Promoviendo el uso de espacios vegetados dentro de la Ciudad de México, el gobierno de la capital ofrece reducciones en el pago del impuesto predial, del 25% a inmuebles con árboles adultos vivos o áreas verdes no arboladas siempre que estos ocupen la tercera parte de la superficie de los predios, de igual manera existe una reducción del 10% del impuesto por la implementación de azoteas verdes siempre que estas ocupen la tercera parte del total de la superficie y cumplan con la disposición de la normativa ambiental de la ciudad (GOCDMX, 2019).

Tipos de azoteas verdes.

Las azoteas verdes se dividen principalmente en dos tipos, las extensivas con una profundidad máxima de 150 mm, donde comúnmente se establecen especies de tamaño pequeño tolerantes a la sequía, y las intensivas, las cuales cuentan con una

capa de sustrato mayor a los 150 mm, lo que les permite soportar especies de mayor tamaño como pastos, hierbas perennes y arbustos (Getter & Rowe, 2006; Mentens *et al.*, 2006).

La instalación de azoteas verdes debe hacerse siguiendo recomendaciones técnicas evaluadas para la plantación de una comunidad vegetal sobre los techos de una construcción (Getter y Rowe, 2006; Townshend, 2007). Para la Ciudad de México estas especificaciones se encuentran establecidas en la Norma ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2017 (GOCDMX, 2018).

En general las azoteas verdes se componen principalmente de cinco capas: 1) impermeabilizante, 2) capa anti-raíz, 3), capa drenante, 4) capa filtrante, 5) sustrato y 6) cubierta vegetal (Fig. 2).

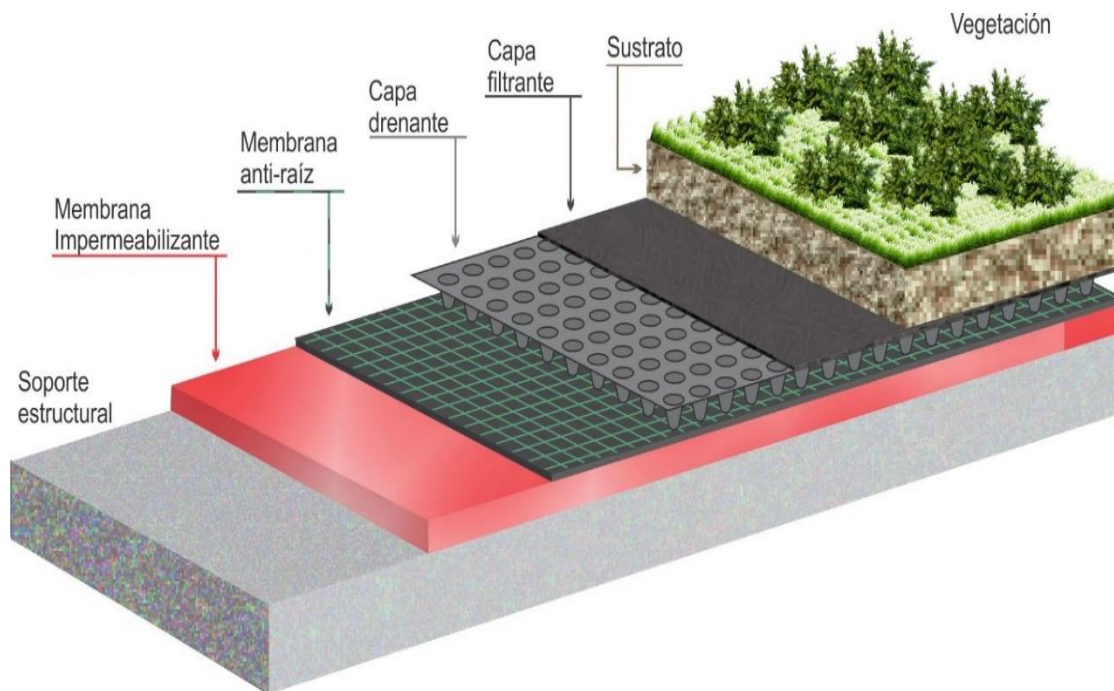


Figura 2. Capas de una azotea verde. (Tomado de Espinoza, 2021)

Tipos de plantas para las azoteas verdes

Para este tipo de plantaciones se ha sugerido la utilización de plantas xerófitas con Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (MAC) que tienen baja demanda de agua, soportan cambios drásticos de temperatura y son de fácil mantenimiento, por lo que los costos de instalación son más bajos (Ávila-Hernández *et al.*, 2023; Rayner *et al.*, 2016).

El MAC se caracteriza por realizar una separación temporal en la captación de carbono. Este metabolismo muestra al menos cuatro fases (Fig. 3), la primera cuando los estomas se abren durante la noche y comienza la síntesis de ácido málico, la segunda etapa se da previo al amanecer cuando se alcanza el máximo de carbono acumulado en forma de ácidos orgánicos, seguido de la tercera etapa en la cual se produce la descarboxilación y activación del ciclo C3, para finalmente retornar a la condición inicial, en la fase cuatro, previa al atardecer cuando la cantidad de ácido málico llega hasta su mínimo y comienza la apertura de estomas para la fijación nocturna (Azcón-Bieto & Talón, 2013).

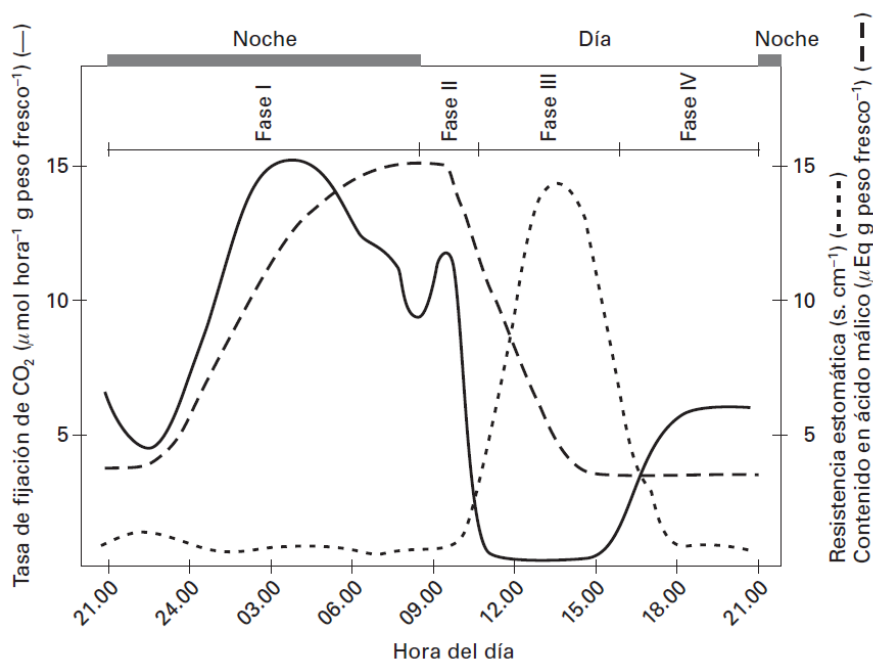


Figura 3. Tasa de asimilación diaria de CO₂ en una planta MAC típica (Tomado de Azcón-Bieto & Talón, 2013)

Este metabolismo es característico de especies que habitan en ambientes con poca disponibilidad de agua, es común que presenten adaptaciones que contribuyen a la captura de carbono y el uso eficiente del agua (Fig. 4), por ello abren los estomas para el intercambio gaseoso durante la noche evitando la pérdida por evapotranspiración, y los cierran durante la mayor parte del día (Taiz & Zeiger, 2010). (Tabla 1).

Tabla 1. Características de las distintas vías de asimilación de carbono (Adaptado de Azcón-Bieto & Talón, 2013).

	C3	C4	CAM
Enzima responsable de la carboxilación inicial	RuBisCO	PEPC	RuBisCO y PEPC
Anatomía	Sin cloroplastos en la vaina perivascular	Con cloroplastos en la vaina perivascular	Suculenta
Tasa de fotosíntesis	Media	Alta	Baja
Fotorrespiración	Si	No	No
Eficiencia en el uso de agua (g de CO₂ fijado por kg de H₂O transpirada)	1-3	2-5	10-40
Distribución geográfica	Amplia	Áreas tropicales abiertas y hábitats áridos	Regiones y hábitats áridos

Se ha reportado que las plantas CAM exhiben tasas de eficiencia en el uso del agua de cinco a diez veces más altas que en plantas C4 (Geydan & Melgarejo, 2005). El proceso de captura inicial de CO₂ en plantas CAM está mediado por la enzima fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEPC), el carbono fijado es acumulado en forma de ácidos orgánicos dentro de la vacuola, predominantemente en forma de ácido málico, estos durante el día pasan al citoplasma y son descarboxilados, se libera CO₂ que es fijado mediante el ciclo C3 con ayuda de la ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa (RuBisco) (Gilman & Edwards, 2020). El metabolismo CAM puede ser obligado, cuando las plantas asimilan CO₂ únicamente mediante la enzima

PEPC, o bien facultativo, en organismos que presentan cierta plasticidad en su metabolismo alternando entre uno de tipo C3 o MAC, en relación con cambios favorables del ambiente en el cual se desarrollan (Borland *et al.*, 2014).

Además de adaptaciones metabólicas frente al estrés ocasionado por la escasez del agua en el medio, algunas especies poseen mecanismos de aclimatación a este tipo de condiciones los cuales repercuten sobre el crecimiento del organismo ya que modifican la asignación de recursos, limitando su expansión foliar y favoreciendo el crecimiento radicular hacia el agua (Moreno, 2009). Además, se ha reportado la existencia de genes codificantes para proteínas que protegen a la planta frente a los daños por déficit hídrico como lo son las proteínas LEA, encargadas del mantenimiento en la homeostasis iónica, evitando el daño en membranas por la deshidratación (Wang *et al.*, 2006).

Por lo anterior, en diversos estudios se propone al género *Sedum* como uno de los mejores para las azoteas verdes, debido al comportamiento MAC en la mayoría de sus especies. y ofrecen una buena captación de carbono, bajo consumo de agua, poco crecimiento de raíces y un buen aumento de biomasa anual, siendo este último aspecto primordial para el aumento en la fijación de carbono (Getter & Rowe, 2006; Kuronuma *et al.*, 2018). Este género cuenta con cerca de 428 especies descritas mundialmente, de las cuales en México existen 133; de este total 110 son endémicas, convirtiendo al país en un sitio de diversificación. *Sedum* se encuentra principalmente distribuida en las zonas de transición de la región Neártica y Neotropical, en los bosques de coníferas y encinos de la región, destacándose algunas especies por su facilidad para adaptarse a ambientes áridos (Aragón-Parada *et al.*, 2019).

Respecto a su utilización en azoteas verdes, se ha reportado en otros países la gran capacidad adaptativa y de dispersión de una especie mexicana, *Sedum stahlii*, la cual ha mostrado resistir a condiciones muy adversas en azoteas verdes que han sido mantenidas con el mínimo de cuidados. Dicha especie fue una de las 6 sobrevivientes de 26 especies de plantas en una azotea abandonada desde el 2014 (Grullón-Penkova *et al.*, 2020). Otra especie nativa del país es *S. griseum*, la cual ha aumentado su popularidad en cultivos de azoteas y muros verdes debido a

su potencial ornamental, se ha observado que se adapta de forma favorable a los ambientes con baja humedad y alta irradiación lumínica (Reyes-Gonzales, 2018), no obstante, existen pocos reportes de esta especie en estudios formales.

Captación de carbono por plantas en azoteas verdes

Se han documentado efectos favorables en la utilización de este tipo de plantaciones con respecto a la captura de CO₂. En un estudio realizado en Estados Unidos se evaluó la capacidad de captura de carbono en distintas azoteas verdes, en su mayoría sembradas con especies del género *Sedum*, encontrándose que estas capturaron en promedio entre 162 y 168 g de carbono por m², proponiendo a este tipo de espacios como una buena alternativa para mitigar los efectos ocasionados por las emisiones atmosféricas de carbono (Getter *et al.*, 2009).

De igual manera, se ha evaluado el potencial uso de diversas especies de *Sedum* para su correcta implementación en azoteas verdes; Starry *et al.* en el 2014 compararon la actividad fotosintética en relación al uso de agua en *S. album* y *S. kamtschaticum*, bajo condiciones de ambiente completamente controlado, en ambas especies observaron distintos grados de actividad metabólica acorde con la disponibilidad de agua, cambiando de un metabolismo C3 a uno MAC conforme la humedad disminuía, *S. album* mostró un mayor valor adaptativo para su implementación en azoteas verdes. Contrario a ello se evaluó el consumo de carbono en parcelas experimentales de *S. sediforme* en una azotea verde semiárida ubicada en Israel, el estudio reportó que durante un mes de calor (febrero a marzo) existían emisiones de CO₂ (0.47 g•m⁻²) en parcelas sembradas en comparación con fragmentos sin plantar en temperaturas que oscilaban entre los 18° a 30°C (Agra *et al.*, 2017). Sin embargo, la metodología contempla solamente dos mediciones a lo largo del día en un sistema de intercambio de gases, que se mantiene cerrado; por este tipo de controversias se tiene la necesidad de continuar aportando información en azoteas verdes de *Sedum* spp.

Existen pocos estudios en México que brinden información sobre el consumo de CO₂ atmosférico por azoteas verdes y los posibles beneficios de ello. En un

estudio realizado en el estado de Guerrero (Carbajal *et al.*, 2017) se cuantificó la cantidad de carbono que logran acumular las especies *Clitoria ternatea* (Fabaceae) y *Pentalion luteum* (Apocynaceae) plantadas en muros verdes. Se encontró que estas acumulan en 6 meses cerca de 263,300 ppm y 156,800 ppm de CO₂ por planta, respectivamente, y en una especie de *Sedum*, la acumulación fue de 1,008,000 ppm de CO₂·m⁻². Por ello los autores recomiendan la importancia de realizar estudios que brinden más información en cuanto a la eficiencia de las diversas especies utilizadas con este propósito. Por su parte, Collazo-Ortega *et al.* (2017) evaluaron la capacidad de captura de carbono en *Sedum dendroideum* y *S. rubrotinctum*, estimando que una azotea verde extensiva de 100 m² captura aproximadamente 180 millones de ppm de CO₂ al año, proponiendo el uso de estos sistemas como una solución a largo plazo para mitigar los efectos contaminantes atmosféricos para la zona metropolitana de la Ciudad de México.

