



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO**

**Procesos hidrológicos en azoteas verdes extensivas maduras, Ciudad de
México**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTORA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(CIENCIAS AMBIENTALES Y RIESGOS)

P R E S E N T A

ERÉNDIRA ALEJANDRA ARELLANO LEYVA

TUTOR PRINCIPAL
DRA. LYSSETTE ELENA MUÑOZ VILLERS
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DRA. BLANCA L. PRADO PANO
INSTITUTO DE GEOLOGÍA
DR. FRISO HOLWERDA
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

“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”

Eréndira Alejandra Arellano Leyva

29 de Agosto de 2023

Agradecimientos Académicos

Quisiera agradecer el apoyo de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y del el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología por la beca de posgrado (550247). Este trabajo fue financiado por PAPIIT – DGAPA UNAM para el proyecto "Evaluación del desempeño de azoteas verdes en la retención de escurrimientos y contaminantes: caso Ciudad de México" a cargo de la Dra. Lyssette E. Muñoz Villers durante el periodo 2019 – 2021 (No. IN104619). Agradezco al Instituto de Biología y al Jardín Botánico de la UNAM por permitirme realizar esta investigación en su área experimental de azoteas verdes. Al Laboratorio de Edafología Ambiental (Física y Experimentación de Suelos) del Instituto de Geología de la UNAM por el análisis de la textura del sustrato.

Estoy profundamente agradecida con mi mentora, la Dra. Lyssette E. Muñoz Villers, quién me brindo todo su apoyo e incansable guía para realizar esta tesis, comprometiéndose siempre para alcanzar un trabajo de calidad con su orientación y ayudándome a entender mejor los procesos ecohidrológicos. Lyssette gracias por tu paciencia, los consejos y tu determinación conmigo.

Agradezco al Dr. Friso Holwerda por su tiempo, apoyo y constante asesoría en la realización de esta tesis, que contribuyeron a mejorar mi razonamiento en ecofisiología. Por su orientación ayuda y valiosos comentarios que sin duda mejoraron este trabajo, quiero agradecer a la Dr. Blanca Prado. También quiero agradecer al Biól. Jerónimo Reyes Santiago por el apoyo técnico, a Miguel Castillo Rodríguez por su apoyo en la captura de las fotos aéreas con dron, a Beatriz Marín Castro por su asesoría en el uso de los infiltrómetros y los cálculos de Kfs.

Me gustaría dar las gracias a los miembros del jurado: Dra. Tonantzin Tarín Terrazas, Dra. Margarita Collazo Ortega, Dra. Beatriz Marín Castro y al Dr. Manuel Maass por su tiempo y valiosos comentarios y sugerencias que ayudaron indudablemente a mejorar la presente tesis.

Quiero agradecer especialmente a Melissa López Portillo por su gran apoyo en las mediciones en campo y el análisis de datos durante la realización de esta tesis. Melissa fuiste una gran aliada, tu compañía e incansable espíritu indudablemente hicieron el proceso mucho más ameno.

A Alitzel y Gaby, gracias por la compañía, charlas amenas e innumerables consejos durante la realización de mi doctorado, les deseo siempre lo mejor.

Dedicatoria

A mi esposo, mis padres y hermanas que siempre están a mi lado motivándome y brindándome su apoyo para lograr mis metas.

El desarrollo no puede subsistir sobre una base de recursos medioambientales deteriorada; el ambiente no puede ser protegido cuando el crecimiento deja de lado la cuenta de costos de la destrucción natural. –Informe Brundtland.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS	i
Abreviaturas, acrónimos y símbolos	i
RESUMEN	1
ABSTRACT	3
CAPÍTULO I	5
INTRODUCCIÓN GENERAL	5
Productos Académicos	13
Objetivos	14
CAPÍTULO II	15
Retención de lluvia y procesos de generación de escurrimiento en azoteas verdes maduras en un ambiente tropical	15
2.1. Amortiguamiento de la precipitación por azoteas verdes y su influencia multifactorial	15
2.2. Materiales y métodos	18
2.2.1. Sitio de estudio y azoteas estudiadas	18
2.2.2. Instrumentación y mediciones hidrológicas	21
2.2.3. Humedad en el sustrato y calibración de sensores 10HS	22
2.2.4. Conductividad hidráulica saturada	26
2.2.5. Muestreo, análisis de laboratorio y determinaciones del sustrato	26
2.2.6. Análisis de datos	27
2.2.7. Métricas hidrológicas	28
2.2.8. Evaluación de los procesos de escurrimiento	28
2.3. Resultados	30
2.3.1. Precipitación y contenidos de humedad en el sustrato	30
2.3.2. Índices de área foliar y propiedades de los sustratos.....	32
2.3.3. Retención de lluvia y tiempos de detención del escurrimiento	33
2.3.4. Procesos de generación de escurrimiento	36
2.4. Discusión.....	42
2.4.1. Retención de lluvia y detención del escurrimiento: Efecto de las características biofísicas de las azoteas verdes estudiadas	43
2.4.2. Generación de escurrimiento en las azoteas verdes extensivas	46

2.5. Conclusiones	48
CAPÍTULO III.....	50
Evaporación de dosel seco y húmedo de azoteas verdes extensivas maduras durante las temporadas de lluvias y secas.....	50
3.1. Dinámica hídrica y evapotranspiración (ET) en azoteas verdes	50
3.2. Métodos.....	54
3.2.1. Descripción de las azoteas verdes	54
3.2.2. Mediciones en campo	55
3.2.2.1. Variables meteorológicas.....	55
3.2.2.2. Vegetación y cambios en cobertura	56
3.2.2.3. Contenido de humedad en sustratos.....	57
3.2.3. Determinación de la evapotranspiración (ET).....	58
3.2.3.1. Modelo de ET para condiciones de dosel seco	58
3.2.3.2. Modelo de interceptación de la lluvia.....	62
3.2.3.3. Determinación de la ET total	63
3.3. Resultados	64
3.3.1. Precipitación	64
3.3.2. Cambios estacionales en la cobertura de la vegetación.....	64
3.3.3. Evapotranspiración de referencia (ET ₀) y humedad en el sustrato.....	67
3.3.4. Calibración del modelo de ET para condiciones de dosel seco.....	69
3.3.4.1. Relaciones entre ET/ET ₀ y la humedad del sustrato.....	70
3.3.4.2. Validación del modelo de ET para condiciones de dosel seco	71
3.3.5. Interceptación de la lluvia por el dosel de la vegetación	74
3.3.6. Estimación de la ET total y comparación con la ET ₀	75
3.4. Discusión.....	77
3.4.1. ET en condiciones de dosel seco y húmedo	77
3.4.2. ET total en azoteas verdes: trabajo actual y estudios previos.....	82
3.5. Conclusiones	91
CAPÍTULO IV	93
4.1. Procesos hidrológicos en las azoteas verdes extensivas estudiadas	93
4.2. Consideraciones y trabajo a futuro.....	96
REFERENCIAS.....	99
APÉNDICE.....	109

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Azoteas verdes extensivas investigadas con (a) una pendiente suave (EGRns) y (b) con una pendiente más pronunciada (EGRws), y (c) la azotea convencional (CR)..... 20
- Figura 2. Mapa de las azoteas verdes y la convencional en el JB- UNAM (Ciudad de México) mostrando los sitios de instrumentación..... 21
- Figura 3. Datos de calibración de los sensores 10HS, ecuaciones ajustadas y coeficientes de determinación por cubierta vegetal del sustrato para las azoteas verdes estudiadas..... 24
- Figura 4. Gráficas de comparación entre el contenido de humedad del sustrato calibrado para (a) EGRns y (b) EGRws contra los valores obtenidos utilizando las calibraciones proporcionadas por el fabricante (versión 1 y 3) para el periodo de estudio (mayo 2017 a noviembre 2018)..... 25
- Figura 5. Valores diarios de precipitación (P) y escurrimiento (Q) de las azoteas estudiadas, y contenido de humedad del sustrato (θ) de las azoteas verdes en el periodo estudiado..... 31
- Figura 6. Precipitación (P) y escurrimiento (Q) observados en las azoteas estudiadas. La regresión 1:1 (línea gris) se muestra a modo de comparación..... 34
- Figura 7. (a) Tiempo de retraso del escurrimiento (TdQ) y (b) tiempos de prolongación del escurrimiento (TeQ) para las azoteas estudiadas..... 35
- Figura 8. Datos ensamblados de precipitación, escurrimiento pluvial y contenido de humedad del sustrato de las azoteas verdes para el caso a1 (19 eventos), caso a2 (23 eventos), caso b1 (17 eventos) y caso b2 (18 eventos). La línea roja de los paneles inferiores muestra el valor promedio de la FC local por cobertura del sustrato en cada azotea verde..... 37
- Figura 9. Promedios y desviaciones estándar de los coeficientes de escurrimiento (Q/P ; -), de los tiempos de retraso del escurrimiento (TdQ; min), de la humedad inicial (θ_i ; %) y máxima (θ_{max} ; %) del sustrato, y del contenido de agua a capacidad de campo local (FC; %) para los cuatro grupos de casos de eventos analizados en las EGR durante las temporadas de lluvias de 2017 y 2018..... 39
- Figura 10. Frecuencia promedio de eventos (%) en los que las diferentes coberturas de sustrato (BV y BS) en las EGRs superaron su FC local para cada criterio analizado (a1, a2, b1 y b2). 40
- Figura 11. Conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}) para las azoteas verdes vs. las intensidades de lluvia promedio (I_{mean}) y máxima (I_{max}) observadas en las diferentes resoluciones analizadas..... 42
- Figura 12. Promedios diarios de (a) precipitación P (barras negras) y contenido volumétrico de humedad del sustrato (líneas de color); (b) ET_0 referencia de Penman-Monteith de la FAO56; e (c) índice de área foliar LAI (líneas) y fracción de la cobertura del dosel k (barras) para la azotea verde sin pendiente EGRns (violeta) y azotea verde con mayor pendiente EGRws

(magenta) durante mayo 2017 a diciembre 2018. El área gris indica la temporada de secas. Se muestra también los períodos de crecimiento vegetal (verde) y marchitamiento (amarillo) en la vegetación perenne y anual (barras horizontales inferiores). Las letras mayúsculas corresponden a los cambios en la cobertura vegetal de la Figura 13..... 66

Figura 13. Cambios en la cobertura vegetal para la temporada de lluvias (a) y temporada de secas en la EGRns (c); y para los meses de transición en la EGRws (b y d)..... 67

Figura 14. Contenido volumétrico de agua en el sustrato (VWC) para la EGR sin pendiente debajo de vegetación perenne (NSvg) y debajo de vegetación anual o escasa vegetación (NSsp), y para la EGR con mayor pendiente debajo de vegetación perenne (WSvg) y debajo de vegetación anual o escasa vegetación (WSp) durante los meses de mayor precipitación (julio a octubre)..... 69

Figura 15. Relación entre la ET para las condiciones de dosel seco con ET_0 y el contenido volumétrico de agua en el sustrato en la EGRns (NS) y EGRws (WS) para ambas condiciones de cobertura vegetal, vg y sp. Se comparan las estimaciones de ET observadas (círculos) con el modelo lineal (cuadros) y el modelo escalonado (cruces) para los días de calibración..... 71

16. Correlación entre las estimaciones diarias de ET observadas y modeladas para ambas EGRs (NS y WS) y condiciones de cobertura vegetal (vg y sp). Las regresiones lineales se representan con líneas continuas, en azul la que corresponde al modelo lineal y en negro al modelo escalonado. La regresión 1:1 (línea punteada gris) se muestra a modo de comparación..... 72

Figura 17. Interceptación de la lluvia por el dosel (I) contra la precipitación (P) por evento de lluvia de las EGRs para las temporadas de lluvias y de secas. El acercamiento (*inset*) muestra los datos para $P \geq 10\text{mm}$ 75

Figura 18. Comparación entre la ET diaria total (línea sólida) y la ET_0 de la FAO (línea punteada) para ambas EGRs durante el periodo de estudio. El área gris indica la temporada de secas..... 77

Figura 19. Diagrama conceptual de los procesos hidrológicos en las azoteas verdes extensivas estudiadas. El color amarillo muestra la cobertura del sustrato (vg, sp) con mayor contribución a la ET de dosel seco y al flujo subsuperficial (SS) en cada azotea verde..... 95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características hidrofísicas del sustrato (valores promedios) en las EGRs.....	32
Tabla 2. Propiedades y distribución de partículas del sustrato en las EGRs estudiadas (valores promedio, mínimos y máximos observados).....	54
Table 3. Parámetros ajustados para el modelo lineal y escalonado en los días de calibración para cada EGRs y cobertura vegetal.....	70
Tabla 4. Parámetros de la regresión (intercepto b , pendiente a y coeficiente de determinación r^2), RMSE y NRMSE de cada modelo (lineal y escalonado) para los días para validación por EGR y condición de cobertura.....	73
Table 5. Estimación promedio de ET en condiciones de dosel seco, ponderación, interceptación (I), ET total, ET_0 y ET/ET_0 , unidades en $mm\ día^{-1}$	76
Tabla 6. Tipo de sistema de estudio de azotea verde, métodos y resultados principales obtenidos por trabajos seleccionados de evapotranspiración (ET) realizados en diferentes zonas climáticas.....	85

Abreviaturas, acrónimos y símbolos

a	pendiente
AP ₇	Precipitación antecedente
b	Intercepto
BV	Sustratos con vegetación
BS	Sustrato de escasa vegetación y sustrato expuesto
CAM	Metabolismo ácido de crasuláceas
CE	Conductividad eléctrica
C_m	Capacidad de almacenamiento del dosel
COS	Carbono orgánico del sustrato
CR	Azotea convencional
DA	Densidad aparente del sustrato
\bar{E}	Evaporación del dosel húmedo
EGR	Azotea verde extensiva
EGR _{ns}	Azotea verde extensiva sin pendiente (2°)
EGR _{ws}	Azotea verde extensiva con pendiente (14°)
ET	Evapotranspiración
ET ₀	ET de referencia de Penman-Monteith de la FAO56
ET/ET ₀	
\bar{E}/\bar{R}	Tasa de evaporación relativa media del dosel húmedo
FC/CC	Humedad a capacidad de campo
GR	Azotea verde
hPa	Presión atmosférica
HR	Humedad relativa
I	Intercepción de la lluvia por el dosel
I_{max}	Intensidad máxima de precipitación
I_{mean}	Intensidad media de precipitación
IEO	Escurrimiento flujos superficiales por exceso de infiltración.
k	Fracción de cobertura
k_{sp}	Fracción de cobertura de la vegetación anual o escasa vegetación
k_{vg}	Fracción de cobertura de la vegetación perenne
K	Potasio
K_c	Coefficiente de cultivo
K_{fs}	Conductividad hidráulica saturada en campo
LAI	Índice de área foliar
M_s	Masa seca del suelo
MO	Materia orgánica
N total	nitrógeno total
NRMSE	Error cuadrático medio normalizado
NSvg	EGR _{ns} debajo de vegetación perenne
NSsp	EGR _{ns} debajo de escasa vegetación o vegetación anual
P	Cantidad de precipitación
P	Fósforo extraíble
P_{sh}	Peso del suelo húmedo
P_{ss}	Peso del suelo seco
PAR	Radiación fotosintéticamente activa

