



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

**EFFECTO DE LA NATURACIÓN EN LA GENERACIÓN DE
ESCURRIMIENTO POR LLUVIAS EN AZOTEAS**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(CIENCIAS AMBIENTALES)**

P R E S E N T A

ERÉNDIRA ALEJANDRA ARELLANO LEYVA

DIRECTOR DE TESIS

DRA. LYSSETTE ELENA MUÑOZ VILLERS

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

ENERO 2017



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.

"Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales".

Agradecimientos académicos

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante los estudios de maestría.

Al Jardín Botánico de la UNAM por los permisos otorgados para realizar esta investigación.

A la Dra. Lyssette E. Muñoz Villers por la dirección de este trabajo, tiempo, apoyo, paciencia, disposición y conocimiento.

Al Biól. Jerónimo Reyes por todo el soporte que brindo en la realización de este proyecto.

Al Dr. Friso Holwerda por sus valiosas asesorías y apoyo.

A la Dra. Margarita Collazo Ortega por su apoyo constante, consideración, tiempo y enseñanzas.

A la Dra. Ma. Susana Alvarado y el Dr. Aron Jazcilevich por sus valiosos comentarios en la revisión del presente trabajo.

Al apoyo por parte del fondo para la titulación del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica que financió parcialmente esta investigación a cargo de la Dra. Lyssette E. Muñoz Villers (IB100313-RR160313).

Agradecimientos personales

A Plinio por todo el cariño, soporte y aliento que me ha brindado.

A mis amigos del Posgrado Alejandro, Andrea, Gilberto, Omar, Martín, Yaima, Jaime y Martha de quiénes he aprendido mucho y he pasado grandes momentos.

A mis compañeras de cubículo Alitzel y Karol porque hemos compartido momentos agradables de estrés en la maestría y han sido un gran apoyo.

A Alejandra que ha sido mi gran apoyo, consejera y amiga de toda la vida.

A mis amigos de la prepa porque a pesar de los años siguen siendo mi soporte y alegrías cada día.

A mis amigos de la Facultad Nallely, Areli, Claudia, Itzi, Pablo, Elizabeth, Rubén, Jesús, Diana, Gerardo porque aunque nuestros caminos se han bifurcado siguen estando presentes en mi vida de una u otra forma.

Dedicatoria

A mis padres Norma y Gerardo, a mis hermanas Patricia y Nancy y a mi pequeña Laisha por el gran apoyo y amor, que siempre me ha impulsado para lograr mis metas. Gracias por creer en mí.

Índice general

I. Introducción	3
Objetivos generales.....	9
II. Materiales y métodos.....	11
2.1. Descripción de los sitios de estudio.....	11
2.1.1 La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA)	12
2.2 Experimento 1	13
2.2.1 Descripción de las azoteas.....	13
2.2.2 Instrumentación y medición de variables.....	15
Precipitación	15
Esguerrimiento	16
2.2.3 Análisis de datos.....	17
Precipitación (P)	17
Esguerrimiento (Q).....	17
Análisis precipitación-esguerrimiento.....	19
Tiempo de retraso del esguerrimiento (TR Q).....	19
Tiempo de duración del esguerrimiento (TD Q)	19
Coeficiente de esguerrimiento (Q/P)	19
Contenido de humedad de suelo (HS).....	19
2.3 Experimento 2.....	20
2.3.1 Descripción del estudio	20
2.3.2 Instrumentación, medición y análisis de datos.....	23
Variables meteorológicas	23
Balance hídrico	23
Contenido de humedad en suelo.....	24
Conductancia estomática (Gs).....	25
III. Resultados.....	26
3.1 Experimento 1	26
3.1.1 Precipitación.....	26
3.1.2 Esguerrimiento	27
3.1.3 Retraso y duración del esguerrimiento.....	30

3.1.4 Contenido de humedad en suelo.....	37
3.2 Experimento 2.....	39
3.2.1 Condiciones meteorológicas	39
3.2.2 Balance hídrico.....	40
3.2.3 Conductancia estomática.....	43
3.2.4 Contenido de humedad en suelo.....	45
IV. Discusión	47
4.1 Relación precipitación-escurrimiento en las azoteas estudiadas	47
4.2 Balance hídrico de <i>Sedum</i>	50
V. Conclusiones.....	53
Anexo A	55
VI. Literatura citada	57

Índice de figuras

Fig. 1. Promedio mensual de la precipitación y de la temperatura registrada en la estación meteorológica del campus Ciudad Universitaria, UNAM durante un periodo de 40 años. Fuente: Castillo-Argüero <i>et al.</i> (2007).....	11
Fig. 2. Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México.	13
Fig. 3. (a) Azotea verde extensiva y (b) común en el Jardín Botánico, UNAM.	14
Fig. 4. Cobertura de la azotea verde extensiva en el mes de octubre de 2014 (final de la época de lluvias y del experimento).....	15
Fig. 5. Distribución de los sensores de humedad de suelo en la azotea verde.	16
Fig. 6. (a) Tanques almacenadores de agua Rotomex con cinta métrica en la azotea común y (b) en la azotea naturada. (c) Modelos de limnógrafo y barómetro utilizados.	17
Fig. 7. Registro del limnógrafo y cinta métrica del tanque en ambas azoteas.	18
Fig. 8. Calibración del tanque de 1100 L.	18
Fig. 9. (i) Mapa de ubicación de la Coordinación de la Investigación Científica (CIC) de la UNAM y (ii) diagrama de distribución de la naturación en la azotea en la edificación: “a” y “c” con sistemas modulares, mientras que en “b” la naturación es directa.	21
Fig. 10. Diseño y ficha técnica del sistema modular con hidromaceta.	21
Fig. 11. Distribución de las 3 especies de <i>Sedum</i> . (a) <i>S. dendroideum</i> , 12 individuos; (b) <i>S. griseum</i> , 30 individuos; (c) <i>S. rubrotinctum</i> , 24 individuos; (d) Mezcla de las 3 especies, 18 individuos y (e) control.....	22
Fig. 12. Calendario de las mediciones realizadas en el experimento de hidromacetas.	24
Fig. 13. Estructura del porómetro de Decagon.....	25
Fig. 14. Precipitación por evento en la zona de estudio, Jardín Botánico, UNAM (26 de junio al 25 de octubre de 2014).....	26
Fig. 15. Esguerrimiento vs. precipitación en la azotea común (AC) y la azotea verde (AVE) ($n = 63$ eventos).....	27
Fig. 16. Coeficientes de esguerrimiento (Q/P) en la azotea común (AC) y la azotea verde extensiva (AVE) para 63 eventos analizados.....	28
Fig. 17. Coeficientes de esguerrimiento (Q/P) en la azotea común y verde extensiva para todos los eventos divididos en tres clases por variable: (a) antecedente de precipitación (AP; mm), (b) duración (hrs) e (c) intensidad promedio de la lluvia (I prom P; mm/hr).	30
Fig. 18. (a) Tiempo de retraso (TR Q) y (b) tiempo de duración (TD Q) del esguerrimiento en la azotea común y la naturada.	31
Fig. 19. Tiempo de duración del esguerrimiento (TD Q) vs. duración del evento de lluvia (TD P) para la azotea verde y común.....	31
Fig. 20. Retraso en el inicio del esguerrimiento (TR Q) en la azotea común (AC) y verde extensiva (AVE) para todos los eventos divididos en tres clases por variable: (a)	

intensidad máxima de precipitación (Int máx; mm/hr), (b) antecedente de lluvia (AP; mm) y (c) duración (hrs).	33
Fig. 21. Duración del escurrimiento (TD Q) en la azotea común y verde extensiva para todos los eventos divididos en tres clases por variable: (a) Antecedente de precipitación (AP) (mm), (b) duración (hrs) e (c) intensidad promedio de la precipitación (Int prom) (mm/hr).....	34
Fig. 22. Histograma y escurrimiento (mm) de 5 eventos de precipitación en la azotea común (AC) y verde extensiva (AVE).....	37
Fig. 23. Contenido de humedad en suelo de la azotea verde extensiva e histograma de la precipitación por evento ($n = 73$) durante el período de muestreo (junio-octubre de 2014).....	38
Fig. 24. Radiación (Rad; W/m ²) y temperatura (T ; °C) media diaria del 15 de enero al 15 de marzo de 2015 registrado por la Estación Meteorológica de la Facultad de Ciencias de la UNAM. El período de duración del experimento se señala en la zona sombrada. ...	39
Fig. 25. Precipitación (P , mm) y déficit de presión de vapor (DPV; kPa) promedio diario del 15 de enero al 15 de marzo de 2015 registrado por la Estación Meteorológica de la Facultad de Ciencias de la UNAM. El período de duración del experimento se señala en la zona sombrada.	40
Fig. 26. Escurrimiento (Q ; mm), retención de agua después del riego (R ; mm), tasa de evapotranspiración diaria (ET_d ; mm), evapotranspiración acumulada (ET_{ac} ; mm), tasa de evaporación diaria (E_d ; mm) y evaporación acumulada (E_{ac} ; mm) en el 1ero, 2do, 3ero y 4to período de muestreo.	43
Fig. 27. Conductancia estomática (CE; mmol/ m ² ·s) promedio de <i>S. dendroideum</i> en tres segmentos del día (mañana, medio día y noche) del 9 de febrero al 11 de marzo de 2015. Se indican los días de riego con flechas azules.	44
Fig. 28. Conductancia estomática (CE; mmol/ m ² ·s) promedio de <i>Sedum dendroideum</i> vs la radiación solar global (Rad; W/m ²) en la mañana, medio día y noche del 9 de febrero al 11 de marzo de 2015.	45
Fig. 29. Conductancia estomática (CE; mmol/ m ² ·s) promedio vs el contenido de humedad en suelo (HS; m ³ /m ³) de <i>S. dendroideum</i> en la mañana, medio día y noche del 10 de febrero al 11 de marzo de 2015. Los días de riego se señalan con franjas azules.	46

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de azoteas verdes de acuerdo a sus características.	4
Tabla 2. Descriptivos generales de la lluvia a nivel de evento y antecedente de precipitación en el periodo de estudio, Jardín Botánico, UNAM ($n = 63$).	26
Tabla 3. Datos estadísticos del escurrimiento (Q) de la azotea común y la naturada ($n = 63$).	27
Tabla 4. Resumen estadístico de la Fig. 22. Correlaciones de Pearson entre los contenidos de humedad en suelo (inicial y en respuesta al primer pico de lluvia) y la precipitación. Humedad inicial zona A (HS inic A); Humedad inicial zona B (HS inic B); Humedad en respuesta al primer pico de lluvia A (HS pkP A); Humedad en respuesta al primer pico de lluvia B (HS pkP B).....	38
Tabla 5. Escurrimiento (Q ; litros) y retención (R ; litros) promedio después del riego y promedio del período por tratamiento.	41
Tabla 6. Tasa de evapotranspiración diaria (ET_d ; mm) y ET acumulada (ET_{ac} ; mm) promedio con su desviación estándar por período y por mes en cada tratamiento. Evaporación diaria (E_d ; mm) y E acumulada (E_{ac} ; mm) promedio con su desviación estándar por período y por mes en el tratamiento sin vegetación (control).	42
Tabla 7. Contenido diario de humedad en suelo (m^3/m^3) por tratamiento del 10 de febrero a 11 de marzo de 2015.	46

Resumen

El cambio de uso de suelo y la pérdida de vegetación como consecuencia de la expansión urbana afecta significativamente el ciclo hidrológico. En este sentido, la naturación de azoteas puede ofrecer varios servicios ecosistémicos, entre los más importantes, el de reducir el escurrimiento pluvial en ambientes urbanos. Este trabajo tuvo por objetivo evaluar la respuesta y eficiencia hidrológica de una azotea verde extensiva (AVE) en la Ciudad de México. Para ello, se cuantificaron los volúmenes y tiempos de retraso del escurrimiento por lluvia, comparándolos con una azotea común (AC) durante la temporada de lluvias de 2014 (junio-octubre) (Experimento 1). También se estimó el balance hídrico en hidromacetas de tres especies de *Sedum* (género dominante) con diferente morfología, para evaluar su desempeño en la evapotranspiración (ET), retención y escurrimiento de agua a eventos simulados de lluvia (riego) durante el periodo febrero-marzo, 2015 (Experimento 2). Se muestreó continuamente la precipitación (P), contenido de agua en suelo y el escurrimiento pluvial (Q) en la AVE y AC. Para el experimento 2, se realizaron cuatro ensayos de riego simulando 6 mm de lluvia. El balance hídrico fue cuantificado a partir de mediciones y cambios en el almacenamiento y pérdida de agua (ET) por gravimetría. Adicionalmente, se hicieron registros de conductancia estomática en *S. dendroideum* para conocer su patrón de transpiración en relación a cambios en las variables ambientales.

En el Experimento 1 se evaluaron 63 eventos de precipitación-escurrimiento de 1-27 mm. Los resultados mostraron un coeficiente de escurrimiento promedio (Q/P) en la AC de más del doble (0.9 ± 0.2 DE) que en la AVE (0.4 ± 0.4). Para esta última, la humedad en el suelo varió entre el 12 y el 43 %. En la AC el escurrimiento inició casi de inmediato al evento de lluvia (20 min en promedio), mientras que la AVE mostró un retraso promedio de 146 min. Concluido el evento, el tiempo de liberación del escurrimiento fue mucho más largo en la AVE (4 hrs 40 min) comparado con la AC (46 min). A tamaños de lluvia pequeños (< 5 mm) y relativamente grandes (> 15 mm), los Q/P en la AC fueron de 0.8 ± 0.2 y 1.1 ± 0.1 , respectivamente; mientras que en la AVE fueron bastante menores (0.1 ± 0.2 y 0.7 ± 0.4). A antecedentes de precipitación bajos (< 35 mm) o altos (> 65 mm), los Q/P en la AC fueron muy similares (0.9 ± 0.2 y 1 ± 0.2). Por el contrario, en la AVE fueron significativamente

menores y mucho más variables (0.3 ± 0.4 y 0.7 ± 0.1). En el Experimento 2, los resultados mostraron que la hidromaceta con *S. rubrotinctum* fue el tratamiento con el mayor registro de escurrimiento y menor retención de agua, lo que posiblemente es resultado de sus tasas más bajas de ET diaria. En general, las hidromacetas con *S. dendroideum* y la mezcla de especies mostraron balances hídricos similares, con las tasas de ET más altas. En todos los casos, las tasas de ET diaria de los tratamientos vegetados fueron más altas que las tasas de evaporación del sustrato sin vegetación (control). Se observó una disminución significativa de la conductancia estomática conforme la radiación solar incidente incrementaba. La humedad promedio en el suelo fue menor en los tratamientos vegetados (de 0.051 ± 0.035 (DE) m^3/m^3) comparados con el control (0.212 ± 0.017 m^3/m^3). Finalmente, se encontró una relación positiva entre el contenido de agua en suelo y la conductancia estomática en respuesta al riego. Estos resultados muestran que la naturación de azoteas puede amortiguar fuertemente los escurrimientos pluviales e impactos por inundaciones, y la hidromaceta con la mezcla de especies de *Sedum* fue la más efectiva en la reducción de escurrimientos. Promover esta estrategia en ciudades es importante para la gestión sustentable de sus recursos hídricos en un contexto de cambio climático.

I. Introducción

El crecimiento poblacional ha tenido gran incidencia en las zonas urbanas a nivel mundial de tal manera que en las próximas décadas se prevé siga en aumento (ONU, 2015). Además de las modificaciones en el uso del suelo, la contaminación edáfica, hídrica y atmosférica que la urbanización provoca, estudios han mostrado que en ciertas áreas el calentamiento global puede traer consigo incrementos en la cantidad y frecuencia de precipitaciones intensas (Bates *et al.*, 2008) que, aunado al reemplazo de la cubierta vegetal natural por superficies impermeables en ciudades, aumentará el riesgo de inundaciones. Entre las estrategias sustentables (eco-tecnologías, sistemas de eficiencia energética y fuentes de energía renovables) que se han implementado mundialmente para mitigar parcialmente los problemas ambientales en zonas urbanas, se encuentra la naturación de azoteas o azoteas verdes (*green roof*, en inglés).

Las azoteas verdes modernas se originaron a principios del siglo XX en Alemania y fue en los años 70's que la creciente preocupación ambiental creó más oportunidades en temas de tecnología y política (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Una azotea verde es un sistema de capas que comprende una membrana impermeabilizante, capa anti-raíz, de drenaje, sustrato y vegetación (Castleton *et al.*, 2010). La adición de suelo y vegetación en la superficie del techo de los edificios puede reducir varios efectos negativos de manera local, así como disminuir el consumo de energía de la edificación.

Generalmente se distinguen dos tipos de azoteas verdes, el *extensivo* e *intensivo* aunque algunos autores incluyen el *semi-intensivo* como una clasificación intermedia. Los *intensivos* presentan una capa de sustrato profunda para soportar el tipo de vegetación arbustiva y arbórea de alto tamaño, por lo tanto este diseño demanda mantenimiento, típicamente deshierbe, fertilización y riego (**Tabla 1**). En contraparte en el *extensivo* se establece una capa delgada de sustrato, el tipo de vegetación es herbácea, musgo, y arbustiva de bajo tamaño con raíces extendidas pero poco profundas, y adaptada a las condiciones ambientales y climáticas de la región, por lo tanto requiere un mínimo mantenimiento. En el *semi-intensivo* comúnmente se plantan gramíneas (pastos), y necesita un cuidado frecuente a través de podas, riego y algunas veces fertilización (Czemiel B.J., 2010; Li *et al.*, 2014; Villareal y Bengtsson, 2005).

Tabla 1. Clasificación de azoteas verdes de acuerdo a sus características.

Principales características	Extensiva	Intensiva	Referencias
Propósito	Funcional	Funcional y estético	Oberndorfer <i>et al.</i> , 2007
Profundidad del sustrato	<15 cm	>15 cm	Mentens <i>et al.</i> , 2006
Cobertura vegetal	Herbácea, musgo	Arbustiva, gramíneas, arbórea	
Peso (saturado)*	60-150 kg/m ²	>300 kg/m ²	Berardi <i>et al.</i> , 2014
	110-140 kg/m ²	>250 kg/m ²	NADF-013-RNAT-2007
Inclinación	≥45°	<10°	Mentens <i>et al.</i> , 2006
Mantenimiento	Mínimo	Constante	Oberndorfer <i>et al.</i> , 2007
Irrigación	No necesaria	Necesaria	
Costo	Bajo	Alto	Berardi <i>et al.</i> , 2014

Los beneficios ambientales que aporta una azotea verde derivan de su funcionamiento como ecosistema (Oberndorfer *et al.*, 2007). Estos servicios ecosistémicos incluyen la mitigación del efecto de isla de calor urbano, la absorción de contaminantes atmosféricos y polvo, la atenuación del escurrimiento pluvial, la reducción del ruido urbano, provisión de biodiversidad y hábitats para la fauna, entre otros, con ventajas económicas y sociales tales como conservar energía para el calentamiento y enfriamiento interno del edificio, aumentar la longevidad de la membrana del techo y crear espacios de esparcimiento y recreación (Arellano-Leyva, 2012; Berardi *et al.*, 2014; Czemieli B.J., 2010; Li *et al.*, 2014; Oberndorfer *et al.*, 2007; Theodosiou, 2009).

En algunos países como Japón, Singapur, Bélgica y Alemania los servicios ecosistémicos de las azoteas verdes ya han resultado en incentivos por parte del gobierno para fomentar e incluso legislar el desarrollo de estos sistemas (Mentens *et al.*, 2006). La investigación e implementación de ellas en América tuvo lugar hasta hace una década, principalmente en países como los Estados Unidos y Canadá. En investigación, los temas se enfocaron en biodiversidad, infraestructura, tecnología y sustratos, lo que contribuyó al desarrollo de normas técnicas publicadas en 1982 para la instalación de azoteas verdes (FLL, 2002; traducción al inglés) (Czemieli B.J., 2010). Herman (2003) reportó 13.5 km² de azoteas verdes en Alemania, equivalente al 14% de todos los techos (Castleton *et al.*, 2010).

En cuanto estudios hidrológicos, el trabajo de Ernst y Weigerding (1985) reportó por vez primera la capacidad de las azoteas verdes en retener agua de lluvia, y fue a partir de este trabajo que científicos en Europa comenzaron a investigar las relaciones entre la precipitación, las propiedades del techo verde y su escurrimiento (Mentens *et al.*, 2006). Al respecto, Mentens y colaboradores (2006) hicieron una revisión de 18 artículos de Alemania (1987-2003), en el cual reportaron que la capacidad promedio de una azotea

verde extensiva en retener agua de lluvia es del 45% con respecto a la precipitación anual; mientras que Köhler y colaboradores (2002), también en Alemania estimaron la reducción anual del escurrimiento total por edificio entre un 60 y 79%. Por otra parte, el modelo de escurrimiento de Jarret y colaboradores (2006) utilizando datos de lluvia de 28 años, reveló una retención del 45 al 55% del volumen de precipitación anual en una azotea verde (Norris *et al.*, 2008).

En general, varios estudios coinciden que las azoteas verdes además de reducir los escurrimientos, pueden retrasar sus picos comparadas con una azotea convencional (Getter *et al.*, 2007; Simmons *et al.*, 2008; VanWoert *et al.*, 2005). En este sentido, Carter y Rasmussen (2006) reportaron un retraso de hasta 10 min para el 57% de los picos de escurrimiento observados en un techo vegetado. A su vez, estos resultados coinciden con los reportados por Simmons *et al.* (2008) y VanWoert *et al.* (2005). Por su parte, Norris y colaboradores en Estados Unidos de América (2008) demostraron que un bloque modular de techo verde con 10 cm de profundidad de sustrato proporciona una retención completa para las tormentas de hasta 20 mm, mientras que para tormentas grande (~80 mm) provee detención cuando el contenido de humedad en el suelo inicial es de 10%. El tiempo de retención para las tormentas de entre 50 mm y 80 mm fue de aproximadamente 12 horas. También se ha demostrado que el amortiguamiento del escurrimiento pluvial en azoteas naturadas depende fuertemente de varios factores como la intensidad de la lluvia (Bengtsoon *et al.*, 2005; Carter y Rasmussen, 2006; DeNardo *et al.*, 2005; Norris *et al.*, 2008; Moran *et al.*, 2005; Simmons *et al.*, 2008; Teemusk y Mander, 2007), la profundidad y propiedades del sustrato (Monterusso *et al.*, 2004; VanWoert *et al.*, 2005), la pendiente del techo (Metselaar, 2012) y el tipo de vegetación (Dunnett *et al.*, 2008; Lundholm, 2006). Las características biofísicas del suelo, morfológicas y fisiológicas de la vegetación tienen una fuerte influencia en el intercambio de agua y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera (Foley *et al.*, 2000). El flujo de agua en el continuo suelo-planta-atmósfera (SPAC; por sus siglas en inglés) es impulsado por gradientes de potencial, del suelo a la raíz (absorción) y de las hojas y/o tallos a la atmósfera (transpiración). Por lo general, entre los factores que promueven este movimiento están las condiciones meteorológicas (la radiación solar, el déficit de presión de vapor y la temperatura), la disponibilidad de

humedad en suelo y las distintas etapas de desarrollo de las especies y del ecosistema (Holwerda *et al.*, 2013; Nektarios *et al.*, 2015).