De acuerdo con lo anteriormente señalado, en un sistema expuesto a condiciones naturales el agua es la principal limitante para el crecimiento y distribución de una especie, su ausencia causa efectos directos sobre la expansión foliar, la síntesis de ácido abscísico y el cierre estomático, lo cual puede dificultar el intercambio gaseoso, en particular la captura de CO₂, además de influir en el crecimiento radicular, el ajuste osmótico y la expresión de algunos genes implicados en la síntesis de proteínas LEA (Moreno, 2009; Hatfield y Prueger, 2015). A pesar de considerarse al género *Sedum* como el ideal se ha observado que en algunas especies la disminución o ausencia de riego podría limitar su crecimiento y desarrollo, además de afectar directamente la captación de CO₂ (Chi-Feng, 2015; Heusinger y Weber, 2017). Las azoteas verdes intensivas comúnmente cuentan con sistemas de riego que permiten un mayor aporte de agua, mientras que las de tipo extensivo sólo están expuestas a la lluvia estacional, y aunque esto pueda ser limitante, uno de sus objetivos principales es permitir la naturación con el menor gasto de agua y una disminución de su mantenimiento (Razzaghmanesh & Beecham, 2014).

Por lo anterior, en el presente estudio se evaluó la captación de carbono de dos especies del género *Sedum* bajo condiciones de riego y temporal en una azotea verde extensiva de la Ciudad de México.

Metodología

Material biológico

Sedum stahlia Solms es una especie ampliamente distribuida en los estados de Puebla, Veracruz y Oaxaca, ha sido localizada en bosques de coníferas y encino, matorrales xerófitos e inclusive áreas bajo manejo agrícola (Aragón-Parada *et al.* 2019). De acuerdo con la descripción de Clausen (1959) posee hojas suculentas y globulares, que se desprenden con facilidad, acomodadas de forma opuesta, en tonalidades rojizas lustrosas, según la exposición al sol su crecimiento es subarborescente, con tallos ramificados y extendidos en color marrón a rojizo, frecuentemente genera raíces adventicias, su floración es terminal en forma de cima con 2-6 grupos de flores pediceladas, con sépalos y pétalos lanceolados en tonalidades amarillas (Fig. 4A).

Sedum griseum Praeger se distribuye a lo largo del Eje Neovolcánico Transversal y la Sierra Madre Oriental en los estados de Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán y Querétaro (Aragón-Parada *et al.* 2019). Su crecimiento es subarborescente, con hojas lineales, biconvexas y sésiles de color verde o amarillo verdosas que se tiñen de rojo por su exposición al sol, sobre tallos con corteza marrón-grisácea de láminas delgadas, posee flores blancas o amarillo pálido, arregladas en cimas de 1 a 12 inflorescencias de 0.7 a 1.5 mm con sépalos y pétalos lanceolados (Clausen, 1959) (Fig. 4B).

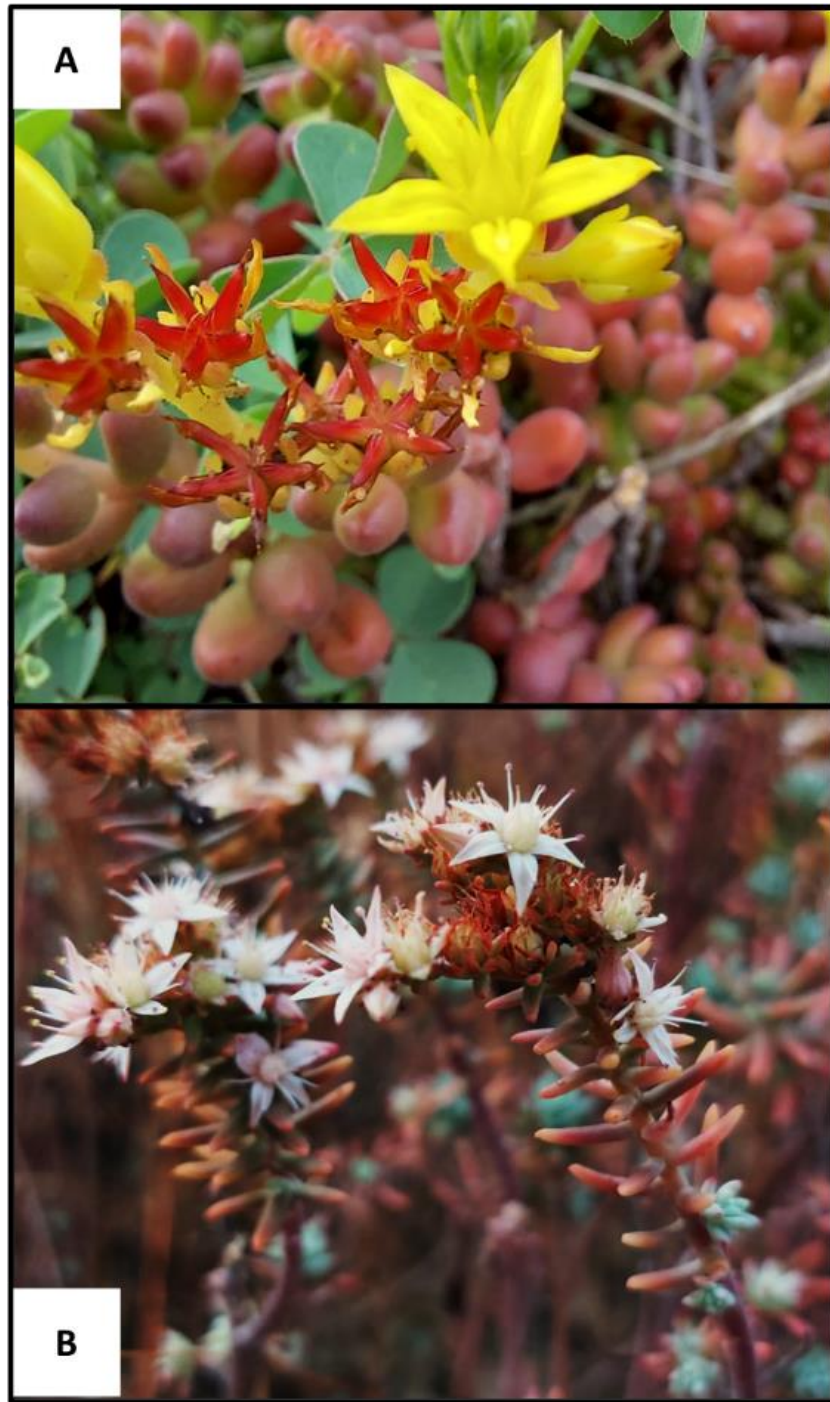


Figura 4. *Sedum stahlia* (A) y *Sedum griseum* (B).

Sitio de estudio y tratamientos

La azotea verde se sitúa en el Jardín Botánico del Instituto de Biología (Fig. 6), Ciudad Universitaria, UNAM, CDMX (19°19'9.28"N; 99°11'36.03"O). Debido a que este espacio se encuentra establecido desde hace más de una década, durante el

mes de agosto de 2021 se realizó la limpieza y reubicación de especies establecidas en dicha azotea (Fig. 5); también se procedió al reacondicionamiento del suelo con tierra negra y agrolita para mantener una profundidad del suelo homogénea (15 cm) y una textura media en el sustrato que permitió el correcto drenado del agua, posteriormente se llevó a cabo la plantación de las dos especies de *Sedum*.

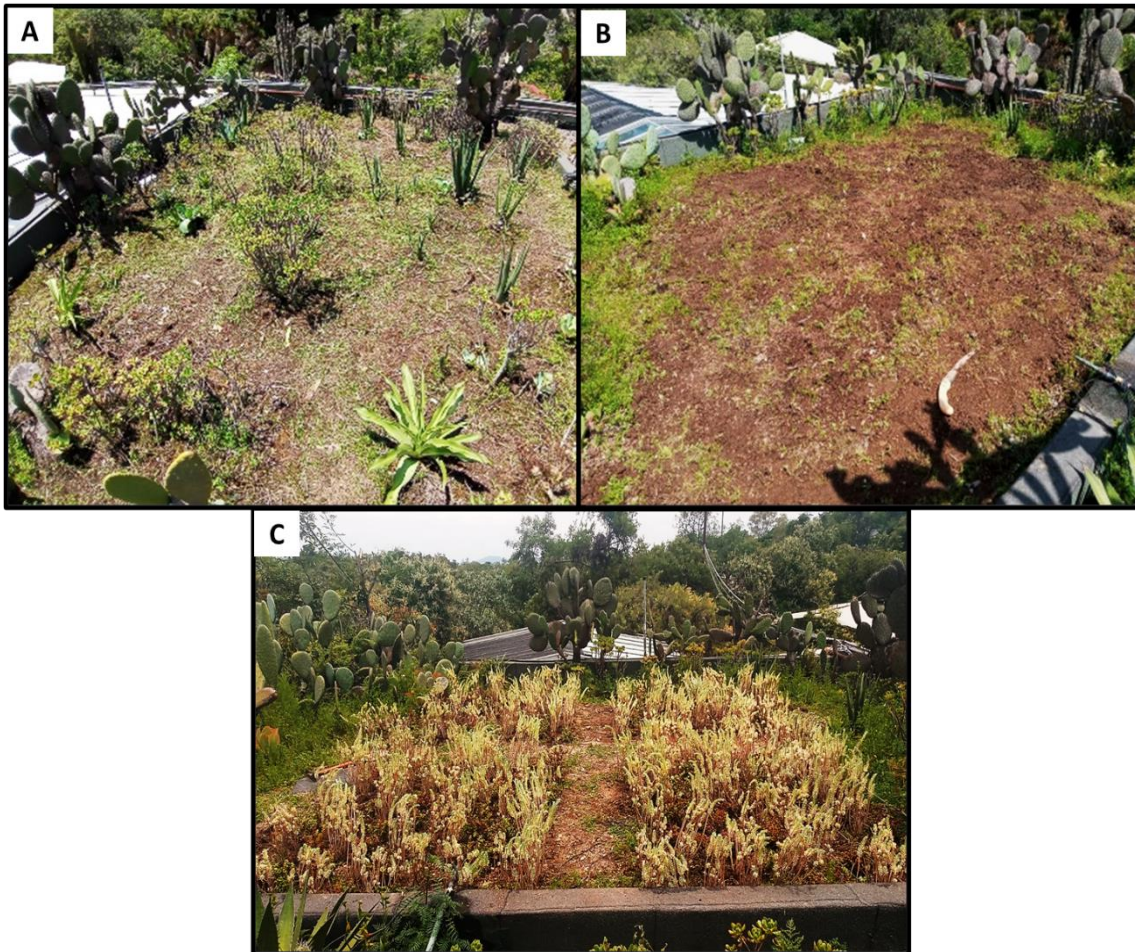


Figura 5. Limpieza (A), reubicación (B) y establecimiento(C) de la parcela experimental, azotea verde del Jardín Botánico, IBUNAM, Ciudad Universitaria.

Las plantas de estudio se sembraron el 20 de agosto del 2021. Se preparó una sección de azotea verde experimental de 30 m² en la que se plantaron de forma aleatoria *S. stahlii* y *S. griseum*, manteniendo separaciones de 15 cm entre ellas, para un total de 200 plantas de cada especie en la azotea. Los organismos fueron separados por dos pasillos para facilitar el acceso a las plantas en los momentos de

la medición, se escarbó en el pasillo central un surco para impedir que el agua de riego difundiera hacia la sección que se mantenía con el aporte de temporal (Fig. 6).