PM-FAO56	Penman-Monteith de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
Q	Volumen de escurrimiento
Q/P	Coefficientes de escurrimiento
r^2	Coefficiente de determinación
\bar{R}	Tasa de precipitación
r_a	Resistencia aerodinámica
RC	Datos crudos
RMSE	Raíz del error cuadrático medio
Rn	Radiación neta
S	Capacidad de almacenamiento específica del dosel
S_{in}	Radiación de onda corta
SEO	Escurrecimiento por flujos superficiales por exceso de saturación
sp	Vegetación anual o escasa vegetación
SS	Escurrecimiento por flujos subsuperficiales
SWC	Contenido de humedad en el sustrato
T	Temperatura
T_p	Duración de la precipitación
TdQ	Tiempo de retraso del escurrimiento
TeQ	Tiempo de prolongación del escurrimiento
U	Velocidad del viento
V_s	Volumen total de la muestra del suelo
vg	Vegetación perenne
VWC	Contenido volumétrico de agua en el sustrato
WSvg	EGRws debajo de vegetación perenne
WSsp	EGRws debajo de escasa vegetación o vegetación anual
θ	Contenido volumétrico de humedad en el sustrato.
θ_{cr}	Punto crítico de humedad
θ_i	Contenido volumétrico de humedad inicial del sustrato
θ_{max}	Contenido volumétrico de humedad máximo del sustrato
θ_{wp}	Contenido volumétrico de agua al punto de marchitez permanente
$\Delta\theta$	Cambios en el contenido de humedad del sustrato
ρ_s	Densidad aparente del suelo
ρ_w	Densidad del agua

RESUMEN

Una azotea verde extensiva (EGR) es la integración de plantas sobre una capa de sustrato delgada y estructuras de soporte en el techo de una edificación. Las EGRs se han promovido como estrategias ambientales sustentables para contrarrestar la pérdida de superficies permeables en las zonas urbanas, proporcionando capacidad de almacenamiento para la retención y detención de las precipitaciones, así como de retorno del agua a la atmósfera a través de la evapotranspiración (ET). Los procesos hidrológicos en EGR de edad madura de regiones tropicales han sido poco estudiados. El presente trabajo se enfocó en cuantificar el porcentaje de retención y los tiempos de detención de la precipitación; evaluar los procesos dominantes de generación de escurrimiento pluvial; y estimar la ET total de dos EGRs de 19 años de edad con diferentes características biofísicas (pendiente, propiedades del sustrato y cobertura vegetal), designadas como EGRns (azotea con 2° de pendiente) y EGRws (azotea con 14° de pendiente), durante dos temporadas de lluvias y una de secas (mayo de 2017 a diciembre de 2018) en la Ciudad de México. Para ello se realizaron mediciones continuas de precipitación, humedad del sustrato y escurrimiento, y se analizaron las propiedades hidrofísicas y fisicoquímicas del sustrato. La interceptación de la lluvia por el dosel de la vegetación se estimó a nivel de evento a partir del modelo de Lui (2001). Se utilizaron y compararon dos modelos para estimar la ET en condiciones de dosel seco, empleando datos de campo para calibrar y validar los modelos, así como variables meteorológicas para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_0). La retención promedio de las precipitaciones fue de ~60% en las EGRs (contra 3% de la azotea convencional), con retrasos significativamente mayores a la lluvia y tiempos de escurrimiento prolongados (100 min y 340 min, respectivamente) en comparación con la azotea convencional (20 min y 258 min, respectivamente). El flujo subsuperficial fue el proceso que controló la cantidad e inicio de los escurrimientos durante eventos de lluvia en las EGRs. La influencia de las áreas con cobertura

vegetada (plantas perennes) y escasa (plantas anuales) en cada EGR dio lugar a diferencias espaciales en las propiedades hidrofísicas de los sustratos. En consecuencia, se encontraron mayores densidades aparentes, contenidos de agua en el sustrato y tasas de ET en las áreas con sustrato cubiertos por escasa vegetación. La interceptación de la lluvia por el dosel correspondió al 15 y 20% de la ET total para la EGRns y EGRws, respectivamente. Los resultados mostraron que las EGRs evapotranspiran a su tasa máxima ($\sim 2 \text{ mm día}^{-1}$) cuando la humedad en el sustrato oscila entre el 10 y 30%, sin embargo, debajo del 10% la ET disminuye rápidamente. El modelo escalonado mostró un mejor desempeño y estimación de la ET, con un error de predicción que varía entre un 41 a 52% (NRMSE) en comparación con el modelo lineal (58-74%). La ET diaria promedio fue 15 y 13% mayor en la EGRns en comparación con la EGRws para las temporadas de lluvias y de secas, respectivamente. Particularmente, la ET del dosel seco tuvo una mayor contribución a la ET total en ambas EGRs. El presente trabajo proporciona conocimiento y un mayor entendimiento de los procesos hidrológicos en EGRs, maduras y bien establecidas en una región tropical; sin embargo, se requiere más investigación para comprender mejor el papel de la heterogeneidad al interior de las azoteas verdes y su influencia en los procesos y ciclo del agua.

Palabras clave: azotea verde extensiva, detención de la escorrentía, humedad del sustrato, flujo subsuperficial, ET del dosel seco, modelo escalonado, interceptación

ABSTRACT

An extensive green roof (EGR) is the integration of plants on a thin substrate layer and supporting structures on the roof of a building. EGRs have been promoted as sustainable environmental strategies to compensate for the loss of permeable surfaces in urban areas by providing storage capacity for the retention and detention of precipitation, as well as the return of water to the atmosphere through the evapotranspiration (ET). The hydrological processes in mature-age EGR in tropical regions have been poorly studied. The present work focused on quantifying the percentage retention and the detention times of precipitation; evaluating the dominant processes of rainfall runoff generation; and estimating the total ET of two 19-year-old EGRs with different biophysical characteristics (slope, substrate properties, and vegetation cover), designated as EGRns (roof with 2° of slope) and EGRws (roof with 14° of slope), during two rainy and one dry season (May 2017 to December 2018) in Mexico City. For this, continuous measurements of rainfall, substrate moisture and runoff were performed, and hydrophysical and physicochemical properties of the substrate were determined. Rainfall interception by the vegetation canopy was estimated at the event level using the model of Lui (2001). For the calculation of dry-canopy ET, the performance of two models was compared, using field data to calibrate and validate the models and meteorological data to calculate reference evapotranspiration (ET_0). Average rainfall retention was ~60% in the EGRs (versus 3% for the conventional rooftop), with significantly longer rainfall delays and extended runoff times (100 min and 340 min, respectively) compared to the conventional rooftop (20 min and 258 min, respectively). In both EGRs, the amount and initiation of runoff was controlled by subsurface flow. Spatial differences in the hydrophysical properties of the substrate were associated with differences in vegetation cover and type (vegetated with perennial plants versus sparse cover of annual plants). Consequently, higher bulk densities, substrate water contents and ET rates were found in areas with substrate covered with sparse vegetation. Rainfall

interception by the canopy contributed to 15 and 20% of total ET for EGRns and EGRws, respectively. Results also showed that the evapotranspiration in the EGRs was maximum (~ 2 mm day⁻¹) when substrate moisture ranged between 10 and 30%, while ET decreased rapidly below 10%. The stepwise model showed better performance and ET estimation, with a prediction error ranging from 41 to 52% (NRMSE) compared to the linear model (58-74%). The average daily ET was 15 and 13% higher in the EGRns compared to the EGRws for the rainy and dry seasons, respectively. Particularly, dry canopy ET had a higher contribution to total ET in both EGRs. The present work provides knowledge and a better understanding of hydrological processes in mature, well-established EGRs in a tropical region; however, more research is needed to better understand the role of heterogeneity within green roofs and its influence on water cycle and processes therein.

Keywords: extensive green roofs, runoff detention, substrate moisture, subsurface flow, dry-canopy ET, stepwise model, interception

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

Las últimas proyecciones de la población mundial de las Naciones Unidas (2022) prevén que la población podría crecer hasta unos 8.500 millones en 2030, 9.700 millones en 2050 y 10.400 millones en 2100. El crecimiento sostenido de la población, la expansión de la urbanización, la sobreexplotación de recursos naturales y el deterioro de los ecosistemas naturales han provocado grandes cambios en el clima de la Tierra y en el sistema climático en su conjunto (IPCC, 2018), lo que ha aumentado los riesgos de desastres naturales, la contaminación y escasez de recursos naturales, reduciendo con ello la calidad de vida de la población en general.

Las zonas urbanas concentran más de la mitad de la población en el mundo (55%) y se espera que dicha cantidad aumente hasta el 60% para 2030 (ONU, 2022). Por tal motivo, la conversión de ecosistemas naturales a urbanos se ha expandido drásticamente y con ello, las superficies impermeables, reduciendo la capacidad de infiltración del agua de lluvia hacia aguas subterráneas y la velocidad de recarga de los acuíferos, así como la reincorporación del agua a la atmósfera y al ciclo hidrológico a través de la evapotranspiración (ET), provocando incrementos en los volúmenes de escurrimiento superficiales (Manley *et al.*, 2022). Al producirse el escurrimiento pluvial en zonas urbanas, con frecuencia el efluente en el sistema de drenaje supera su capacidad, lo que da lugar a la descarga directa y/o al desbordamiento combinado de las aguas residuales no tratadas y el escurrimiento pluvial en los núcleos urbanos y en las masas de agua receptoras, además de causar erosión de suelos, transporte de sedimentos y contaminación (Li *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2017). La capacidad operativa de los sistemas de drenaje sigue siendo un reto importante para adaptarse a la futura variabilidad climática, especialmente a eventos extremos de precipitación (Li *et al.* 2022). Asimismo, el efecto isla de calor urbano es el resultado directo de la absorción de la radiación solar y el almacenamiento

de calor por las superficies impermeables con el incremento de la urbanización, las emisiones antropogénicas y la limitada evapotranspiración debido a la insuficiente vegetación (Hoelscher *et al.*, 2016), lo que provoca un aumento de la frecuencia de las olas de calor en los periodos secos. Los escenarios propuestos sugieren que las ciudades ubicadas particularmente en zonas tropicales sufrirán los mayores niveles de calentamiento debido a la urbanización, las emisiones de gases de efecto invernadero y la falta de capacidad de adaptación en los próximos años (Huang *et al.*, 2019). La gestión sostenible de los ecosistemas, sus servicios y recursos naturales, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la implementación de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático y sus efectos, así como el desarrollo de ciudades resilientes es indispensable para contribuir a reducir los impactos negativos de los diversos factores de estrés en el mundo, incluido el cambio climático.

La falta de ecosistemas naturales o espacios donde establecer vegetación a nivel del suelo en las ciudades, ha hecho necesario recurrir a estrategias de adaptación y naturación a través de infraestructuras sustentables para aumentar los espacios verdes urbanos, reducir las superficies impermeables y contrarrestar el estrés térmico urbano, entre otros problemas ambientales. Los techos en las ciudades representan entre el 40 y 50% de las áreas impermeables (Stovin *et al.*, 2013). En las últimas décadas la implementación de azoteas verdes en los techos ha mostrado ser una alternativa viable, ya que permiten aumentar la cubierta vegetal en las ciudades, sin añadir nuevos terrenos de construcción y tienen la capacidad de proveer algunos servicios ecosistémicos similares a los ecosistemas naturales (Oberndorfer *et al.*, 2007; Shafique *et al.*, 2018; Shao *et al.*, 2021).

Los beneficios ambientales que aporta una azotea verde se pueden considerar a nivel de edificación y de ciudad (Cascone *et al.*, 2019). A escala de edificación, las azoteas verdes ofrecen un espacio de recreación, funcionan como barreras de sonido (Van Renterghem y

Botteldooren, 2011), pueden reducir la temperatura de la superficie de la cubierta y del ambiente circundante debido al proceso de evapotranspiración, el sombreado de las plantas y el aislamiento del sustrato, lo que a su vez disminuye el uso de sistemas de calefacción y aire acondicionado. Sin embargo, este efecto puede variar en función de las condiciones climáticas y del tipo de sistema (Jim y Peng, 2012). A nivel de ciudad, las azoteas verdes proveen hábitat para la flora y fauna; adicionan permeabilidad para interceptar y retener las precipitaciones, reduciendo y retrasando el escurrimiento pluvial (Stovin *et al.*, 2012; Voyde *et al.* 2010); mitigan el efecto isla de calor urbano (Razzaghmanesh *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2022); son sumideros de carbono y pueden absorber algunos contaminantes pero también pueden lixiviar algunos otros en la escorrentía (Arellano-Leyva *et al.*, 2016; Berghage *et al.*, 2009; Cano-Vázquez, 2021).

Una azotea verde (GR, por sus siglas en inglés) es la aplicación directa o indirecta de sustrato y una cubierta vegetal sobre un techo. Las azoteas verdes modernas se componen de múltiples capas instaladas sobre la estructura de soporte o techo en el siguiente orden ascendente: impermeable, drenaje, filtro y barrera anti-raíz, sustrato y vegetación. Las tres primeras capas son materiales sintéticos, fabricados y duraderos (Jim y Peng, 2012). A la fecha, las azoteas verdes extensivas (EGR) son los sistemas de mayor implementación a nivel mundial debido a que utilizan sustratos ligeros (< 15 cm), tienen bajos costos de mantenimiento y sin sistema de riego permanente; en comparación con los sistemas semi-intensivos e intensivos, con una capa de sustrato profunda (> 15 cm) capaces de albergar plantas que requieren mantenimiento y riego ocasional o sistemáticos. Por lo general, el sustrato en las azoteas verdes es una mezcla de varios materiales inorgánicos livianos (como hormigón triturado, pizarra expandida, arcilla expandida, ladrillo triturado, piedra pómez volcánica, escoria y arena) y materia orgánica (como composta, fibra de coco, mantillo), para lograr características específicas: ligereza para adaptarse a la capacidad de carga de la edificación, retención y

absorción eficaz de agua, propiedades de drenaje libre, elevada porosidad y aporte de nutrientes, así como un adecuado anclaje para las plantas (Nagase y Dunnett, 2011). Las EGRs suelen estar plantadas con una o varias especies suculentas del género *Sedum* ya que su metabolismo ácido de crasuláceas (CAM, por sus siglas en inglés), las hace especialmente resistentes a condiciones con limitada disponibilidad de agua.

La investigación con relación a la hidrología de las azoteas verdes tuvo sus inicios en las regiones templadas de Europa a mediados de los años 80's. A partir de esa década, los estudios hidrológicos fueron en aumento y expandiéndose alrededor del mundo, en los cuales se ha observado que las diferencias en las condiciones climáticas y ambientales de las distintas regiones tienen un papel crucial en el comportamiento hidrológico de las azoteas verdes a diferentes escalas temporales (Poe *et al.*, 2015; Talebi *et al.*, 2019). En algunos países incluido México, los servicios ecosistémicos de las azoteas verdes han resultado en incentivos por parte del gobierno para fomentar e incluso legislar el desarrollo de estos sistemas (por ejemplo, Secretaría de Medio Ambiente y Finanzas en la CDMX, 2015). Las primeras azoteas verdes en México se instalaron de tipo extensivo en la década de los 90's en el centro del país, principalmente con fines recreativos y de investigación. Sin embargo, fue hasta 2008 que se publicó la primera regulación estandarizada que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el Distrito Federal, actual Ciudad de México (NADF-013-RNAT-2007). En los siguientes dos años, se realizó una implementación más amplia de sistemas de naturación, de los cuales el Gobierno de la capital instaló más de 16 mil m² en edificaciones gubernamentales seguidos por la iniciativa privada (Plan Verde, 2011).