La evapotranspiración –componente importante del balance de agua en los ecosistemas terrestres– se define como la pérdida de agua de un ecosistema por transpiración y evaporación de la superficie (del dosel y del suelo) (Lambers *et al.*, 2006) resultado del continuo suelo-planta-atmósfera. Se ha reportado que la evapotranspiración propicia el enfriamiento de la planta y de su entorno debido a la pérdida de calor latente incrementando la humedad del aire, además de contribuir secundariamente en la retención de agua en azoteas verdes (Oberndorfer *et al.*, 2007; Franzaring *et al.*, 2016). Aunque el sustrato podría tener una mayor influencia en la retención de agua, se ha reportado que la cobertura vegetal desempeña un papel importante en los períodos con temperaturas altas y baja disponibilidad de agua (Dunnett *et al.*, 2008; Lundholm, 2008).

Sedum es el género de crasuláceas más ampliamente utilizado en la naturación de azoteas de tipo *extensivo* (Xiao *et al.*, 2014). Sus características morfofisiológicas y su amplia distribución geográfica han convertido a esta suculenta en la flora dominante de estos sistemas. El metabolismo de estas plantas es de tipo CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*, por sus siglas en inglés) que se define como el proceso por el cual las suculentas fijan dióxido de carbono (CO₂) a través de la formación de ácido málico en la noche, y lo metabolizan en el día manteniendo los estomas cerrados con el propósito de reducir la pérdida de agua, haciéndolas resistentes a condiciones de estrés hídrico en climas áridos y semiáridos.

Se ha reportado que algunas especies de *Sedum* tienen un metabolismo CAM facultativo, es decir, que cambian su método de fotosíntesis de C3 al CAM en respuesta a las condiciones de estrés hídrico o salino al que estén sometidas, por tanto su dinámica de transpiración puede modificarse en respuesta a estados de baja disponibilidad de agua o salinidad (Moritani *et al.*, 2013). Al respecto, Starry y colaboradores (2014) compararon las ganancias diarias de carbono, las tasas de evapotranspiración y el uso eficiente del agua de dos especies de *Sedum* en sistemas modulares de azotea verde. Sus resultados mostraron diferentes respuestas metabólicas a las condiciones meteorológicas y de estrés hídrico. Por otra parte, Moritani y colegas (2013) evaluaron el rendimiento de *Sedum kamtschaticum* en condiciones de estrés hídrico y salino en una azotea verde extensiva y observaron que la

planta modifica su estrategia metabólica para hacer un uso más eficiente de agua. En ambos estudios se puntualiza la necesidad de una mayor investigación en el tema debido a las variaciones climáticas y adaptativas de las plantas a distintas regiones.

En las ciudades, el incremento de superficies impermeables además de acrecentar el riesgo a inundaciones, provoca un aumento de la temperatura y disminución de la humedad del aire debido a reducciones en el componente de evapotranspiración (Czemieli, 2010; Pöe *et al.*, 2015).

En México, 65 millones de personas (57% de la población total) residen en 59 zonas metropolitanas (ZM). En la mayoría de estas ZM, el proceso de urbanización se caracterizó por una escasa planeación (ONU, 2015), no siendo la excepción la ciudad de México, la cual hoy en día representa una de las mayores concentraciones urbanas a nivel mundial (ONU, 2015). La capital es la entidad más pequeña con una superficie de 1,480 km², ocupa el 0.1% del territorio nacional y contiene una población de 9.4 millones. De acuerdo a los estándares internacionales establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) una ciudad debe tener como mínimo 9.2 m² de área verde por habitante. En promedio, la ciudad de México cuenta con una superficie de 5.3 m² de área verde urbana por habitante (SMA, 2006), pero existe una gran variación entre las 16 delegaciones políticas.

La naturación de azoteas en América Latina es relativamente reciente, pero los progresos cada vez son mayores. En Argentina y Colombia se han generado iniciativas para la implementación de estos sistemas en edificios gubernamentales. En México, las primeras azoteas verdes fueron instaladas en el año 1999, aunque la mayoría no siguió un diseño estándar. Posteriormente el gobierno mexicano promovió su implementación publicando la regulación estandarizada en la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007, la cual establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el Distrito Federal (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008).

Hasta hace unos cuantos años, los estudios en azoteas naturadas en nuestro país eran muy escasos. Sin embargo a partir de 2009, la investigación en azoteas verdes extensivas en México fue en aumento y se ha centrado en temas sobre flujo de calor en interiores de edificios (Carbajal, 2009); selección de plantas en términos de la eficiencia térmica (Tovar *et al.*, 2014); supervivencia, crecimiento y captura de carbono en plantas del género *Sedum* (Monroy, 2012); influencia de la profundidad del sustrato en el crecimiento de especies de

crasuláceas (Acosta, 2016); retención de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH, por sus siglas en inglés); y retención de metales pesados de la lluvia (Arellano-Leyva, 2012; Arellano-Leyva *et al.*, 2016).

Para la ciudad de México, la naturación de azoteas puede ser una atractiva estrategia para adicionar permeabilidad y áreas verdes que brinden servicios ambientales en las zonas urbanas, donde los techos cubren una elevada fracción de las superficies impermeables. Sin embargo, son escasos los estudios que han cuantificado la relación precipitación-escurrimiento en estos sistemas. Por tanto, el objetivo principal de este trabajo fue comparar una azotea común y una verde extensiva para evaluar la retención, reducción y atenuación del escurrimiento generado por lluvias, así como la respuesta hídrica de 3 especies de *Sedum*. Con esto se pretende contribuir al conocimiento actual que se tiene sobre azoteas verdes extensivas, y así llenar un vacío importante de información referente a su comportamiento hidrológico a distintas escalas con el último fin de transferir esta información a tomadores de decisión.

Objetivos generales

1. Cuantificar y comparar el escurrimiento generado por lluvias en una azotea verde extensiva y una común en la Ciudad de México.
2. Evaluar los efectos de la morfología de tres especies de *Sedum* en el balance hídrico utilizando un sistema modular de azotea verde extensiva.

Objetivos particulares

- i. Cuantificar la precipitación y la esorrentía a nivel de eventos de lluvia en una azotea verde extensiva y una común durante el periodo de lluvias de 2014 (junio-octubre).
- ii. Calcular y comparar los coeficientes de esorrentía (Q/P), tiempos de respuesta (TR) a la precipitación y los tiempos de duración (TD) del escurrimiento en las azoteas estudiadas.
- iii. Evaluar la influencia del tamaño de los eventos de lluvia y antecedentes de precipitación en la generación de escurrimiento en ambas azoteas, así como el efecto de la humedad del suelo en la azotea verde.
- iv. Evaluar el desempeño de 3 especies de *Sedum* con diferente morfología (*S. dendroideum*, *S. rubrotinctum* y *S. grisseum*) en la evapotranspiración, retención, y escurrimiento de agua a eventos simulados de lluvia (riego) utilizando un sistema modular de hidromacetas en un entorno de azotea.
- v. Determinar el estado hídrico y las relaciones fotosintéticas de *Sedum dendroideum* en respuesta al riego y a las condiciones meteorológicas.
- vi. Aportar información de este sistema como estrategia de mitigación a las inundaciones en la ciudad de México.

Preguntas de investigación

Experimento 1

1. ¿De qué magnitud son las diferencias en el volumen de escurrimiento por lluvias entre una azotea común y una verde extensiva?
2. ¿Cuáles son los tiempos de retraso y de duración del escurrimiento en una azotea naturada comparada con una común?
3. ¿Cómo influye la cantidad, intensidad y duración de la precipitación, así como el antecedente de humedad en suelo en la generación del escurrimiento?

Experimento 2

1. ¿Hay diferencias en la evapotranspiración, retención, y escurrimiento de agua dependiendo de la morfología de la planta (*Sedum*)?
2. ¿Cuál es el efecto del riego y las condiciones meteorológicas en la apertura estomática y transpiración de *Sedum*?

II. Materiales y métodos

2.1. Descripción de los sitios de estudio

De acuerdo con los objetivos del presente trabajo, se llevaron a cabo 2 tipos de experimentos dentro del campus Ciudad Universitaria de la UNAM, localizado al suroeste de la ciudad de México (19°19'N y 99°11'O). El primer experimento se realizó en una azotea común y verde extensiva, ubicadas en el Jardín Botánico del Instituto de Biología de la UNAM, esta área a su vez, forma parte de las zonas de amortiguamiento de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA). El segundo experimento se realizó en la azotea del edificio de la Coordinación de la Investigación Científica de la UNAM, para el cual se utilizaron hidromacetas.

Debido a su posición geográfica y orografía, el tipo de clima en la zona de estudio es templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano [Cb(w1)(w)], de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1988). La temperatura media anual varía entre los 15 y 17°C. La precipitación anual promedio es ~800 mm, dividida en 2 períodos bien definidos (**Fig. 1**): una época de lluvias de junio a octubre (80% de la precipitación se observa en este periodo) durante la cual los vientos tropicales traen aire inestable y condiciones de humedad produciendo lluvias convectivas intensas (James-Palomera, 2016); y una época de secas de noviembre a mayo (Valiente-Banuet y De Luna, 1990).

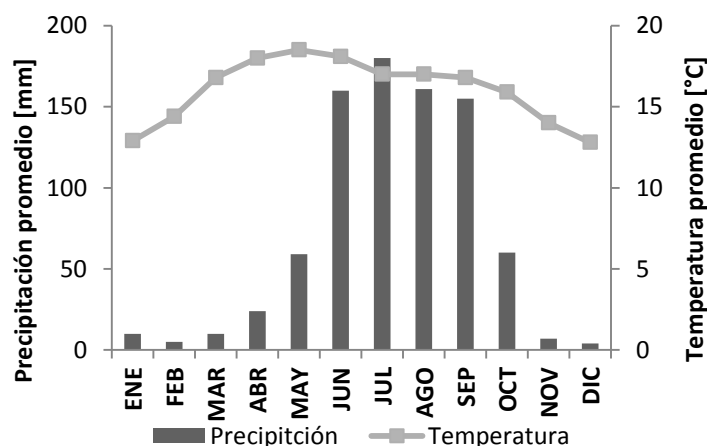


Fig. 1. Promedio mensual de la precipitación y de la temperatura registrada en la estación meteorológica del campus Ciudad Universitaria, UNAM durante un periodo de 40 años. Fuente: Castillo-Argüero *et al.* (2007).

2.1.1 La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA)

La REPSA cubre una extensión de 237.3 ha, y abarca un intervalo altitudinal de los 2,254 a los 2,349 m.s.n.m. (Sarukhán, 1997) (**Fig. 2**), representa un fragmento del ecosistema que se originó debido a la erupción del volcán Xitle (*xictli* = *ombliguito* en Náhuatl) que forma parte del Campo Volcánico de la Sierra Chichinautzin; sus lavas denominadas “del Pedregal” abarcaron un área aproximada de 70 km², las cuales llegaron a las planicies del Valle de México y cubrieron vastas áreas que hoy en día son ocupadas por colonias urbanas pertenecientes a las delegaciones de Tlalpan, Coyoacán y Álvaro Obregón. El área que quedó recubierta por roca dura y estéril por la erupción (llamada comúnmente *malpais*) permaneció por mucho tiempo desprovista de vegetación debido a la ausencia de suelo. Con el tiempo, el viento depositó materiales finos (arcilla y limo) que se fueron acumulando en las hondonadas de la superficie del Pedregal (Siebe, 2009). Actualmente el suelo de origen orgánico y eólico principalmente, es escaso, en el cual es difícil distinguir horizontes edáficos. La textura del suelo dominante es arenosa-limosa. El suelo es moderadamente ácido, con alto contenido de materia orgánica, potasio y calcio pero bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo total (Rojo, 1994).

Actualmente, la REPSA es una reserva natural de tipo urbano particular por su biodiversidad, geomorfología y de gran valor paisajístico. El matorral xerófilo de alta elevación es la vegetación característica y también la que cuenta con el mayor número de especies. En ella, el estrato arbóreo es casi inexistente (10 especies) y no supera los 4 m de altura debido a la escasez de suelo. El estrato herbáceo formado por pastos, hierbas erguidas y hierbas trepadoras es el más abundante (279 especies), mientras que el estrato arbustivo (48 especies) se encuentra representado por la especie dominante llamada “palo loco” *Senecio praecox* (Rzedowski, 1954). Muchas plantas que crecen en esta zona presentan claras adaptaciones fisiológicas y morfológicas afines a la vegetación de zonas áridas y semiáridas, como el género *Sedum* (Castillo-Argüero *et al.*, 2007). La vegetación en la REPSA registra cambios estacionales pronunciados en respuesta a las entradas de precipitación durante la época de lluvias o ausencia de ella durante el periodo de secas. Por ejemplo, en el mes de junio, la mayoría de las plantas reverdecen y la floración es abundante. Los meses en que la vegetación adquiere su mayor volumen son agosto y septiembre, mientras que en el período de secas sólo el 16% de las plantas son visibles,

debido a que la mayoría de las especies suspenden temporalmente su crecimiento y reducen el consumo de nutrientes y agua.

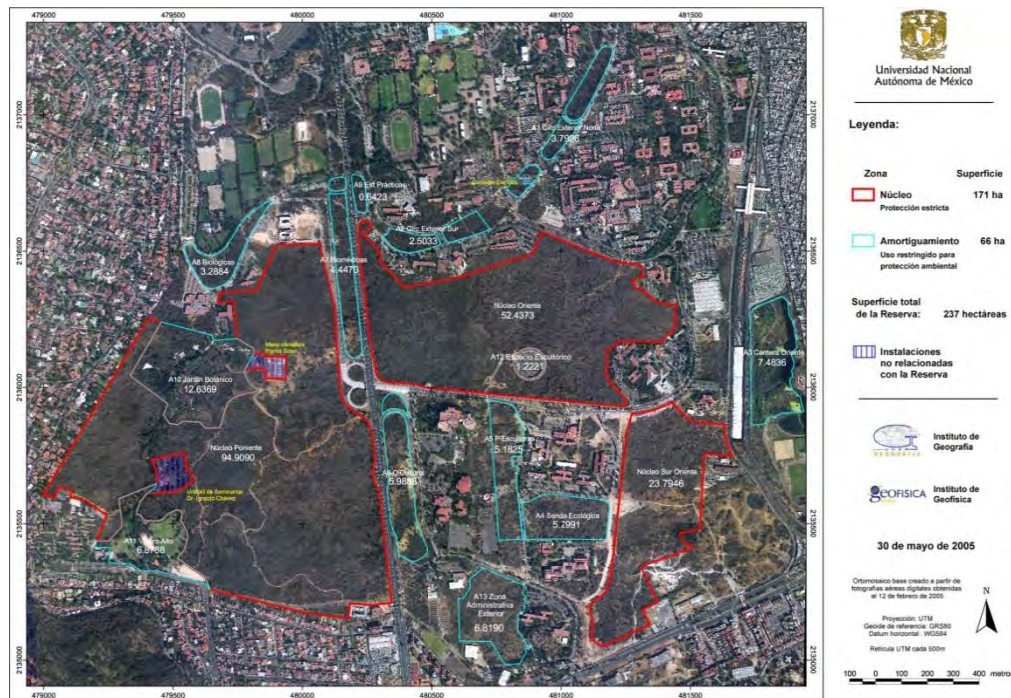


Fig. 2. Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México.

2.2 Experimento 1

2.2.1 Descripción de las azoteas

El estudio se realizó en la azotea verde extensiva (AVE) y la azotea común (AC) ubicadas en el Área de Colecciones del Jardín Botánico de la UNAM durante el periodo comprendido del 26 de junio al 4 de noviembre de 2014 (**Fig. 3**).

La AVE, construida en julio de 1999, fue de la primeras azoteas naturadas en la ciudad de México como un “prototipo” (Vázquez, 2013). El sistema tiene una elevación de 3.40 m y una pendiente de 2°, muros perimetrales de 20 cm de alto, una capa impermeable, carpeta asfáltica sellada, el sistema de drenaje, membrana anti-raíz, el sustrato con 10 cm de espesor compuesto de tepojal, fibra de coco y composta y la vegetación con una altura estimada promedio de 90 cm (**Fig. 3**). La AVE requiere mínimo mantenimiento y, por lo tanto no tiene un sistema de irrigación. Las especies plantadas y dominantes en la azotea son crasuláceas, cactáceas y agaváceas: *Sedum dendroideum*, *Sedum moranense*, *Sedum*

rubrotinctum, *Sedum acre*, *Sedum griseum*, *Altamiranoa mexicana*, *Echeveria giggiflora*, *Opuntia robusta*, *Opuntia tomentosa*, *Mammillaria magnimamma*, *Agave celsii* y *Agave sp.* Todas estas especies habitan en la REPSA, por lo tanto comparten características similares a la vegetación xerófila, entre ellas, el metabolismo ácido de las crasuláceas.

El total del área de la AVE es de 208 m², dividida en 3 secciones. En este caso, la sección de 32 m² de la azotea fue la que se utilizó en el presente estudio para el monitoreo de precipitación, escurrimiento y contenido de humedad en suelo (ver sección 2.2.2 más adelante).

La AC (control) se situó a 1.50 m de distancia de la AVE. Esta azotea fue seleccionada por su proximidad a la AVE y su similar elevación e inclinación; tiene muros perimetrales de 20 cm de alto, impermeable y la carpeta asfáltica sellada. Comprende un área total de 37 m², dividida en 2 secciones. El área de 19.27 m² fue la que se utilizó para el monitoreo del escurrimiento por lluvia.

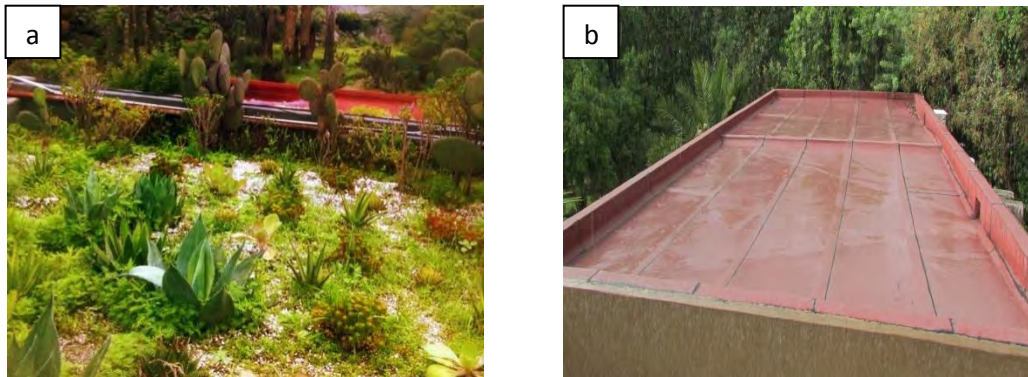


Fig. 3. (a) Azotea verde extensiva y (b) común en el Jardín Botánico, UNAM.

De acuerdo a los objetivos de la investigación, la AVE se mantuvo durante el período de muestreo sin mantenimiento por lo que no se deshirió. En consecuencia, se establecieron algunas especies nativas e introducidas de la REPSA (*Bidens odorata*, *Bidens bigelovii*, *Bidens pilosa*, *Tagetes lunulata*, *Cosmos bipinnatus* Cav. (Asteraceae), *Lopezia recemosa* Cav. (Onagraceae), *Lepidium virginicum* L., *Cyperus hermaphroditus*, *Cyperus odoratus* L. (Poaceae) (Castillo *et al.*, 2007), sin embargo las especies de *Sedum* y otras mencionadas previamente fueron las dominantes durante todo el año y las que caracterizaron el sistema de azotea verde extensiva (**Fig. 4**).



Fig. 4. Cobertura de la azotea verde extensiva en el mes de octubre de 2014 (final de la época de lluvias y del experimento).

2.2.2 Instrumentación y medición de variables

Precipitación

Para registrar las entradas por precipitación se utilizó un pluviómetro de balancín marca HOBO (Onset, EUA; resolución de 0.2 mm), colocado en la AVE a una altura de 1.30 m del suelo. El periodo de medición abarcó de junio del 2014 a mayo del 2015.

Humedad en suelo

Para conocer los contenidos volumétricos de agua en el suelo en la AVE, se colocaron de forma horizontal 10 sensores basados en métodos de capacitancia tipo 10 HS (Decagon, EUA) a una profundidad de 5 cm. Para ello, se dividió la AVE en dos secciones de acuerdo a su cobertura vegetal. El lado A con menor cobertura y dominancia de cactáceas, mientras que el lado B tuvo mayor cobertura y dominancia de Agave. La presencia de especies *Sedum* fue similar en ambos segmentos. En cada sección se colocaron 5 sensores distribuidos formando una “X”. Por el tipo de cobertura vegetal, algunos sensores quedaron bajo sombra y otros más expuestos a la radiación solar, sin embargo con el transcurrir de la época de lluvias y crecimiento de la vegetación, la cobertura vegetal fue aumentando homogeneizando estas condiciones. El registro de la humedad en suelo se llevó a cabo a intervalos de 5 min utilizando un datalogger Em50 marca Decagon, EUA (**Fig. 5**), durante el periodo del 26 de junio al 25 de octubre de 2014.