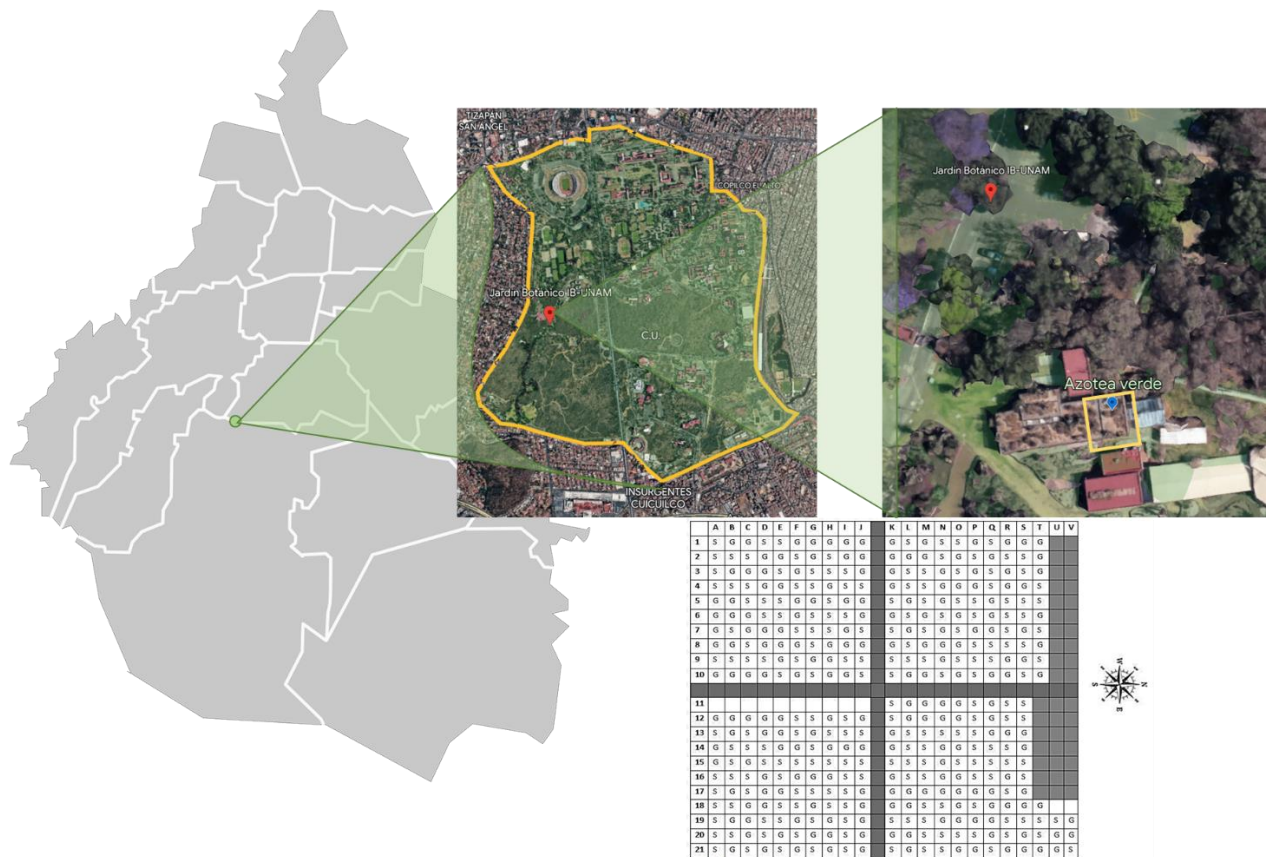


Figura 6. Mapa de ubicación y diagrama de la distribución de especies en la azotea verde del Jardín Botánico, IBUNAM, Ciudad Universitaria (*S. griseum* (G) y *S. stahlii* (S)).

Al principio de la plantación se dio al menos un riego semanal durante un mes para su establecimiento. Posteriormente la azotea fue dividida en dos regímenes de riego, la mitad sujeta únicamente a las precipitaciones anuales, y la otra con riego cada 15 días, realizándose en ambos casos deshierbes ocasionales.

Variables

Captura de CO₂

Mensualmente se midió la captura de carbono en 5 individuos escogidos al azar de cada especie. Las mediciones se realizaron en la azotea verde, cada cuatro

horas, para ello se seleccionó un brote lateral de la sección media en la planta y sin desprender se colocó dentro de la cámara portátil de un analizador de gases por infrarrojo (IRGA, QUBYT, Canadá) para la construcción de curvas de asimilación, en relación con el peso del tejido fresco (Collazo et al., 2017). Ese mismo brote se colectó y fue utilizado para la cuantificación de ácidos orgánicos titulables. Al término se consideró el consumo mensual promedio de CO₂ con relación a la biomasa acumulada por cada una de las especies, para ello se trasladaron los valores mensuales de consumo de CO₂ al total del tejido vegetal acumulado por cada planta colectada mensualmente.

Ácidos orgánicos

De igual forma se realizó el análisis de ácidos orgánicos para determinar la actividad MAC (Geydan y Melgarejo, 2005) cada 4 h a lo largo de un día, para lo cual se maceró 1 g de tejido fresco en 4.5 ml de agua destilada, misma mezcla que posteriormente se filtró y aforó a 25 mL con agua destilada, posteriormente se tituló con una solución de NaOH 0.004 N hasta alcanzar un pH de 8.3. Se considera que por cada mL de NaOH gastado existe 1 meq. de ácidos orgánicos en 100 g de tejido.

Biomasa

Se cuantificó mensualmente la biomasa de los cinco individuos utilizados para la medición de las variables anteriores. Se separaron en raíz, flores, tallo y hojas, se secaron en horno a 70°C por 5 días para determinar peso seco total (Matsuoka, 2020).

Variables ambientales

Se registraron mensualmente durante un año a partir de septiembre de 2021, las variables atmosféricas de precipitación (mm), temperatura (°C), humedad ambiental relativa (% HR) y carbono atmosférico (ppm de CO₂) mediante la estación climatológica posicionada en la azotea del edificio.

Análisis estadístico.

Debido a que los valores obtenidos no presentaban una distribución normal, se realizó una transformación Box Cox con la intención de encontrar el λ que mejor ajustara los valores a una distribución normalizada, y posterior a ello en cada uno de los parámetros registrados se realizaron pruebas de Análisis de Varianza de tres vías, con interacciones de dos vías para comparar las diferencias existentes entre los tres factores del trabajo: especies, régimen de riego y temporalidad. Se aplicó la prueba de Tukey de comparaciones múltiples. Dichos análisis se realizaron mediante el software R versión 4.2.2 (2022-10-31 ucrt) de R Core Team (2022).

Resultados

Variables ambientales

Los datos climáticos registrados por la estación meteorológica (Tabla 2) muestran la transición entre la temporada de lluvias (abril-septiembre) y la de secas (octubre-marzo), el mes con mayor precipitación acumulada fue julio (200 mm) mientras que los meses más secos del año debido a las bajas precipitaciones fueron enero y febrero (1.4 mm). A su vez, los meses con una mayor humedad relativa correspondieron a septiembre y agosto con un porcentaje de 82%, mientras que mayo fue el mes con un menor registro promedio en este valor (50.6%).

A pesar de existir una sección de la azotea que se mantuvo con riego, la humedad relativa en el ambiente descendió a sus valores menores entre los meses de febrero a mayo (Tabla 2), registrándose el mínimo valor durante el mes de mayo (8.3%), esto, considerando la temperatura media del mes (24.2°C) brinda condiciones en el día donde el potencial hídrico atmosférico oscila alrededor de -341.7MPa.

En relación con la temperatura, los meses más calurosos se presentaron en abril y mayo (fig. 7) durante los cuales se registraron temperaturas promedio de 22.7°C y 23.1 °C, respectivamente. De igual forma se registró que en estos meses

acontecieron periodos con temperaturas superiores a los 30°C, registrándose valores máximos de 44.3°C para el mes de abril y 36.0 °C para mayo. Por el contrario, los meses más fríos correspondieron a diciembre y enero, con temperaturas promedio de 14.1°C y 13.1°C respectivamente, registrándose mínimas nocturnas de 1.6°C en diciembre y 2.3 °C durante enero.

A lo largo del año, el promedio mensual de los valores de CO₂ atmosférico se mantuvo por encima de las 257 ppm, pero sin exceder las 300 ppm, a excepción del mes de noviembre, donde existió un aumento del CO₂ promedio de 301.88 ppm.

Tabla 2. Registro mensual de variables ambientales.

Mes	Temperatura (°C)		HR %		Precipitación acumulada (mm)	CO ₂ (ppm)
	Media	Max./Min.	Media	Max./Min.		
Sept.21	16.6	25.9 / 9.7	82.1	100 / 37.6	54.8	297.1 ± 10.3
Oct	16.3	26.6 / 7.7	76.4	100 / 33.4	18	297.1 ± 10.3
Nov	14.8	27.7 / 2.0	70.5	100 / 25.8	18.4	301.9 ± 9.6
Dic	14.1	25.8 / 1.6	64.5	100 / 13.3	9.4	276.5 ± 18.3
Ene	13.1	24.0 / 2.4	64.3	100 / 17.5	1.4	262.6 ± 12.6
Feb	14.6	28.6 / 1.9	56.5	98.2 / 11.4	1.4	259.6 ± 12.9
Mar	16.4	28.2 / 2.9	51.0	99.9 / 10.6	5.8	258.8 ± 16.7
Abr	22.7	44.3 / 10.8	59.4	100 / 17.7	62	265.9 ± 23.1
May	23.1	36.0 / 14.6	50.7	100 / 8.3	24.2	261.1 ± 24.5
Jun	19.8	34.7 / 14.1	74.6	100 / 17.3	111.4	257.6 ± 24.6
Jul	19.1	25.1 / 14.7	79.9	100 / 28.2	199.8	259.4 ± 32.5
Ago	18.8	23.9 / 14.7	82.3	100 / 34.5	135.2	260.3 ± 32.8
Sept.22	16.8	24.6 / 10.8	72.0	96 / 32	110.8	-

Absorción de CO₂

La absorción de CO₂ por *S. griseum* (Fig. 7), en ambos regímenes hídricos, mostró los mayores niveles de absorción durante la noche y previo al amanecer, seguidos de una disminución en las horas de mayor irradiación lumínica.

Durante los meses de septiembre a enero del 2021 existió una media en humedad ambiental superior al 64%, junto con temperaturas que no superaron los 28°C (Tabla 2). Estas condiciones favorecieron un aumento en la captura de carbono nocturna en *S. griseum*, para ambos regímenes de riego (Fig. 7). Posterior a esta temporada la temperatura media ambiental comenzó a incrementar, y a pesar de existir precipitaciones desde el mes de abril del 2021 se propició una disminución de

captura de CO₂, observándose una caída en el consumo nocturno entre los meses de febrero del 2021 a septiembre del 2022. Esto sucedió tanto en plantas mantenidas con temporal como aquellas que se encontraban con un aporte hídrico constante.

En la temporada de secas, cuando la precipitación disminuyó o fue nula (noviembre a marzo) se presentaron al medio día valores negativos en la absorción de CO₂ (Figs. 7 A y B), es decir, que las plantas tuvieron una liberación de este gas, dicha condición se muestra en mayor proporción en la sección que fue mantenida únicamente con el aporte hídrico de temporal.

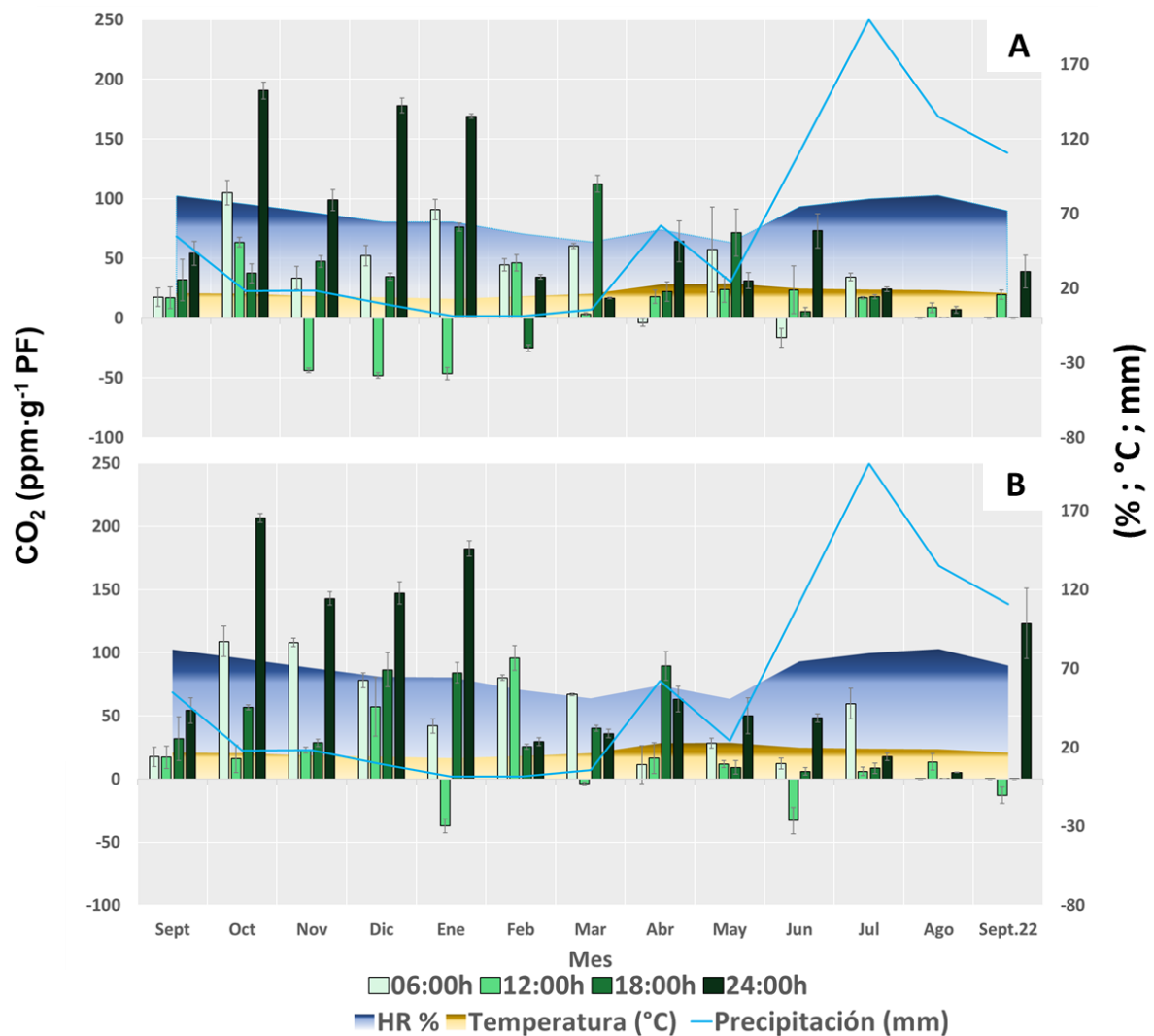


Figura 7. Parámetros ambientales y absorción mensual de CO₂ en *S. griseum*, con temporal (A) y riego (B) a lo largo de 24 horas. ±S.D. n=5.

La dinámica en la absorción de CO₂ de *S. stahlII* para ambos regímenes hídricos (Fig. 8) mostró valores más elevados previo al amanecer entre las 00:00h y 06:00h, durante los meses de septiembre a febrero del 2021. No obstante, en algunos meses durante el día, entre las 12:00h y 18:00h, existió una asimilación de carbono similar a la nocturna, sugiriendo que esta especie posee un metabolismo ácido de las crasuláceas de tipo facultativo, es decir que logra realizar carboxilación mediante la vía C3 cuando las condiciones ambientales son favorables (Winter & Holtum, 2014).