A pesar de ello, se ha realizado muy poca investigación científica sobre el funcionamiento hidrológico de las azoteas verdes en México. Considerando que el país tiene una gran cantidad de retos ambientales, es una ventana abierta de estudio. La mayoría de los

trabajos hidrológicos en estos sistemas se han orientado en evaluar la capacidad de retención de los eventos de precipitación. Al respecto, Hernández (2019) realizó simulaciones con un modelo hidrodinámico para evaluar tres tipos de infraestructura verde (azoteas verdes, sistemas de captación de lluvia y parques inundables) como medidas de mitigación a inundaciones en la Ciudad de México a partir de eventos de precipitación de diseño. En su estudio, consideró una azotea verde con una profundidad de sustrato de 10 cm y una altura de captación efectiva de 3 cm con una retención pluvial del 30%. Su trabajo concluye que las tres infraestructuras son una buena alternativa para mitigar inundaciones considerando sus costos-beneficios. Por su parte, Torres (2016) cuantificó durante un mes el escurrimiento pluvial en sistemas modulares de azoteas verdes con crasuláceas, *Sedum* y un sustrato de 9 cm, en Toluca, Estado de México. Su trabajo concluye una retención pluvial promedio del 72%. Pérez (2010) estudió el escurrimiento generado por azoteas verdes con 10 cm de suelo vertisol (20% arena, 25% limo y 55% arcilla) y un pasto exótico (*Pennisetum clandestinum* (Hochst.)), en la zona urbana de Santiago de Querétaro. Evaluó tres sistemas de impermeabilización (asfalto, loseta y geomembrana) en comparación con un azotea convencional. Sus resultados mostraron que las azoteas verdes presentan una reducción promedio del escurrimiento del 85% y un retraso en el inicio del escurrimiento de 10 a 15 minutos, con respecto a la azotea sin cubierta vegetal.

Un par de estudios han cuantificado el balance hídrico a partir de mediciones gravimétricas en sistemas modulares de azoteas verdes extensivas con diferentes especies vegetales. Arellano (2017), evaluó la eficiencia de tres monocultivos con especies de *Sedum spp.* y una mezcla de las tres especies en la evapotranspiración, retención y escurrimiento de agua a eventos simulados de lluvia (riego) durante un mes. Adicionalmente midió la conductancia estomática de *Sedum dendroideum* (Moc. & Sessé ex DC). Sus resultados concluyeron que *S. dendroideum* y la mezcla fueron los tratamientos de mayor efectividad en la gestión pluvial, sin embargo, la mezcla puede proveer servicios ecosistémicos adicionales.

Se confirmó el metabolismo ácido de las crasuláceas en *S. dendroideum*. También en sistemas modulares, Falcón (2017) determinó la evapotranspiración por gravimetría y la conductancia estomática de seis especies con diferente metabolismo (C3, C4 y CAM) en monocultivos y mezclas. Sus resultados mostraron que *Muhlebergia robusta* (E. Fourn.) Hitchc., con metabolismo C4 tiene una mayor ET, seguidas por las especies C3 y CAM. Además, las especies con metabolismo C3 y C4 presentaron una mayor conductancia estomática durante el mediodía y por la mañana, respectivamente. Sin embargo, de acuerdo con la bibliografía consultada no se han realizado estudios referentes a la ET (evaporación de dosel seco y húmedo), así como sobre los mecanismos de generación de escurrimiento en azoteas verdes en México.

La Ciudad de México (CDMX), la quinta ciudad más poblada del mundo es un conglomerado urbano en crecimiento que alberga a casi 22 millones de personas (ONU, 2018). Su tasa de crecimiento urbano ha ido en aumento: de 38 km² año⁻¹ durante 1993-2004 a 53 km² año⁻¹ durante 2004-2018 (Manley *et al.*, 2022). Construida sobre el lecho de un lago, la CDMX es una de las capitales más lluviosas del mundo con aproximadamente 900 mm de precipitación promedio anual (INEGI, 2015; López Portillo, 2019). Debido a su ubicación, condiciones topográficas y climatológicas, así como al acelerado crecimiento urbano, la CDMX es un ecosistema complejo que ha pasado por constantes inundaciones a lo largo de su historia, y debido al cambio climático se encuentra aún más expuesta a desastres naturales y riesgos hidrometeorológicos (SEDEMA, 2020). A la fecha, más del 50% de las alcaldías de la CDMX registran afectaciones por altas temperaturas e inundaciones (SEDEMA, 2020; Vargas y Magaña, 2020).

En México la mayoría de los techos tiene una pendiente ligera, por lo cual las azoteas verdes se instalan principalmente en techos con esta característica, sin embargo, el presente

trabajo considera importante estudiar los procesos hidrológicos de una EGR con mayor pendiente con fines comparativos para el estudio y a nivel internacional, debido a que la implementación de EGRs en techos de mayor inclinación es más común en regiones templadas. Asimismo, es de interés evaluar los efectos de las diferencias en pendiente y prácticas de manejo en el funcionamiento ecohidrológico de las azoteas verdes con aproximadamente 20 años, que puedan ser comparables al resto de los sistemas de naturación contemporáneos y actuales en regiones tropicales.

A la fecha, el componente de evapotranspiración en las azoteas verdes ha sido muy poco estudiado en México y, aunque internacionalmente existen varios trabajos que estiman la evapotranspiración, son escasos los que proporcionen estimaciones separadas de la ET del dosel seco y de la interceptación de lluvia a nivel estacional y anual. Asimismo a nivel mundial, la mayoría de los trabajos previos consideran una azotea verde como un sistema homogéneo sin diferencias espaciales en los procesos hidrológicos, esto se basa principalmente en que la mayoría de los estudios de EGRs se realizan en sistemas modulares de menor escala y reciente instalación.

Por este motivo, es fundamental realizar mediciones a largo plazo y a nivel estacional que permitan cuantificar el escurrimiento pluvial, determinar los procesos dominantes de generación de escurrimiento y estimar la evapotranspiración total en azoteas verdes extensivas con diferentes características biofísicas (pendiente, propiedades del sustrato y cobertura vegetal). De igual forma, es importante entender mejor la dinámica hídrica dentro de una misma azotea verde, lo cual generará conocimiento relevante que nos permita entender sus procesos hidrológicos, potencializar sus funciones y así aportar información para la toma de decisiones en cuanto a su implementación como parte de la gestión de aguas pluviales urbanas en la Ciudad de México para contribuir a una ciudad más sostenible.

La presente tesis doctoral consta de cuatro capítulos. En el capítulo I se proporcionan los antecedentes generales sobre los estudios ecohidrológicos en azoteas verdes a nivel internacional, en México y en la Ciudad de México. En el capítulo II, publicado en la revista *Hydrological Processes*, se evaluó la retención pluvial, los tiempos de detención del escurrimiento pluvial y los procesos de generación de escurrimiento de dos azoteas verdes de naturación directa comparado con un azotea convencional durante dos temporadas de lluvias (2017 y 2018).

En el capítulo III se estimó la evapotranspiración total de las mismas dos azoteas verdes extensivas de 19 años de edad, considerando que presentan diferentes características en pendiente, propiedades del sustrato y cobertura vegetal para las condiciones de dosel seco y dosel húmedo durante las temporadas de lluvias y de secas. Este trabajo será enviado a la revista indizada internacional *Urban Forestry & Urban Greening*.

Por último, en capítulo IV presenta una Discusión y Conclusiones Generales del trabajo.

Productos Académicos

- Artículo arbitrado: Arellano-Leyva E. A., López-Portillo M., Muñoz-Villers L. E y Prado-Pano B. L. 2021. *Rainfall retention and runoff generation processes in tropical mature green roof ecosystems*. Hydrological Processes, 36(11), e14382 DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.14382>.
- Participación en Congresos: AGU Fall Meeting 2021 (cartel), VIII Congreso Mexicano de Ecología 2022 (Presentación oral).
- Participación en el Curso de Ecohidrología (Instituto de Ecología A.C.), Curso de Hidrología (Facultad de Ciencias, UNAM) y en el Taller de Proyectos-Diseño, Max Cetto (Facultad de Arquitectura, UNAM).
- Impartición del Seminario: Las azoteas verdes y su papel en el mejoramiento de la calidad de vida de la Ciudad de México. Programa Universitario de Alimentación Sostenible. Seminario Permanente sobre Agricultura, Alimentación y Sostenibilidad 2022.

Objetivos

General

Determinar la retención de la lluvia, los tiempos de detención del escurrimiento pluvial y los mecanismos de generación de escurrimiento, así como cuantificar la evapotranspiración (ET) en dos EGRs maduras y bien establecidas (19 años), con diferentes características (pendiente, propiedades del sustrato y cobertura vegetal, y manejo) en la Ciudad de México. El desempeño en la retención pluvial de las EGRs se comparó con una azotea convencional (CR) adyacente (control).

Particulares

1. Comparar la retención de la lluvia y los tiempos de detención del escurrimiento pluvial de las EGRs con los del CR durante dos temporadas de lluvias.
2. Determinar la influencia de las diferencias en la vegetación, las propiedades hidrofísicas del sustrato y las pendientes en los patrones de humedad y en los procesos de escurrimiento de las EGRs.
3. Determinar los mecanismos dominantes de generación de escurrimiento en las EGRs.
4. Determinar el modelo más adecuado para estimar la ET diaria en condiciones de dosel seco en las EGRs estudiadas.
5. Cuantificar la ET real diaria en condiciones de dosel seco y dosel húmedo en las dos EGRs para las estaciones de lluvias y secas.
6. Contrastar las tasas diarias de ET real de las EGRs con las tasas de ET de referencia (ET_0) para el periodo investigado.

CAPÍTULO II

Retención de lluvia y procesos de generación de escurrimiento en azoteas verdes maduras en un ambiente tropical

La retención de lluvia y la detención del escurrimiento son probablemente los servicios ecosistémicos más importantes proporcionados por las azoteas verdes extensivas (EGRs) que contribuyen a la mitigación y manejo de las aguas pluviales urbanas. Sin embargo, su funcionamiento hidrológico y mecanismos involucrados en la generación del escurrimiento son aún muy poco entendidos en EGRs maduras y bien establecidas de regiones tropicales. En este capítulo se evaluó la retención de la lluvia, los tiempos de detención del escurrimiento pluvial, así como los procesos dominantes de generación de escurrimiento en dos EGRs vecinas de 19 años de edad con diferente pendiente (2° y 14° para EGRns y EGRws, respectivamente) y prácticas de manejo; comparándolas con un azotea convencional (CR, 2° de pendiente) en la Ciudad de México, durante las temporadas de lluvias de 2017 y 2018 (mayo-noviembre).

2.1. Amortiguamiento de la precipitación por azoteas verdes y su influencia multifactorial

El cambio climático está incrementando la magnitud y la frecuencia de las olas de calor y las precipitaciones extremas en la mayoría de las regiones del mundo (IPCC, 2018; Pfahl, O'Gorman y Fischer, 2017). En consecuencia, se prevé aumentos en la ocurrencia de tormentas severas (IPCC, 2018) que, combinado con el reemplazo de la cubierta vegetal natural por superficies menos permeables en zonas urbanas, incrementarán aún más los impactos y riesgos por inundaciones. Por consiguiente, el control y la mitigación de los eventos de inundación se han convertido en un creciente desafío para muchas ciudades en los trópicos, con riesgos mucho mayores para aquellas zonas urbanas que carecen de infraestructura o para los asentamientos construidos en áreas vulnerables. Por lo tanto, la implementación de

infraestructura verde es fundamental para lograr ciudades más sostenibles y resilientes en un contexto de cambio climático (Loiola *et al.*, 2019).

Las azoteas verdes extensivas han mostrado ser una estrategia eficaz para mitigar los impactos por encharcamientos e inundaciones en ambientes urbanos mediante la retención de lluvia y retraso del escurrimiento pluvial (Hakimdavar *et al.*, 2014; Speak *et al.*, 2013; Stovin *et al.*, 2012). Al respecto, estudios previos indican que la magnitud del amortiguamiento de los eventos de lluvia-escurrimiento en EGRs depende de varios factores, como son el tipo de vegetación, las propiedades y la profundidad del sustrato, la edad, el tipo de manejo, la pendiente del techo y las características de la precipitación, entre otros (Stovin *et al.*, 2012; Stovin *et al.*, 2015; VanWoert *et al.*, 2005; Voyde *et al.*, 2010; Yin *et al.*, 2019). Hasta ahora, las investigaciones han demostrado que el tipo de vegetación influye poco en la retención de la lluvia comparado con las funciones de almacenamiento de agua del sustrato (Ferrans *et al.*, 2018; Palla *et al.*, 2010; Stovin *et al.*, 2012). Sin embargo, son aún pocos los estudios realizados en EGRs de naturación directa con una mayor diversidad vegetal (Carter y Rasmussen, 2006; Carpenter *et al.*, 2016; Nawaz *et al.*, 2015; Voyde *et al.*, 2010), por lo que el efecto de un mayor número de especies en la hidrología de las EGRs sigue siendo un tema de investigación. En estudios anteriores se ha observado que los sustratos más profundos proporcionan una mayor retención de las precipitaciones (Soulis *et al.*, 2017; Uhl y Schiedt, 2008; Villarreal y Bengtsson, 2005), mientras que las azoteas con mayor pendiente promueven un mayor volumen de escurrimiento pluvial (Getter *et al.*, 2007; VanWoert *et al.*, 2005).

La estructura de la vegetación y las propiedades hidrofísicas y fisicoquímicas del sustrato están estrechamente relacionadas con la edad de la EGR (De-Ville *et al.*, 2017; Thuring y Dunnett, 2014). Aunque la mayoría de las investigaciones se han realizado en EGRs relativamente jóvenes (<10 años), estos estudios han observado cambios en los procesos hidrológicos conforme la edad de las azoteas se incrementa. Esto incluye aumentos en las

capacidades de almacenamiento de agua y de retención de la lluvia debido al incremento en los contenidos de partículas finas del sustrato y microporosidad (De-Ville *et al.*, 2017; Getter *et al.*, 2007; Yio *et al.*, 2013). Por lo tanto, cabría esperar una mayor retención y detención del escurrimiento en las EGRs más envejecidas (10-20 años) debido a que los sustratos y la vegetación se encuentran más desarrollados (De-Ville *et al.*, 2017; Getter *et al.*, 2007).

El clima y los patrones de precipitación son también factores importantes que influyen en la respuesta hidrológica de las EGRs. Por ejemplo, resultados de estudios realizados en regiones templadas donde la precipitación media anual oscila entre los 600 y los 2000 mm y se distribuye uniformemente a lo largo del año, mostraron un rango relativamente estrecho de valores de retención de la lluvia (45-62%: Bengtsson *et al.*, 2004; Mentens *et al.*, 2006; Stovin *et al.*, 2012; VanWoert *et al.*, 2005). En contraparte, los estudios realizados en regiones tropicales con una mayor precipitación media anual (700-3000 mm) y estacionalidad más pronunciada, han mostrado porcentajes de retención mucho mayores (40-80%: Carter y Rasmussen, 2006; Moran *et al.*, 2005; VanWoert *et al.*, 2005; Voyde *et al.*, 2010; Wong y Jim, 2014), lo que podría deberse a las características de la precipitación de estas regiones en combinación con una alta demanda evaporativa (Carpenter y Kaluvakolanu, 2011).

Además de los volúmenes de retención, se han cuantificado métricas hidrológicas como los tiempos de detención del escurrimiento, principalmente para las EGRs situadas en climas templados. En este sentido, se han reportado tiempos de retraso en la generación de escurrimiento muy variables entre EGRs y regiones (10-342 min: DeNardo *et al.*, 2005; VanWoert *et al.*, 2005; Yio *et al.*, 2013), lo cual puede deberse a diferencias en la humedad antecedente y en la capacidad de almacenamiento de agua de los sustratos. Del mismo modo, los tiempos de escurrimiento una vez finalizada la precipitación también varían ampliamente (de 3 a 14 horas) y se atribuyen principalmente a diferencias en los tamaños de los eventos de lluvia (Getter *et al.*, 2007; VanWoert *et al.*, 2005). Sin embargo, dada la cantidad e intensidades

de lluvia generalmente más altas observadas en las regiones tropicales, se podría esperar tiempos de detención del escurrimiento más cortos (Arellano-Leyva, 2017; Voyde *et al.*, 2010; Wong y Jim, 2014) comparado con lo reportado en zonas templadas.