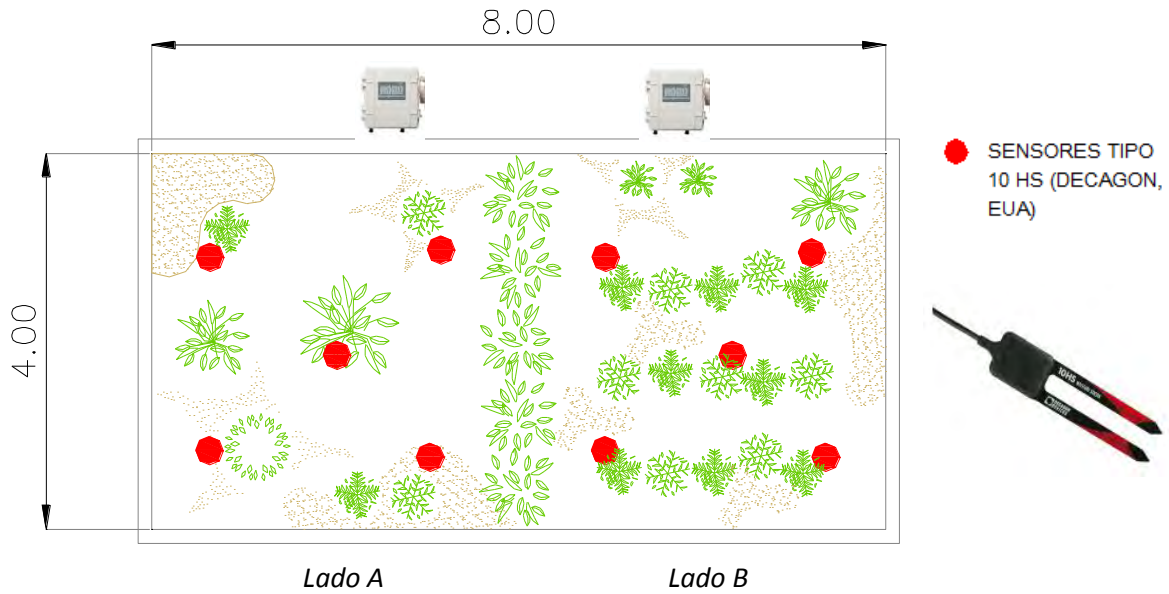


Fig. 5. Distribución de los sensores de humedad de suelo en la azotea verde.

Escurrecimiento

Para cuantificar el escurrimiento generado por lluvia, se instaló en cada azotea estudiada un sistema de tuberías con tanques almacenadores de agua Rotomex con capacidad de 1100 L, equipados con un limnígrafo modelo 3001 (Solinst, Canadá Ltd.) con una precisión de 2.5 mm. Para compensar las lecturas de presión del limnígrafo se utilizó un barómetro modelo 3001 (Solinst, Canadá Ltd.) con precisión de 0.05% kPa, colocado en la AVE. Ambos instrumentos fueron programados para registrar lecturas a intervalos de 1 min. Como una medida independiente a la de los instrumentos, se tomaron lecturas de la altura del agua en los tanques con una cinta métrica colocada en la parte exterior de los mismos (**Fig. 6**). Dependiendo de la frecuencia de los eventos de lluvia, se realizaban visitas diarias entre semana y también en el fin de semana, siendo así también la descarga de los tanques. El registro de los datos abarcó del 26 de junio al 25 de octubre del 2014.

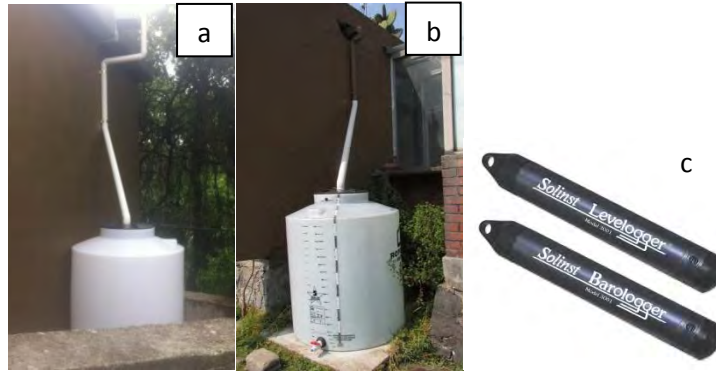


Fig. 6. (a) Tanques almacenadores de agua Rotomex con cinta métrica en la azotea común y (b) en la azotea naturada. (c) Modelos de limnígrafo y barómetro utilizados.

2.2.3 Análisis de datos

Precipitación (P)

Los datos de precipitación fueron remuestreados a periodos de 5 min, y a partir de esta resolución se identificó el número de eventos durante el periodo de estudio. Un evento de precipitación fue definido como aquel mayor a 1 mm. Basado en el criterio de separación de eventos de precipitación propuesto por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica en 2007 (NOAA, por sus siglas en inglés), los eventos de precipitación con un periodo ≥ 6 hr sin lluvia fueron clasificados como eventos independientes (Voyde *et al.*, 2010; Wong y Jim, 2014). Por cada evento de precipitación identificado se calculó la precipitación total (mm), tiempo de duración (minutos), intensidad máxima e intensidad promedio (mm/hr), y el índice de precipitación antecedente (API, por sus siglas en inglés). El API fue calculado de acuerdo al método de Viessman y colaboradores (1989) para determinar las condiciones de humedad antecedentes 7 días previos a cada tormenta.

Escurrimiento (Q)

Los datos de presión del limnígrafo y barómetro fueron también remuestreados a periodos de 5 min, con la finalidad de tener la misma resolución de datos que la lluvia. El cálculo de escurrimiento (Q) se hizo primero realizando la compensación de las fluctuaciones de presión barométrica y los datos colectados por el limnígrafo para obtener la altura real de las mediciones de la columna de agua, como se indica a continuación:

$$\text{Lectura del limnígrafo} - \text{Lectura del barómetro} = \text{Altura de la columna de agua (m)}$$

Posteriormente, se hizo la conversión de la columna de agua a centímetros y los diagramas de correlación con las lecturas de las cintas métricas colocadas en los tanques, como una medida independiente de los equipos automáticos instalados. Los datos de columna de agua se corrigieron con la ecuación correspondiente, como se muestra en la **Fig. 7**.

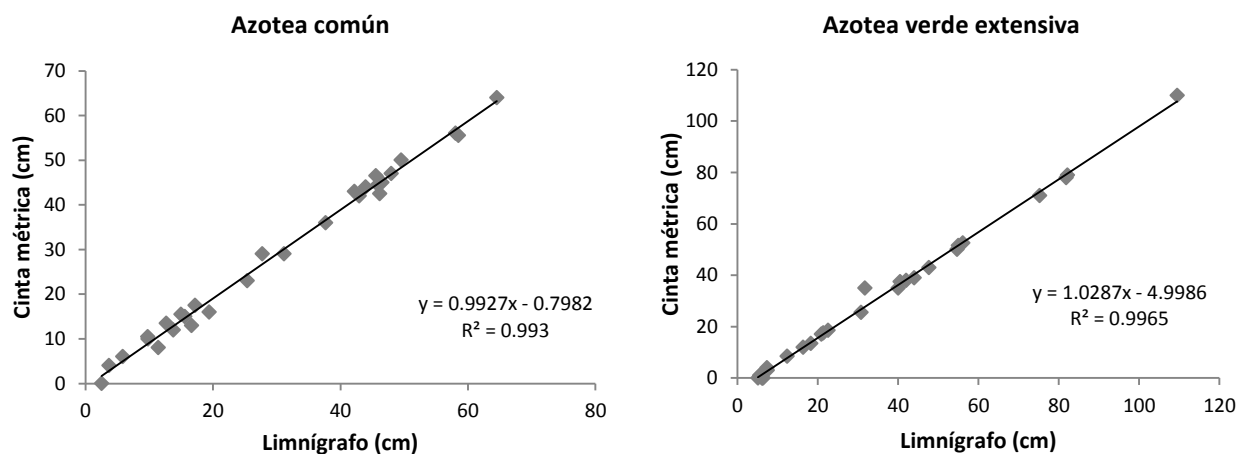


Fig. 7. Registro del limnógrafo y cinta métrica del tanque en ambas azoteas.

Posteriormente se transformaron los valores de la columna de agua a litros utilizando la ecuación derivada de la calibración del tanque de 1100 L (**Fig. 8**). Finalmente se realizó la conversión de litros a milímetros utilizando el área de cada azotea (19.3 y 32 m² para la azotea común y verde extensiva).

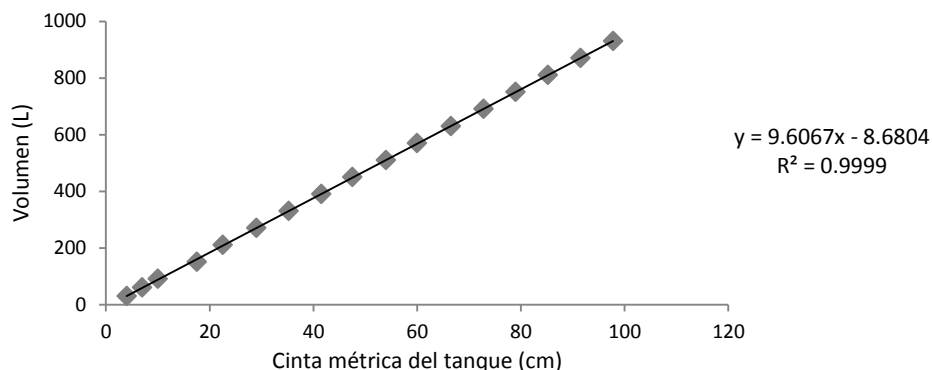


Fig. 8. Calibración del tanque de 1100 L.

Análisis precipitación-escorrimento

Para este análisis se seleccionaron los casos con base en los siguientes criterios: 1) Eventos de lluvia y escurrimiento con datos completos, y 2) No se tomaron en cuenta aquellos eventos donde el volumen de agua acumulado por escurrimiento llegó a superar el 90 % de la altura del tanque , y por tanto éste estaba cerca de rebasar su capacidad.

Tiempo de retraso del escurrimiento (TR Q)

Una vez seleccionados los eventos precipitación-escorrimento a analizar, se calculó el retraso en minutos del escurrimiento (TR Q) con respecto a la precipitación, que se refiere al tiempo que tarda en iniciar el escurrimiento de las azoteas estudiadas una vez que comienza el evento de lluvia.

Tiempo de duración del escurrimiento (TD Q)

Para determinar este parámetro se realizó una gráfica de escurrimiento por cada evento de precipitación, de este modo se observó y cuantificó la duración en minutos del comienzo del escurrimiento a su valor máximo y constante.

Coefficiente de escurrimiento (Q/P)

Este coeficiente se calculó a partir de la relación entre el escurrimiento y la precipitación total (P_t) para cada evento de lluvia (Chow *et al.*, 1994):

$$\text{Coeficiente de escurrimiento} = \frac{Q}{P_t}$$

Ec. (1)

Contenido de humedad de suelo (HS)

Los registros de humedad de suelo en la AVE cada 5 min fueron calibrados utilizando la función de calibración dieléctrica, de acuerdo a lo establecido en el Manual del sensor 10HS:

$$VWC \left(\frac{m^3}{m^3} \right) = 1.17 \times 10^{-9} * dc^3 - 3.95 \times 10^{-6} * dc^2 + 4.90 \times 10^{-3} * dc - 1.9$$

* dc - dato sin procesar

Ec. (2)

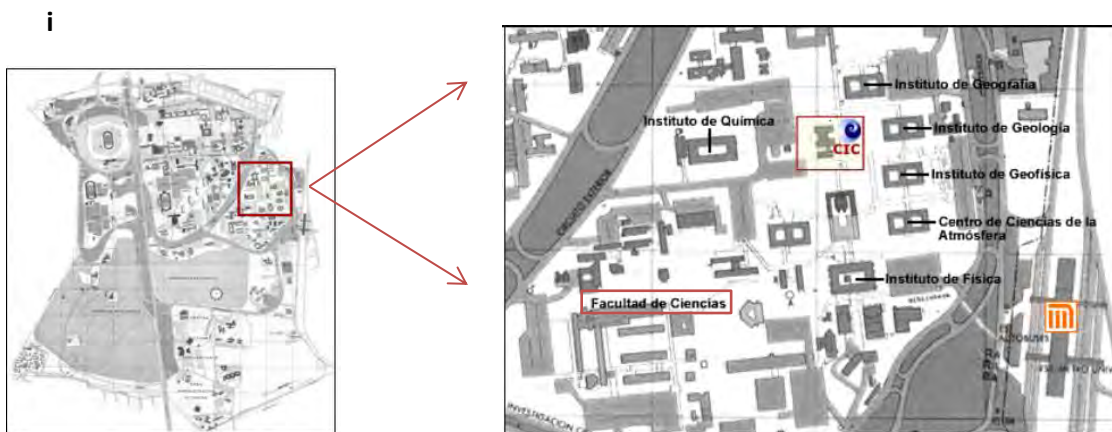
Posterior a esto se determinaron los siguientes parámetros por evento de precipitación utilizando los datos de humedad en suelo por parcela (A y B): promedio de HS al inicio del evento de lluvia en m^3/m^3 (HS_i); el valor máximo promedio de HS en respuesta al primer pico de precipitación (m^3/m^3) ($HS_{máxPk}$); el tiempo promedio entre el inicio del evento de lluvia y valor máximo de HS en respuesta al primer pico de lluvia (TR_{HS_i}); y el tiempo promedio del primer pico de lluvia al valor máximo de HS ($TR_{HS_{máxPk}}$), ambos registrados en minutos.

Se realizaron comparaciones estadísticas mediante pruebas ANOVA entre la precipitación, el escurrimiento y el contenido de humedad en suelo en ambas azoteas, para evaluar diferencias significativas. Además se hicieron pruebas de correlación de Pearson entre las variables antes mencionadas. Los análisis se llevaron a cabo en el software estadístico SigmaPlot 13.0.

2.3 Experimento 2

2.3.1 Descripción del estudio

El estudio se realizó en la Coordinación de la Investigación Científica (CIC) de la UNAM, la cual ha puesto a disposición la azotea de sus tres edificios con fines de investigación como parte de la Estrategia de Universidad Sustentable Eco-Puma. En la **Fig. 9** se observa la ubicación de la CIC y la distribución de la naturación de la azotea; en el techo “c” se implementaron sistemas modulares con hidromacetas para el estudio.



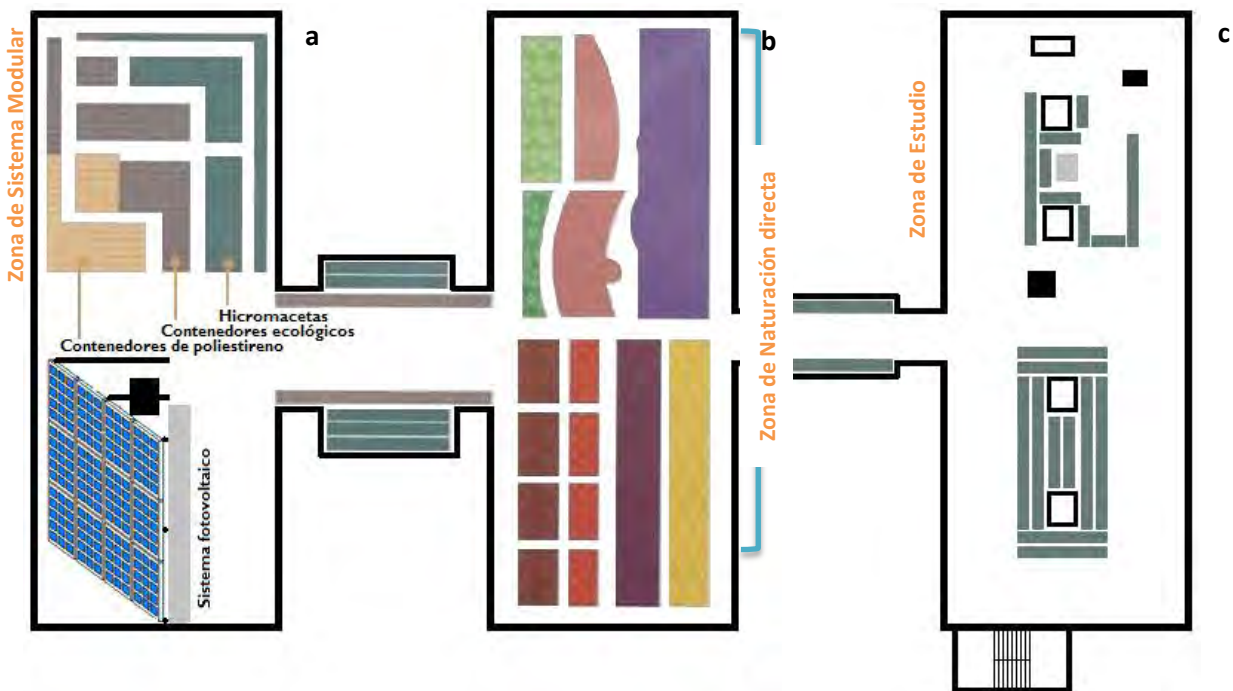
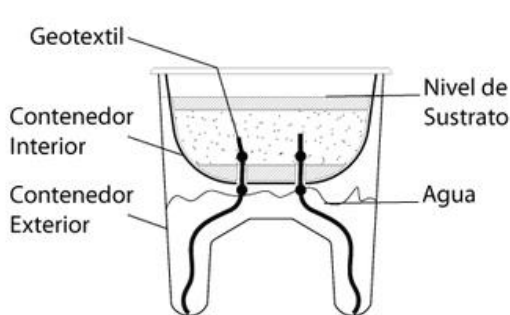


Fig. 9. (i) Mapa de ubicación de la Coordinación de la Investigación Científica (CIC) de la UNAM y (ii) diagrama de distribución de la naturación en la azotea en la edificación: “a” y “c” con sistemas modulares, mientras que en “b” la naturación es directa.

La hidromaceta utilizada para esta sección del trabajo está fabricada con polipropileno (plástico) reciclado y su diseño de doble fondo con malla geotextil permite almacenar 6 litros de agua que las plantas consumen paulatinamente. Sin embargo, por los objetivos de este estudio, no se colocó geotextil en las hidromacetas. La estructura y características de las hidromacetas se especifican en la **Fig. 10**.



Ficha técnica	
Largo	52 cm
Ancho	32 cm
Altura	33 cm
Elevación	14 cm
Peso hidromaceta	1.4 kg
Peso c/ plantas y sustrato	11 kg
Peso a saturación	20 kg

Fig. 10. Diseño y ficha técnica del sistema modular con hidromaceta.

En preparación al experimento, se comenzó cortando esquejes de tres especies de crasuláceas del género *Sedum*: *S. dendroideum*, *S. grisseum* y *S. rubrotinctum*, elegidas por ser especies plantadas en la azotea naturada del Jardín Botánico, que presentan diferencias morfológicas pero comparten el metabolismo CAM. A los esquejes se les aplicó enraizador (Radix) en 2 cm a partir de la base; 15 días después se agregó el sustrato al nivel marcado en las hidromacetas tratando de obtener un valor en peso lo más cercano a 10 kg. Posteriormente se plantaron los esquejes con la siguiente distribución: 3 hidromacetas de cada especie, *S. dendroideum* (a) en un acomodo de 4 esquejes a lo largo por 3 de ancho, *S. grisseum* (b) 6 esquejes a largo por 5 de ancho, *S. rubrotinctum* (c) 6 por 4; 3 hidromacetas con la mezcla de las 3 especies (d) 6 esquejes de cada una colocadas aleatoriamente y 3 hidromacetas control (e) con sólo sustrato, siendo en total 15 hidromacetas (**Fig. 11**).

Con el fin de que las plantas se aclimataran, se dejó transcurrir un periodo de tres meses (de noviembre del 2014 a febrero de 2015) antes de empezar con el experimento. Una vez aclimatadas el experimento tuvo una duración de cuatro semanas (9 de febrero al 11 de marzo del 2015). Durante este periodo se registraron las condiciones meteorológicas, y se realizaron mediciones de conductancia estomática en *Sedum dendroideum* y balance hídrico en todos los tratamientos.

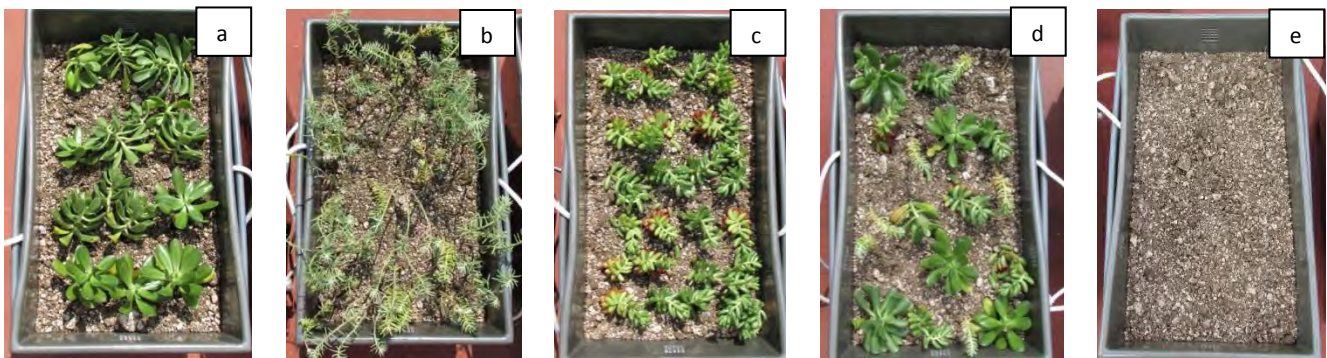


Fig. 11. Distribución de las 3 especies de *Sedum*. (a) *S. dendroideum*, 12 individuos; (b) *S. grisseum*, 30 individuos; (c) *S. rubrotinctum*, 24 individuos; (d) Mezcla de las 3 especies, 18 individuos y (e) control.

2.3.2 Instrumentación, medición y análisis de datos

Variables meteorológicas

Con el fin de caracterizar las condiciones meteorológicas se obtuvieron datos de precipitación, temperatura, humedad relativa y radiación solar global a una resolución de 1 minuto de la estación meteorológica de la Facultad de Ciencias de la UNAM, localizada a menos de 500 m de distancia del área de estudio (**Fig. 9 (i)**). Posteriormente se hizo el remuestreo de las variables meteorológicas a intervalos de 1 hora y día.

Déficit de presión de vapor de agua (DPV)

Para determinar el DPV primeramente se calculó la presión de vapor de saturación (e_{sat}) con la siguiente relación (Holwerda *et al.*, 2013):

$$e_{sat} = 0.6108 \exp \left(\frac{17.21 * T (^{\circ}C)}{237.3 + T (^{\circ}C)} \right) \quad \text{Ec. (3)}$$

Después, se calculó la presión de vapor (e) a partir de la ecuación de la humedad relativa:

$$HR = \left(100 \frac{e}{e_{sat}} \right) \% \quad \text{Ec. (4)}$$

Finalmente el DPV fue determinado con la siguiente relación:

$$DPV (kPa) = (e_{sat} - e) \quad \text{Ec. (5)}$$

Balance hídrico

El balance hídrico hace referencia a todas las entradas y salidas de agua en las hidromacetas en un tiempo definido. Para determinar este equilibrio y estimar la evapotranspiración, se usó la siguiente ecuación de acuerdo con Norris *et al.* (2008):

$$ET = P - Q \pm R \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde la precipitación (P) es el volumen de riego por hidromaceta (1L) que fue equivalente a simular una lluvia de 6 mm; Q es el agua drenada de la hidromaceta que se almacenó en el contenedor externo a ella y se midió con una probeta de 1L aproximadamente 4 horas después del riego; y R es la retención de agua en el suelo. La evapotranspiración (ET) fue

estimada a partir de las diferencias en el registro del peso del contenedor interior de las hidromacetas con sustrato y plantas antes y después del riego, utilizando una báscula digital (Ohaus Defender™ Serie 5000) con una resolución de 5 g. Finalmente se realizó la conversión de kilogramos en litros y milímetros para reportar los datos utilizando el área de la hidromaceta (0.16 m²). En los días de riego, las hidromacetas fueron pesadas 2 ocasiones, antes y 4 horas después de ser regadas. En los días subsiguientes, las hidromacetas fueron pesadas diariamente por la mañana hasta el siguiente riego. Este procedimiento se continuó durante 4.5 semanas exceptuando los días domingo, como se muestra en la calendario de la **Fig.12**.