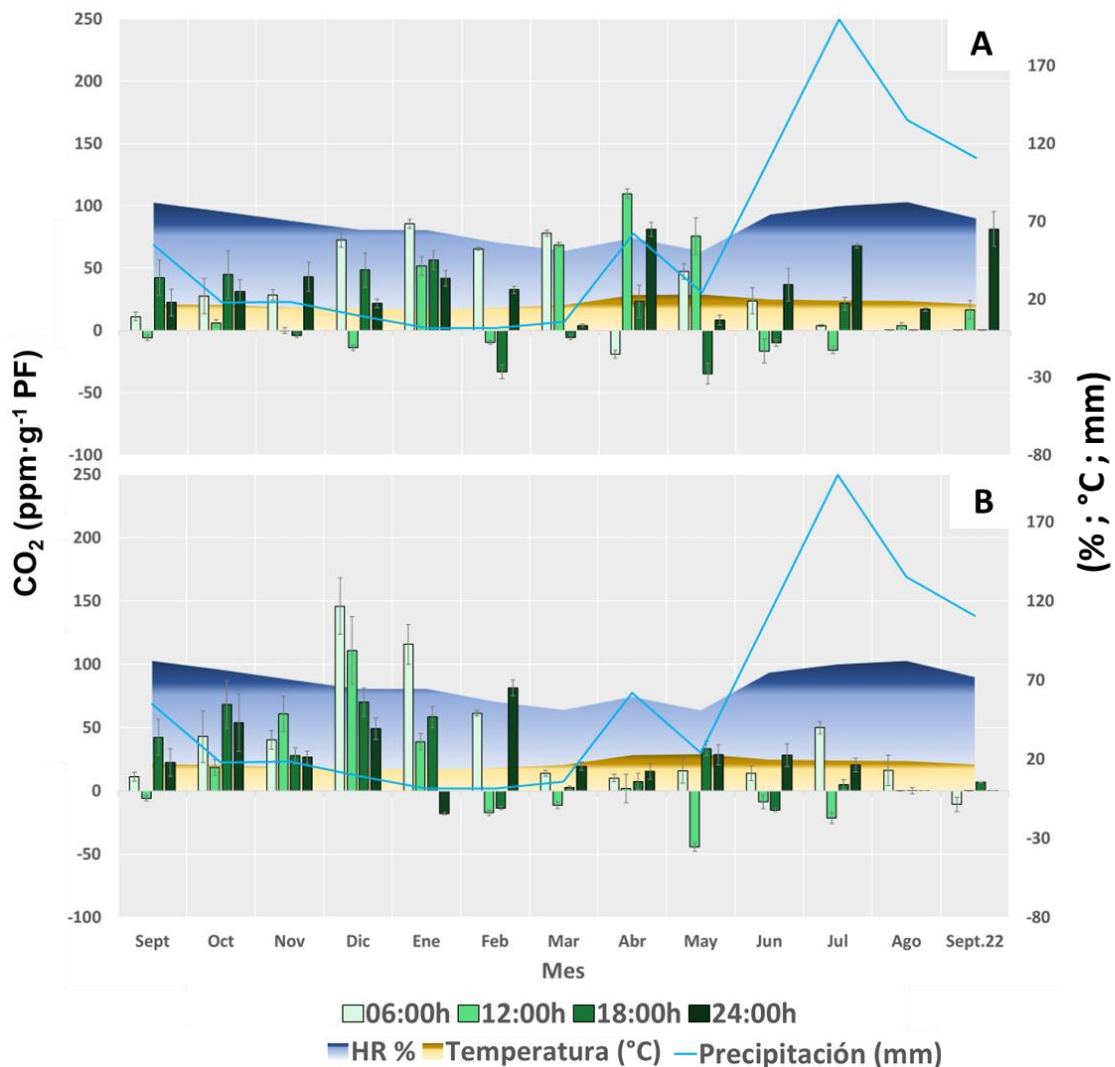


Figura 8. Parámetros ambientales y absorción mensual de CO₂ en *S. stahlII*, con temporal (A) y riego (B) a lo largo de 24 horas. ±S.D. n=5.

Para comparar las diferencias existentes en la captura de CO₂ entre ambas especies y tratamientos se sumó la captura total por día en cada mes (Fig. 9), con ello se realizó un análisis de varianza de tres vías para comparar el cambio mensual, por régimen de riego y especie en relación al consumo total de CO₂ por gramo de tejido fresco, y se observaron diferencias significativas al nivel de $p < 0.05$ para las especies analizadas [$F(1, 208) = 426.55, p = < 0.001$]. Las comparaciones post hoc utilizando la prueba Tukey HSD indicaron que la puntuación media para *S. griseum* ($M = 7.75, SD = 0.0543$) fue significativamente diferente a *S. stahlii* ($M = 6.16, SD = 0.0543$), evidenciando con esto que *S. griseum* presenta una mayor capacidad en la captura de CO₂ en comparación con *S. stahlii* (Tabla 3).

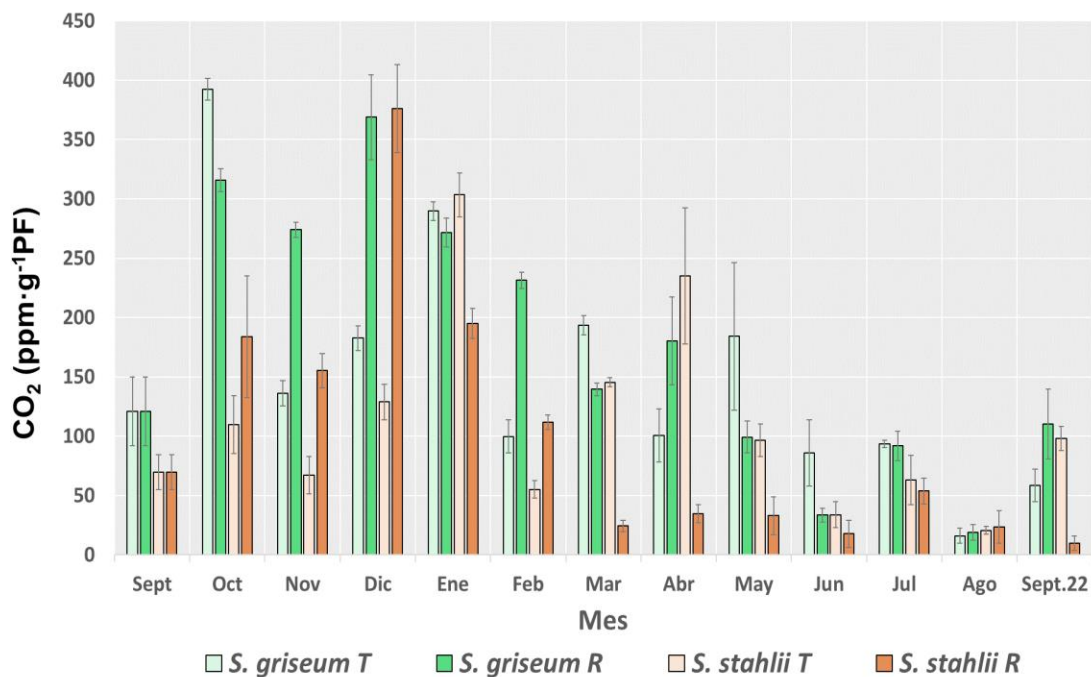


Figura 9. Captura total por día en cada mes de CO₂ por gramo de tejido fresco en *S. griseum* *S. stahlii* ±S.D. n=5. T= riego de temporal, R= riego

El comportamiento de ambas especies creciendo bajo los regímenes de riego y temporal indica que este tratamiento no influyó en la capacidad de captura de carbono, ya que no existieron diferencias significativas [$F(1, 208) = 0.07$, $p = 0.798$].

Tabla 3. Análisis de Varianza en consumo de CO₂

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Especie	1	163.60	163.599	426.55	<0.001
Régimen de riego	1	0.03	0.025	0.07	0.798
Mes	12	1000.31	83.359	217.34	<0.000
Interacciones de 2 términos					
Especie*Régimen de riego	1	30.41	30.413	79.29	<0.001
Especie*Mes	12	116.95	9.746	25.41	<0.001
Régimen de riego*Mes	12	212.02	17.669	46.07	<0.001
Interacciones de 3 términos					
Especie*R. de riego *Mes	12	104.56	8.713	22.72	<0.001
Error	208	79.78	0.384		
Total	259	1707.65			

A lo largo del año existió una mayor asimilación de carbono durante la temporada con mayor humedad relativa, de septiembre a enero del 2021, teniendo diferencias significativas al nivel de $p < 0.05$ para los distintos meses (Tabla 3) en los cuales se realizaron las determinaciones [$F(12, 208) = 217.34$, $p = < 0.001$]

A pesar de que no existieron diferencias para la asimilación de CO₂ por biomasa fresca entre los distintos regímenes hídricos aplicados, el aumento de biomasa es indicativo de la asimilación del carbono capturado, así que cuando se trasladan los valores de captura de CO₂ con relación al contenido de biomasa por planta de ambas especies (Tabla 4.) resalta que, debido a la mayor biomasa en la sección con riego, estas logran acumular una mayor proporción de carbono promedio anual, 83749.3 ppm de CO₂ por planta para *S. stahlii* y 122,591.1 ppm de CO₂ en *S. griseum*, corroborando que esta última resulta ser la mejor opción por la capacidad de captura de carbono en azoteas verdes para la Ciudad de México.

Considerando que 100 plantas de cada especie cubrieron la cuarta parte del área asignada para esta azotea verde (6 m²), en extensión *S. stahlii* mantenida con riego fijaría anualmente 1,395,821.7 ppm de CO₂ por cada metro cuadrado, a su vez en una azotea verde con riego *S. griseum* estaría fijando 2,043,185 ppm de CO₂•m² al año.

Tabla 4. Captura anual promedio de CO₂ por planta.

Especie	Captura de CO₂ por planta (ppm· g⁻¹ PF)
<i>S. griseum</i> Temporal	100553.3
<i>S. griseum</i> Riego	122591.1
<i>S. stahlii</i> Temporal	62937.2
<i>S. stahlii</i> Riego	83749.3

Ácidos Orgánicos

La concentración de ácidos orgánicos en la planta indica la existencia de un metabolismo fotosintético tipo MAC en ambas especies, y tratamientos, ya que existe una mayor acumulación de ácido málico durante las horas de oscuridad (Figs. 10 y 11).

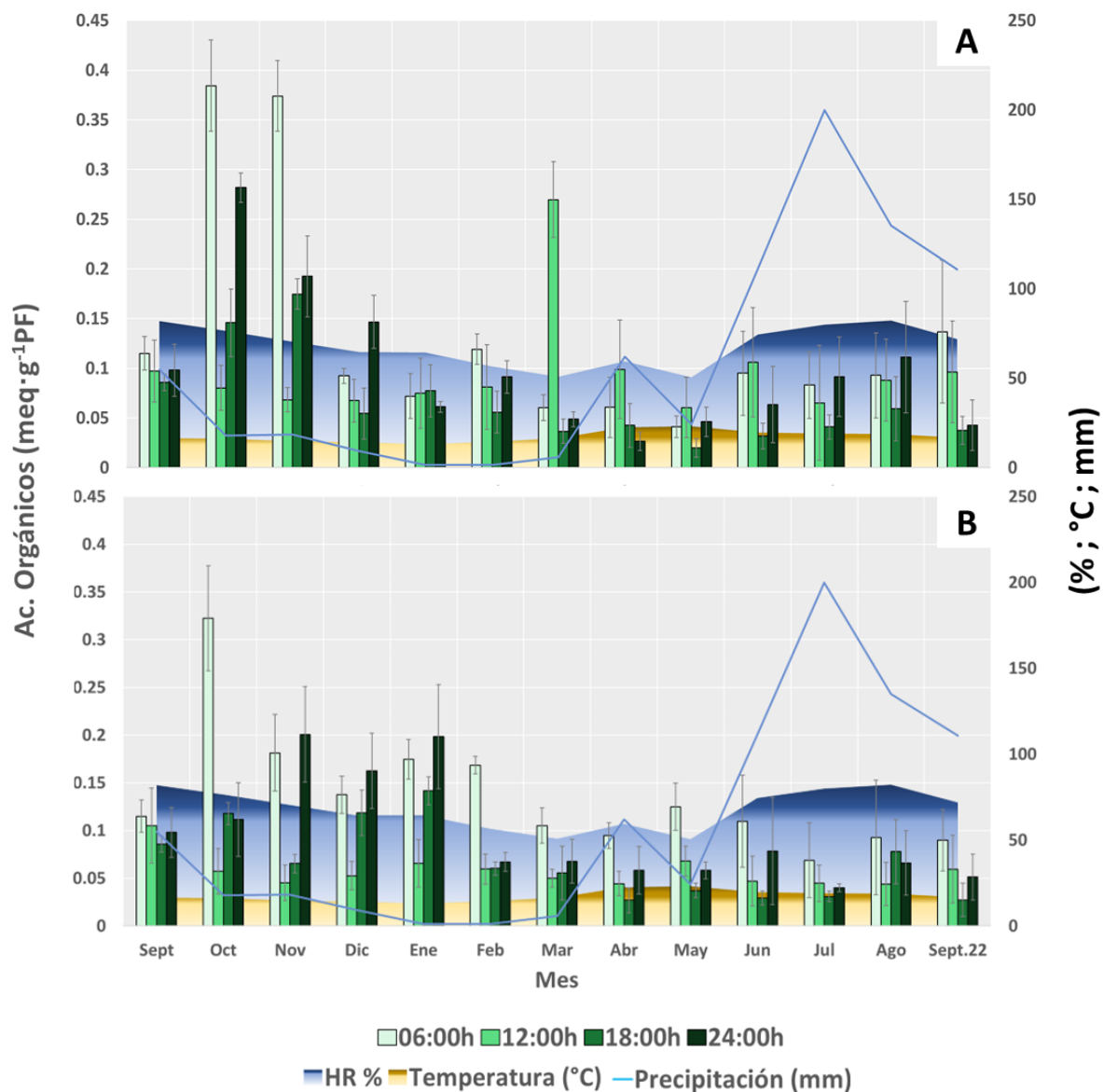


Figura 10. Acumulación diurna de ácidos orgánicos determinada en diferentes meses del año, en *S. griseum*, con Temporal (A) y Riego (B) a lo largo de 24 horas, \pm S.D. n=5.