A pesar de que los procesos hidrológicos básicos son conocidos en las azoteas verdes (Carter y Rasmussen, 2006; Locatelli *et al.*, 2014; Stovin *et al.*, 2013; Voyde *et al.*, 2010), existen relativamente pocos estudios que se han centrado en estudiar los mecanismos de generación de escurrimiento en EGRs de naturación directa (Fassman y Simcock, 2012; Palla *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2015). Además, la mayoría de los trabajos existentes asume que el sustrato es espacialmente homogéneo (Carpenter y Kaluvakolanu, 2011; Carter y Rasmussen, 2006), sin embargo en azoteas verdes envejecidas y bien establecidas, esto puede no ser el caso debido a los cambios en las propiedades hidrofísicas del sustrato y el crecimiento de la vegetación que ocurre con el paso del tiempo (De-Ville *et al.*, 2017). Por lo tanto, se necesita más trabajo para proporcionar información sobre la variabilidad espacial de los procesos hidrológicos que operan al interior de una azotea verde. Esta información es importante para mejorar nuestra comprensión de cómo la heterogeneidad podría controlar las fuentes y rutas de los flujos y la detención del escurrimiento general en microecosistemas de azoteas verdes envejecidas, lo que a su vez podría utilizarse para mejorar las funciones de las EGRs mediante prácticas de manejo (Sinha *et al.*, 2016).

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Sitio de estudio y azoteas estudiadas

La investigación se realizó en el área experimental de EGRs perteneciente al Jardín Botánico de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), ubicada al suroeste de la Ciudad de México (19°19'N y 99°11'O). El sitio de estudio se ubicó a una altitud de 2326 m sobre el nivel medio del mar, con una temperatura y precipitación media anual de 16.2 °C y 913 mm, respectivamente, registrados por una estación meteorológica cercana (PEMBU-UNAM, 2020;

$n = 14$ años); aproximadamente el 80% de la precipitación ocurre entre los meses mayo y octubre (Bravo et al., 2014). El tipo de clima es templado cálido y subtropical, con un régimen de lluvias en verano [Cb (w1) (w)], según la clasificación de Köppen modificada por García (2004).

La EGR fue instalada en 1999 y fue uno de los primeros prototipos de EGRs instalados en México con fines educativos y de investigación. Debido a que en esos años no existían normas para su instalación, la capa de drenaje se elaboró con piedra volcánica porosa (tezontle), una piedra pómez de color rojizo oscuro, que es un material de construcción común en México y tiene características similares a los materiales estándar utilizados para las capas de drenaje. Además, el sustrato preparado que se utilizó en ese momento (ver más adelante) aún no estaba estandarizado; sin embargo, sus características son comparables a las de los sustratos que se utilizan mundialmente (De-Ville *et al.*, 2017). La EGR está sellada con una membrana impermeable y tiene la siguiente disposición de capas: la capa más profunda es de tezontle con un espesor de aproximadamente 5 mm (capa de drenaje); la capa intermedia es de malla geotextil de 2 mm (capa filtrante); la capa superior, que es el sustrato preparado, se compone de grava, roca volcánica cubierta de arcilla (tepojal), fibra de coco, composta y suelo de textura franco arenosa (70% de arena, 17% de limo y 13% de arcilla), este último es común en la región sur de la ciudad (zona de Xochimilco) (J. Reyes, comunicación personal, 2015).

La EGR tiene una superficie total de 260 m². Para este estudio, se seleccionaron dos secciones de la EGR con diferentes características biofísicas. La primera sección (de aquí en adelante EGRns) tiene una superficie de 32.0 m², una pendiente de 2° y una profundidad media del sustrato de 132 mm (Figura 1a). La vegetación incluye varios géneros y las especies dominantes son *Agave ferchoveri*, *Opuntia tomentosa*, *Sedum dendroideum* y *Altamiranoa mexicana* (Arellano-Leyva *et al.*, 2016). La altura media de la vegetación fue de 45 cm. La

segunda sección (de aquí en adelante EGRws) tiene una superficie de 36.7 m², una pendiente de 14° y una profundidad media del sustrato de 103 mm (Figura 1b). Las especies dominantes son *Agave montana*, *Agave celsii*, *Opuntia hyptiacantha*, *Opuntia tomentosa* y *Sedum dendroideum*. La altura media de la vegetación fue de 72 cm. Dado que la composición vegetal está dominada por especies con metabolismo ácido de las crasuláceas, las EGRs no requieren riego más allá de lo que proporciona el régimen estacional de lluvias. En cuanto a prácticas de manejo, la remoción de hierbas se realiza de forma manual dos veces al año, y por la edad de las azoteas, algunos individuos de gran tamaño se eligen ocasionalmente para ser extraídos y reemplazados por plantas jóvenes con la finalidad de reducir el peso en el techo. Esto ha ocurrido principalmente en la EGRns. Es importante mencionar que durante el período de estudio no se realizaron trasplantes o deshierbes en las azoteas para no alterar la cubierta vegetal y el sustrato y, en consecuencia, la partición de lluvia por la vegetación y el movimiento del agua en el sustrato.

La azotea convencional (de aquí en adelante CR) está cubierta por una membrana impermeable, tiene una superficie de 19.3 m², una pendiente de 2° y muros perimetrales de 20 cm de altura (Figura 1c). La elevación sobre el suelo fue la misma para las tres azoteas estudiadas (3 m).



Figura 1. Azoteas verdes extensivas investigadas con (a) una pendiente de 2° (EGRns) y (b) con una pendiente de 14° (EGRws), y (c) la azotea convencional (CR).

2.2.2. Instrumentación y mediciones hidrológicas

El estudio se llevó a cabo del 21 de mayo de 2017 al 15 de noviembre de 2018. Durante este periodo, la precipitación (P) fue registrada cada 5 min utilizando un pluviómetro de balancín marca HOBO RG3-M (Onset, EUA; 0.2 mm de resolución) instalado a 1.2 m del suelo de las EGRs (Figura 2).

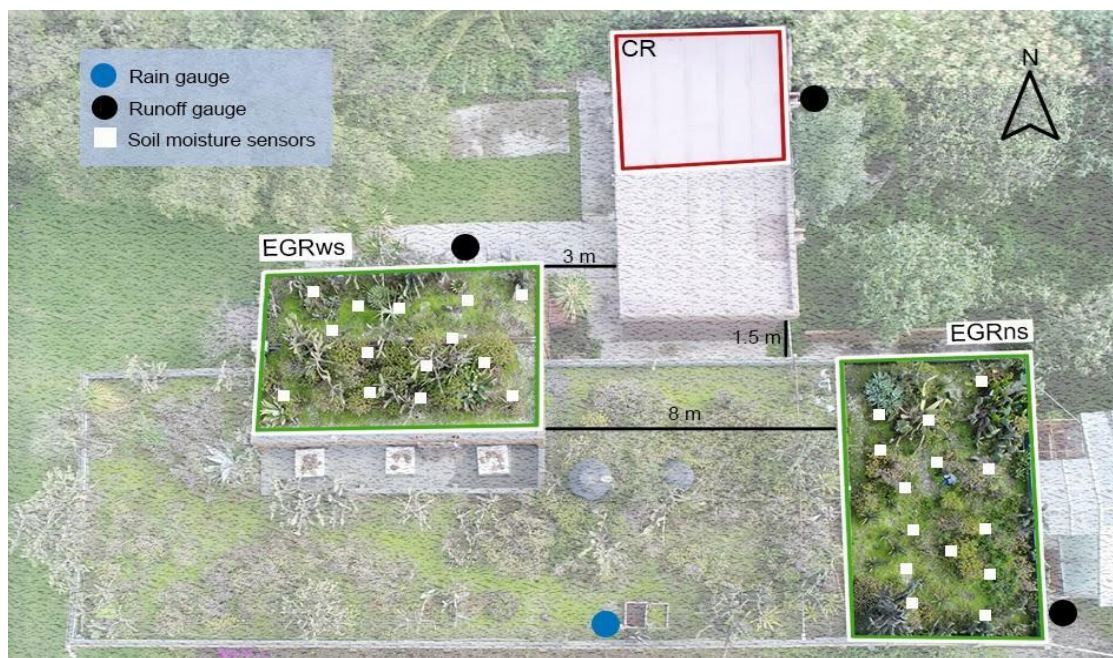


Figura 2. Mapa de las azoteas verdes y la convencional en el JB- UNAM (Ciudad de México) mostrando los sitios de instrumentación.

El índice de área foliar se midió mensualmente en un horario de 12:00-15:00 hrs de septiembre a noviembre de 2017 y de mayo a septiembre de 2018, utilizando un ceptómetro AccuPAR LP-80 (Decagon, EUA). Con la finalidad de cubrir la mayor variabilidad espacial posible, se realizaron por muestreo 10 mediciones de radiación solar incidente y 15 mediciones con cinco repeticiones por sitio de radiación fotosintéticamente activa (PAR) en cada azotea verde.

El escurrimiento pluvial en cada una de las azoteas estudiadas se midió colectando el agua en tanques de 1100 L (Rotomex), cada uno de ellos equipado con un transductor de presión (3 mm de precisión) y un barómetro colocado en el tanque de la EGRns (5.1 mm de precisión) (modelo 3001 LT F5/M1.5, Solinst, Canadá Ltd.) a partir de los cuales se calcularon los niveles de agua cada 1 min. A continuación, se corrigieron los valores de la profundidad del agua utilizando las lecturas de una cinta métrica colocada en el exterior de los tanques de cada azotea, y se convirtieron en un volumen de escurrimiento (Q , mm) utilizando la ecuación de calibración desarrollada del tanque ($y = 9.6067x - 8,6804$; $r^2 = 0.99$) y la superficie de cada azotea. Por lo general, todos los tanques se vaciaron al día siguiente del evento de lluvia y una vez que el escurrimiento se detuvo por completo. Las máximas cantidades de eventos de lluvia que fueron totalmente contenidas por los tanques fueron de 31, 27 y 52 mm para las EGRns, EGRws y CR, respectivamente.

2.2.3. Humedad en el sustrato y calibración de sensores 10HS

En cada EGR se distribuyeron 14 sensores basados en capacitancia (10HS-Soil Moisture Sensor, Decagon, EUA) y se instalaron horizontalmente a una profundidad de 5 cm en el sustrato para medir el contenido de humedad volumétrica (Figura 2). Los datos se registraron cada 5 minutos mediante un registrador de datos Em50 (Decagon, EUA).

Posteriormente, para obtener los valores reales de humedad en el sustrato (Θ), se llevó a cabo una calibración de los sensores de 10HS por azotea verde. El procedimiento de calibración siguió el método estándar de Starr y Paltineanu (2002). Para ello, se colectó una muestra no perturbada de sustrato por tipo de cobertura vegetal (bajo vegetación, vegetación escasa y sustrato desnudo), en contenedores de plástico (35.9 x 19.7 x 12.4 cm; largo, ancho y alto) para cada azotea verde ($n = 1$ por cobertura vegetal; 6 muestras en total), basado en la observación de que la densidad aparente difiere significativamente entre las coberturas con

vegetación y sin vegetación (véanse las secciones 2.2.5 y 2.3.2). En el laboratorio se colocó el sensor 10HS en posición horizontal en cada contenedor; después todas las muestras se saturaron y se dejaron drenar durante 48 horas. Una vez concluido esto, se inició el experimento de calibración, que consistió en secar gradualmente las muestras de sustrato. Al mismo tiempo, se registraron los datos crudos (RC) del sensor 10HS a una resolución de 5 min. utilizando un registrador de datos EM50, junto con los pesos de los contenedores mediante una balanza digital (Ohaus Defender™ Serie 5000; resolución de 5 g.). Durante la primera semana, los pesos de los contenedores se registraron dos veces al día, a las 9:00 y a las 16:00 horas (hora local). A partir de entonces, se realizó una única lectura diaria a las 9:00 horas. Cuando las variaciones de peso fueron constantes durante varios días, las mediciones se realizaron cada tres días durante un mes. Al final del experimento, se extrajeron 500 g. de sustrato de cada contenedor; todas las muestras se secaron a 105°C y se determinó la densidad aparente (ρ_s) como se muestra:

$$\rho_s \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{M_s}{V_s}$$

[Ec. 1]

donde M_s es la masa seca del suelo y V_s , es el volumen total de la muestra. A partir de esto, el contenido de humedad del sustrato se calculó en unidades gravimétricas (w) y volumétricas (θ) como:

$$w \text{ (\%)} = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100$$

[Ec. 2]

$$\theta \text{ (\%)} = \frac{w * \rho_s}{\rho_w} * 100$$

[Ec. 3]

donde P_{sh} es el peso del suelo húmedo, P_{ss} es el peso del suelo seco y ρ_w es la densidad del agua (1 g cm⁻³).

A continuación, se graficaron los valores θ vs. RC y se ajustó una curva de regresión para obtener la ecuación de calibración para cada tipo de cobertura vegetal (Figura 3).

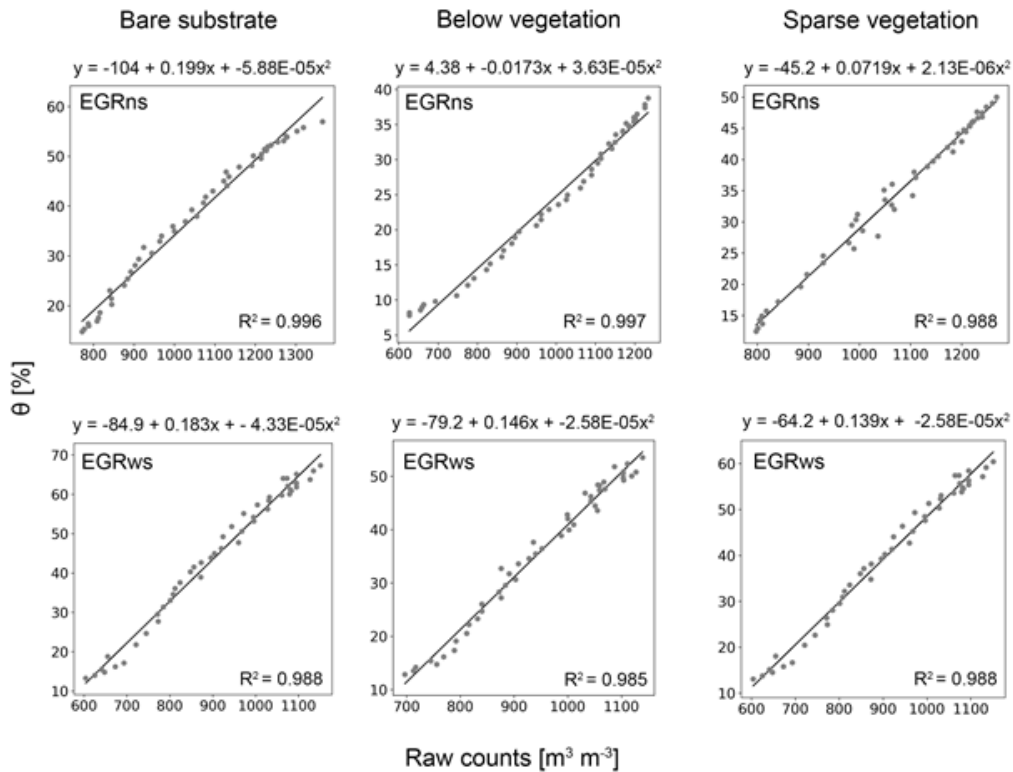


Figura 3. Datos de calibración de los sensores 10HS, ecuaciones ajustadas y coeficientes de determinación por cubierta vegetal del sustrato para las azoteas verdes estudiadas.