Fig. 12. Calendario de las mediciones realizadas en el experimento de hidromacetas.

Resolviendo la ecuación de Norris *et al.* (2008), se calculó la tasa de ET diaria y acumulada por tratamiento en los cuatro períodos de riego, así como la ET promedio diaria y acumulada durante el tiempo de estudio (9 de febrero al 11 de marzo de 2015). Se siguió el mismo procedimiento para calcular la evaporación (*E*) del tratamiento con sustrato sin vegetación (control). Todas las variables fueron reportadas en valores de mm.

Contenido de humedad en suelo

Para el monitoreo del contenido de humedad en el sustrato, se colocó un sensor 10 HS (Decagon) a una profundidad de 5 cm de forma horizontal en dos de tres hidromacetas por tratamiento. Las lecturas de humedad fueron registradas a intervalos de 5 min utilizando un datalogger Em50 de Decagon (**Fig. 5**). Para corregir los registros con la calibración dieléctrica estándar, se aplicó la **Ec. 2** obteniéndose valores en m³/m³. Posteriormente se hizo un remuestreo de los datos a 1 hora.

Conductancia estomática (Gs)

Con el fin de monitorear el metabolismo CAM del género, y de estudiar su relación con las variables meteorológicas y condiciones de humedad en el suelo, se realizaron mediciones de conductancia estomática utilizando un porómetro modelo SC-1 (Decagon, EUA) (**Fig. 13**). De esta forma, el índice de apertura y cierre de los estomas fue registrado durante diferentes horas del día en *S. dendroideum* únicamente, ya que la morfología de las hojas de *S. grisseum* y *S. rubrotinctum* no permitieron su medición con este instrumento. Sin embargo, al pertenecer todas ellas al grupo de crasuláceas se podría esperar que su comportamiento metabólico fuese de la misma manera. Las mediciones se realizaron por la mañana (6:30 -7:30 hrs), la tarde (13:00-14:30 hrs) y la noche (18:30-20:00 hrs) los días señalados en la **Fig.12**.



Fig. 13. Estructura del porómetro de Decagon.

Para el análisis de los datos, se promediaron las cinco mediciones realizadas en cada una de las 3 hidromacetas de *Sedum dendroideum*, obteniéndose así tres valores promedio para cada segmento del día.

Posteriormente, se realizaron comparaciones estadísticas mediante pruebas ANOVA entre la retención, el escurrimiento, la evaporación y evapotranspiración diaria y acumulada, y el contenido de humedad en suelo en todos los tratamientos, para evaluar diferencias significativas. Además se hicieron pruebas de correlación de Pearson entre las variables antes mencionadas. Los análisis se llevaron a cabo en el software estadístico SigmaPlot 13.0.

III. Resultados

3.1 Experimento 1

3.1.1 Precipitación

La precipitación total registrada durante el periodo de estudio (26 de junio al 25 de octubre de 2014) fue de 663.6 mm, de la cual se reportan 63 eventos de acuerdo a los criterios descritos en los Métodos (Sección 2.2.3), y que sumados tienen una precipitación de 513.4 mm. Esto equivalió al 48% del total de lluvia observado durante el año hidrológico junio 2014-mayo 2015.

El evento de mayor precipitación ocurrió el 11 de agosto con 27 mm y los de menor tamaño con 1 mm se observaron el 10 de julio y 28 de septiembre (**Fig. 14**). Los datos estadísticos generales se encuentran en la **Tabla 2**.

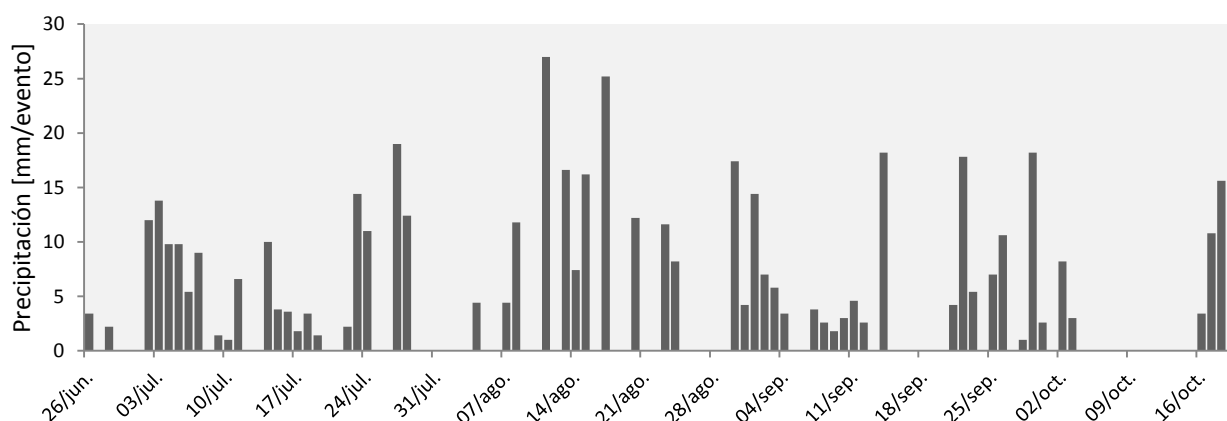


Fig. 14. Precipitación por evento en la zona de estudio, Jardín Botánico, UNAM (26 de junio al 25 de octubre de 2014).

Tabla 2. Descriptivos generales de la lluvia a nivel de evento y antecedente de precipitación en el periodo de estudio, Jardín Botánico, UNAM ($n = 63$).

Variable	Mínimo	Media	Máximo	Desviación Estándar
<i>P</i> total (mm)	1	8.1	27	6.2
Duración (hr)	00:25	5:20	18:45	4:15
Intensidad máx (mm/hr)	0.6	5.0	16.6	3.8
Intensidad prom (mm/hr)	0.2	1.6	6.1	1.3
Antecedente de precipitación (mm)	5	35.9	91.2	20.6

3.1.2 Esguerrimiento

En términos del volumen de esguerrimiento generado por eventos de lluvia (Q) para la azotea común (AC) y la azotea verde extensiva (AVE) ($n = 63$), los valores promedio fueron 8.53 mm y 4.52 mm, respectivamente (**Tabla 3**). Por lo tanto, la diferencia de Q entre azoteas fue en promedio de 4 mm. Pruebas estadísticas sugirieron diferencias significativas en Q entre azoteas ($p < 0.05$).

Tabla 3. Datos estadísticos del esguerrimiento (Q) de la azotea común y la naturada ($n = 63$).

Q (mm)	AC	AVE
Mínimo	0.53	0.00
Media	8.53	4.52
Máximo	31.51	21.29
Desviación estándar	7.23	5.78
Error estándar	0.91	0.73

La precipitación y el esguerrimiento en la azotea común mostró una fuerte relación lineal y positiva ($r^2=0.987$), mientras que en la azotea verde esta correlación fue menos clara ($r^2=0.672$) (**Fig. 15**). De los 63 eventos analizados, la azotea común registró esguerrimiento para todos ellos; mientras que la azotea verde no registró esguerrimientos en 22 eventos en los que la precipitación fue ≤ 4.6 mm.

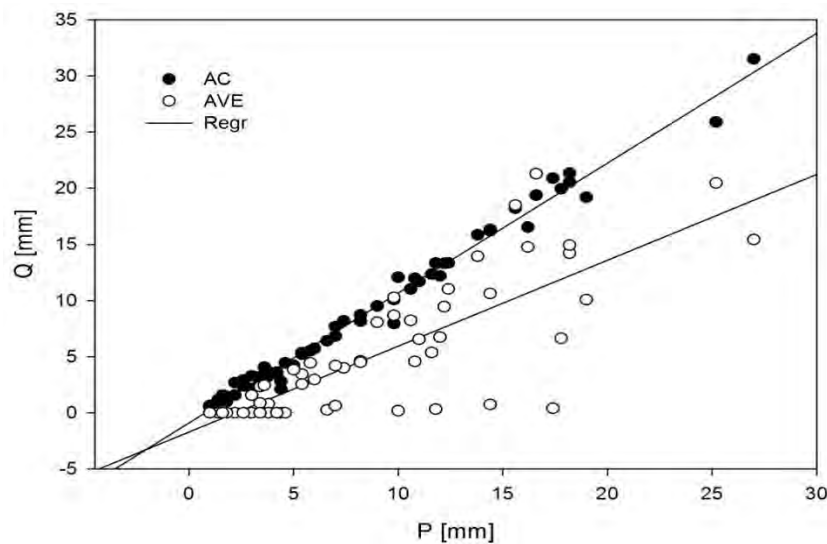


Fig. 15. Esguerrimiento vs. precipitación en la azotea común (AC) y la azotea verde (AVE) ($n = 63$ eventos).

Para la azotea común, el valor promedio del coeficiente de escurrimiento (Q/P) obtenido fue de $0.96 \pm 0.18\%$ (DE), lo que indica una casi nula retención de agua de lluvia (4%). Por otro lado, la azotea verde presentó un Q/P de $0.386 \pm 0.385\%$ equivalente a una retención promedio del 61%. Al compararse estos resultados entre azoteas se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.001$). Cabe también mencionar que hubo casos en los que se obtuvieron coeficientes de escurrimiento >1 en la azotea común (31 eventos) y en la azotea verde (4 eventos) (**Fig. 16**).

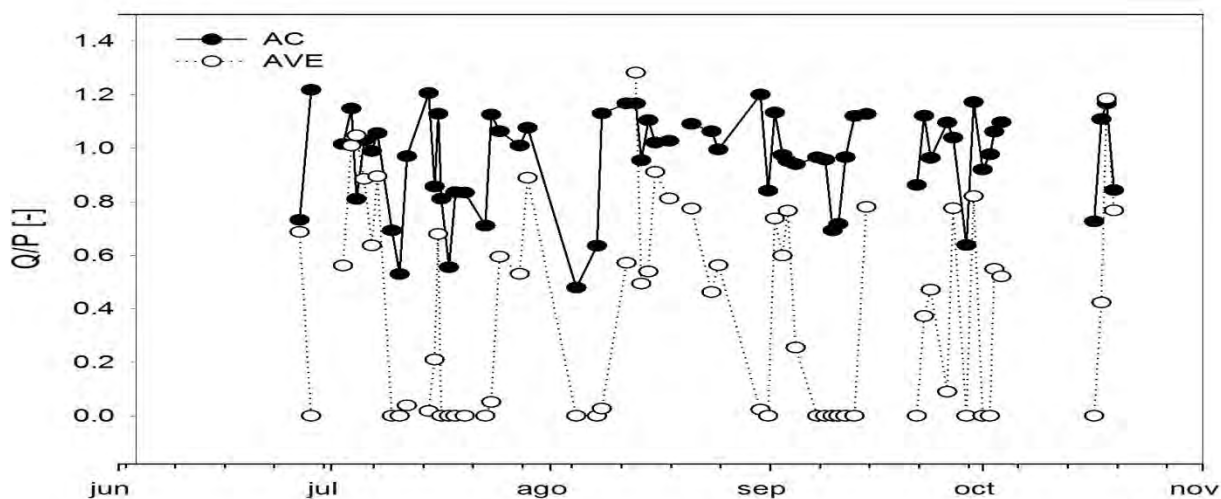


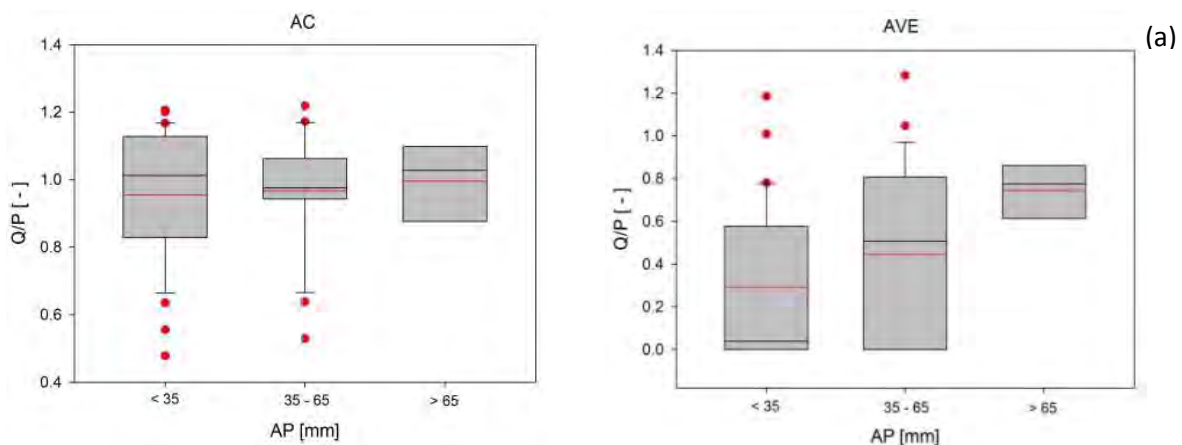
Fig. 16. Coeficientes de escurrimiento (Q/P) en la azotea común (AC) y la azotea verde extensiva (AVE) para 63 eventos analizados.

Por tamaño de precipitación, eventos pequeños ($< 5\text{mm}$), medianos ($5\text{-}10\text{ mm}$) y grandes ($> 15\text{ mm}$), la azotea verde reportó coeficientes de escurrimiento y retenciones expresadas en porcentaje de 0.09 (91%), 0.56 (44%) y 0.73 (27%) respectivamente; mientras que la azotea común registró valores de 0.83 (17%), 1.04 (0%) y 1.12 (0%) para cada tamaño de precipitación.

La influencia del antecedente de precipitación (AP), la duración e intensidad promedio de lluvia en el coeficiente de escurrimiento de la azotea común y naturada se muestra en la **Fig. 17**. Se observa que sin importar el antecedente de lluvia, la azotea común presentó un Q/P mayor a 0.85. En contraste, en la azotea verde los eventos con valores de AP $< 35\text{ mm}$ (antecedentes de lluvia bajos) presentaron una retención de lluvia promedio del 70%, mientras que los valores de AP en el rango de 35-66 mm (moderados), la retención fue

cercana al 60%, y para AP > 66 mm (antecedentes de lluvia altos) la retención disminuyó hasta un 25% aproximadamente (**Fig. 17a**); hallándose diferencias significativas en los volúmenes de escurrimiento generados con antecedentes de precipitación bajos (< 35 mm) y altos (> 66 mm) ($p = 0.029$). También se encontraron diferencias significativas en Q/P por rangos de AP entre azoteas ($p < 0.05$).

De manera general se observó un incremento en el coeficiente de escurrimiento y por tanto una disminución en el volumen retenido de precipitación en ambas azoteas conforme la intensidad promedio del evento de lluvia (Int prom P) aumentaba, variando Q/P de 0.87 a >1 en la azotea común y de 0.22 a 0.64 en la azotea verde; encontrándose una correlación positiva y significativa entre estas variables ($p < 0.05$). En cada azotea, no se encontraron diferencias significativas en los valores de Q/P a intensidades promedio de 1-3 y > 3 mm/hr ($p > 0.05$). Sin embargo, al compararse Q/P por rangos de Int prom P entre azoteas, las diferencias sí fueron significativas ($p < 0.05$) (**Fig.17b**). Por otro lado, en la duración de los eventos de precipitación no se encontraron diferencias significativas en los valores de Q/P en la azotea verde ($p = 0.334$); sin embargo sí las hubo para la azotea común entre los eventos de corta (< 5 hrs) y mediana (5 - 10 hrs) duración con respecto a los largos > 10 hrs ($p = 0.004$) observándose en estos últimos un escurrimiento 10% mayor (**Fig.17c**).



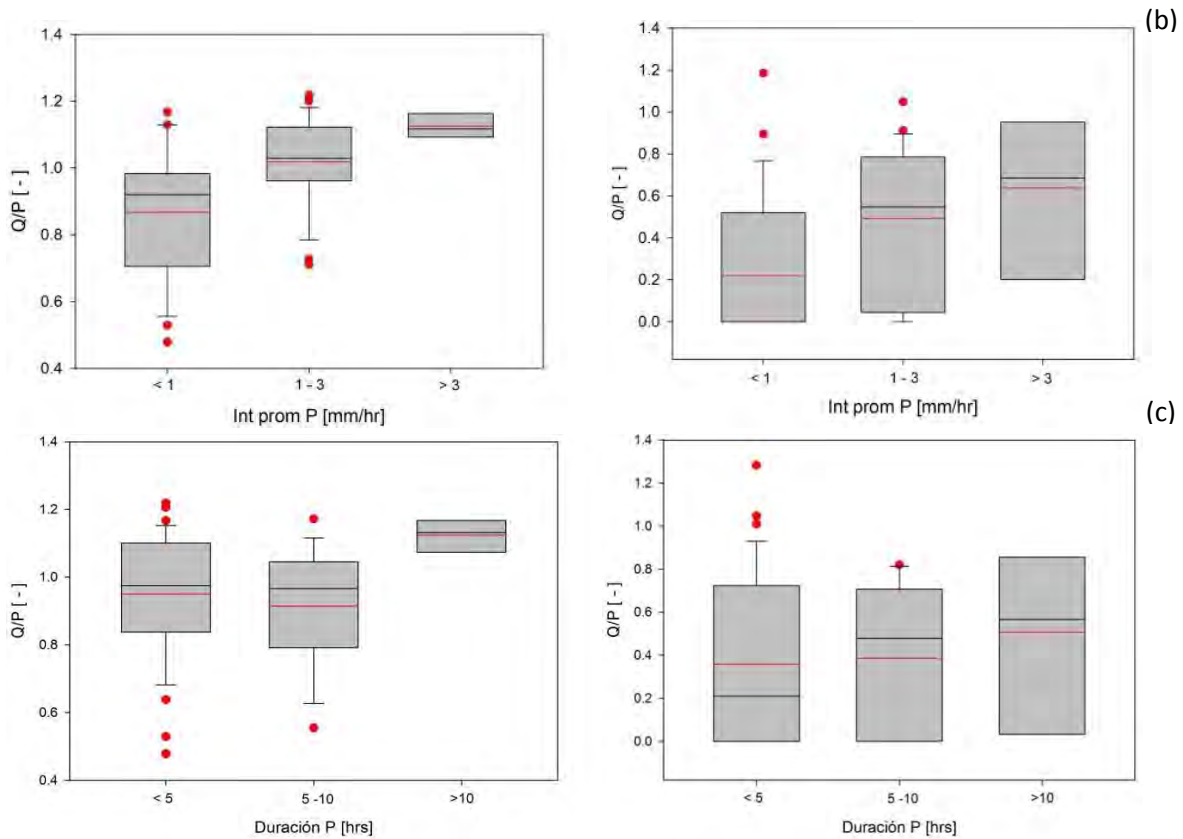


Fig. 17. Coeficientes de escurrimiento (Q/P) en la azotea común y verde extensiva para todos los eventos divididos en tres clases por variable: (a) antecedente de precipitación (AP; mm), (b) duración (hrs) e (c) intensidad promedio de la lluvia (I prom P; mm/hr).

3.1.3 Retraso y duración del escurrimiento

En la **Figura 18** podemos notar en promedio un menor tiempo de retraso (TR Q) en el inicio del escurrimiento de la azotea común (20 min) comparado con la azotea verde (2 hrs 27 min), lo cual fue significativamente diferente entre azoteas ($p < 0.001$). Por otro lado, el tiempo de duración (TD Q) del escurrimiento en la azotea verde y común mostraron también ser diferentes ($p = 0.002$) con tiempos promedio de 7 hrs 38 min y 5 hrs 52 min, respectivamente. También se observó que la correlación entre la duración del escurrimiento de la azotea común y la duración de la lluvia fue alta y prácticamente lineal ($r^2 = 0.915$) (**Fig. 19**). Los valores promedio de estas variables fueron muy similares, 5 hr 52 min y 5 hr 24 min, respectivamente. En contraste, la duración de la lluvia y la del escurrimiento en la azotea verde mostraron una correlación baja ($r^2 = 0.271$); en este caso el valor promedio fue de 5 hr 24 min y de 7 hrs 38 min, respectivamente.

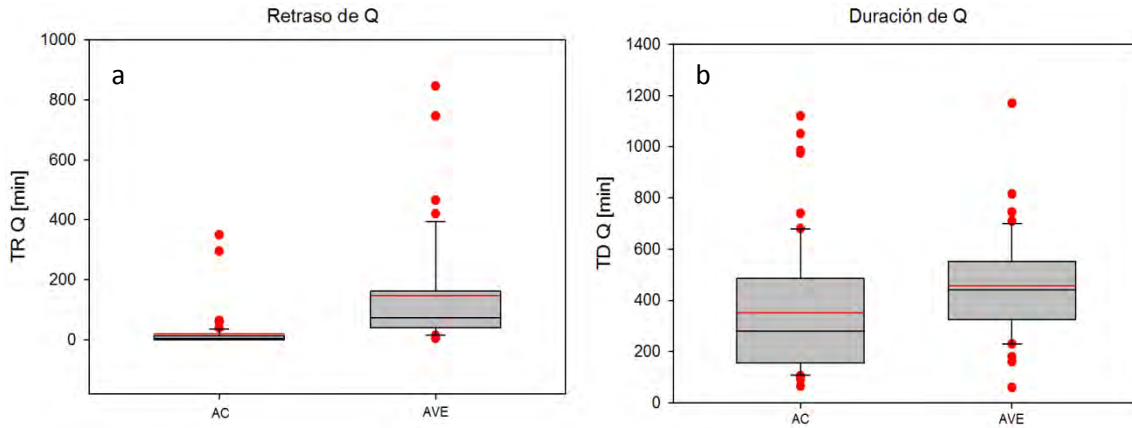


Fig. 18. (a) Tiempo de retraso (TR Q) y (b) tiempo de duración (TD Q) del escurrimiento en la azotea común y la naturada.