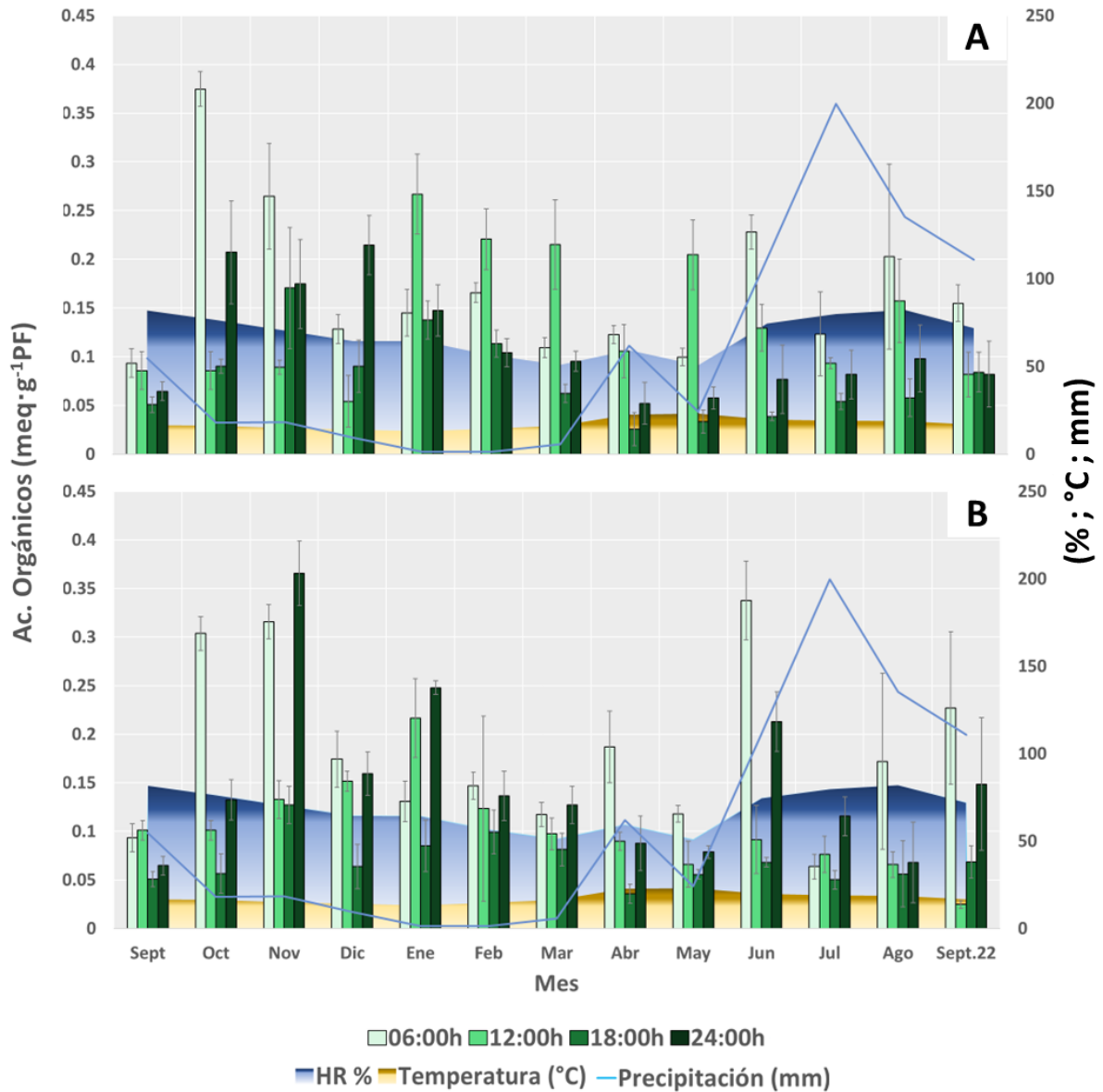


Figura 11. Acumulación diaria de ácidos orgánicos determinada en diferentes meses del año en *S. stahlia*, con Temporal (A) y Riego (B) a lo largo de 24 horas. \pm S.D. n=5.

Para comparar los cambios mensuales por régimen de riego y especie se realizó un análisis de varianza de tres vías (Tabla 5). En relación con la acumulación de ácidos orgánicos por gramo de tejido fresco (Figs. 10 y 11), se observaron diferencias significativas al nivel de $p < 0.05$ para las especies analizadas $[F(1,208) =$

39.908, $p = <0.001$]. Las comparaciones post hoc utilizando la prueba Tukey HSD indicaron que la media para *S. griseum* ($M = 0.317$, $SD = 0.007$) fue significativamente diferente a *S. stahlia* ($M = 0.365$, $SD = 0.008$), mostrando con esto que *S. stahlia* presenta una mayor capacidad en la acumulación de ácidos orgánicos titulables en comparación con *S. griseum*.

Al igual que para el caso de la asimilación de CO_2 , la presencia y ausencia de riego en las parcelas analizadas no mostró diferencias significativas [$F(1, 208) = 2.491$, $p = 0.116$], por lo que el metabolismo en la acumulación de ácidos orgánicos no se encuentra completamente influenciado por esta variable analizada.

Para el caso de *S. griseum* (Fig. 10) existió una mayor acumulación de carbono en forma de ácidos orgánicos durante la temporada con mayor humedad relativa, en combinación con temperaturas medias que no superaron los $17^\circ C$, es decir de septiembre a febrero del 2021, posterior a este intervalo de tiempo (marzo a septiembre del 2022) la temperatura media mensual comenzó a incrementarse ($\geq 17^\circ C$) y con ello disminuyó la capacidad de acumulación de ácidos orgánicos titulables en el tejido, esta dinámica sucedió de manera muy similar en las plantas mantenidas con riego y temporal.

En relación con los resultados obtenidos para la acumulación de ácidos orgánicos de *S. stahlia* se observó para los meses de enero a marzo del 2021, en las plantas mantenidas con temporal (Fig. 11-A), que existió una mayor acumulación de ácidos titulables durante el mediodía, seguida de una disminución gradual de estos ácidos en el transcurso del atardecer. Para ambos regímenes de riego se presentó una mayor acumulación de ácidos orgánicos entre los meses de septiembre a enero y junio a septiembre del 2022 meses en los cuales la media diaria para la humedad ambiental fue superior al 64%.

Tabla 5. Análisis de Varianza en la acumulación de Ácidos Orgánicos titulables.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Especie	1	0.141	0.141	39.908	<0.001
Régimen de riego	1	0.00878	0.00878	2.491	0.116
Mes	12	1.586	0.132	37.499	<0.001
Interacciones de 2 términos					
Especie*Régimen de riego	1	0.00380	0.00380	1.079	0.300
Especie*Mes	12	0.229	0.0191	5.414	<0.001
Régimen de riego*Mes	12	0.262	0.0219	6.201	<0.001
Interacciones de 3 términos					
Especie*R. de riego*Mes	12	0.266	0.0221	6.283	<0.001
Error	208	0.733	0.00352		
Total	259	3.230	0.0125		

Los valores obtenidos sugieren que la presencia de riego no modifica directamente la proporción de ácidos orgánicos acumulados por la planta y tampoco existe una interacción entre los factores de especie y régimen de riego analizados (Tabla 5).

Biomasa

Con relación al crecimiento, se observó un mayor incremento en la biomasa de ambas especies en la sección que recibió un aporte de agua periódicamente, mostrándose diferencias significativas al nivel de $p < 0.05$ para los regímenes hídricos utilizados [$F(1, 208) = 42.49$, $p = < 0.001$]. La biomasa por planta aumentó en ambas especies y tratamientos durante los últimos meses de mediciones, agosto y septiembre del 2022 (Figs. 12 y 13), época durante la cual se presentaron los mayores índices de precipitación (Tabla 2).

S. griseum mostró un mayor incremento de biomasa mensual en comparación con *S. stahlii*, para ambos regímenes de riego (Figs. 12 y 13). El análisis de varianza de tres vías para comparar el cambio mensual por régimen de riego y especie mostró diferencias significativas al nivel de $p < 0.05$ para las especies analizadas [$F(1, 208) = 39.80$, $p = < 0.001$]. Las comparaciones post hoc utilizando la prueba Tukey HSD indicaron que la puntuación media para *S. griseum* ($M = 3.0102$, $SD = 0.0310$) fue significativamente diferente a *S. stahlii* ($M = 2.7333$, $SD = 0.0310$), evidenciando con

esto que *S. griseum* presenta una mayor capacidad en la captura de carbono en comparación con *S. stahlia* siendo reflejada con un incremento en la biomasa seca ganada a lo largo del año (Fig. 12).

Tal como se muestra en el apartado correspondiente a la captura de CO₂ (Tabla 4), cuando se considera la biomasa fresca del tejido fotosintético con relación a la captura de CO₂, *S. griseum* resalta como la especie que presenta una mayor eficiencia en la captura de carbono con relación a la biomasa acumulada.

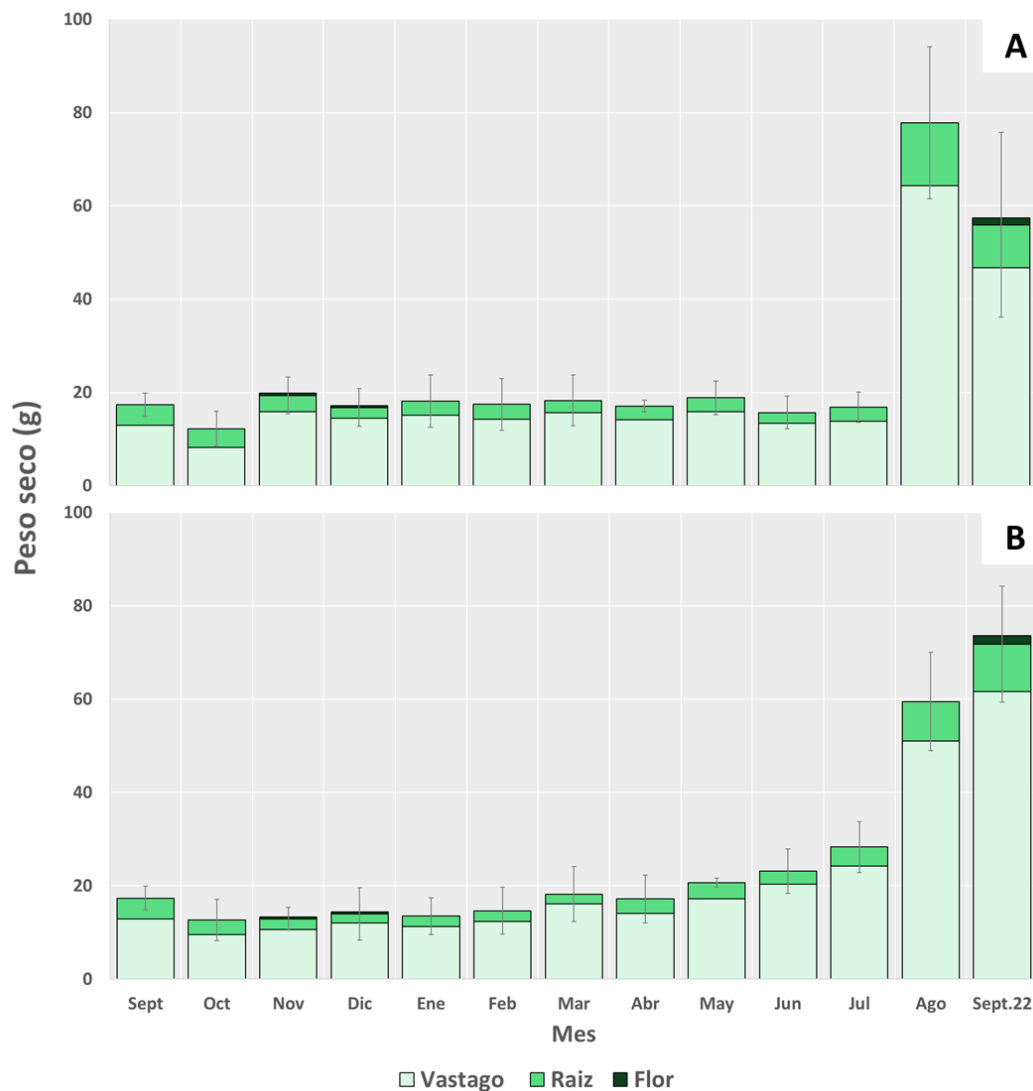


Figura 12. Biomasa seca mensual de *S. griseum*, con Temporal (A) y Riego (B), ±S.D. n=5.