Con fines de comparación, se trazaron los valores diarios promedio del contenido volumétrico de agua calibrado contra los obtenidos mediante las ecuaciones genéricas proporcionadas por el manual de usuario del sensor 10HS (Figura 4).

Versión 1:

$$VWC (m^3 m^{-3}) = 3.13E^{-7} * RC^2 - 1.47E^{-4} * RC - 5.82E^{-2}$$

[Ec. 4]

Versión 3:

$$\text{VWC (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)} = 1.17 \times 10^{-9} * (\text{RC})^3 - 3.95 \times 10^{-6} * (\text{RC})^2 + 4.90 \times 10^{-3} * (\text{RC}) - 1.9$$

[Ec. 5]

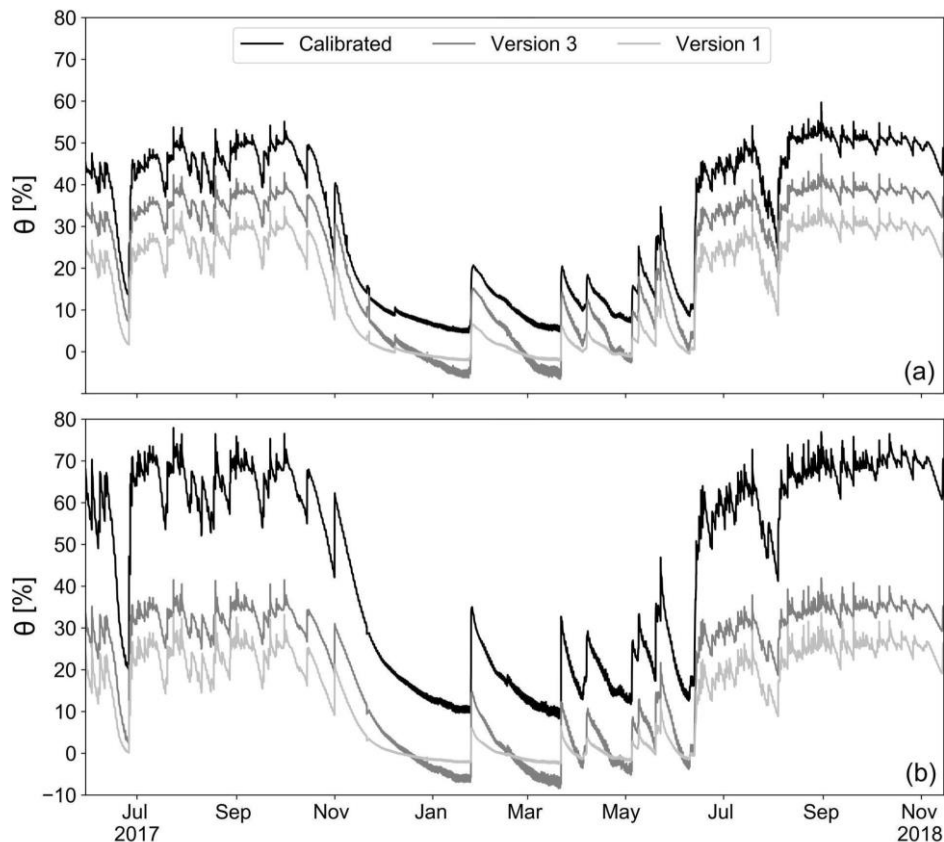


Figura 4. Gráficas de comparación entre el contenido de humedad del sustrato calibrado para (a) EGRns y (b) EGRws contra los valores obtenidos utilizando las calibraciones proporcionadas por el fabricante (versión 1 y 3) para el periodo de estudio (mayo 2017 a noviembre 2018).

Al final del experimento, se asignó a cada sensor de humedad una ecuación de calibración específica según su cobertura de sustrato. Después de las correcciones, los valores del contenido volumétrico de agua variaron entre +20 y 40% para la EGRns y entre +43 y 57% para la EGRws. Para las áreas por debajo de la vegetación y el sustrato desnudo, el contenido

de humedad osciló, respectivamente, entre el 32 y el 41% ($n = 6$ sensores) y entre el 44 y el 51% ($n = 3$) en la EGRns, mientras que para las áreas por debajo de la vegetación y el sustrato desnudo en la EGRws, la humedad osciló entre el 39 y el 60% ($n = 7$) y entre el 64 y el 76% ($n = 3$), respectivamente.

En el caso de los sustratos con cobertura de escasa vegetación, la humedad varió del 11 al 61% en la EGRns ($n = 5$) y del 23 al 78% en la EGRws ($n = 4$). Basándose en el rango de variación de cada uno de estos conjuntos de datos, se asignaron, en consecuencia, a la categoría de sustrato debajo de la vegetación o desnudo. Al final, ocho y seis sensores de humedad caracterizaron las áreas por debajo de la vegetación y el sustrato desnudo en la EGRns, respectivamente, mientras que diez y cuatro sensores describieron la humedad por debajo de la vegetación y los sustratos desnudos en la EGRws.

2.2.4. Conductividad hidráulica saturada

Se realizaron 14 ensayos de infiltración en cada EGR utilizando un infiltrómetro de anillo simple con una carga constante de 5 cm (Gómez-Tagle *et al.*, 2008; Clothier & White, 1981) para calcular posteriormente la conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs} , mm hr^{-1}) de acuerdo con el método de Wu y Pan (1997) utilizando una tasa de infiltración cuasi estacionaria, estimada como la pendiente de la última parte lineal de la infiltración acumulada. En cada sitio, el anillo se introdujo presionando y girando suavemente hasta llegar a una profundidad de 5 cm en el sustrato.

2.2.5. Muestreo, análisis de laboratorio y determinaciones del sustrato

Para determinar las propiedades hidrofísicas y fisicoquímicas del sustrato, se colectó un número igual de muestras de las áreas debajo de la vegetación y de sustrato desnudo en cada EGR. La densidad aparente del sustrato (DA) se determinó mediante el método del cilindro (n

= 3 muestras por cobertura). Las propiedades químicas y la disponibilidad de macronutrientes de los sustratos se determinaron a partir de muestras secadas al aire ($n = 1$ muestra compuesta por cobertura) que se tamizaron utilizando una malla de 2 mm. El pH del sustrato se determinó utilizando un medidor de pH con electrodo de vidrio en una proporción suelo:agua de 1:2, y la conductividad eléctrica (CE) se determinó utilizando una célula de conductividad que midió la resistencia eléctrica en una solución suelo:agua de 1:5. La materia orgánica (MO) se determinó mediante el método Walkley Black. El carbono orgánico del sustrato (COS), el carbono total (C) y el nitrógeno total (N) se midieron con un analizador de CN de combustión seca TruSpec (LECO, EUA). El fósforo extraíble (P) se determinó mediante el método Bray I (Bray y Kurtz, 1945), y el K^+ intercambiable se determinó extrayendo el suelo con 1 M NH_4OAc (pH 7.0) y analizándolo después mediante Fotometría de flama. Todas las determinaciones de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Suelos del INECOL en Xalapa, Veracruz, México.

La porosidad total del sustrato y el contenido volumétrico de agua a capacidad de campo (FC) se determinaron a partir de los datos de humedad calibrados. Para cada EGR, la porosidad total se calculó promediando los valores máximos de humedad del sustrato observados en todos los sensores (Zhu *et al.*, 2018; Zwartendijk *et al.*, 2020). Para determinar la FC, una vez que el evento de lluvia finalizó, se utilizó el valor del contenido de humedad del sustrato 24 horas después de la lluvia para representar la retención de agua del sustrato previo al escurrimiento libre por gravedad.

2.2.6. Análisis de datos

Los datos de precipitación, escurrimiento y humedad del sustrato fueron analizados a resoluciones temporales de 5 minutos, 60 minutos y 24 horas durante las estaciones de lluvias de 2017 y 2018 (mayo-noviembre). Un evento de lluvia se definió como un periodo con más de 1 mm de precipitación, separado por un periodo seco de al menos 6 horas (Driscoll *et al.*,

1989; NOAA 2007; Voyde *et al.*, 2010; Wong y Jim, 2014). Para cada evento, se determinó la cantidad de precipitación (P , mm), la intensidad media (I_{mean} , mm hr⁻¹), la intensidad máxima (I_{max} , mm hr⁻¹) y la duración de la precipitación (T_p , min). La precipitación antecedente (AP_7 , mm) se calculó sumando las cantidades de precipitación de los 7 días previos a cada evento de lluvia (Viessman *et al.*, 1989). Este análisis sólo consideró eventos de precipitación-escorrimento completos y con datos confiables.

2.2.7. Métricas hidrológicas

Para cada evento de precipitación-escorrimento observado en las azoteas estudiadas, se calculó el coeficiente de escorrimento definido como la relación entre el escorrimento y la precipitación (Q/P , sin unidades). La retención de la lluvia expresada en % se calculó como la inversa de Q/P multiplicada por 100. Se calcularon los siguientes tiempos de detención del escorrimento: el tiempo de retraso (T_dQ , min), definido como el tiempo entre el inicio de la precipitación y el inicio del escorrimento, y el tiempo de prolongación (T_eQ , min), definido como la duración del escorrimento una vez finalizado el evento de lluvia.

Se probó la significancia estadística de los parámetros hidrológicos obtenidos para las tres azoteas mediante pruebas paramétricas (Shapiro-Wilk) o no paramétricas (Mann-Whitney y Kruskal-Wallis) en función de la normalidad de los datos. Todos los análisis se realizaron en el programa estadístico SigmaPlot, versión 12.0 (Systat Software, Inc.).

2.2.8. Evaluación de los procesos de escorrimento

Para evaluar la posible ocurrencia del flujo superficial por exceso de infiltración (IEO), se compararon los datos de K_{fs} de cada azotea verde con los valores de I_{mean} e I_{max} calculados para resoluciones temporales de 5, 30 y 60 min, utilizando los datos de precipitación de las dos estaciones de lluvias estudiadas. Para este análisis, sólo se utilizaron eventos de precipitación

≥ 5 mm, ya que ésta fue la cantidad mínima de lluvia para producir escurrimiento en ambas EGRs (111 de 181 eventos).

A partir de los eventos de precipitación-escurrimiento seleccionados en ambas EGRs durante los dos periodos de lluvia (77 de 111 eventos), se examinó la variación temporal del contenido de humedad del sustrato y del escurrimiento para diferentes intensidades de lluvia y condiciones de precipitación antecedente, de acuerdo con los siguientes criterios: Caso a1, fueron aquellos eventos caracterizados por una P relativamente pequeña (5-16 mm) y una precipitación antecedente relativamente baja ($AP_7 \leq 39$ mm); Caso a2 fueron eventos con una P relativamente pequeña (5-16 mm) y una AP_7 alta (> 39 mm); Caso b1 contiene eventos con una P alta (> 16 mm) y una AP_7 relativamente baja (≤ 39 mm); y Caso b2 contiene eventos con una P alta (> 16 mm) y una AP_7 alta (> 39 mm). Por lo tanto, toda la información de los eventos pertenecientes a cada uno de estos diferentes casos fueron agrupados y analizados a una resolución de 5 minutos, después estos datos fueron ensamblados para producir valores promedio por hora.

Para evaluar la posible ocurrencia de flujos superficiales por exceso de saturación (SEO) en las EGRs, las condiciones de saturación de agua en el sustrato se establecieron cuando el contenido volumétrico de agua medido alcanzó el valor máximo durante los eventos de lluvia analizados (Zwartendijk *et al.*, 2020). Para determinar las áreas potenciales de las azoteas verdes que contribuyeron a SEO, cada EGR fue dividida en un mallado regular de 12 cuadrados. Un cuadrado tenía una superficie de 2.7 m^2 en la EGRns y de 3.2 m^2 en la EGRws; cada uno de ellos estaba equipado con al menos un sensor de humedad, con la excepción de uno en la EGRws en el que la instalación del sensor no fue posible debido a que el sustrato era poco profundo, por lo que esa zona se excluyó del análisis. A continuación, asumiendo propiedades homogéneas del sustrato dentro de las áreas de los cuadrados que rodea al sensor de humedad, se realizó una estimación de la superficie que contribuye a SEO para cada azotea

verde, multiplicando el área de cada cuadrado por el número promedio de veces que el sensor de humedad registró el valor máximo de almacenamiento de agua, y luego sumando todas las áreas individuales que contribuyeron por evento para los casos estudiados (a1, a2, b1 y b2).

2.3. Resultados

2.3.1. Precipitación y contenidos de humedad en el sustrato

Durante las temporadas de lluvias de 2017 y 2018 se observaron un total de 997 y 1145 mm de precipitación (P), distribuidos en 104 y 131 eventos, respectivamente (Figura 5). En comparación con los registros climáticos del PEMBU-UNAM (2000-2015), la precipitación observada en las dos temporadas de lluvias estudiadas fueron mayores a los valores promedio (760 mm).

El promedio diario de P durante las estaciones de lluvias de 2017 y 2018 fue de 6.0 mm, con cantidades máximas registradas el 18 de agosto de 2017 (53 mm) y el 30 de agosto de 2018 (83 mm). Los mayores ingresos de P por mes se observaron en julio de 2017 (282 mm) y en agosto de 2018 (407 mm). A escala de evento, el valor promedio de P en 2017 fue de 9.59 ± 11.5 (DE) mm con una I_{\max} de 5.59 ± 6.5 mm hr⁻¹; la duración promedio de P fue de 4.70 ± 5.3 hr. En 2018, el promedio de P (8.74 ± 11.3 mm) y su duración (4.49 ± 6.7 h) fueron ligeramente menores a las de 2017 ($p > 0.05$), mientras que la I_{\max} fue similar (5.36 ± 6.4 mm hr⁻¹) a las de 2017 ($p > 0.05$).

Durante las estaciones de lluvias de 2017 y 2018, el contenido diario de humedad promedio del sustrato (θ) fue significativamente más bajo en la EGRns ($43.1 \pm 9.1\%$ y $43.7 \pm 12.3\%$) que en la EGRws ($62.9 \pm 10.7\%$ y $60.9 \pm 16.5\%$) ($p < 0.05$; Figura 5). En general, se observó una mayor variación de la humedad en las zonas con sustrato desnudo (BS) en ambas azoteas verdes (Figura 5). En la EGRns, los valores de θ para el BS oscilaron entre el 14.8 y el 58.6% en 2017 y entre el 8.7 y el 60.6% en 2018, mientras que los valores correspondientes

para los sustratos en áreas con vegetación (BV) variaron entre el 14.1 y el 46.7% en 2017 y entre el 10.5 y el 49.2% en 2018, encontrándose diferencias significativas entre las coberturas del sustrato y temporadas de lluvias ($p < 0.05$). En la EGRws, el contenido de humedad en las zonas BS varió entre el 24.6 y el 81.4% en 2017 y entre el 21.3 y el 82.7% en 2018, mientras que en los sustratos BV la humedad osciló entre el 17.7 y el 67.8% y entre el 10.3 y el 67.8% para 2017 y 2018, respectivamente; las diferencias fueron significativas entre coberturas de sustrato y para BV entre temporadas de lluvia ($p < 0.05$).