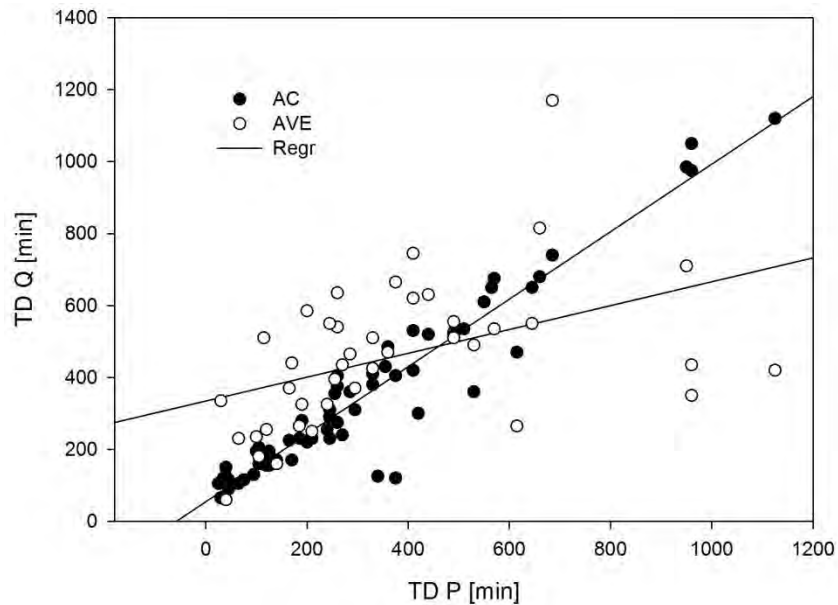
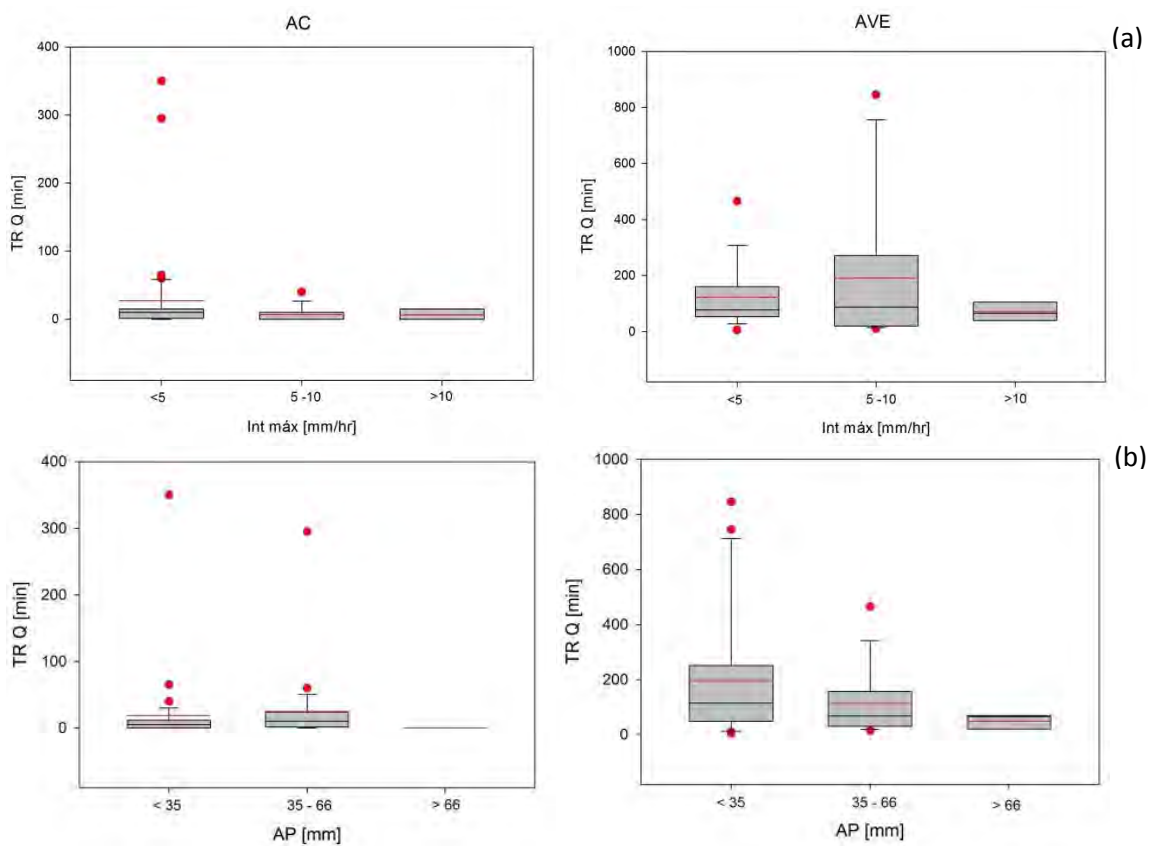


Fig. 19. Tiempo de duración del escurrimiento (TD Q) vs. duración del evento de lluvia (TD P) para la azotea verde y común.

Los gráficos de la **Fig. 20** muestran la influencia del antecedente de lluvia, la duración y la intensidad máxima de precipitación en el tiempo de inicio del escurrimiento (TR Q) para ambas azoteas. Pese a que se registraron más eventos con intensidades máximas de precipitación < 5 mm/hr (40 casos), fue el intervalo entre 5 y 10 mm/hr el que mostró una mayor variación en el tiempo de respuesta de la azotea verde, siendo éste de 10 a 845 min (14 hrs) con un valor promedio de 191 min (3 hrs 10 min); a pesar de ello no se encontraron diferencias significativas entre clases en cada azotea (**Fig. 20a**). Además se hizo evidente

en la azotea verde que, el tiempo de inicio del escurrimiento disminuye a medida que se incrementa el antecedente de precipitación (**Fig. 20b**) y aumenta conforme se prolonga la duración del evento de lluvia (**Fig. 20c**). Al respecto, se encontraron diferencias significativas entre intervalos en la precipitación de corta (< 5 hrs) y larga (> 10 hrs) duración en la AVE ($p = 0.013$) y entre antecedentes de lluvia moderados (35 - 66 mm) y altos (> 66 mm) de la AC ($p = 0.014$). Asimismo, se encontraron diferencias significativas en el TR Q al comparar por rango de AP, Int máx y duración de la precipitación entre azoteas ($p < 0.05$).



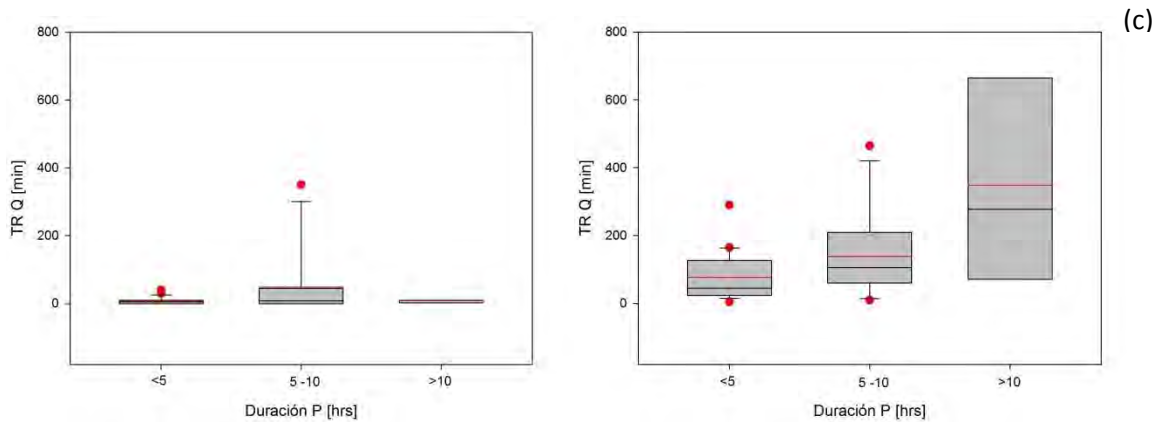


Fig. 20. Retraso en el inicio del escurrimiento (TR Q) en la azotea común (AC) y verde extensiva (AVE) para todos los eventos divididos en tres clases por variable: (a) intensidad máxima de precipitación (Int máx; mm/hr), (b) antecedente de lluvia (AP; mm) y (c) duración (hrs).

En la **Fig. 21a** se observó que la influencia del antecedente de precipitación en la duración del escurrimiento (TD Q) produce patrones muy diferentes en ambas azoteas; a pesar que la azotea común mostró en general una disminución en TD Q conforme aumentó el antecedente de precipitación, las diferencias entre clases no resultaron significativas entre azoteas ($p > 0.05$). Por otro lado, se encontró que a una mayor intensidad promedio de lluvia, la duración del escurrimiento disminuye de forma general en ambas azoteas ($p < 0.05$). Se observó que en eventos con intensidades promedio > 3 mm/hr, el valor promedio de TD Q en la azotea verde (299 min) fue poco menos que el doble reportado en la azotea común (174 min) (**Fig. 21c**). Además, se encontraron diferencias significativas en las clases de TD Q para la azotea verde ($p = 0.014$) y diferencias significativas entre azoteas en eventos con intensidades promedio > 3 mm/hr ($p < 0.05$). En la **Fig. 21b** se corrobora la relación estrecha que existe entre el tiempo de duración de la lluvia y el tiempo de duración del escurrimiento de la azotea común, como se mencionó anteriormente. Asimismo observamos que la AVE prolongó el TD Q promedio 3 hrs y 2 hrs más que la AC para los eventos de lluvia mayores a 5 hrs y de 5 a 10 hrs, respectivamente; hallándose diferencias significativas en la comparación de dichos intervalos entre azoteas ($p < 0.05$); mientras que para precipitaciones con duración > 10 hrs, la AVE redujo el TD Q 4 hrs en promedio comparado con la AC; sin embargo no se sugirieron diferencias significativas para este intervalo entre azoteas ($p > 0.05$). Por rangos en ambas azoteas sí se encontraron diferencias significativas en relación al TD Q ($p < 0.05$). No obstante, en la AVE las

diferencias significativas sólo se establecieron a eventos de lluvia < 5 hrs y de 5-10 hrs ($p = 0.002$).

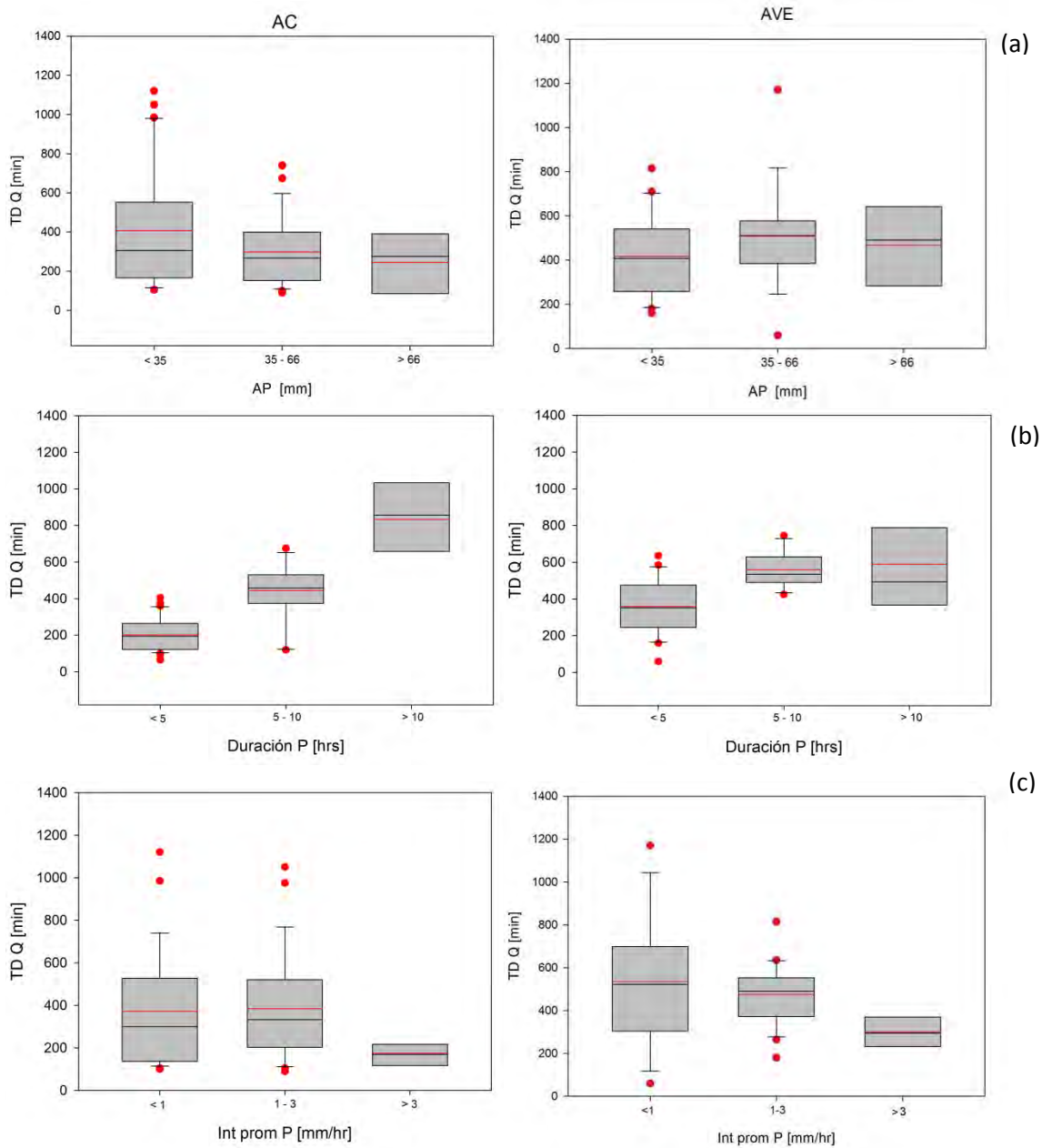


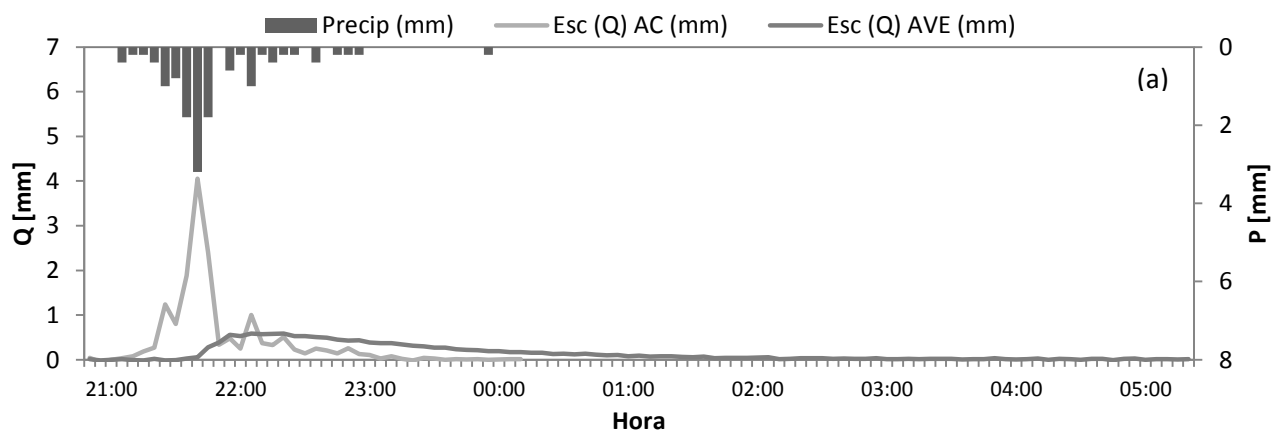
Fig. 21. Duración del escurrimiento (TD Q) en la azotea común y verde extensiva para todos los eventos divididos en tres clases por variable: (a) Antecedente de precipitación (AP) (mm), (b) duración (hrs) e (c) intensidad promedio de la precipitación (Int prom) (mm/hr).

A continuación, se muestran 5 distintos eventos precipitación-escorrimento para ambas azoteas elegidos con base en condiciones contrastantes de precipitación antecedente e intensidades promedio de lluvia (**Fig.22a-e**).

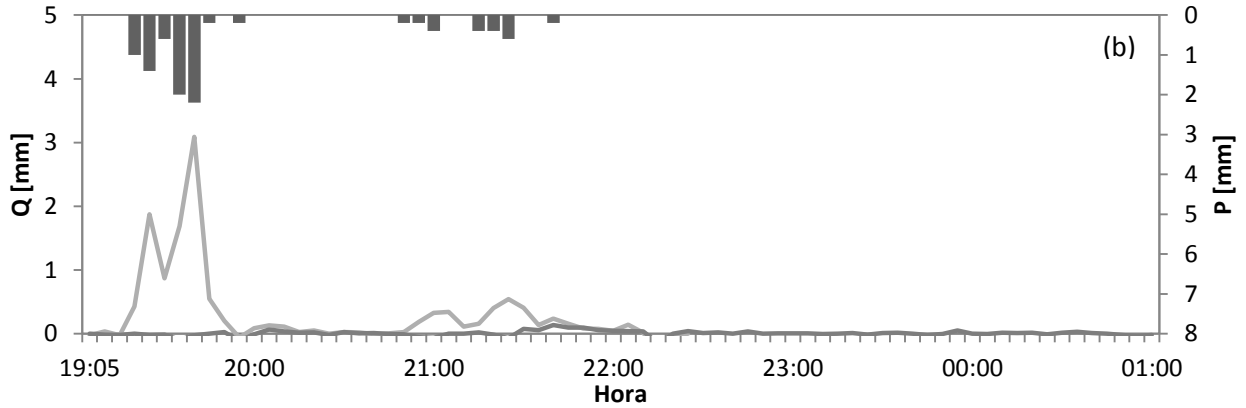
El 3 de Julio con una precipitación total de 13.8 mm y antecedentes de lluvia (bajo) similar a su día anterior (27 mm y 29.8 mm, respectivamente) pero con una intensidad promedio mayor (4.60 mm/hr) no hubo ninguna retención por ambos techos (**Fig.22a**).

Por otra parte, en algunos eventos observamos una mayor influencia del antecedente de precipitación. El 14 de Julio con una antecedente de lluvia de 18.8 mm (bajo), y una intensidad promedio de lluvia alta (3.3 mm/hr), la azotea naturada retuvo el 98% de la lluvia y la común 0% (**Fig. 22b**); mientras que el 13 de Agosto (**Fig. 22c**) con un intensidad promedio 5.53 mm/hr y precipitación total de 16.6 mm; ambas altas, es posible que el antecedente de lluvia con 61 mm en conjunto con la intensidad promedio, condujeran a una nula retención del evento de la azotea verde. Además, para los eventos con una precipitación total y AP bajos se observó una mayor retención de la precipitación, incluso con valores de Q/P igual a cero en la azotea verde (**Fig. 22d**).

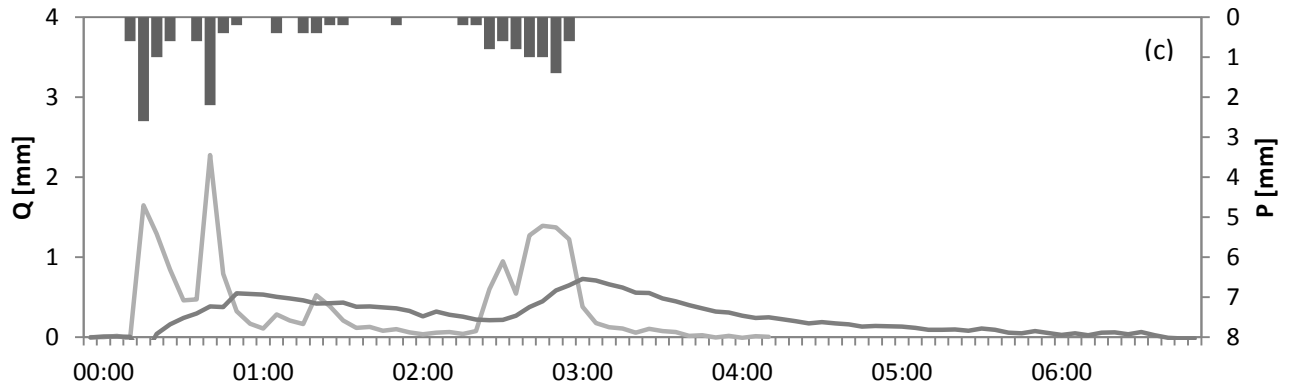
Con una precipitación total de 17.8 mm e intensidad promedio de 2.97 mm/hr, el evento del 22 de septiembre tuvo una duración de 4 hrs 15 min y retuvo el 64% de la lluvia, mientras que la azotea común drenó el 100% de la lluvia (**Fig.22e**).



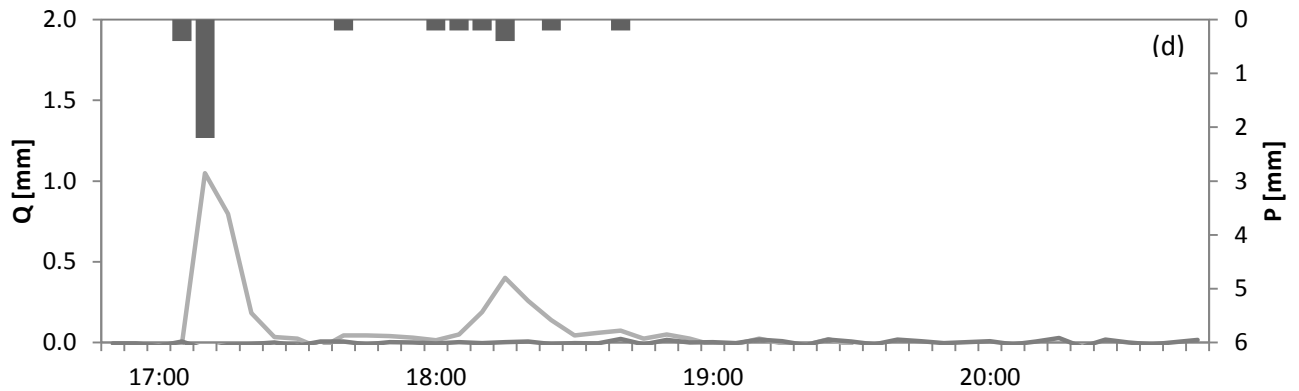
Evento de lluvia del 03 de julio de 2014. $P_t = 13.8$ mm; Dur. P = 2 hr 50 min; Q/P AC = 1.15; Q/P AVE = 1.01; AP = 27 mm; Int máx = 10.6 mm/hr; Int prom = 4.60 mm/hr.