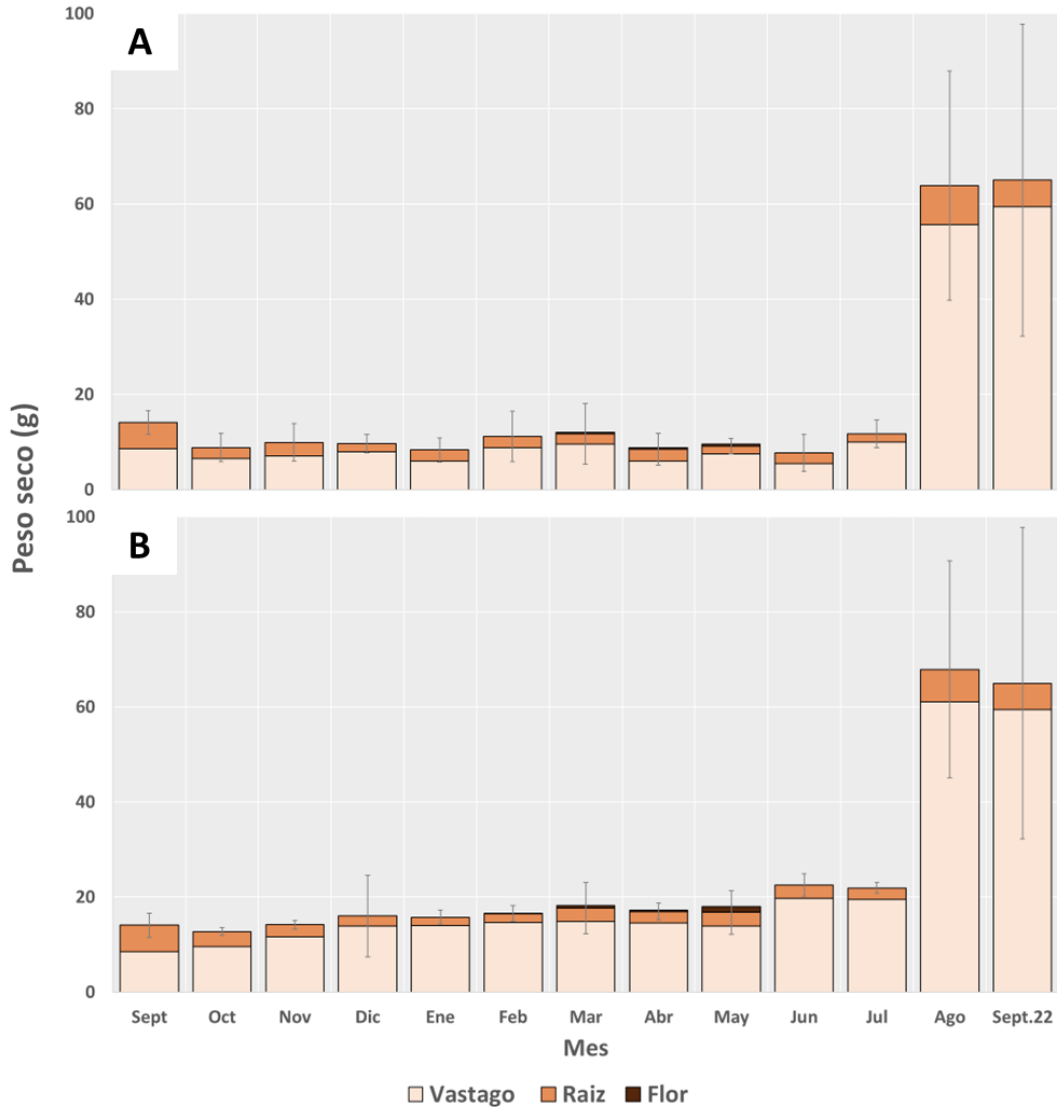


Figura 13. Biomasa seca mensual de *S. stahlia*, con Temporal (A) y Riego (B), \pm S.D. n=5.

Se observó que, la temporada de floración para ambas especies, ocurre en los meses de noviembre y diciembre para *S. griseum* (Fig. 12) y en el caso de *S. stahlia* durante los meses de marzo, abril y mayo (Fig. 13). A lo largo del año existió una serie de cambios en el aspecto de la azotea verde derivados de la sucesión estacional (Fig. 14), pasando de momentos donde ambas especies muestran tonos verdes brillantes en su cobertura foliar (Fig. 14 A y C) a otros en lo que adquieren tonalidades rojizas derivadas de la exposición a la radiación lumínica y falta de agua (Fig. 14 B).

Es importante señalar que en el caso de *S. griseum* posterior a la temporada de floración y al comienzo de la temporada de secas, ocurrió la pérdida de la mayor parte de la cobertura foliar (Fig. 14 B), aunque aparentemente el tratamiento sometido a riego preservó una mayor proporción de hojas, no existieron diferencias estadísticamente significativas entre la interacción y mes (Tabla 6).

En contraste, *S. stahlia* no mostró la pérdida de hojas en las temporadas con bajas o nulas precipitaciones. El único cambio visible fue la pérdida de turgencia en comparación con las plantas mantenidas con riego, su floración comenzó previo al inicio de la temporada de lluvias y se observó que en el tratamiento con riego comenzó la formación de botones florales un mes antes que el tratamiento con temporal (Fig. 13).

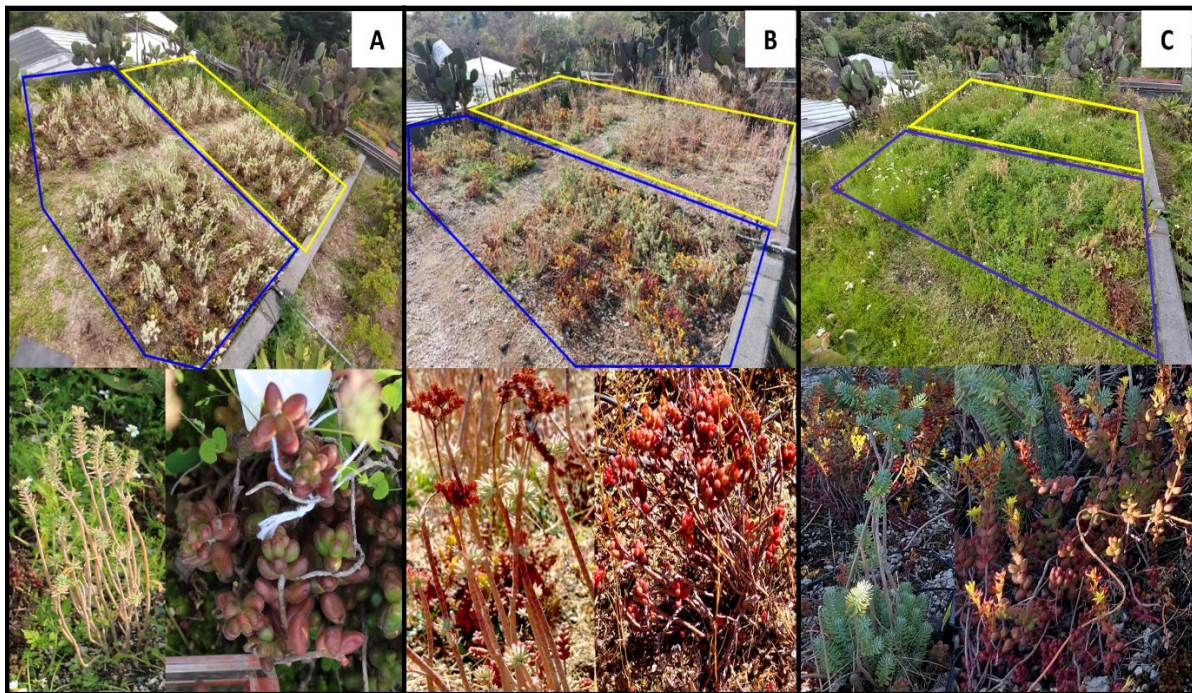


Figura 14. Aspecto de la azotea verde del Jardín Botánico, derivado de la variación estacional. IBUNAM, Ciudad Universitaria. Octubre del 2021 (A); febrero del 2022 (B); septiembre de 2022 (C). Riego (línea azul) y temporal (línea amarilla).

Tabla 6. Análisis de Varianza de Biomasa Seca

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Especie	1	4.985	4.98544	39.80	<0.001
Régimen de riego	1	5.322	5.32218	42.49	<0.001
Mes	12	71.895	5.99127	47.84	<0.001
Interacciones de 2 términos					
Especie* Régimen de riego	1	3.898	3.89814	31.12	<0.001
Especie*Mes	12	0.758	0.06319	0.50	0.910
Régimen de riego *Mes	12	3.036	0.25304	2.02	0.024
Interacciones de 3 términos					
Especie*R. de riego*Mes	12	2.053	0.17112	1.37	0.184
Error	208	26.051	0.12525		
Total	259	118.001			

Discusión

Un aspecto que resulta determinante en la implementación exitosa de azoteas verdes es la elección de especies vegetales que se adecuen a un ambiente con un bajo aporte hídrico, por lo que se ha señalado la importancia de evaluar y conocer más sobre potenciales especies para su implementación (Rayner *et al.*, 2016). Es por ello que el objetivo principal de este trabajo fue evaluar el metabolismo y captura de carbono de dos especies mexicanas, *Sedum stahlii* y *S. griseum*, las cuales han sido señaladas como potenciales para la implementación en este tipo de espacios (Ávila-Hernández *et al.*, 2023; Grullón *et al.*, 2020), pero de las cuales se desconocía en forma clara el tipo de metabolismo que presentan.

De acuerdo con los resultados obtenidos a lo largo de un año de observaciones se mostró que, durante la temporada en la cual existe un mayor índice de humedad ambiental relativa (HR%), la proporción de CO₂ atmosférico capturado por ambas especies (*S. stahlii* y *S. griseum*) fue mayor en comparación con la época de secas en la zona de estudio (Figs. 7 y 8). Bajo condiciones de baja HR% que se combina con el aumento en la irradiación lumínica se esperaría un incremento de la resistencia estomática y por lo tanto disminución en la tasa de toma de CO₂ en ambas especies, adicionalmente se activan mecanismos de defensa que prevendrían de

daño en la membrana fotosintética (fotoinhibición) y que afectan el intercambio gaseoso y eviten la pérdida excesiva de vapor de agua (Arriaga *et al.*, 2012; Gil-Marín *et al.*, 2006).

Durante los meses de septiembre a enero, cuando la HR fue elevada ($\geq 64\%$) y la temperatura media del ambiente no superó los 17°C , el comportamiento del metabolismo en *S. griseum*, para ambos regímenes de riego es el típico MAC, es decir que existe una absorción mayor de CO_2 nocturna (Geydan & Melgarejo, 2005) entre las fases I, II y IV (Fig. 3) teniendo una nula absorción de carbono durante las horas de mayor irradiación lumínica, tal como se muestra en la figura 7. Conforme transcurrió la temporada de secas en la azotea verde, se presentó un descenso gradual de la humedad relativa, además de un incremento en la temperatura media, con ello la capacidad de captura de CO_2 en *S. griseum* disminuyó, mostrándose también caídas en la asimilación nocturna. Esta flexibilidad metabólica se encuentra relacionada con la capacidad de realizar un cierre estomático que favorece a la eficiencia en el uso del agua cuando las condiciones medioambientales no son favorables para la especie, y abrirlos total o parcialmente durante la noche cuando existe menor riesgo de pérdida de agua para realizar una fijación de carbono atmosférico (Borland *et al.*, 2014).

Para el caso de *S. stahlia* en ambos regímenes de riego también se observó la presencia de metabolismo del tipo MAC, no obstante durante la temporada de lluvias su comportamiento se ajusta más al descrito como del tipo MAC-facultativo (Herrera, 2009; Geydan & Melgarejo, 2005) pues se observa en mayor proporción la asimilación diurna del carbono atmosférico, que surge durante las primeras horas del día, es decir previo o durante el amanecer (Fig. 8), seguida de una refijación y acumulación nocturna de carbono, la cual se observa como un incremento en la cantidad de ácidos orgánicos acumulados por esta especie (Fig. 11). Es decir, que dicha especie probablemente logra realizar la carboxilación mediante la vía C3 cuando las condiciones ambientales son favorables en el día (Winter & Holtum, 2014), ya que este metabolismo suele estar íntimamente ligado a las condiciones medioambientales y puede ser modificado o perturbado por la temperatura,

intensidad lumínica, estatus nutricional, humedad ambiental y disponibilidad de agua (Borland *et al.*, 2014; Dodd *et al.*, 2002; Winter & Holtum, 2014).

En ambas especies existieron momentos del día durante los cuales hubo liberación de CO₂ hacia la atmósfera; este fenómeno se presentó durante las horas de mayor irradiación lumínica por lo cual existe un incremento en la temperatura. Estas liberaciones diurnas en plantas MAC son indicativo del estrés hídrico presentado en las plantas debido a las condiciones desfavorables del medio lo cual favorece al cierre total de estomas y que también podría estar ligado a una fotoinhibición (Diez *et al.*, 2017; Geydan & Melgarejo, 2005).

Posterior al comienzo de la temporada de secas la temperatura media ambiental incrementó ($\geq 18^{\circ}\text{C}$) y esta no disminuyó aún con la llegada de la estación de lluvias, presentándose máximas de hasta 44°C al mediodía (Tabla 2). De acuerdo con lo reportado por Jáuregui (2009) estos fenómenos considerados como “olas de calor” son derivados del calentamiento global y representan momentos para la Ciudad de México, donde la temperatura alcanza entre los 25 a 30°C y propiciando el descenso de la humedad relativa. Estas olas de calor ocasionaron tanto en *S. griseum* como *S. stahlia* la disminución de su capacidad de asimilación de CO₂ atmosférico, entre los meses de abril a septiembre del 2022, debido a que se encontraron sometidas a momentos en los cuales la tensión atmosférica ejercida sobre la planta fue muy elevada ($\Psi_w \leq 300$ MPa) por lo cual se obliga al cierre estomático para eficientizar el uso del agua, a pesar de existir un aporte hídrico periódico. Con relación a lo anterior, se ha reportado que elevadas temperaturas logran disminuir la conductancia estomática es decir que la eficiencia en el uso de agua se ve disminuida debido a que el gradiente de presión de vapor entre la hoja y la atmósfera cambia favoreciendo la transpiración por lo que se inhibe la apertura estomática (Hatfield & Dold, 2019).