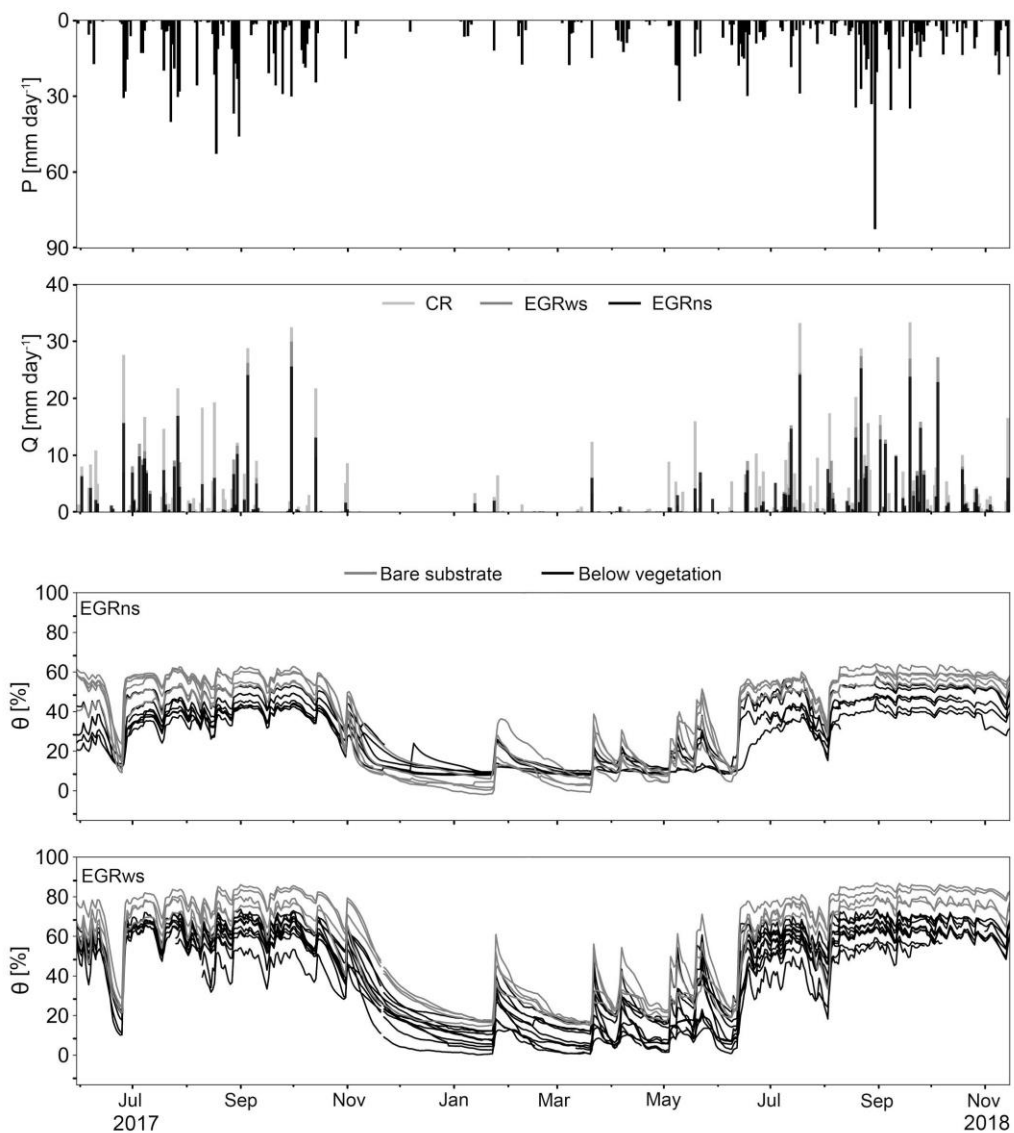


Figura 5. Valores diarios de precipitación (P) y escurrimiento (Q) de las azoteas estudiadas, y contenido de humedad del sustrato (θ) de las azoteas verdes en el periodo estudiado.

2.3.2. Índices de área foliar y propiedades de los sustratos

Los valores promedio de los índices de área foliar medidos a lo largo del estudio fueron de 3.58 m² m⁻² para la EGRns y de 3.13 m² m⁻² para la EGRws ($p > 0.05$).

En general, las densidades aparentes y las porosidades totales del sustrato fueron mayores en la EGRws ($p < 0.05$) (Tabla 1). En la EGRns, el valor promedio de la densidad aparente fue de 0.52 ± 0.04 g cm⁻³ para las áreas BV, y de 0.73 ± 0.01 g cm⁻³ para las áreas BS ($p < 0.05$), mientras que los valores correspondientes en la EGRws fueron, respectivamente, de 0.78 ± 0.03 y 0.91 ± 0.05 g cm⁻³ ($p < 0.05$). En promedio, la porosidad total fue mayor en las zonas con sustrato desnudo ($60.6 \pm 1.2\%$ en la EGRns y $84.4 \pm 1.6\%$ en la EGRws) que en las áreas debajo de vegetación ($49.1 \pm 1.9\%$ en la EGRns y $70.4 \pm 1.9\%$ en la EGRws) ($p < 0.05$).

Valores similares de acidez en el sustrato fueron encontrados en ambas EGRs. El carbono orgánico del sustrato y la materia orgánica fueron mayores en la EGRns. También mostraron concentraciones similares de potasio, nitrógeno y carbono total, sin embargo los contenidos de fósforo fueron más altos en la EGRws.

Tabla 1. Características hidrofísicas del sustrato (valores promedios) en las EGRs.

	EGRns	EGRws
DA (g cm ⁻³)	0.63	0.85
Porosidad total (%)	54.87	77.39
pH	4.82	4.90
CE (mS cm ⁻¹)	0.03	0.06
MO (%)	15.25	12.30
COS (%)	8.84	7.15
K (cmol kg ⁻¹)	0.19	0.17

P (mg kg ⁻¹)	23.50	37.10
C total (%)	9.77	9.65
N total (%)	1.04	1.14

2.3.3. Retención de lluvia y tiempos de detención del escurrimiento

Durante la temporada de lluvias de 2017, el escurrimiento (Q) promedio diario fue de 1.41, 1.49 y 2.43 mm en la EGRns, EGRws y CR, respectivamente. Los valores diarios de Q más altos fueron de 30, 26 y 33 mm en la EGRns, EGRws y CR, respectivamente, observados el 30 de septiembre de 2017. En la temporada de lluvias de 2018, se registraron valores promedios diarios de Q más altos en las tres azoteas (1.9 mm en ambas azoteas verdes y 3.1 mm en la CR). El valor diario máximo de Q fue registrado el 22 de agosto de 2018 en la EGRns (27 mm) y en la EGRws (25 mm), y el 19 de septiembre de 2018 en la CR (33 mm) (Figura 5). A escala de evento, el valor de Q promedio fue similar entre azoteas verdes (5.97 mm en la EGRns [$n = 173$] y 6.25 mm en la EGRws [$n = 147$]; $p > 0,05$), siendo aproximadamente la mitad de los valores observados en la CR (11.67 mm [$n = 134$]; $p < 0.05$). Cabe mencionar que el número de eventos analizados en la CR fue menor que en las EGRs, debido a que el desagüe del escurrimiento pluvial fue bloqueado ocasionalmente con hojas de árboles cercanos, por lo que estos eventos fueron excluidos del análisis. Como se esperaba, se encontró una menor correlación entre la precipitación y el escurrimiento a nivel de evento en las EGRs comparado con la CR (Figura 6). En este caso, la CR generó escurrimiento en todos los eventos de precipitación registrados por muy pequeños que éstos fueran. Por el contrario, las EGRs retuvieron un gran número de eventos $P \leq 6$ mm, observándose también que la EGRns retenía el doble de eventos ($n = 51$) comparado con la EGRws ($n = 26$).

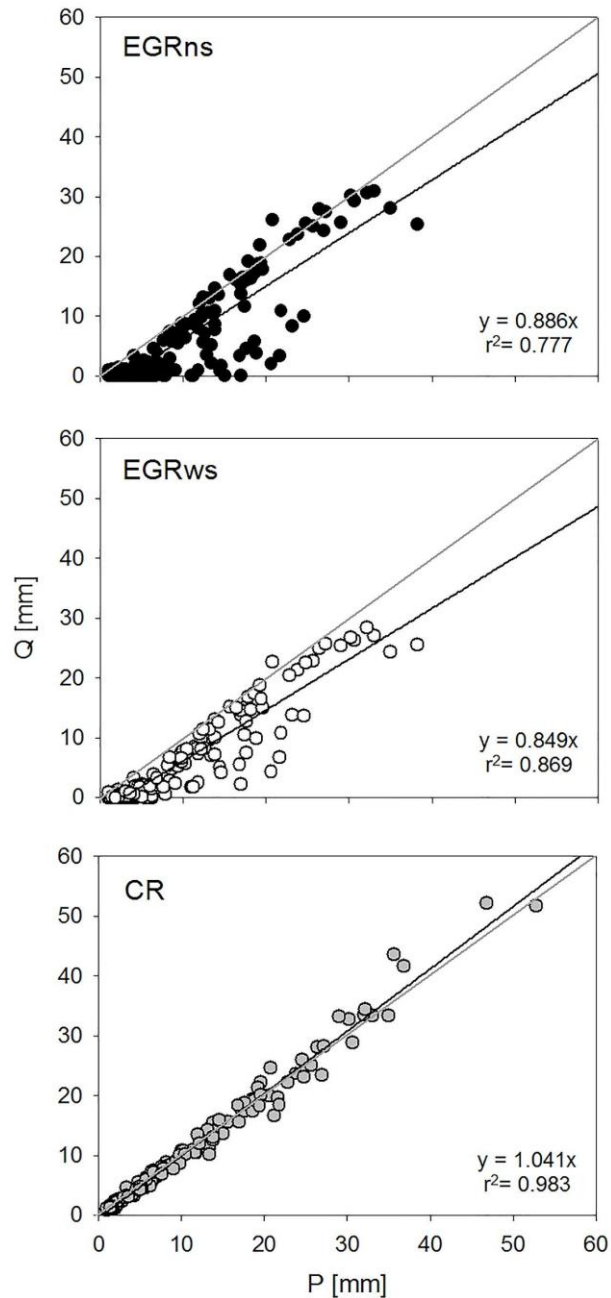


Figura 6. Precipitación (P) y escurrimiento (Q) observados en las azoteas estudiadas. La regresión 1:1 (línea gris) se muestra a modo de comparación.

El valor promedio de Q/P a nivel de evento fue de 0.38 ± 0.38 en la EGRns y de 0.40 ± 0.34 en la EGRws ($p > 0.05$). Por el contrario, el valor promedio de Q/P en la CR fue de 0.97 ± 0.11 , y significativamente mayor que lo observado en las EGRs ($p < 0.05$). Se observó un

mayor retraso (TdQ) en promedio en el inicio del escurrimiento pluvial en la EGRns (117 min) y la EGRws (87 min) comparado con la CR (20 min) ($p < 0.05$ entre azoteas; Figura 7a). Asimismo, el tiempo que se prolongó el escurrimiento una vez finalizado el evento de lluvia (TeQ) fue de 344 y 337 min en la EGRns y EGRws, respectivamente, lo que fue significativamente mayor que lo observado en la CR (259 min) ($p < 0.05$; Figura 7b).

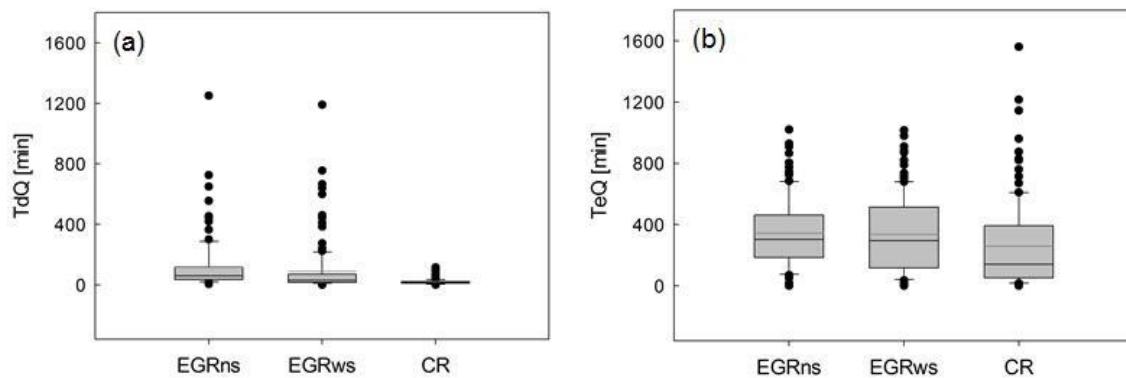


Figura 7. (a) Tiempo de retraso del escurrimiento (TdQ) y (b) tiempos de prolongación del escurrimiento (TeQ) para las azoteas estudiadas.

Adicionalmente, se evaluó el efecto de las características de la precipitación en la retención de las mismas. Con base en valores promedios calculados a lo largo de las dos temporadas de lluvias, las cantidades y las intensidades promedio de la lluvia se dividieron en dos clases. En eventos de precipitación pequeños ($P < 11$ mm), la retención de la lluvia fue, en promedio, del 81% en la EGRns y del 79% en la EGRws; y cuando se produjeron lluvias de mayor tamaño (11-53 mm), la retención fue menor y similar entre las azoteas verdes (31% en promedio). Lluvias con intensidades promedio bajas (< 3.4 mm hr^{-1}) y altas (> 3.4 mm hr^{-1}), la EGRns mostró una retención del 65 y el 50%, mientras que los valores correspondientes en la EGRws fueron del 64 y el 45%, respectivamente. Por el contrario, la CR mostró una retención muy baja ($< 4\%$) para todas las diferentes lluvias analizadas.

2.3.4. Procesos de generación de escurrimiento

Al inicio de los eventos de lluvia de los casos a1, a2, b1 y b2, definidos en la sección 2.2.7, los contenidos de humedad del sustrato estuvieron por debajo de sus capacidades de campo (FC) locales en la mayoría de los casos (Figura 8). Sin embargo, se observó un rápido aumento de la humedad en todas las coberturas de sustrato durante el periodo de ascenso de los hidrogramas en respuesta a las precipitaciones, alcanzando el estado de humedad a capacidad de campo antes o durante los picos de escurrimiento en ambas azoteas verdes. Una vez que la humedad del sustrato alcanzó la capacidad de campo, los contenidos de humedad tendieron a aumentar con las lluvias y a disminuir ligeramente durante los periodos de recesión del escurrimiento.