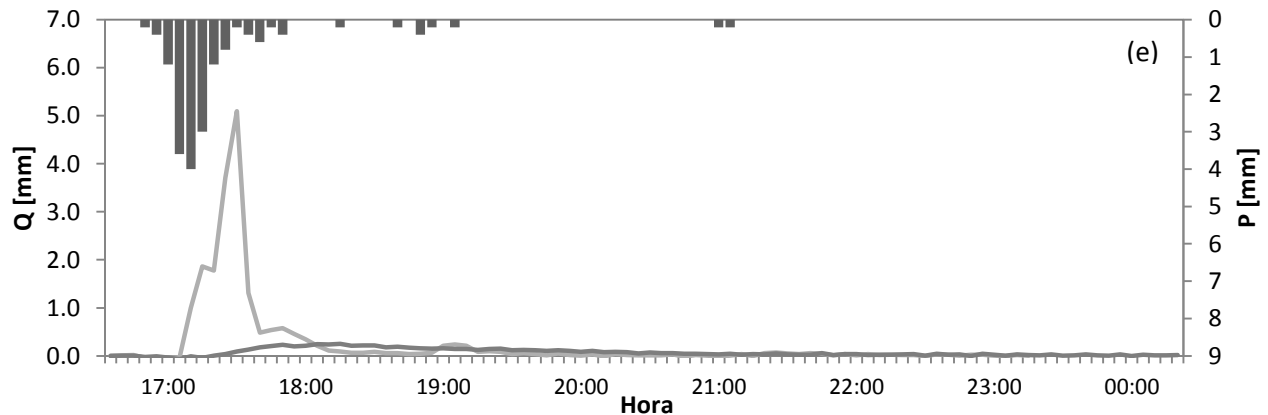
Evento de lluvia del 14 de julio de 2014. $P_t = 10$ mm; Dur. P = 2 hr 20 min; Q/P AC = 1.21; Q/P AVE = 0.02; AP = 18.8 mm; Int máx = 7.6 mm/hr; Int prom = 3.33 mm/hr.



Evento de lluvia del 13 de agosto de 2014. $P_t = 16.6$ mm; Dur. P. = 2 hr 45 min; Q/P AC = 1.17; Q/P AVE = 1.28; AP = 61 mm; Int máx = 8.2 mm/hr; Int prom = 5.53 mm/hr.



Evento de lluvia del 31 de agosto de 2014. $P_t = 4.2$ mm; Dur. P = 1 hr 35 min; Q/P AC = 0.84; Q/P AVE = 0; AP = 22.2 mm; Int máx = 3 mm/hr; Int prom = 2.10 mm/hr.



Evento de lluvia del 22 de septiembre de 2014. $P_t = 17.8$ mm; Dur. P = 4 hr 15 min; Q/P AC = 1.12; Q/P AVE = 0.37; AP = 5.2 mm; Int máx = 14.4 mm/hr; Int prom = 2.97 mm/hr.

Fig. 22. Histograma y escurrimiento (mm) de 5 eventos de precipitación en la azotea común (AC) y verde extensiva (AVE).

3.1.4 Contenido de humedad en suelo

En la AVE, el contenido de humedad en el suelo varió entre 0.12 y 0.43 m^3/m^3 durante el período de muestreo de junio a octubre de 2014 considerando 73 eventos de precipitación con rangos de 1 a 38 mm. El rango de humedad al inicio del evento de lluvia fue de 0.127 a 0.338 m^3/m^3 en el lado “A” y de 0.154 a 0.361 m^3/m^3 en el lado “B”, la diferencias entre ellas fueron significativas ($p < 0.001$). El máximo de humedad en respuesta al primer pico de lluvia estuvo en el rango de 0.125-0.367 m^3/m^3 en la zona “A” y de 0.155-0.433 m^3/m^3 en la “B”, hallándose diferencias significativas entre zonas ($p < 0.001$).

Asimismo, para ambas zonas de la AVE el tiempo promedio que tardó en responder la humedad del suelo a los eventos de lluvia fue de 59 min y el tiempo promedio al valor máximo de humedad en respuesta al primer pico de la precipitación fue de 2 hrs.

Comparando estos datos con el tiempo promedio de retraso del escurrimiento al evento de precipitación (2 hrs 26 min), se encontró que existe un lapso de 1 hr 26 min entre la respuesta en la humedad del suelo y el escurrimiento de la AVE una vez iniciado el evento de lluvia y de 26 min entre la respuesta en humedad de la AVE al primer pico de lluvia y el inicio del escurrimiento.

En general, la correlación positiva entre la precipitación (mm) y el contenido de humedad en suelo (m^3/m^3) en respuesta al primer pico de lluvia de la azotea verde extensiva (**Tabla**

4) induce a la tendencia de incrementar juntas en ambos lados del techo con diferente cobertura vegetal (“A” y “B”), hecho que también se percibe en la **Fig. 23**. Se encontró la misma tendencia entre el valor inicial de humedad en suelo y la respuesta al primer pico de lluvia por segmento del techo. Por otro lado, no se encontró una relación significativa entre la precipitación y el contenido inicial de humedad en suelo en ninguna región de la azotea verde, medido antes de comenzar el evento de lluvia (**Tabla 4**).

Tabla 4. Resumen estadístico de la **Fig. 22**. Correlaciones de Pearson entre los contenidos de humedad en suelo (inicial y en respuesta al primer pico de lluvia) y la precipitación. Humedad inicial zona A (HS inic A); Humedad inicial zona B (HS inic B); Humedad en respuesta al primer pico de lluvia A (HS pkP A); Humedad en respuesta al primer pico de lluvia B (HS pkP B).

	HS inic A	HS inic B	HS pkP A	HS pkP B
Precipitación (mm)	-0.105 (P>0.05)	-0.0645 (P>0.05)	0.274 (P<0.05)	0.373 (P<0.05)
HS inic A		0.975 (P<0.05)	0.868 (P<0.05)	0.786 (P<0.05)
HS inic B			0.883 (P<0.05)	0.849 (P<0.05)
HS pkP A				0.948 (P<0.05)

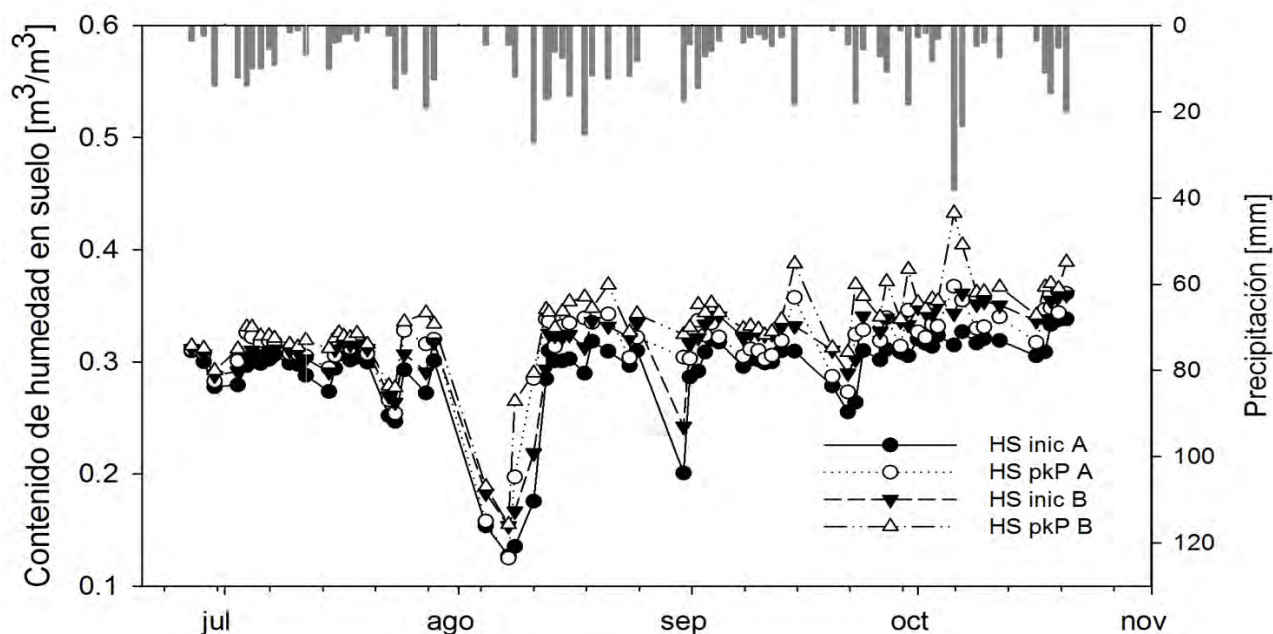


Fig. 23. Contenido de humedad en suelo de la azotea verde extensiva e histograma de la precipitación por evento ($n = 73$) durante el período de muestreo (junio-octubre de 2014).

3.2 Experimento 2

3.2.1 Condiciones meteorológicas

Durante el periodo comprendido entre el 9 de febrero y 11 de marzo de 2015 (~ 2 meses), se registraron distintas variables meteorológicas. En la **Fig. 24** se muestra la temperatura y radiación promedio diaria, mientras que en la **Fig. 25** se observa la precipitación diaria y el déficit de presión de vapor promedio diario (DPV). En el periodo de estudio, la temperatura diaria promedio fue de $15.8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.3\text{ DE}$, la humedad relativa de $44.23\% \pm 9.9\text{ DE}$ y el DPV de 1.12 kPa. La precipitación fue de 7.4 mm, sin embargo la mayoría se registró el día 10 de marzo (3.7 mm) y 11 de marzo (3.6 mm).

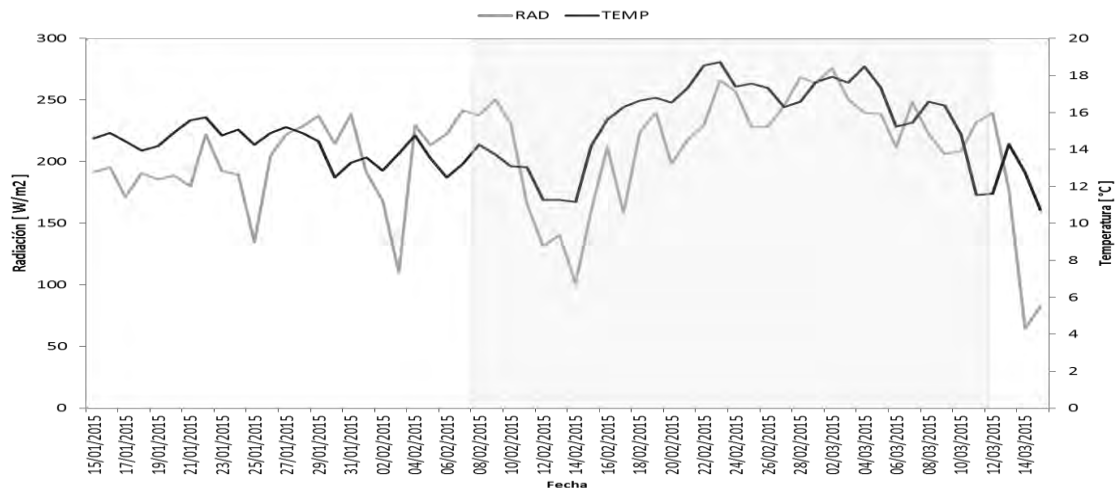


Fig. 24. Radiación (Rad; W/m²) y temperatura (*T*; °C) media diaria del 15 de enero al 15 de marzo de 2015 registrado por la Estación Meteorológica de la Facultad de Ciencias de la UNAM. El período de duración del experimento se señala en la zona sombreada.

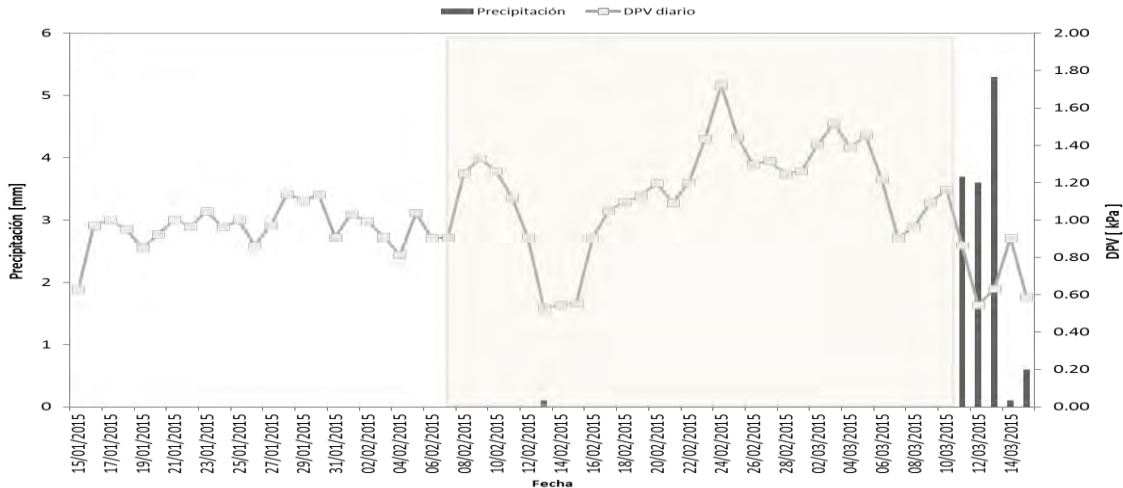


Fig. 25. Precipitación (P , mm) y déficit de presión de vapor (DPV; kPa) promedio diario del 15 de enero al 15 de marzo de 2015 registrado por la Estación Meteorológica de la Facultad de Ciencias de la UNAM. El período de duración del experimento se señala en la zona sombreada.

3.2.2 Balance hídrico

En cada ensayo, la entrada de agua fue el riego simulando una lluvia de 6 mm, y como pérdidas (salidas) de agua el escurrimiento generado por el riego (Q ; litros). Los cambios en el contenido de agua del suelo se registraron como entradas o salidas (R ; litros) en el balance diario.

Durante el período investigado, los valores promedio de Q por tratamiento mostraron un descenso para todos los casos conforme las semanas transcurrieron; mientras que la retención de agua (R) no mostró un patrón general. Se observó que en *S. rubrotinctum*, la mezcla y el sustrato sin vegetación (control), la R aumento a lo largo de tiempo, en cambio en *S. dendroideum* y *S. griseum* disminuyó durante los primeros tres riegos pero al cuarto incrementó. Al comparar la R por períodos de riego, se encontraron diferencias significativas entre el 1er, 2do y 3er período con respecto al 4to ($p < 0.001$). Al comparar por tratamientos, *S. rubrotinctum* fue la que mostró diferencias significativas con respecto a los demás tratamientos ($p < 0.05$). En el caso del Q , se hallaron diferencias significativas entre el 1er período con el 2do, 3er y 4to períodos, y entre el 2do y 4to período ($p < 0.005$). En la comparación por tratamientos, no se encontraron diferencias significativas entre el control y *S. griseum*, así como entre la mezcla y *S. dendroideum* ($p > 0.05$) pero sí las hubo entre *S. rubrotinctum* con el resto de los tratamientos; *S. griseum* y el control sin vegetación

con la mezcla y *S. dendroideum* ($p > 0.05$). Q promedio total fue más alto en *S. rubrotinctum* seguido por el sustrato sin vegetación, *S. griseum*, *S. dendroideum* y la mezcla, estos últimos dos con el mismo valor. Estos resultados concuerdan con lo observado en la R total promedio donde la secuencia de disminución por tratamiento es inversa a Q . En este caso, *S. dendroideum* y la mezcla reportaron los valores más altos de R , seguido por *S. griseum*, el sustrato sin vegetación y *S. rubrotinctum*. De forma general, se encontró una relación inversa entre R y Q por período de riego en todos los tratamientos ($p < 0.05$) (**Tabla 5**).

Tabla 5. Ecurrimiento (Q ; litros) y retención (R ; litros) promedio después del riego y promedio del período por tratamiento.

Q [litros]					
Tratamiento	09-feb	20-feb	27-feb	06-mar	Mes
<i>S. dendroideum</i>	0.12 ± 0.04	0.07 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.06 ± 0.03	0.07 ± 0.03
<i>S. rubrotinctum</i>	0.29 ± 0.02	0.20 ± 0.03	0.20 ± 0.02	0.16 ± 0.00	0.21 ± 0.05
<i>S. griseum</i>	0.17 ± 0.02	0.13 ± 0.05	0.10 ± 0.01	0.07 ± 0.04	0.12 ± 0.04
Mezcla	0.12 ± 0.03	0.09 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.07 ± 0.04
Control (s/veg.)	0.21 ± 0.04	0.13 ± 0.07	0.12 ± 0.02	0.08 ± 0.01	0.13 ± 0.06
R [litros]					
Tratamiento	09-feb	20-feb	27-feb	06-mar	Mes
<i>S. dendroideum</i>	0.73 ± 0.01	0.73 ± 0.03	0.71 ± 0.04	0.76 ± 0.03	0.74 ± 0.02
<i>S. rubrotinctum</i>	0.59 ± 0.01	0.62 ± 0.04	0.62 ± 0.04	0.66 ± 0.02	0.62 ± 0.03
<i>S. griseum</i>	0.70 ± 0.01	0.68 ± 0.04	0.68 ± 0.02	0.79 ± 0.04	0.71 ± 0.06
Mezcla	0.72 ± 0.06	0.72 ± 0.02	0.73 ± 0.02	0.77 ± 0.01	0.73 ± 0.03
Control (s/veg.)	0.60 ± 0.16	0.69 ± 0.07	0.69 ± 0.01	0.76 ± 0.03	0.68 ± 0.07

En términos de la evapotranspiración (ET) generada por los 4 tratamientos de azoteas verdes extensivas en hidromacetas y de la evaporación (E) del control (sustrato sin vegetación), se obtuvieron tasas de ET diaria (ET_d) promedio altas y similares en *S. dendroideum* y la mezcla, mientras que *S. rubrotinctum* presentó la tasa más baja; hallándose diferencias significativas entre los tratamientos vegetados y el control, así como entre *S. dendroideum* y la mezcla con *S. rubrotinctum* ($p < 0.05$). Además se registró una ET acumulada (ET_{ac}) mayor en la mezcla y menor en *S. rubrotinctum*, hallándose diferencias significativas entre los tratamientos vegetados y el control, así como entre la mezcla y *S. rubrotinctum* ($p < 0.05$) (**Tabla 6**).

Tabla 6. Tasa de evapotranspiración diaria (ET_d ; mm) y ET acumulada (ET_{ac} ; mm) promedio con su desviación estándar por período y por mes en cada tratamiento. Evaporación diaria (E_d ; mm) y E acumulada (E_{ac} ; mm) promedio con su desviación estándar por período y por mes en el tratamiento sin vegetación (control).

ET d [mm]					
Período	1	2	3	4	Mes
<i>S. dendroideum</i>	0.69 ± 0.04	0.84 ± 0.02	0.87 ± 0.02	0.91 ± 0.03	0.83 ± 0.10
<i>S. rubrotinctum</i>	0.68 ± 0.01	0.76 ± 0.02	0.77 ± 0.01	0.84 ± 0.07	0.76 ± 0.07
<i>S. griseum</i>	0.66 ± 0.01	0.80 ± 0.04	0.79 ± 0.02	0.92 ± 0.03	0.79 ± 0.11
Mezcla	0.70 ± 0.08	0.84 ± 0.05	0.84 ± 0.05	0.95 ± 0.02	0.83 ± 0.10
E diaria [mm]					
Control (s/veg.)	0.52 ± 0.08	0.66 ± 0.02	0.69 ± 0.04	0.74 ± 0.02	0.65 ± 0.09
ET ac [mm]					
Período	1	2	3	4	Total del mes
<i>S. dendroideum</i>	6.86 ± 0.38	5.88 ± 0.16	6.08 ± 0.14	4.55 ± 0.17	23.37
<i>S. rubrotinctum</i>	6.77 ± 0.09	5.31 ± 0.15	5.39 ± 0.10	4.21 ± 0.35	21.67
<i>S. griseum</i>	6.61 ± 0.05	5.62 ± 0.31	5.56 ± 0.11	4.60 ± 0.17	22.39
Mezcla	7.04 ± 0.64	5.88 ± 0.37	5.89 ± 0.38	4.75 ± 0.11	23.56
E acumulada [mm]					
Control (s/veg.)	5.23 ± 0.76	4.61 ± 0.12	4.86 ± 0.28	3.69 ± 0.10	18.39

En la **Fig. 26** se muestran los valores de R , Q posteriores al riego y desglosada la ET acumulada y la tasa promedio de ET_d por tratamiento en cada uno de los cuatro períodos del estudio. Haciendo una comparación general entre períodos, se encontró que la tasa de ET_{ac} es mayor en algunos tratamientos vegetados a la entrada por riego equivalente a una precipitación de 6 mm. Por otra parte, la ET_d fue superior al Q en *S. dendroideum*, la mezcla y *S. griseum* en algunos períodos, incluso en el tratamiento sin vegetación para el último período.

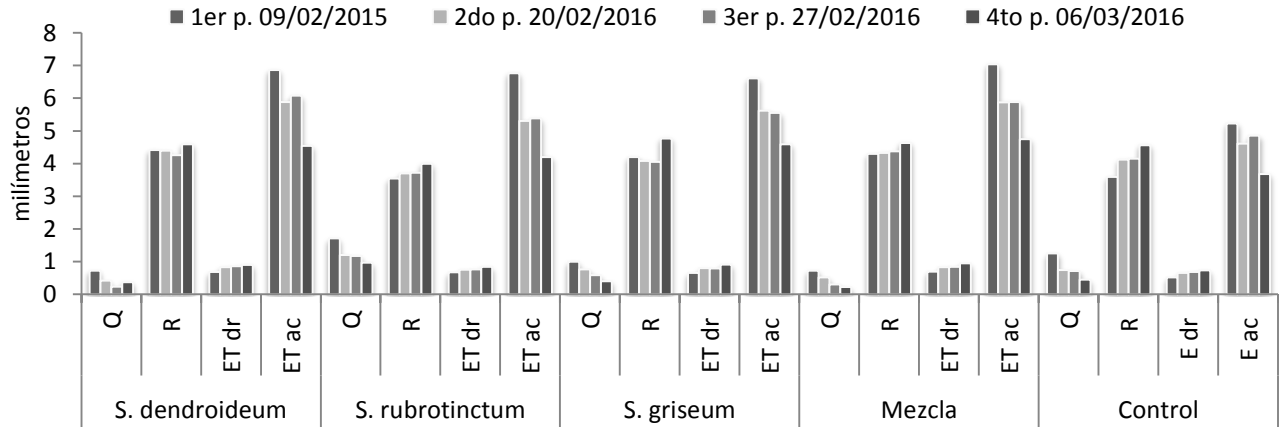


Fig. 26. Escurrimiento (Q ; mm), retención de agua después del riego (R ; mm), tasa de evapotranspiración diaria (ET_d ; mm), evapotranspiración acumulada (ET_{ac} ; mm), tasa de evaporación diaria (E_d ; mm) y evaporación acumulada (E_{ac} ; mm) en el 1ero, 2do, 3ero y 4to período de muestreo.