Aun bajo la condición anteriormente descrita, la cuantificación de ácidos orgánicos para ambas especies (Fig. 10 y 11) se mantuvo con un dinamismo MAC, es decir en las horas de oscuridad existe acumulación de ácidos orgánicos, a pesar de no existir una asimilación nocturna de CO₂ atmosférico, por lo cual se infiere que

la planta se encuentra reciclando el carbono asimilado con anterioridad. En relación con ello se ha señalado que cuando las condiciones atmosféricas desfavorables se acrecientan y mantienen por periodos largos se entra en un metabolismo del tipo MAC-“inútil” (CAM-idling), donde los estomas se cierran en la mayor parte del día y la noche para evitar con ello la pérdida de agua comprometiendo la captura de CO₂ atmosférico pero presentando fluctuaciones en la cantidad de ácido málico de la vacuola proveniente de la asimilación de carbono derivado de la respiración (Herrera, 2009; Geydan & Melgarejo, 2005).

Durante los meses en los cuales se acrecentó la falta de agua se presentaron cambios en la turgencia foliar, principalmente en las plantas mantenidas con el régimen de temporal. En *S. stahlia* se perdió turgencia y se mostraron tonalidades más oscuras, seguramente debido a la síntesis de una mayor cantidad de pigmentos accesorios que evitan el daño del aparato fotosintético por una fotooxidación (Terletskaia *et al.*, 2022; Bonina *et al.*, 2000). En *S. griseum* se presentó la caída de la mayor parte de su área foliar (Fig. 12). Dicha estrategia ha sido documentada con anterioridad para especies con metabolismo MAC con la intención de mantener una mejor eficiencia en el uso de agua y evitar las pérdidas por evapotranspiración reduciendo la superficie transpiratoria en las temporadas climáticamente más desfavorables (Griffiths *et al.*, 2002).

A pesar de que se ha señalado en distintos estudios que el aporte hídrico en estas estructuras urbanas resulta indispensable para la supervivencia de las plantas (Agra *et al.*, 2017; Rayner *et al.*, 2016; Habibi & Hajiboland, 2012; Herrera, 2009). En este trabajo y para las dos especies utilizadas, no se mostraron diferencias entre la sección mantenida con riego y temporal. Con respecto a la acumulación de ácidos orgánicos y absorción de CO₂ atmosférico, para cada especie la captura de carbono sucedió de forma muy similar en ambas condiciones. No obstante, su distinta capacidad para tolerar la falta de agua y el crecimiento que mantuvieron a lo largo del año (Figs. 12 a 14). El aporte de agua sí repercutió sobre la biomasa que acumularon y con ello la posibilidad de presentar una mayor superficie fotosintética para la acumulación de carbono (Fig. 9), pues como se ha señalado un aumento de biomasa en la parte aérea de las plantas permite la captura y acumulación de una

mayor cantidad de carbono al aumentar la proporción de tejido fotosintético (IPCC, 2013). Bajo esta premisa aquella especie que resalta como la más eficiente en relación con su crecimiento y captura de carbono para la implementación de azoteas verdes en la Ciudad de México es *S. griseum*.

Con relación a la captura anual de carbono que se ha documentado para distintas especies del género *Sedum*, se reporta que en promedio *S. acre*, *S. álbum* y *S. kamtschaticum*, acumularon a lo largo de dos años 100,000 ppm de C•m⁻² (Getter *et al.*, 2009), mientras que en otro estudio se reporta una acumulación anual de 143,000 ppm de C•m⁻² en plantas de *S. acre* implementado en una azotea verde de Irán (Reza *et al.*, 2021). En un estudio realizado bajo el clima mediterráneo se prospectó la captura de 100,000 ppm de C•m⁻² en plantas de *S. sediforme* durante una temporada seca de 200 días (Agra *et al.*, 2017). Los datos anteriormente descritos corresponden a diversas especies no presentes en México, pero todas ellas implementadas bajo la premisa de poseer bajos requerimientos hídricos, a pesar de que en estos trabajos fueron mantenidas bajo distintas condiciones de riego los resultados obtenidos para esta investigación muestran valores por encima de los comúnmente registrados para el género *Sedum*, resaltando que bajo condiciones de riego, en este trabajo, se obtuvieron valores de acumulación anual de carbono para *S. stahlii* de 1,395,821.7 ppm de CO₂•m² mientras que *S. griseum* bajo las mismas condiciones presentó una mayor captura, correspondiente a los 2,043,185 ppm de CO₂•m².

Por otro lado, cuando se analiza la potencial implementación de especies mexicanas en azoteas y muros verdes urbanos, estas logran resaltar, pues además de tolerar amplios rangos de variaciones en las condiciones medioambientales, también presentan elevados índices de captura de carbono, tal es el caso de *S. mexicanum* en la cual se ha documentado la acumulación anual de 364,000 ppm de C•m⁻² (Kuronuma & Watanabe, 2017) y el de *S. dendroideum* y *S. rubrotinctum* para las que se reportó una acumulación de 1.8 x10⁸ ppm de CO₂ al año en una extensión de 100 m² (Collazo-Ortega *et al.*, 2017). Con esto los valores obtenidos *S. griseum* continúa prospectándose como una de las mejores candidatas para su implementación en este tipo de espacios urbanos.

Se estima mediante este trabajo, que una azotea verde extensiva de 100 m² conformada por *S. griseum* podría estar fijado 2.0x10⁸ ppm de CO₂ al año mientras que una conformada por *S. stahlii* podría capturar cerca de 1.3 0x10⁸ ppm de CO₂ al año. En contraste se estima que anualmente se generan por habitante en la Ciudad de México cerca de 4.4 x10⁸ ppm de CO₂ (Cruz, 2016) por lo cual este tipo de espacios verdes urbanos contribuye a la mitigación de la huella de carbono que genera la población en la ciudad, siendo indispensable la aparición de programas gubernamentales que promuevan su utilización. También, cabe considerar que el sistema suelo mantiene un flujo de emisiones de bióxido de carbono hacia la atmósfera, derivado del dinamismo de los organismos que alberga y las mismas raíces de plantas, influenciado por la temperatura, humedad y textura (López-Teloxa *et al.*, 2020), por ello resulta de importancia continuar con el estudio de estos factores para determinar con mayor exactitud la captura neta de carbono en este tipo de sistemas de naturación urbana.

Conclusiones

Para ambas especies no se registró una diferencia en la captura de CO₂ en función del riego o temporal

S. griseum mostró una mayor captura diaria de carbono en comparación con *S. stahlii*, en ambos regímenes de riego, siendo esta más eficiente durante los meses de lluvias.

S. griseum y *S. stahlii* presentan un metabolismo ácido de las crasuláceas.

La aplicación de riego en la azotea verde favoreció el incremento de biomasa en ambas especies, pero no tuvo un efecto positivo en la asimilación de CO₂ y ácidos orgánicos.

La baja precipitación y el aumento de temperatura durante la temporada de secas en la Ciudad de México disminuyen la capacidad de captura de carbono en ambas especies sometidas a riego y temporal.

S. griseum sometida a riego mostró un mayor incremento de biomasa en comparación con *S. stahlii*.

Recomendaciones

Este trabajo cumple con la necesidad de aportar información existente en México sobre la implementación de azoteas verdes extensivas, las cuales constantemente son implementadas resaltando su valor ornamental, pero dejando de lado la selección de especies que aporten beneficios ecosistémicos como la captura de contaminantes. Constantemente se utilizan plantas que pueden representar un riesgo para la flora y fauna local, con altos requerimientos en el aporte de agua, nutrientes y/o mantenimiento para su establecimiento.

Es por ello que es necesario continuar estudiando la biología de diferentes especies de crasuláceas nativas que se adapten a las condiciones de las diversas regiones de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México con la finalidad de conocer su capacidad en la captura y asimilación de contaminantes, que representan un grave problema ambiental. Y de esta manera conocer su eficiencia en la en captura de CO₂, su crecimiento con relación al aporte de agua, para brindar información de que especies pueden ser potenciales candidatas para la implementación azoteas verdes y, además, aumentar las superficies naturadas en estos espacios urbanos.

Aún falta mucho por hacer, desde conocer los mecanismos presentes frente al estrés hídrico y lumínico, hasta la propia morfofisiología de cada una de estas especies. Resultando conveniente conocer y correlacionar más a detalle los aspectos medioambientales que influyen en el crecimiento y captura de contaminantes, como lo son el potencial hídrico en el sistema suelo-planta-atmósfera o bien implementar metodologías que permitan la medición del consumo neto de carbono en este tipo de sistemas completos.

Referencias bibliográficas.

- Adrew, R. & Peters, G. 2021. [En Línea]. The global carbon project's fossil CO₂ emissions dataset. Figshare. [Fecha de consulta: 17 de febrero del 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.16729084.v1>
- Alcaforado, M.J. & Andrade, E. 2008. Global warming and the urban heat island. *Urban Ecology*. Springer. 249-262
- Aragón-Parada, J., Carrillo-Reyes, P., Rodríguez, A. y Munguía-Lino, G. 2019. Diversidad y distribución geográfica del género *Sedum* (Crassulaceae) en la Sierra Madre del Sur, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 90: 1-17.
- Arellano-Leyva, E., Portillo-Purata, M.L. & Muñoz, V.M. 2021. Rainfall retention and runoff generation processes in tropical mature green roof ecosystems. *Hydrological Processes*. 35(11): 1-14.
- Arriaga, F.A., De la Cruz, G.G.H. & Ortiz, M.J.G. 2012. Relaciones hídricas en las plantas. UNAM. México. 123pp.
- Agra, H., Klein, T., Vasl, A., Shalom, H., Kadas, G., y Blaustein, L. 2017. *Sedum*-dominated green-roofs in a semi-arid region increase CO₂ concentrations during the dry season. *Science of the Total Environment*. 584(585): 1147-1151.
- Ávila-Hernández, A., Simá, E. & Ché-Pan, M. 2023. Research and development of green roofs and green walls in Mexico: A review. *Science of The Total Environment*. 865(1): 1-16.
- Azar, C., Lindgren, K., Obersteiner, M., Riaji, K., Van Vuuren, D.P., Den Elzen, K.M.G.J., Möllersten, K. & Larson, E.D. 2010. The feasibility of low CO₂ concentration targets and the role of bio-energy with carbon capture and storage (BECCS). *Climatic Change*. 100: 195-202.
- Azeñas, V., Janner, I., Medrano, H. & Gulías, J. 2018. Performance evaluation of five Mediterranean species to optimize ecosystem services of green roofs under water-limited conditions. *Journal of Environmental Management*. 212:236-247.
- Barradas, L.V. 2013. La isla de calor urbana y la vegetación arbórea. *IKOS*. 7:1-4.
- Bonina, F., Puglia, C., Tomaino, A., Saija, A., Mulinacci, N., Romani, A. & Vincieri, F.F. 2000. In-vitro antioxidant and In-vivo photoprotective effect of three

- lyophilized extracts of *Sedum telephium* L. leaves. *J. Of Pharmacy and Pharmacology*. 52(10): 1279-1285.
- Borland, A., Hartwell, J., Weston, D.J., Schlauch, K.A., Tschaplinski, T.J., Tuskan, G.A., Yang, X. & Cushman, J.C. 2014. Engineering crassulacean acid metabolism to improve water-use efficiency. *Trends Plant Sci*. 19(5): 327-338.
- CAME. Comisión Ambiental de la Megalópolis. 2018. [En Línea]. La mancha urbana de la megalópolis. [Fecha de consulta: 15 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/la-mancha-urbana-de-la-megalopolis?idiom=es>
- Carbajal, A.J., Rodríguez, R.A.A., Ávila, C.L.P., Rodríguez, H.A.L. y Hernández, C.H. 2017. Captura de carbono por una fachada vegetada. *Acta Universitaria: Multidisciplinary Scientific Journal*. 27(5): 55-61.
- CEDRSSA. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. 2020. [En Línea]. Impacto económico del cambio climático en México. [Fecha de consulta: 15 de febrero del 2023]. Disponible en: http://www.cedrssa.gob.mx/post_n-impacto_econnimico-n-_del_-n-cambio_climnotico-n-_en_mn-xico.htm
- Chen, c., Xu, R., Tong, D., Qin, X., Cheng, J., Liu, J., Zheng, B., Yan, L. & Zhang, Q. 2022. A striking growth of CO₂ emissions from the global cement industry driven by new facilities in emerging countries. *Environmental Research Letters*. 17(4): 1-12.
- Cheng, M., Lu, Y., Zhu, H. & Xiao, K. 2022. Measuring CO₂ emissions performance of China's construction industry: A global Malmquist index analysis. *Environmental Impact Assessment Review*. 92 (106673): 1-14.
- Chi-Feng, C. 2015. A preliminary study on carbon sequestration potential of different green roof plants. *IJRSB*. 3(5): 121-129.
- Chumley, H. & Hewlings, S. 2020. The effects of elevated atmospheric carbon dioxide (CO₂) on micronutrient concentration, specifically iron (Fe) and zinc (Zn) in rice; a systematic review. *Journal of Plant Nutrition*. 43 (10): 1571-1578.
- Clausen, R.T. 1959. *Sedum of the Trans-Mexican Volcanic Belt: An exposition of taxonomic methods*. Comstock pub. Associates. New York. 380pp.