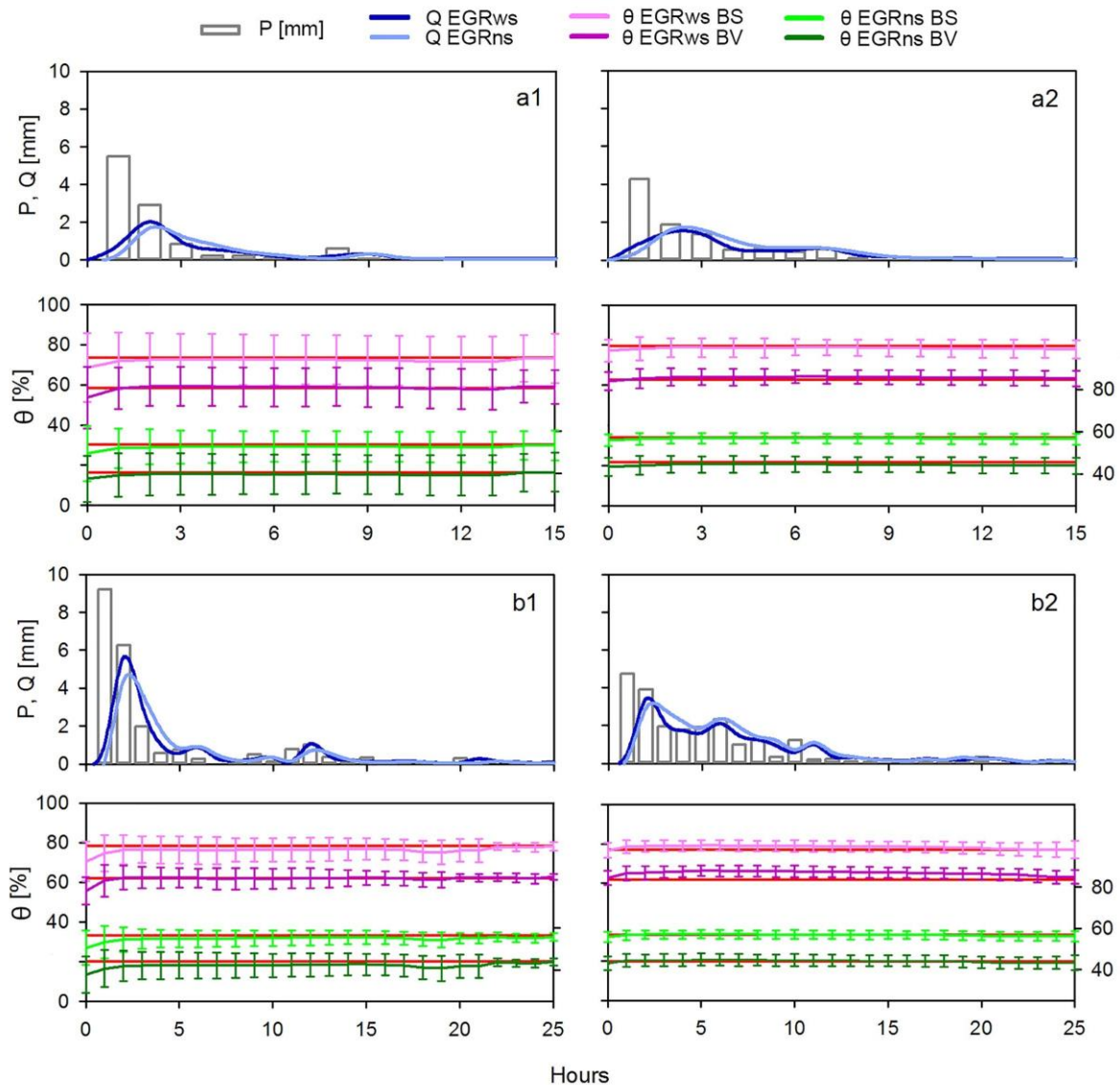


Figura 8. Datos ensamblados de precipitación, escurrimiento pluvial y contenido de humedad del sustrato de las azoteas verdes para el caso a1 (19 eventos), caso a2 (23 eventos), caso b1 (17 eventos) y caso b2 (18 eventos). La línea roja de los paneles inferiores muestra el valor promedio de la FC local por cobertura del sustrato en cada azotea verde.

Las características de los eventos de los casos a1, a2, b1 y b2, se presentan en la Figura 9. Cuando ocurrieron eventos de lluvia pequeños precedidos por precipitaciones relativamente bajas (caso a1) ($n = 19$ eventos), los valores Q/P promedio fueron de 0.55 en la EGRns y de

0.59 en la EGRws con tiempos de retraso del escurrimiento (TdQ) más cortos en la EGRws (Figura 9). La mayor variación en los contenidos de agua en el sustrato se observó en estas precipitaciones comparado con los otros casos estudiados (Figura 8). En la EGRns, las humedades en los sustratos con vegetación (BV) y de escasa vegetación y sustrato expuesto (BS) alcanzaron la FC local en el 49 y 56% de los eventos, respectivamente. En la EGRws, la humedad en ambas coberturas de sustrato mostraron respuestas similares y mayores (70-72%) a las observadas en la EGRns (Figura 10).

Durante eventos de lluvia pequeños y de alta precipitación antecedente (caso a2) ($n = 23$ eventos), se observó un aumento de los valores de Q/P en ambas azoteas verdes, con un TdQ prolongado en la EGRns (Figura 9). Las respuestas del sustrato fueron similares entre las coberturas dentro de cada azotea verde, sin embargo la humedad del sustrato en la EGRws estuvo por encima de la FC local durante más eventos de lluvia (Figura 10).

En eventos con alta precipitación y relativamente baja precipitación antecedente (caso b1) ($n = 17$ eventos), se observaron valores de Q/P similares en combinación con TdQ más largos en ambas azoteas verdes (Figura 9). En estos eventos, los sustratos BV en la EGRws alcanzaron la FC en el 72% de los eventos, mientras que la humedad en las zonas BS fue menos sensible (65% en promedio). Por el contrario, los sustratos en la EGRns alcanzaron la FC durante un número similar de eventos (48-51%) (Figura 10).

Cuando se produjeron altas entradas de precipitación combinadas con precipitación antecedente alta (caso b2) ($n = 18$ eventos), ambas azoteas verdes produjeron los mayores valores Q/P ; en este caso la EGRws mostró valores más altos de Q/P promedio junto con un TdQ más corto que la EGRns (Figura 9). Las respuestas y los patrones de humedad del sustrato fueron bastante similares a los observados en el caso b1; la EGRns mostró una excedencia de la FC generalmente baja (59% de los eventos en promedio), mientras que la humedad en las

áreas BV y BS en la EGRws estuvieron por encima de la FC en el 74 y el 81% de los eventos, respectivamente (Figura 10).

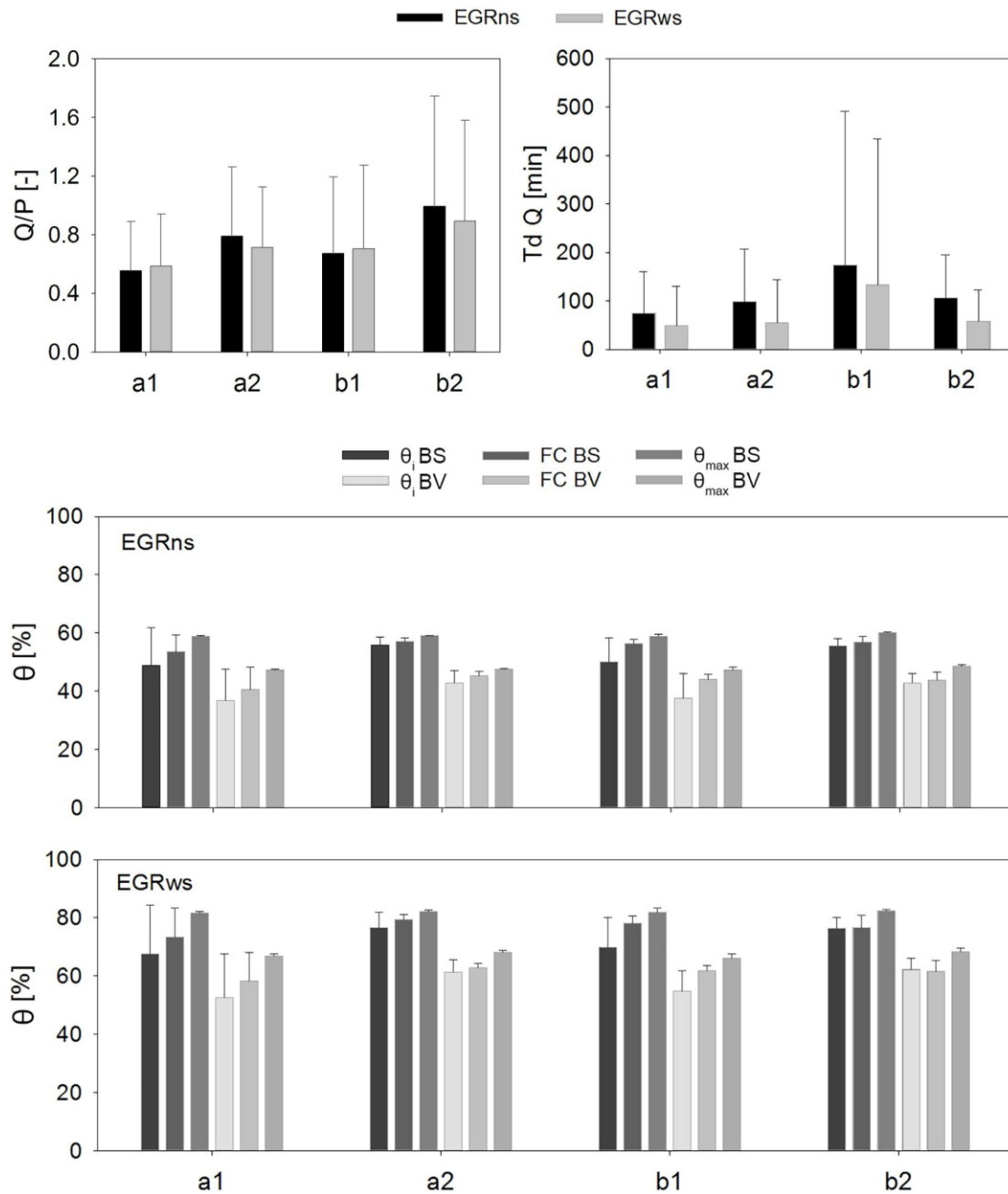


Figura 9. Promedios y desviaciones estándar de los coeficientes de escurrimiento (Q/P ; -), de los tiempos de retraso del escurrimiento (TdQ ; min), de la humedad inicial (θ_i ; %) y máxima (θ_{max} ; %) del sustrato, y del contenido de agua a capacidad de campo local (FC; %) para los

cuatro grupos de casos de eventos analizados en las EGR durante las temporadas de lluvias de 2017 y 2018.

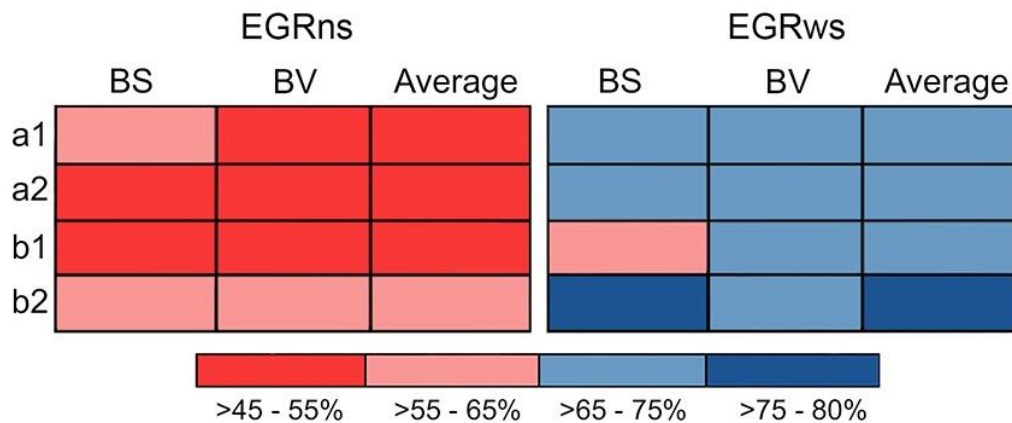


Figura 10. Frecuencia promedio de eventos (%) en los que las diferentes coberturas de sustrato (BV y BS) en las EGRs superaron su FC local para cada criterio analizado (a1, a2, b1 y b2).

Además, el flujo superficial por exceso de saturación (SEO) inferido se registró, en promedio, en el 8 al 9% de todos los eventos analizados. El menor desarrollo de este flujo se produjo en los casos a1 (0.8% en la EGRns y 2.6% en la EGRws de los eventos examinados), seguido por los casos a2 (5.0% en la EGRns y 3.4% en la EGRws). La mayor ocurrencia de SEO se detectó en los casos b1 y b2. Para los casos b2, la saturación del sustrato se produjo durante muchos más eventos en la EGRws (16.8 vs. 12.2%), mientras que en los casos b1, SEO se detectó en un número similar de eventos en ambas azoteas verdes (14.3%).

También se examinó la influencia de la cobertura del sustrato en la generación de SEO. Para los casos a1 y a2, ambas EGRs reportaron bajas ocurrencias de este flujo entre los tipos de cobertura de sustrato (< 5% de los eventos en promedio). Para los casos b1, los sustratos con vegetación en la EGRns fueron más propensos a estar saturados (>10 a 15%) en comparación con los sustratos desnudos (> 5 a 10%), mientras que la EGRws mostró

generalmente una ocurrencia más alta de saturación del sustrato entre sus coberturas de sustrato (>15 a 20%). Para los casos b2, se detectó un mayor desarrollo de SEO en los sustratos BV (>15 al 20%) en ambas azoteas verdes, en comparación con las áreas BS (>10 al 15% en la EGRns y >5 al 10% en la EGRws). En correspondencia con los resultados anteriores, la mayor área que contribuyó a la generación de SEO se registró durante los eventos b1 y b2 (en promedio: 15 y 18% del área de la EGRns y de la EGRws, respectivamente).

Por último, la Figura 11 muestra la conductividad hidráulica saturada en campo (K_{fs}) para cada una de las EGRs estudiadas. Se observa que la K_{fs} promedio fue menor en la EGRns ($351.8 \pm 275.9 \text{ mm hr}^{-1}$) que en la EGRws ($571.1 \pm 290.9 \text{ mm hr}^{-1}$) con diferencias marginalmente no significativas ($p = 0.051$). El gráfico también muestra los valores de I_{mean} (4.38 ± 5.13 , 3.59 ± 3.63 y $3.03 \pm 2.15 \text{ mm hr}^{-1}$) e I_{max} (39.03 ± 22.19 , 16.64 ± 10.38 y $10.7 \pm 6.28 \text{ mm hr}^{-1}$) calculados para intervalos de 5, 30 y 60 minutos, respectivamente. En ambas EGRs, la K_{fs} superó por mucho las intensidades de lluvia examinadas, descartando así la ocurrencia de flujo superficial por exceso de infiltración (IEO) en las azoteas verdes estudiadas. Por el contrario, el escurrimiento en la CR fue generado exclusivamente por flujo IEO debido a la casi nula permeabilidad del agua, como lo muestra la alta correlación encontrada entre P y Q (Figura 6).