3.2.3 Conductancia estomática

Por diferencias en la morfología de las hojas de las especies estudiadas, la conductancia estomática sólo fue medida en *S. dendroideum* en tres lapsos del día durante el período de estudio. En la **Fig. 27** se indican los días de riego con flechas azules, que coinciden con el incremento de la transpiración en relación a la disponibilidad de agua en el sustrato, principalmente en la mañana y la noche debido al metabolismo CAM de la planta. También se presentó el mismo comportamiento después de un evento de lluvia el 11 y 12 de febrero de 2015. El valor promedio de conductancia estomática obtenido en la mañana fue de 79.23 ± 19.01 mmol/m²·s (DE), con un mínimo de 45.03 mmol/m²·s el 6 de marzo y un máximo de 120.96 mmol/m²·s el 28 de febrero de 2015. Los valores al medio día fueron más bajos con un promedio de 13.19 ± 1.28 mmol/m²·s (DE), una máxima de 15.82 mmol/m²·s el 9 de marzo y mínima de 10.52 mmol/m²·s el 16 de febrero. Por otro lado, la conductancia estomática promedio en la noche fue de 27.67 ± 9.86 mmol/m²·s (DE), la máxima de 47.19 mmol/m²·s el 7 de marzo y la mínima de 14.62 mmol/m²·s el 23 de febrero. Al comparar estos resultados se encontraron diferencias significativas entre segmentos del día ($p < 0.05$).

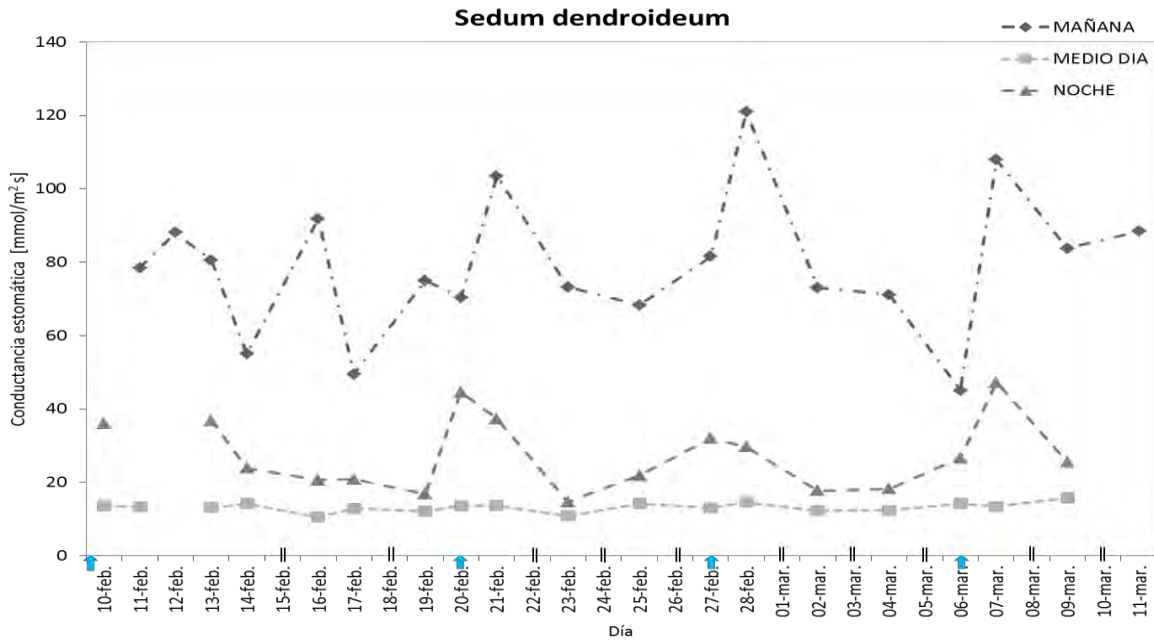
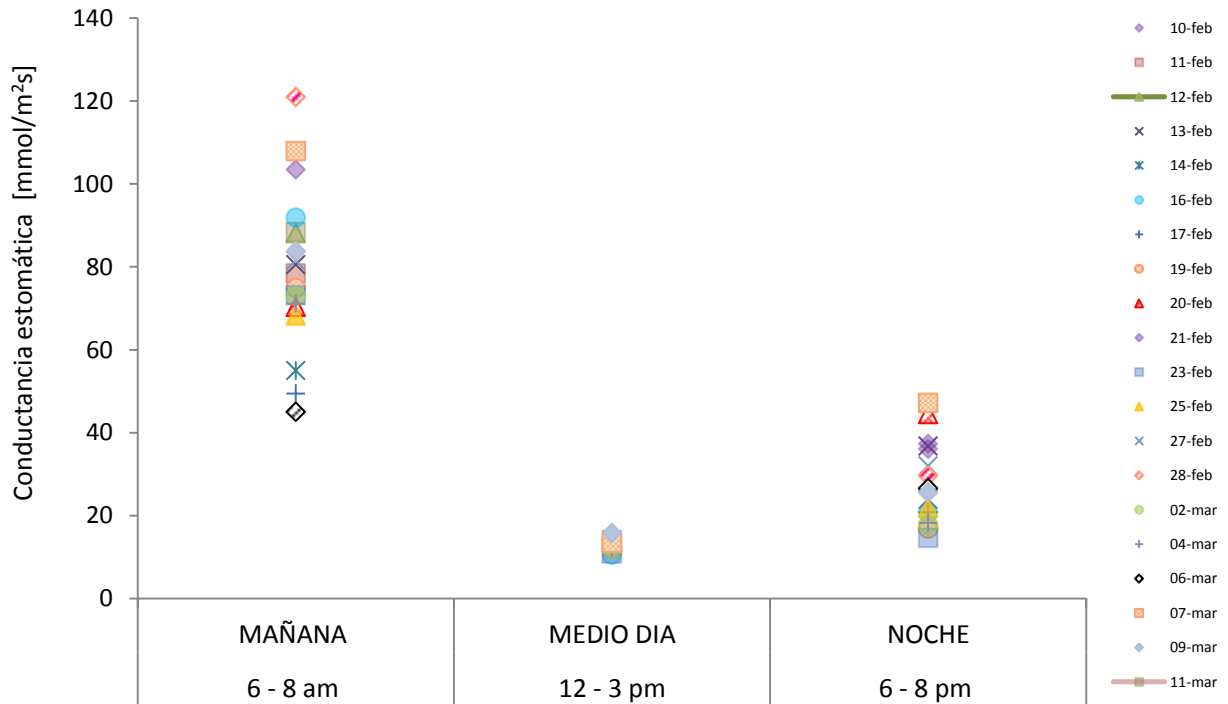


Fig. 27. Conductancia estomática (CE; mmol/ m²·s) promedio de *S. dendroideum* en tres segmentos del día (mañana, medio día y noche) del 9 de febrero al 11 de marzo de 2015. Se indican los días de riego con flechas azules.

La influencia de la radiación global (Rad; W/m²) en la conductancia estomática de *S. dendroideum* se muestra en la **Fig. 28**. A realizar una correlación de Pearson se encontró una disminución significativa de la conductancia estomática conforme la radiación aumentaba al medio día ($p < 0.05$); mientras que en la mañana y noche no se hallaron diferencias importantes entre estas dos variables ($p > 0.05$).



	Radiación [W/m^2]		
Rango	0 – 36.7	205.6 – 907.1	0 – 2.7
$\mu \pm \sigma$	5.4 ± 10.6	664.7 ± 227.2	0 ± 1.9

Fig. 28. Conductancia estomática (CE; $mmol/m^2 \cdot s$) promedio de *Sedum dendroideum* vs la radiación solar global (Rad; W/m^2) en la mañana, medio día y noche del 9 de febrero al 11 de marzo de 2015.

3.2.4 Contenido de humedad en suelo

El contenido promedio de humedad en el suelo para los tratamientos vegetados fue de 0.051 ± 0.035 (DE) m^3/m^3 , con un valor máximo y mínimo de 0.125 y 0 m^3/m^3 observado en *S. rubrotinctum*; mientras que la humedad promedio del sustrato sin vegetación (control) fue de 0.212 ± 0.017 (DE), máxima y mínima de 0.249 y 0.176 m^3/m^3 respectivamente, durante el período muestreado. En la **Tabla 7** se muestran los contenidos de humedad por tratamiento. Al realizar una prueba de Tukey se hallaron diferencias significativas en los tratamientos ($p < 0.05$), excepto entre *S. griseum*, *S. dendroideum* y la mezcla ($p > 0.05$).

Tabla 7. Contenido diario de humedad en suelo (m^3/m^3) por tratamiento del 10 de febrero a 11 de marzo de 2015.

Tratamiento	Mínimo	Media	Máximo	Desviación Estándar
<i>S. rubrotinctum</i>	0.042	0.086	0.125	0.023
<i>S. dendroideum</i>	0.000	0.037	0.093	0.030
<i>S. griseum</i>	0.002	0.042	0.096	0.026
Mezcla	0.000	0.040	0.112	0.034
Control (s/veg.)	0.176	0.212	0.249	0.017

A continuación se muestra el comportamiento general de los tratamientos, en los que se observó un incremento de la humedad en suelo después del riego (marcado con franjas azules en la **Fig. 29**) y su siguiente disminución con el transcurso de los días sin irrigación. Se encontró una correlación positiva entre el contenido de humedad en suelo (m^3/m^3) y la conductancia estomática ($\text{mmol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) en respuesta al riego en el tratamiento de *S. dendroideum*, que se observa en la **Fig. 29** y la tendencia a incrementar juntas en el período de la mañana con un valor de $p = 0.006$ y en la noche de $p = 0.028$, mientras que en la noche no se encontró relación entre las variables ($p = 0.440$).

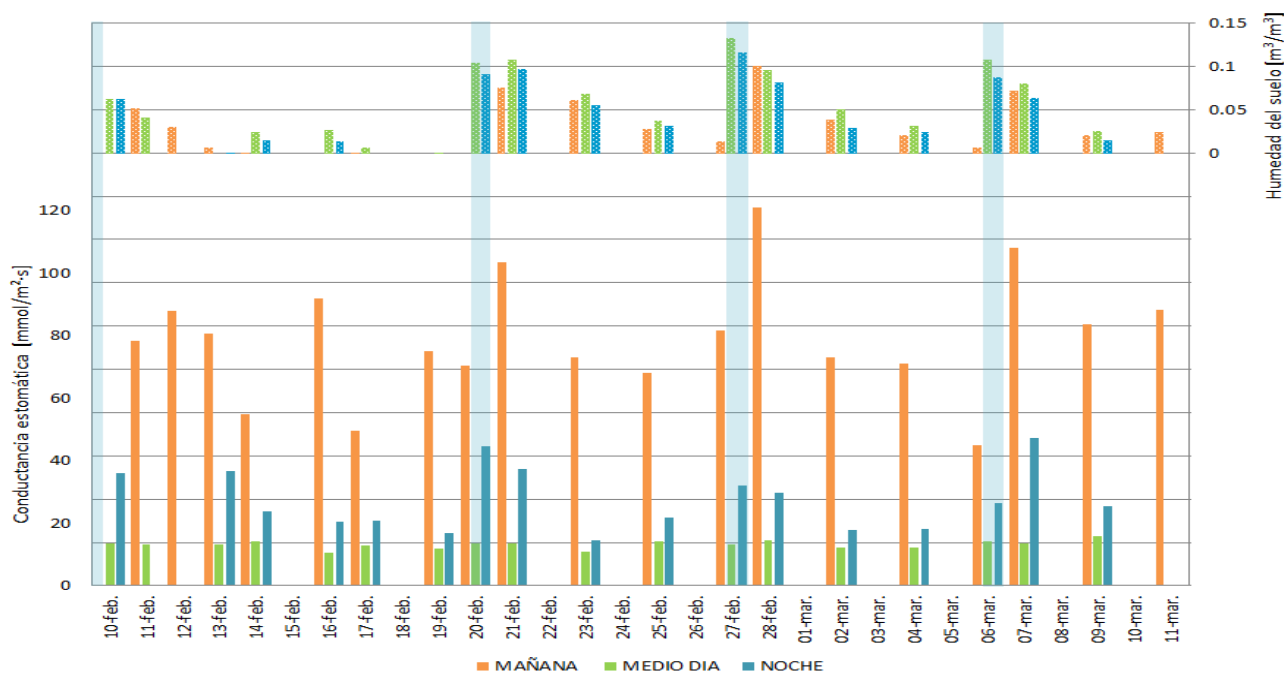


Fig. 29. Conductancia estomática (CE; $\text{mmol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) promedio vs el contenido de humedad en suelo (HS; m^3/m^3) de *S. dendroideum* en la mañana, medio día y noche del 10 de febrero al 11 de marzo de 2015. Los días de riego se señalan con franjas azules.

IV. Discusión

4.1 Relación precipitación-escorrentía en las azoteas estudiadas

Los resultados mostraron una retención promedio de lluvia del 61% para la azotea verde y del 4% en la azotea común, evaluado a través de 63 eventos de precipitación-escorrentía monitoreados simultáneamente en ambas azoteas durante el período de estudio (junio-octubre 2014). Comparando los resultados con otros trabajos, el valor de escorrentía obtenido para la azotea verde se ubica dentro del rango reportado en sistemas de naturalización de azoteas, en específico las de tipo extensivo. Por ejemplo, DeNardo y colaboradores (2005) reportaron en Michigan, EUA, una retención del 45% en azoteas verdes; mientras que en una síntesis de trabajos realizada por Mentens *et al.* (2006) indicaron una retención del 54 y 4% de la lluvia en azoteas verde y común en Alemania, respectivamente. Por otra parte, VanWoert y colaboradores (2005) observaron una retención del 60% de la precipitación en una azotea verde extensiva y del 27% en una azotea común.

Por tamaños de eventos de precipitación, se encontró que existen diferencias en el volumen de agua retenido en la azotea verde comparado con otros estudios. En esta investigación la precipitación fue dividida en 27 eventos cuyas cantidades de lluvia fueron pequeñas (< 5mm), 26 eventos de tamaño moderado (5-15mm) y 10 eventos relativamente grandes (> 15 mm). Por cada rango, la retención de agua en la azotea verde fue del 91, 44 y 27%, respectivamente, mientras que en la común fue del 17% para lluvias pequeñas y no hubo retención para los demás tamaños de lluvia.

En otros trabajos, Carter y Rasmussen (2006) en Georgia, EUA reportaron retenciones del 88% durante eventos que ellos clasificaron como pequeños (< 25.4 mm), 54% en lluvias moderadas (25.4-76.2 mm) y 48% en eventos de precipitación con gran cantidad de lluvia (> 76.2mm). Por otra parte, VanWoert *et al.* (2005) y Getter *et al.* (2007) en Michigan, EUA mostraron precipitaciones y rangos por tamaño muy similares a las aquí reportadas (< 2mm; 2-6 mm y 2-10 mm; > 6 mm y > 10mm) obteniendo valores de retención del 96.2 al 93.3% en lluvias ligeras, del 82.9% al 92.2% en moderadas y del 52.4% al 71.4% en grandes eventos, respectivamente. Es claro que diferencias en las condiciones climáticas y características de la lluvia de las distintas regiones juegan un papel importante en el comportamiento y respuesta hidrológica de las azoteas verdes.

La azotea verde retuvo totalmente 22 eventos de precipitación que se clasificaron como lluvias pequeñas, en específico ≤ 4.6 mm; y drenó al 100% en 4 eventos con precipitaciones de moderadas a ligeramente grandes. En contraste, la azotea común mostró una relación lineal y positiva entre la precipitación y el escurrimiento, misma que no se vio afectada por las características de la precipitación, en particular la intensidad de lluvia, lo cual coincide con lo que también reportan Mentens y colaboradores (2006) en Alemania. Por el contrario en la azotea verde, los coeficientes de escurrimiento mostraron aumentos conforme las intensidades promedio de lluvia y los antecedentes de precipitación incrementaban, también observado por Hakimdavar y colaboradores (2014) en Nueva York, E.U.A. Este comportamiento puede atribuirse a una mayor respuesta de la azotea verde en generar escurrimiento a intensidades de lluvia relativamente altas y cuando condiciones de alta humedad prevalecieron en el suelo, lo que también coincide con lo reportado en otros estudios realizados en Michigan, E.U.A. (Getter *et al.*, 2007). Para ninguna azotea se observó una relación entre la duración del evento de precipitación y el volumen retenido de agua, lo que contradice a Hakimdavar *et al.* (2014), quienes reportaron un mayor escurrimiento en azoteas verdes conforme el evento de lluvia se prolongaba.

Los coeficientes de escurrimiento obtenidos con valores mayores a 1 (32 eventos) en la azotea común se atribuyen principalmente a variaciones espaciales de la precipitación en el entorno de las azoteas estudiadas; esto debido a su vez, a mayores ingresos de lluvia durante eventos en los que hubo viento, así como también a encharcamientos en la azotea a causa de la acumulación de material orgánico e inorgánico (hojas de árboles, insectos, heces de aves y polvo). Para la azotea verde, este fenómeno se atribuye también a variaciones en la precipitación a nivel microescala, y a condiciones de humedad en suelo altos lo cual pudo contribuir a movilizar agua previamente almacenada de eventos anteriores, y así generar mayor escurrimiento que el solo proveniente del evento de precipitación en cuestión, combinado a las condiciones meteorológicas locales que pudieron favorecer una menor evapotranspiración del sistema.

Los resultados también mostraron un tiempo de retraso mayor y significativo en el inicio del escurrimiento en la azotea verde comparada con la azotea común (2 hrs 26 min vs 20 min). En este sentido, Carter y Rasmussen (2006) reportaron un tiempo promedio de inicio del escurrimiento mucho menor, particularmente para la azotea naturada (34 y 17 min para

una azotea verde extensiva y común, respectivamente), con un retraso máximo de hasta 2 hrs en la azotea verde. Existen otros estudios como los de DeNardo *et al.*, (2005) y VanWoert *et al.*, (2005) en los que únicamente reportaron tiempos de inicio de escurrimientos para azoteas verdes (4 hrs y 40 min, respectivamente).

En este estudio también se observó que el retraso en el inicio del escurrimiento y el tiempo de duración de la lluvia mostraron una relación directa en la azotea verde, mientras que con el antecedente de precipitación la correlación fue inversa. Para el caso de la azotea común no se encontró ninguna relación al respecto. Integrando los resultados, se observó que el retraso en el inicio del escurrimiento de la azotea verde estuvo en función del antecedente de precipitación, la cantidad y duración del evento de lluvia; mientras que en la azotea tradicional el mínimo retraso en el escurrimiento se debe posiblemente al tiempo que demora en humedecerse la carpeta impermeabilizante y a la acumulación de materia orgánica e inorgánica en el techo, esto último obstruyendo el escurrimiento durante el inicio de la lluvia.

Por otra parte, se observó que el tiempo de duración del escurrimiento en la azotea común fue menor (5 hrs 52 min) y significativo comparado con el de la azotea verde (7 hrs 38 min). Una vez concluido el evento de lluvia, el tiempo de liberación del escurrimiento fue mucho más largo en la azotea verde (4 hrs 40 min) comparado con la común (46 min). En este caso, no se encontraron estudios que comparen los tiempos de duración del escurrimiento entre la azotea común y verde. Sin embargo, Getter y colaboradores (2007) registraron en modelos de azoteas verdes extensivas, la prolongación del escurrimiento una vez finalizado el evento de lluvia siendo de 4 h 20 min en eventos pequeños de precipitación (< 2 mm), de 10 h 45 min en eventos medianos (2-10 mm) y de 13 h 45 min en eventos de mayor tamaño (> 10 mm).

Para ambas azoteas, el tiempo de duración del escurrimiento mostró una relación inversa con la intensidad promedio de la lluvia, y una relación lineal y positiva con la duración de la lluvia. En el caso de la azotea verde, se observó un amortiguamiento de la precipitación y de la duración del escurrimiento, sin embargo en este último observamos que el estado de humedad juega un papel importante. El retraso en el inicio del escurrimiento y duración del mismo en la azotea natural se asocia principalmente a la profundidad del sustrato (capacidad de almacenamiento de agua), la presencia de cobertura vegetal y a las

condiciones de humedad del suelo. Existen también otros factores que pueden afectar la capacidad de una azotea verde para mitigar el escurrimiento como son la pendiente del techo, tipo de cobertura vegetal, propiedades hidráulicas del sustrato, entre otros, las cuales no fueron objetivo de investigación en este trabajo.

Durante el periodo estudiado, la humedad en el suelo en la azotea verde varió en un rango de 12 a 43%. El rango observado se atribuye a diferencias en cobertura vegetal. En este caso, el lado A tuvo una menor cobertura y dominancia de cactáceas mientras que el lado B tuvo una mayor cobertura y dominancia de *Agave* y *Opuntia*. A pesar de que algunos sensores de humedad quedaron bajo sombra y otros más expuestos a la radiación solar al inicio del estudio, con el transcurrir de la época de lluvias y crecimiento de la vegetación, la cobertura vegetal fue aumentando homogeneizando estas condiciones. De manera general, se observaron incrementos en los contenidos de humedad en suelo después de 1 hora de iniciada la lluvia, en promedio, Y posteriormente, cuando condiciones de suficiente saturación en el sustrato fueron alcanzadas, esto es un promedio de 1 h 26 min de iniciada la lluvia, el proceso de generación de escurrimiento de agua de lluvia tuvo lugar en la azotea verde.

4.2 Balance hídrico de *Sedum*

Los resultados sugieren que las diferencias morfológicas en las tres especies de *Sedum* tienen una influencia distinta sobre el balance hídrico en el sistema modular de azotea verde extensiva. En este caso, la hidromaceta con *S. dendroideum* mostró la mayor retención y menor escurrimiento, lo que probablemente es el resultado de sus tasas más altas de evapotranspiración diaria y acumulada, además presentó el menor contenido de humedad en el suelo generado por el riego. Estas propiedades en conjunto presentan a la hidromaceta con *S. dendroideum* (posiblemente por la biomasa y características estructurales de la especie) con una mayor capacidad de almacenamiento de agua en el sustrato en comparación con las hidromacetas de *S. griseum* y *S. rubrotinctum*; sugiriendo que dentro de las especies estudiadas, el sistema modular de azotea verde con *S. dendroideum* es la elección más efectiva para el objetivo de gestión de aguas pluviales. Sin embargo, la hidromaceta con la mezcla de las tres especies mostró un patrón similar al de *S. dendroideum*, por lo que representa la mejor elección al combinar alta capacidad de almacenamiento de agua con el incremento de la biodiversidad de la flora y fauna en

azoteas verdes. Por otro lado, la hidromaceta con *S. rubrotinctum* presentó la retención de agua en el suelo más baja, y consecuentemente el mayor escurrimiento, lo que refleja probablemente las tasas más bajas de evapotranspiración diaria y acumulada de los tratamientos vegetados; mientras que la hidromaceta con *S. griseum* mostró un patrón intermedio comparado con las de *S. dendroideum* y *S. rubrotinctum*. Estas diferencias en el uso de agua entre especies parecen asociarse además de la morfología, fisiología y estructura vegetal, a las condiciones climáticas y la disponibilidad de agua.