- Collazo-Ortega, M., Rosas, U. & Reyes-Santiago, J. 2017. Towards providing solutions to the air quality crisis in the Mexico City metropolitan area: carbon sequestration by succulent species in green roofs. PLOS Currents Disasters. 9.
- Colunga, L.M., Cambrón-Sandoval, V.H., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar, A. y Luna-Soria, H. 2015. The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro City, Mexico. *Atmósfera*. 28(3): 205-218.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. 2018. [En Línea]. Estadísticas del agua en México. [Fecha de consulta: 15 de mayo del 2021]. Disponible en: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Contreras-Bejarano, O. y Villegas-González, P.A. 2019. Techos verdes para la gestión integral del agua: caso de estudio Chapinero, Colombia. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 10(5): 282-318.
- Cruz, I.I.C. 2016. Emisiones de CO₂ en hogares urbanos. El caso del Distrito Federal. *Estudios Demográficos y Urbanos*. 31(91):115-142.
- Diez, C.M., Moreno, F. & Gantiva, E. 2017. Effects of light intensity on the morphology and CAM photosynthesis of *Vanilla planifolia* Andrews. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*. 70(1): 8023-8033.
- Dodd, A., Borland, A., Haslam, R., Griffiths, H. & Maxwell, K. 2002. Crassulacean Acid Metabolism: Plastic, Fantastic. *J Exp Bot*. 53:559-580.
- Epstein, P.R. 2001. Climate change and emerging infectious diseases. *Microb Infection*. 3:747-754.
- Esparza, M. 2014. La sequía y la escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*. 89:195-219.
- Espinoza, H.J. 2021. Variación de la diversidad de flora y fauna en tres azoteas verdes de la ciudad de México. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. UNAM. México. 133 pp.
- Evans, N., Baierl, A., Semenov, M.A., Gladders, P. & Fitt, B.D.L. 2008. Range and severity of a plant disease increased by global warming. *J.R. Soc. Interface*. 5: 525-531.

- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Bakker, D.C.E. *et al.* 2021. [En Línea]. Global Carbon Budget 2021. Earth System Science Data. [Fecha de consulta: 17 de febrero del 2022]. Disponible en: <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2021-386/>
- Gasser, T., Guivarach, C., Tachiiri, K., Jones, C.D. & Cias, P. 2015. Negative emissions physically needed to keep global warming below 2°C. *Nature Communications*. 6 (7958): 1-7.
- Getter, K.L. & Rowe, B.D. 2006. The role of extensive green roofs in sustainable development. *Hort Science*. 41(5): 1276-1285.
- Getter, K.L., Rowe, B. D., Robertson, G.P., Cregg, B.M. & Andresen, J.A. 2009. Carbon sequestration potential of extensive Green roofs. *Environ. Sci. Technol.* 43:7564-7570.
- Geydan, T.D. & Melgarejo, L.M. 2005. Metabolismo ácido de las crasuláceas. *Acta Biológica Colombiana* 10(2): 3-15.
- Gilman, I.S. & Edwards, E.J. 2020. Crassulacean acid metabolism. *Current Biology*. 30(1): 51-63.
- Gil-Marín, J.A., Rodríguez, R., Jasso-Cantú, D. & Zermeño, A. 2006. Resistencia estomática, transpiración y potencial hídrico en sábila con diferentes condiciones ambientales. 24(3): 355-365.
- GCDMX. Gobierno de la Ciudad de México. 2019. [En Línea]. Programa Ambiental y de Cambio Climático para la Ciudad de México. [Fecha de consulta: 19 de diciembre del 2022]. Disponible en: <https://www.jefaturadegobierno.cdmx.gob.mx/storage/app/media/pdf-programa-de-medio-ambiente-y-cambio-climatico-uv.pdf>
- GOCDMX. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. 2017. [En Línea]. Ley ambiental de la protección a la tierra en el distrito federal. [Fecha de consulta: 19 de diciembre del 2018]. Disponible en: http://www.paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2017/LEY_AMBIENTAL_PROTECCION_TIERRA_08_09_2017.pdf
- GOCDMX. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. 2018. [En Línea]. Norma Ambiental para el distrito federal NADF-013-RNAT-2017. [Fecha de consulta:

- 26 de noviembre del 2022]. Disponible en: http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/NADF_013_RNA_T_2017.pdf
- GOCDMX. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. 2019. [En Línea]. Código Fiscal de la Ciudad de México. Artículo 296 Bis. [Fecha de consulta: 26 de noviembre del 2022]. Disponible en: https://congresocdmx.gob.mx/archivos/transparencia/CODIGO_FISCAL_CD_MX.pdf
- Grullón-Penkova, F.I., Zimmerman, J.K. y González, G. 2020. Green roofs in the tropics: design considerations and vegetation dynamics. *Heliyon*. 6:1-8.
- Griffiths, H., Broadmeadow, M.S.J., Borland, A.M. & Hetherington, C.S. 2002. Regulation of the Rubisco Activity in CAM Plants: Better Later than Never. *Funct. Plant Biol.*29:689-696.
- Habibi, G. & Hajiboland, R. 2012. Comparison of photosynthesis and antioxidative protection in *Sedum album* and *Sedum stoloniferum* (Crassulaceae) under water stress. *Photosynthetica*. 50(4): 508-518.
- Hatfield, J.L. & Dold, C. 2019. Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate. *Front. Plant Sci.* 10(103): 1-14.
- Herrera, A. 2009. Crassulacean acid metabolism and fitness under water deficit stress: if not for carbon gain, what is facultative CAM good for? *Annals of Botany*. 103: 645-653.
- Heusinger, J. & Weber, S. 2017. Extensive green roof CO₂ exchange and its seasonal variation quantified by eddy covariance measurements. *Science of the Total Environment*. 607 (608): 623-632.
- Hatfield, J.L. & Prueger, J.H. 2015. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*. 10:4-10.
- Hunter, M.D. 2001. Effects of elevated atmospheric carbon dioxide on insect-plant interactions. *Agricultural and Forest Entomology*. 3(3): 153-159.
- INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2018. [En Línea]. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. [Fecha de consulta: 19 de diciembre del 2018]. Disponible en:

- <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2020. [En Línea]. Censo de población y vivienda 2020. [Fecha de consulta: 19 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2017. [En Línea]. Marco geoestadístico 2017. [Fecha de consulta: 19 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463171829>
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. [En Línea]. Third assessment report (AR3). [Fecha de consulta: 23 de marzo del 2022]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar3/syr/>
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. [En Línea]. Fourth assessment report (AR4). [Fecha de consulta: 15 de marzo del 2022]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. Cambio climático: bases físicas. Contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. IPCC, Ginebra, Suiza.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. [En Línea]. Fifth assessment report (AR5). [Fecha de consulta: 15 de marzo del 2022]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Jáuregui, O.E. 2009. The heat spells of Mexico City. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 70: 71-76.
- Jáuregui, O.E. 2000. El clima de la Ciudad de México. Instituto de geografía, UNAM. 131pp.
- Khasnis, A.A. & Nettleman. M.D. 2005. Global warming and infectious disease. Archives of Medical Research. 36: 689-696.
- Kuronuma, T., Watanabe, H., Ishihara, T., Kou, D., Touda, K., Ando, M. & Shindo, S. 2018. CO₂ payoff of extensive green roofs with different vegetation species. Sustainability. 10: 2256.

- Lezama, J.L. & Graizbord, B. 2010. Los grandes problemas de México. Colmex. Mexico. 429p.
- Li, W.C. y Yeung, K.K.A. 2014. A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. International Journal of Sustainable Built Environment. 3: 127-134.
- López-Teloxa, L.C., Monterroso-Rivas, A.I., Gómez-Díaz, J.D. 2020. Diseño de calibración para cuantificar emisiones de CO₂ (Respiración del suelo) durante intervalos diurnos. Agrociencia. 54(6): 731-745.
- Lüttge U. 2004. Ecophysiology of Crassulacean Acid Metabolism. Ann Bot. 93:629-652.
- Martínez, J. & Fernández, B.A. 2004. Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 525 pp.
- Matsuoka, T., Tsuchiya, K., Yamada, S., Lundholm, J. & Okuro, T. 2020. The effects of growth form on the impact of companion planting of nectar-producing plant species with *Sedum album* for extensive green roofs. Urban Forestry & Urban Greening. 56: 1-9.
- Mentens, J., Raes, D. & Hermy, M. 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? Landscape and Urban Planning. 77(3): 217-226.
- Moreno, F.L. P. 2009. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. Agronomía Colombiana. 27(2):179-191.
- Navarro, A.A. 2019. Control de la contaminación atmosférica en la zona metropolitana del Valle de México. Estud. Demogr. Urbanos. 34(3):631-663
- Nimmo, H.G. 2000. The Regulation of Phosphoenolpyruvate Carboxylase in CAM Plants. Trends in Plant Sci. 5:75-80.
- Núñez, J.M. 2021. Análisis especial de las áreas verdes urbanas de la Ciudad de México. Econ. Soc. Terr. 21(67): 803-833.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R.R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K.K.Y & Rowe, B. 2007. Green roofs as urban

- ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience*. 57 (10): 823-833.
- Oreskes, N. 2004. The Scientific Consensus on Climate Change. *Science*. 306 (5702): 1686.
- Padela, L., Kowalczyk, T., Bogaez, A. y Kasowska, D. 2020. Sustainable Green roof ecosystems: 100 years of functioning on fortifications- A case study. *Sustainability*. 12(4721): 1-21.
- Paital, B. Kumari, S.P., Kumar, H.A., Mohanty, B., Kumar, M.M., Kanungo, S. & Bihari, N.C.G. 2016. Longevity of animals under reactive oxygen species stress and disease susceptibility due to global warming. *Biological Chemistry*. 7(1): 110-127.
- PAOT. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la CDMX. 2016. [En Línea]. Estadísticas y datos generales de las áreas verdes de la CDMX. [Fecha de consulta: 7 de diciembre del 2018]. Disponible en: http://www.paot.org.mx/micrositios/FORO_CONS_RN/pdf/mesa_4/Zenia.pdf
- Perló, C.M. y González, R.A.E. 2005. Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México. *Investigaciones Geográficas*. 62:158-163.
- Kirkham, M.B. 2014. Infiltration. *Principles of soil and plant water relations*. ELSEVIER. 579 Pp.
- Rayner, J.P., Claire, F., Raynor, K.J., Murphy, S.M. & Williams, N.S.G. 2016. Plant establishment on a green roof under extreme hot and dry conditions: The importance of leaf succulence in plant selection. *Urban Forestry & Urban Greening*. 15: 6-14.
- Razzaghamanesh, M. & Beecham, S. 2014. The hydrological behaviour of extensive and intensive green roofs in a dry climate. *The Sci. of The Total Env*. 499 (1): 284-296.
- Reyes-González, C.E., Torres-Morán, J.P., Ramírez-Hernández, B.C., Portillo, L., Pimienta-Barrios, E. y Torres-Moran, M.I. 2018. Morphological changes of mexican native succulent plants in a vertical greenery system compared with pot conditions. *Hortechology*. 28(3): 304-309.

- Sabine, C. L., Feely, R.A., Gruber, N., Key, R.M., Lee, K., 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305: 367–371.
- Starry, O. Lea-Cox, J.D., Kim, J. y Van Iersel, M.W. 2014. Photosynthesis and water use by two *Sedum* species in green roof substrate. *Environmental and Experimental Botany*. 107: 105-112.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2022. [En Línea]. Tercer informe bienal de actualización ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México. [Fecha de consulta: 20 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://www.gob.mx/inecc/documentos/investigaciones-2018-2013-en-materia-de-mitigacion-del-cambio-climatico>.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010 [En Línea]. Como afecta el cambio climático a México. [Fecha de consulta: 7 de diciembre del 2018]. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/como-afecta-el-cambio-climatico-a-mexico>.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2018 [En Línea]. Informe de la situación del medio ambiente en México. [Fecha de consulta: 15 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2018 [En Línea]. ¿Qué es el ProAire? . [Fecha de consulta: 15 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/que-es-el-proaire?idiom=es>
- SEDEMA. Secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México. 2018. [En Línea]. Inventario de emisiones de la Ciudad de México 2016. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire. [Fecha de consulta: 15 de mayo del 2021]. Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-o-emisiones-2016/mobile/inventario-emisiones-2016.pdf>
- Soto, C.N.V. 2021. El aire de cada día: Política y medición de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México (1960-2015). PUEC-Coordinación de Humanidades-UNAM. 152pp

- Sudhakar, P. Latha, P. & Reddy, P.V. 2016. Photosynthetic rates. Phenotyping crop plants for physiological and biochemical traits. Academic Press. 33-39.
- Taiz, L., Zeiger, E. 2010. Plant physiology. 5.^a ed. Redwood City, California, Sinauer: Oxford U. Press. 782 pp
- Terletskaya, N.V., Seitimova, G.A., Kudrina, N.O., Meduntseva, N.D. & Ashimuly, K. 2022. The reactions of photosynthetic capacity and plant metabolites of *Sedum hybridum* L. in response to mild and moderate abiotic stresses. *Plants*. 11(6): 1-18.
- Townshend, D. 2007. [En Línea]. Study of Green Roof Application in Hong Kong. Disponible en: https://www.archsd.gov.hk/media/11630/green_roof_study_final_report.pdf
- Ulacia, B.R. 2018. La infraestructura verde como sistema de captación de agua de lluvia. *Impluvium*. 17-22.
- UNFCCC. United Nations Framework Convention for Climate Change. 2015. [En Línea]. The Paris Agreement. [Fecha de consulta: 9 de marzo del 2022]. Disponible en: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- Useros, F.J.L. 2013. El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales. *An. Real. Acad. Med. Cir. Vall*. 50:70-98.
- Wang, Y., J. Jiang, X. Zhao, G. Liu, C. Yang & L. Zhan. 2006. A novel *LEA* gene from *Tamarix androssowii* confers drought tolerance in transgenic tobacco. *Plant Sci*. 171: 655-662.
- Winter K. & Holtum, J.A.M. 2014. Facultative crassulacean acid metabolism (CAM) plants: powerful tools for unravelling the functional elements of CAM photosynthesis. *J. of Experimental Botany*. 65(13): 3425-3441.
- Yang, J., Yu, Q. & Gong, P. 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*. 42: 7266-7273.
- Zielinski, S., García, C.M.A., Vega, P.J.C. 2012. Techos verdes: ¿Una herramienta visible para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero Santa Marta? *Gestión y Ambiente*. 15(1):91-144.