En general, los tratamientos vegetados registraron una transpiración promedio entre 0.10 y 0.20 mm/día más alta que la evaporación del sustrato sin vegetación. Las tasas de evapotranspiración de las especies vegetales son un factor importante que influye en el rendimiento hídrico y térmico de las azoteas verdes, sin embargo su cuantificación no ha tenido mucho interés a nivel mundial y en México no se han reportado estudios al respecto. De los pocos trabajos se encuentra el de Berghage y colaboradores (2007) en Pensilvania, EUA quienes reportaron para *S. spurium* una ET_d promedio de 1.36 mm y ET_{ac} a 12 días de 16.2 mm, y para *S. sexangulare* una ET_d promedio de 0.57 mm y ET_{ac} a 18 días de 10.20 mm. Al comparar estos datos con los promedios de ET_d obtenidos en el presente trabajo, podemos decir que los resultados están dentro del rango reportado para el género *Sedum* en estudios de azoteas verdes. Dependiendo del tipo de planta, la evapotranspiración contribuye en la recuperación de la capacidad de almacenamiento del sustrato y, por lo tanto, a la capacidad de recarga y retención del agua de lluvia (Poë *et al.*, 2015; Starry *et al.*, 2014; Voyde *et al.*, 2010).

Las plantas suculentas que se utilizan en la instalación de azoteas verdes extensivas a nivel mundial presentan adaptaciones a ambientes xerófitos con estrategias como el metabolismo de tipo CAM, que tiene como objetivo promover la supervivencia al prolongar la disponibilidad de agua (Starry *et al.*, 2014). En el presente estudio, la pérdida de agua a través de los estomas de *S. dendroideum* siguió el patrón esperado de transpiración para especies con metabolismo CAM, mostrando un descenso de la conductancia estomática durante las horas del día con mayor incidencia de radiación solar y una progresiva apertura de estomas del atardecer al anochecer. Asimismo, los resultados indicaron que *Sedum* utiliza el agua fácilmente disponible en el sustrato, obteniendo los valores más altos de evapotranspiración y de conductancia estomática en los primeros dos días del riego y que

disminuyen a través de los días aproximándose a la evaporación registrada por el tratamiento sin vegetación (control). Asimismo se observó que la evapotranspiración se redujo con el descenso del contenido de humedad en suelo, lo cual coincide con lo reportado por Berghage *et al.* (2007) y Starry *et al.* (2014).

Por otro lado, la revisión de Saadatian y colaboradores (2013) en términos de conservación de energía, concluye que el efecto combinado de la presencia de la cubierta vegetal, su evapotranspiración y el aislamiento térmico que provee el suelo en las azoteas verdes tiene un rol importante en la modulación del microclima y en la mejora del rendimiento térmico del edificio, proporcionando un mayor confort térmico. En China, He *et al.* (2016) también mencionan el impacto significativo que el contenido de humedad en suelo tiene sobre el balance energético.

De tal manera que varios estudios han mencionado la importancia de la selección de especies o comunidades de plantas para la instalación de azoteas verdes con propósitos específicos, con el fin de maximizar su efectividad, ya que los servicios ecosistémicos que éstas brinden dependerá en gran medida de las características morfológicas y fisiológicas de las especies (Berghage *et al.*, 2007; Starry *et al.*, 2014).

V. Conclusiones

Escurrimiento pluvial en una azotea verde vs una azotea común

- El análisis de eventos de precipitación-escurrimiento mostró una retención de lluvia en el rango de 1 a 27 mm del 61% para la azotea verde extensiva y del 4% en la común.
- En la azotea verde extensiva, los coeficientes de escurrimiento mostraron aumentos conforme las intensidades promedio de lluvia y los antecedentes de precipitación incrementaban; este comportamiento puede atribuirse a un mayor escurrimiento en respuesta a altas intensidades de lluvia y también alta humedad en suelo.
- Se encontró un mayor tiempo de retraso en el inicio del escurrimiento en la azotea verde extensiva comparado con la común (2 hrs 26 min vs 20 min). En la azotea verde extensiva, el tiempo de retraso en el escurrimiento tuvo una relación directa con la duración de la lluvia e inversa con el antecedente de precipitación.
- El tiempo de duración del escurrimiento en la azotea común (5 hrs 52 min) fue menor comparado con el de la azotea verde extensiva (7 hrs 38 min). Para ambas azoteas, el tiempo de duración del escurrimiento mostró una relación inversa con la intensidad promedio de la lluvia y una relación lineal con la duración de la lluvia.
- En la azotea verde extensiva, la humedad en suelo por zonas estuvo asociada a diferencias en la cobertura vegetal y el inicio del escurrimiento ocurrió en promedio 30 min después de alcanzar los valores máximos de humedad en suelo en respuesta al primer pico de lluvia.
- En resumen, comparado con la azotea común, la verde extensiva tiene la capacidad de retener, atenuar y retrasar significativamente el escurrimiento generado por eventos de precipitación. Además, se observó que el estado de humedad en el suelo juega un papel importante.

Balance hídrico de *Sedum*

- Las diferencias entre las hidromacetas con especies de *Sedum* asociadas a disimilitudes morfológicas, estructurales y fisiológicas influyeron en el desempeño hídrico en azoteas verdes.
- Las hidromacetas con *S. dendroideum* y la mezcla de las 3 especies de *Sedum* mostraron la mayor efectividad en la gestión de aguas pluviales para azoteas verdes extensivas,

asociado probablemente a sus propiedades fisiológicas, estructurales y mayor biomasa. En particular, esta investigación considera al tratamiento mezcla como la mejor elección debido a los beneficios ecosistémicos adicionales que puede ofrecer.

- *S. dendroideum* mostró una transpiración con metabolismo fotosintético tipo CAM, con un descenso de la conductancia estomática en los períodos de mayor incidencia de radiación solar y un incremento en los períodos de oscuridad. Se observó también que la evapotranspiración y conductancia estomática de *S. dendroideum* mostró una relación positiva y directa con la disponibilidad de agua en el sustrato.
- Debido a la escasa investigación en azoteas verdes, se recomienda ampliamente realizar más estudios interdisciplinarios sobre los beneficios de estos sistemas, tomando en cuentas las características específicas de México; las condiciones climáticas y ambientales, propiedades de la edificación y de su entorno, así como las características físicas y propiedades hidráulicas del sustrato para proporcionar una integración eficiente de investigación y una mejor visión en la implementación de políticas públicas.

Anexo A

A continuación se muestra a modo de tablas los pesos promedio registrados por cada tratamiento de hidromaceta a lo largo de los cuatro períodos de riego y en la **Fig. 30** las tasas de evapotranspiración diaria (ET_d ; mm) promedio por período en cada tratamiento.

Período 1

Fecha	9-feb	9-feb	10-feb	11-feb	12-feb	13-feb	14-feb	16-feb	17-feb	18-feb	19-feb
Especie	Peso (kg)										
<i>S. dendroideum</i>	7.592	8.327	8.127	7.950	8.048	7.883	7.800	7.657	7.560	7.493	7.427
<i>S. rubrotinctum</i>	8.230	8.820	8.697	8.577	8.738	8.607	8.490	8.288	8.165	8.073	7.980
<i>S. griseum</i>	7.057	7.757	7.617	7.448	7.562	7.357	7.257	7.107	7.018	6.963	6.903
Mezcla	7.792	8.507	8.358	8.180	8.280	8.097	8.002	7.835	7.732	7.667	7.598
Control	8.037	8.635	8.553	8.466	8.666	8.553	8.474	8.361	8.283	8.224	8.156

Período 2

Fecha	20-feb	20-feb	21-feb	23-feb	24-feb	25-feb	26-feb
Especie	Peso (kg)						
<i>S. dendroideum</i>	7.347	8.078	7.968	7.590	7.473	7.374	7.298
<i>S. rubrotinctum</i>	7.880	8.497	8.420	8.123	7.998	7.887	7.795
<i>S. griseum</i>	6.832	7.512	7.432	7.020	6.912	6.832	6.768
Mezcla	7.518	8.238	8.132	7.733	7.618	7.528	7.453
Control	8.081	8.768	8.691	8.450	8.358	8.260	8.188

Período 3

Fecha	27-feb	27-feb	28-feb	02-mar	03-mar	04-mar	05-mar
Especie	Peso (kg)						
<i>S. dendroideum</i>	7.216	7.926	7.781	7.424	7.326	7.243	7.164
<i>S. rubrotinctum</i>	7.678	8.298	8.193	7.900	7.788	7.685	7.585
<i>S. griseum</i>	6.707	7.382	7.273	6.917	6.828	6.755	6.683
Mezcla	7.368	8.097	7.955	7.593	7.498	7.417	7.337
Control	8.112	8.803	8.710	8.462	8.357	8.267	8.183

Período 4

Fecha	06-mar	06-mar	07-mar	09-mar	10-mar	11-mar
Especie	Peso (kg)					
<i>S. dendroideum</i>	7.094	7.859	7.689	7.361	7.274	7.803
<i>S. rubrotinctum</i>	7.488	8.153	8.015	7.727	7.627	8.210
<i>S. griseum</i>	6.630	7.424	7.237	6.875	6.797	7.397
Mezcla	7.268	8.040	7.872	7.523	7.440	8.003
Control	8.102	8.862	8.730	8.492	8.413	9.017

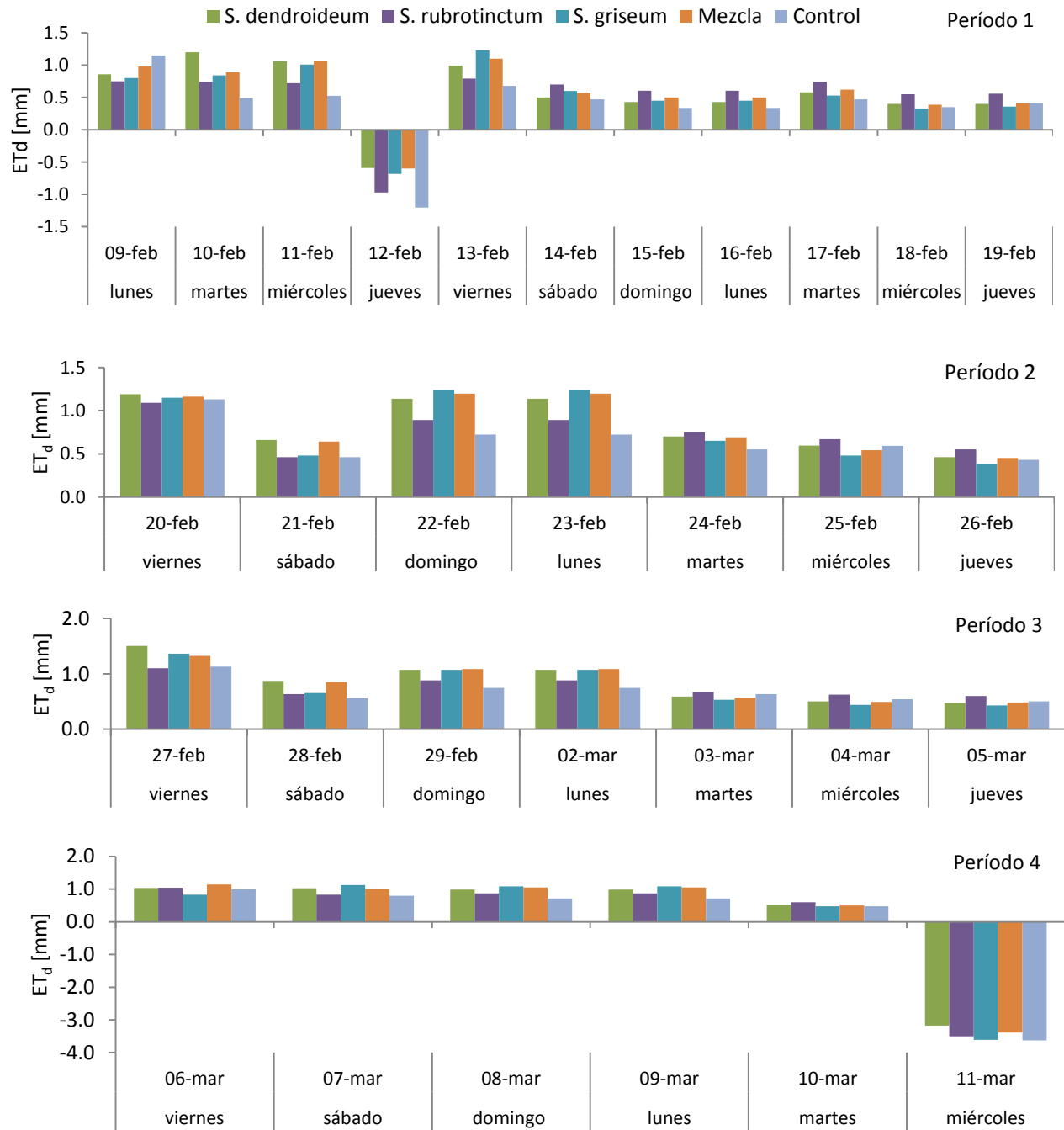


Fig. 30. Tasa de evapotranspiración diaria (ET_d; mm) promedio por período en cada tratamiento.

VI. Literatura citada

- Acosta L. A. 2016. Efecto de la profundidad del sustrato en el crecimiento y cobertura de cuatro especies de crasuláceas en una azotea verde extensiva. *Tesis de Licenciatura*. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Arellano L. E. A. 2012. Capacidad de retención de hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados en una azotea verde extensiva. *Tesis de Licenciatura*. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 60 p.
- Arellano-Leyva E.A., Henández-Quiróz, Huerta-Guzmán R.G., Collazo-Ortega M. 2016. Extensive green roofs as a means to capture polycyclic aromatic hydrocarbons. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 1-12.
- Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S. y Palutikof J.P. (Eds.) 2008. Climate Change and Water. *Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat*, Geneva. 210 p.
- Bengtsson L., Grahn L., Olsson J. 2005. Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Nordic Hydrology*. 36 (3), 259–268.
- Berardi U., GhaffarianHoseini A. y GhaffarianHoseini A. 2014. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*. 115:411-428.
- Berghage R., Jarret A., Beattie D., Kelley K., Husai S., Rezai F., Long B. Negassi A., Cameron R. Hunt W. 2007. Quantifying evaporation and transpiration water losses from green roofs and green roof media capacity for neutralizing acid rain. *National Decentralized Water Resources Capacity Development Project (NDWRCP) Research Project*. Pennsylvania, E.U.A. 94 p.
- Carbajal A. J. 2009. Diseño térmico de azotea verde en clima cálido húmedo. *Tesis de Maestría*. Facultad de Arquitectura. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Carter T. L. y Rasmussen T. C. 2006. Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*. 42(5): 1261–1274.
- Carter B. Z., Gotsch G.S., Holwerda F., Muñoz-Villers L. y Asbjornsen H. 2016. Slope position influences vegetation-atmosphere interactions in a tropical montane cloud forest. *Agricultural and Forest Meteorology*. 221:207-218.
- Castillo-Argüero S., Orea Y. M., Romero M.A.R., Chávez P. G., Castillo O. N., Gallén I. S. y Meave J.A. 2007. La reserva ecológica del Pedregal de San Ángel: aspectos florísticos y ecológicos.
- Castleton H.F., Stovin V., Beck S.B.M. y Davison J. B. 2010. Green roofs; building energy saving and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*. 42:1582-1591.
- Czemieli B.J. 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*. 36: 351-360.
- Chow T.V., Maidment D.R. y Mays L.W. 1994. Hidrología Aplicada. *McGraw-Hill*. Colombia. 584 p.
- DeNardo J.C., Jarrett A.R., Manbeck H.B., Beattie D.J. y Berghage R.D. 2005. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Trans. ASAE* 48 (4): 1491–1496.
- Dunnett N., Nagase A., Booth R. y Grime P. 2008. Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. *Urban Ecosystems*. 11:385-398.

- Franzaring J., Steffan L., Ansel W., Walker R. y Fangmeier A. 2016. Water retention, wash-out, substrate and surface temperatures of extensive green roof mesocosms-Results from a two year study in SW-Germany. *Ecological Engineering*. 94:503-515.
- FLL, 2002. Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen (in German) (Guidelines for planning execution and upkeep of Green roof sites). Bonn, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau E.V.
- García E., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. *Instituto de Geografía*. UNAM, México.
- Getter L.K., Rowe B.D. y Adresen J.A. 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineerin*. 31:225-231.
- Hakimdavar R., Culligan J. P., Finazzi M, Barontini S. y Ranzi R. 2014. Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. *Ecological Engineering*. 73:494-508.
- He Y., Yu H., Dong N y Ye H. 2016. Thermal and energy performance assessment of extensive green roof in summer: A case study of lightweight building in Shanghai. *Energy and Building*. 127:762-773.
- Holwerda F., Bruijnzeel L. A., Barradas L.V. y Cervantes J. 2013. The water and energy exchange of a shaded coffee plantation in the lower montane cloud forest zone of central Veracruz, Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*. 173:1-13
- Köhler M., Schmidt M., Grimme F.W., Laar M., de Assunção Paiva V.L. y Tavares S. 2002. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. *Environmental Management and Health* 13 (4): 382–391.
- Lambers H., Chapin III F.S., Pons T.L. 2006. Plant physiological ecology. Springer Science. Nueva York, E.U.A. 540 p.
- 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*. 3:1127-134.
- Lundholm J. 2006. Green roofs and facades: a hábitat template approach. *Urban Habitats*. 4(1):87-101.
- Mentens J., Raes D. y Hermy M. 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problema in the urbanized 21st century? *Landscape and urban planning*. 77:217-226.
- Metselaar K. 2012. Water retention and evapotranspiration of green roofs and posible natural vegetation types. *Resources, Conservation and Recycling*. 64:49-55.
- Monterusso M.A., Rowe D.B., Rugh C.L. y Russell D.K. 2004. Runoff water quantity and quality from green roof systems. *Acta Horticulturae*. 639: 369–376.
- Monroy C. A. 2012. Evaluación fisiológica de dos especies del género *Sedum* (Crassulaceae) utilizadas en “Azoteas verdes extensivas”. *Tesis de Licenciatura*. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F
- Moran A., Hunt B. y Smith J. 2005. Hydrological and water quality performance from greenroofs in Goldsboro and Raleigh, North Carolina. En: *Green Roofs for Healthy Cities Conference*, Mayo 2005, Washington, DC.
- Moritani S., Tahei Y., Henintsoa A., Mitsuhiro I., Koh K. y Hirotaka S. 2013. Effect of combined water and salinity stress factors on evapotranspiration of *Sedum kamtschaticum* Fischer in relation to green roof irrigation. *Urban Forestry and Urban Greening*. 12:338-343.

- Nektarios, A.P., Ntoulas N., Nydrioti E., Kokkinou I., Bali E.-M y Amountzias, I. 2015. Drought stress response of *Sedum sediforme* grown in extensive green roof systems with different substrate types and depths. *Scientia Horticulturae*. 181:52-61.
- Norris H.R., Mark L.T. y William T. E. 2008. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *Journal of Hydrology*. 358: 288–293.
- Norma ambiental para el distrito federal NADF-013-RNAT-2007, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el distrito federal. 2008. Gaceta Oficial del Distrito Federal. No.491. 33 p.
- Oberndorfer E., Lundholm J., Bass B., Coffman R.R, Doshi H., Dunnett N., Gaffin S., Köhler M., Liu Y.K. y Rowe B. 2007. Green Roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *Bioscience*. 57:823–33.
- Organización de las Naciones Unidas. 2015. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. Departamento de Asuntos Sociales y Económicos, División Población. Nueva York. 493 pp.
- Pöe S., Stovin V. y Barretta C. 2015. Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration. *Journal of Hydrology*. 523: 356-367.
- Royo A. 1994. Reserva ecológica "El Pedregal de San Ángel: ecología, historia natural y manejo. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Rzedowski, J. 1954. Vegetación del Pedregal de San Ángel (Distrito Federal, México). *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas* 8(1-2):59-129.
- Saadatian O. Sopian K., Salleh E., Lim C.H., Riffat S., Saadatian E., Toudeshki A. y Sulaiman M.Y. 2013. A review of energy aspects of green roofs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 23:155-168.
- Sarukhán J. 1997. Acuerdo por el que se reestructura e incrementa la zona de la Reserva Ecológica y se declaran las áreas verdes de manejo especial de la Ciudad Universitaria. *Gaceta* No. 3070. 13 enero. UNAM. México, D.F. 15–16 p.
- Secretaría del Medio Ambiente. 2006. Memorias. *Dirección general de bosques urbanos y educación ambiental*. Gobierno del Distrito Federal. México. 203 p.
- Simmons M.T., Gardiner B., Windhager S. y Tinsley J. 2008. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems*. 11: 339–348.
- Siebe C. 2009. La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670+/- 35 años AP y sus implicaciones. En: Lot, A., Cano-Santana, Z. (Eds.), Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 43–49.
- 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*. 107:106-112.
- Teemusk A. y Mander Ü. 2007. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: the effects of short-term events. *Ecological Engineering*. 30: 271–277.
- Theodosiou T. 2009. Green roofs in buildings: Thermal and environmental behavior. *Advances in Building Energy Research*. 3:1, 271-288.
- Tovar J. E. I., Figueroa A.C. y Gordon S.M. 2014. Criteria for selection of plant species for its deployment in thermally efficient architectural green roofs in the Metropolitan Area of Mexico City: methodological guidelines. *Energy Procedia*. 57:1789-1807.

- Valiente-Banuet, A. y de Luna E.G.1990. Una lista florística para la Reserva de Pedregal de San Ángel, México, D. F. *Acta Botánica Mexicana*. 9:13:30.
- VanWoert N.D., Rowe D.B., Andresen J.A., Rugh C.L., Fernandez R.T. y Xiao L. 2005. Green roofs stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality*. 34: 1036–1044.
- Vázquez Q. S. 2013. Un laboratorio al aire libre. *El faro*. Junio de 2013. 147: 6-7.
- Viessman W., Lewis G. and Knapp J.W. 1989. Introduction to hydrology. *Harper y Row Publishers*, Nueva York, USA, 3ra edición.
- Villareal E.L. y Bengtsson L. 2005. Response of a *Sedum* green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering*. 25:1–7.
- Voyde E. Fassman E. y Simcock R. 2010. Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *Journal of Hydrology*. 394:384-395.
- Wong K.L.G. y Jim C.Y. 2014. Quantitative hydrology performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime. *Ecological Engineering*. 70:366-378.
- Xiao M., Lin Y., Han J. y Zhang G. 2014. A review of green roof research and development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 40: 633.648.