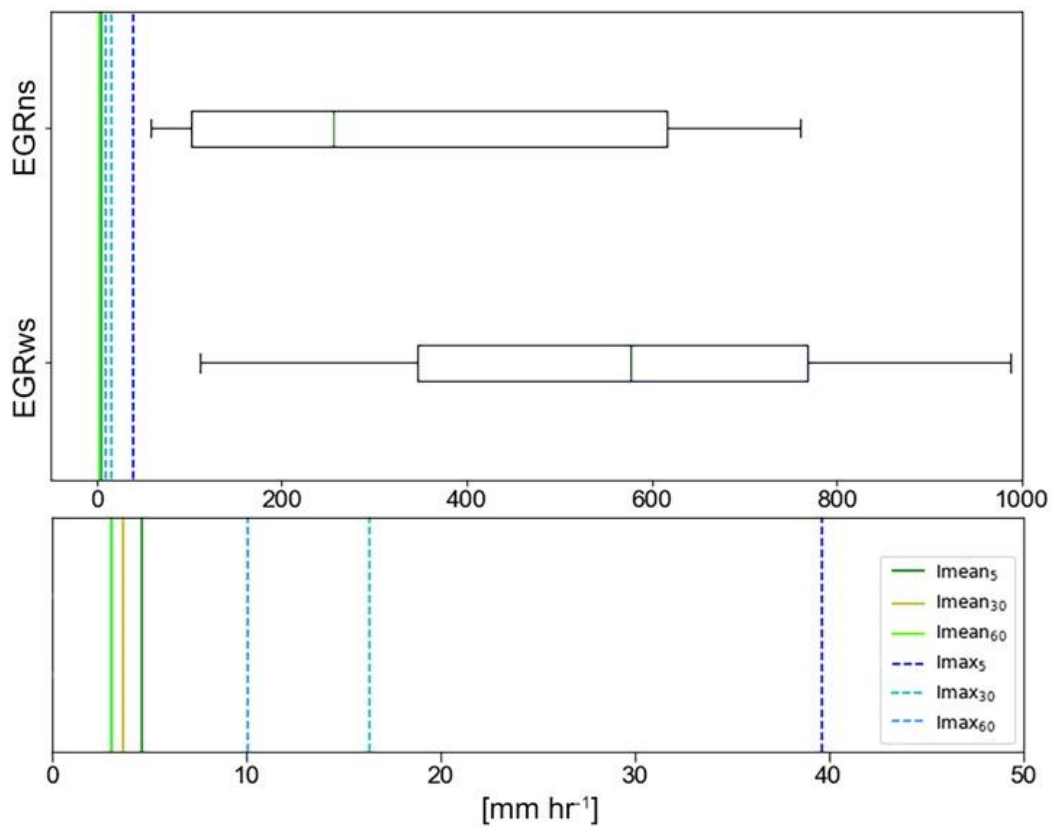


Figura 11. Conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}) para las azoteas verdes vs. las intensidades de lluvia promedio (I_{mean}) y máxima (I_{max}) observadas en las diferentes resoluciones analizadas.

2.4. Discusión

Los resultados mostraron una mayor retención de lluvia en las azoteas verdes (61%) comparado con la azotea convencional (3%), junto con mayores tiempos de retraso del escurrimiento (101 vs. 20 minutos) y tiempos de escurrimiento más prolongados una vez finalizado el evento de lluvia (340 vs. 259 minutos). La combinación de estas respuestas hidrológicas tiene el potencial de reducir fuertemente el escurrimiento pluvial y los picos de descarga, y así disminuir el riesgo de saturación y desbordamiento de los sistemas de drenaje urbanos.

Comparando con estudios previos, la capacidad de retención de la lluvia en las EGRs aquí estudiadas se encuentra dentro del rango intermedio observado (40-80%) en EGRs de climas tropicales y subtropicales: Atenas, Georgia, EUA (Carter y Rasmussen, 2006); Bogotá, Colombia (Ferrans *et al.*, 2018); Ciudad de México, México (Arellano-Leyva, 2017); Carolina del Norte, EEUU (Moran *et al.*, 2005); Auckland, Nueva Zelanda (Voyde *et al.*, 2010); Hong Kong, China (Wong y Jim, 2014); y Nanjing, China (Yin *et al.*, 2019), pero en el límite alto del rango (45-62%) reportado para EGRs de zonas templadas (Bengtsson *et al.*, 2004; Mentens *et al.*, 2006; Stovin *et al.*, 2012; VanWoert *et al.*, 2005). En cuanto a los tiempos de detención del escurrimiento pluvial, no se cuenta con información previa de azoteas verdes en los trópicos. Las comparaciones con estudios realizados en climas templados mostraron que nuestros tiempos de retraso y prolongación del escurrimiento pluvial fueron más cortos que los típicamente observados para EGRs de América del Norte (15-342 min y 180-840 min, respectivamente: DeNardo *et al.*, 2005; Getter *et al.*, 2007; VanWoert *et al.*, 2005). Esto podría sugerir que nuestras EGRs son sistemas hidrológicos más responsivos en cuanto a los tiempos de detención del escurrimiento pluvial cuando se comparan con otras EGRs similares de latitudes medias, lo cual es debido probablemente a mayores cantidades de lluvia e intensidades como suele observarse en los trópicos.

2.4.1. Retención de lluvia y detención del escurrimiento: Efecto de las características biofísicas de las azoteas verdes estudiadas

A pesar de que las azoteas verdes estudiadas fueron instaladas al mismo tiempo empleando el mismo sustrato y composición de especies vegetales, las diferencias en su uso y prácticas de manejo dieron lugar a diferencias en las propiedades hidrofísicas del sustrato y en las características de la vegetación (cf. Thuring y Dunnet, 2014). Por ejemplo, la EGRns ha experimentado un mayor recambio de vegetación en el que las plantas maduras han sido

sustituidas por otras más jóvenes, mientras que la EGRws ha tenido una intervención mínima y, por tanto presenta una vegetación estructuralmente más desarrollada. A pesar de estas modificaciones, ambas EGRs mostraron índices de área foliar muy similares, lo que sugiere una capacidad de interceptación de la lluvia comparable y, por tanto, diferencias mínimas en el almacenamiento de agua por el dosel de la vegetación y atenuación de lluvias (Berretta *et al.*, 2014). Al respecto, varios trabajos han coincidido en que el efecto de la interceptación del dosel sobre las capacidades de retención de las lluvias en las EGRs, es comparativamente menor que el efecto de la transpiración, el cual hace disminuir la humedad del sustrato en los periodos sin precipitación y así restablece (parcialmente) la capacidad de retención entre eventos de lluvia (Kemp *et al.*, 2019; Pöe *et al.*, 2015; Sims *et al.*, 2016).

La EGRns mostró sustratos más profundos (+22%), contenidos de materia orgánica más altos (+19%), y una pendiente más suave comparado con la EGRws, por lo que cabría esperar una mayor retención de lluvia y tiempos de detención del escurrimiento pluvial más largos en la EGRns. Sin embargo, las diferencias observadas entre azoteas verdes fueron mínimas y sólo significativas para la detención del escurrimiento. Es probable que una mayor porosidad del sustrato combinado con una mayor capacidad de infiltración en la superficie en la EGRws, como resultado de una menor perturbación y manejo, están contrarrestando los efectos de la profundidad del sustrato, la materia orgánica y la pendiente de la azotea. Al respecto y en condiciones controladas, el estudio realizado por Yio *et al.* (2013) en Sheffield, Reino Unido, mostró tiempos de retraso del escurrimiento más largos (de 10 a > 15 min) con el aumento de la profundidad del sustrato (de 5 a 15 cm) y el contenido de materia orgánica (de 0 a 15%) en EGRs.

Este trabajo también evaluó el efecto de cantidad e intensidad de la lluvia y el antecedente de precipitación en los volúmenes de retención de las lluvias. Los resultados

mostraron una retención similar entre las EGRs durante eventos de precipitación pequeños (< 11 mm; 80%) y grandes (11-53 mm; 30%). La diferencia más notoria observada entre las azoteas fue que la EGRns retuvo por completo el doble de los eventos de lluvia comparado con la EGRws, probablemente debido a una mayor profundidad del sustrato y pendiente más suave. Nuestros resultados son consistentes con otros estudios realizados en zonas templadas y tropicales. Por ejemplo, en el trabajo realizado por Stovin *et al.* (2015) en Sheffield, Reino Unido, llevado a cabo en plataformas cubiertas por *Sedum* con sustratos de 80 mm de espesor, los autores observaron una retención de la lluvia superior al 80% en eventos menores a 10 mm, mientras que el rango de retención obtenido en lluvias mayores a 10 mm fue mucho más amplio (27-62%). De forma similar, un estudio realizado en plataformas de EGRs con profundidades de sustrato de 80 mm en Hong Kong, reportó retenciones promedio de 84%, 46% y 17% para eventos de lluvia muy pequeños (< 2 mm), intermedios (2-10 mm) y relativamente grandes (> 10 mm), respectivamente (Wong y Jim, 2014). Basándonos en nuestros resultados y en los mencionados anteriormente, es evidente la fuerte relación que existe entre la retención de la lluvia y la cantidad de precipitación, y también que la mayor variabilidad en retenciones se ha observado hasta ahora en eventos relativamente grandes (> 10 mm) en todas las regiones.

También observamos reducciones en la retención de la lluvia conforme la intensidad promedio y el antecedente de precipitación aumentaba, sin encontrarse diferencias significativas entre las EGRs. Al respecto, Villarreal y Bengtsson (2005) llevaron a cabo un estudio en Suecia con el objetivo de evaluar varios eventos de precipitación en EGRs con pendientes similares (2 y 14°) a las nuestras, pero con profundidades de sustrato menores (4 mm) bajo condiciones de humedad inicial del sustrato contrastantes (a capacidad de campo y después de un periodo de 7 días sin lluvia). Sus resultados mostraron que en condiciones de humedad relativamente seca, la retención de la lluvia tendía a aumentar en techos con pendientes más suaves y cuando las intensidades de las tormentas eran bajas. Sin embargo, en

condiciones de sustrato más húmedo, observaron que la intensidad de la lluvia y la pendiente del techo tenían poco efecto en la retención de las EGRs.

2.4.2. Generación de escurrimiento en las azoteas verdes extensivas

Los resultados mostraron que la generación de flujo subsuperficial (SS) fue el proceso dominante y responsable de controlar la cantidad y el momento del inicio del escurrimiento en respuesta a la precipitación en las EGRs de naturación directa estudiadas durante las temporadas de lluvias (Figura 8 y 9). Esto coincide con los resultados obtenidos por Stovin *et al.* (2012) y Villarreal y Bengtsson (2005) en regiones templadas, lo que probablemente se deba a las altas porosidades y permeabilidades que caracterizan generalmente a los sistemas de azoteas verdes. A su vez, nuestros resultados contrastan con los encontrados por Liu *et al.* (2020), quienes estudiaron azoteas verdes con tres composiciones de material de sustrato y profundidades diferentes (50, 100 y 150 mm) cubiertas por diferentes tipos de vegetación. Estos autores mostraron que la saturación y flujos de agua se producían a través de la matriz de los sustratos en respuesta a cantidades de lluvia relativamente grandes (17-22 mm), sugiriendo que la generación del escurrimiento estaba dominada principalmente por mecanismos de flujo superficial por exceso de saturación (SEO).

Las respuestas hidrológicas de las azoteas verdes estudiadas en el presente trabajo se examinaron a través de una serie de casos caracterizados por ser contrastantes en cuanto a las cantidades de lluvia y precipitación antecedente. En general, los resultados mostraron un aumento en la humedad del sustrato y en el escurrimiento pluvial a medida que aumentaba la cantidad de lluvia y antecedente de precipitación (Figura 8 y 9). Por ejemplo, durante lluvias pequeñas antecedidas por condiciones de baja precipitación (caso a1), se observó que la humedad del sustrato alcanzaba la capacidad de campo (FC) local en los picos máximos de escurrimiento, lo que de alguna manera apoya los resultados de los ejercicios de modelación

obtenidos por Locatelli *et al.* (2014), quienes mostraron que el escurrimiento puede ocurrir antes de que se alcance la FC en los sistemas de azotea verde. Los valores de Q/P obtenidos fueron relativamente pequeños y similares en ambas azoteas verdes, probablemente debido a los bajos contenidos iniciales de agua del sustrato al principio de los eventos de lluvias. En estos casos, el escurrimiento fue producido en su totalidad por flujos subsuperficiales (SS) sin observarse diferencias entre las áreas cubiertas con vegetación y las áreas más expuestas.

Durante eventos de precipitación pequeños y precipitación antecedente alta (caso a2), se observaron aumentos sustanciales de los valores Q/P en ambas azoteas verdes. Los sustratos tendieron a alcanzar la FC en la fase ascendente de los hidrogramas de las lluvias, observándose una mayor respuesta en la EGRws, lo cual se atribuye a sus contenidos de humedad generalmente más altos en comparación con la azotea verde con menor pendiente (Figura 8 y 9).

Durante eventos de lluvia de gran tamaño y antecedentes de precipitación relativamente bajos (caso b1), los valores Q/P en ambas azoteas verdes fueron similares a las obtenidas en el caso a2. El escurrimiento se produjo principalmente por procesos de flujo SS, sin embargo en algunos de estos eventos, se detectó saturación del sustrato en ambas azoteas verdes generado posiblemente por flujos SEO. La estimación del área de contribución al SEO fue de ~15% en ambas azoteas verdes, en las que pudo haberse producido un estancamiento temporal del agua superficial. Desafortunadamente, no se realizaron observaciones de campo durante o después de las lluvias para tener la confirmación visual de este proceso hidrológico.

Los valores más altos de Q/P en las azoteas verdes ocurrieron durante eventos de lluvia grandes en combinación con altos antecedentes de precipitación (caso b2). En general, la respuesta hidrológica de las azoteas estuvo controlada principalmente por mecanismos de flujo SS. Los niveles más altos de humedad del sustrato observados durante estas condiciones (a

menudo cercanos a la saturación) pudieron haber promovido la generación de SS a través de vías preferenciales en el perfil de sustrato. En particular, se observó una mayor respuesta hidrológica en la EGRws, mostrando que los sustratos con escasa vegetación fueron los más propensos a desarrollar flujos por SEO en comparación con las áreas con vegetación (Figura 10). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Stovin *et al.* (2015) y Berretta *et al.* (2014) en módulos de prueba de azoteas verdes. Asimismo, la saturación del sustrato se observó con mayor frecuencia en la EGRws, posiblemente debido a una mayor pendiente y a un contenido de humedad del sustrato generalmente más alto favoreciendo su rápida saturación.

Este trabajo también demostró que las tasas de infiltración en los primeros 5 cm del sustrato en las EGRs fueron mucho más altas que las intensidades máximas de lluvia observadas, descartando la ocurrencia de un flujo por exceso de infiltración (IEO) durante los eventos de precipitación-escurrimiento en las temporadas de lluvias. A este respecto, este trabajo utilizó métodos comparables a los de Fassman y Simcock (2012) para medir las conductividades hidráulicas saturadas en la capa superficial del sustrato en campo. Los resultados mostraron una gran variabilidad en las conductividades hidráulicas del sustrato al interior de cada azotea verde (Figura 11), que podría atribuirse a la presencia o ausencia de raíces de las plantas, a la compactación *in situ* del sustrato y a la variabilidad en la composición del mismo, lo que conduce a cambios en las propiedades hidrofísicas locales de los sustratos (Fassman y Simcock, 2012; Stovin *et al.* 2015 y sus referencias), y que no es del todo sorprendente encontrar en azoteas verdes de edad madura y bien establecidas como las aquí estudiadas.

2.5. Conclusiones

Este estudio proporciona información de referencia acerca de los procesos de generación de escurrimiento en azoteas verdes extensivas de aproximadamente 20 años de edad,

caracterizadas por varias especies vegetales, distinta pendiente y prácticas de manejo en la Ciudad de México. Dentro de cada azotea verde, la influencia de las áreas con y sin vegetación dio lugar a diferencias espaciales en las propiedades hidrofísicas de los sustratos. En consecuencia, se encontraron mayores densidades aparentes y mayores variaciones en los contenidos de humedad a nivel diario en las áreas de sustrato desnudo comparado con las áreas cubiertas por vegetación a lo largo de las temporadas de lluvias. De manera general, se observaron mayores incrementos en la humedad del sustrato y volúmenes de escurrimiento durante los eventos de lluvia en la azotea verde con mayor inclinación (14°). El escurrimiento pluvial estuvo controlado principalmente por procesos de flujo subsuperficial atribuido a la alta permeabilidad que caracteriza a las azoteas verdes estudiadas. El desarrollo de flujos superficiales por saturación del sustrato fue pequeño y detectado principalmente cuando se produjeron eventos de alta precipitación y alta precipitación antecedente. En estas condiciones de evento, la azotea con mayor inclinación mostró la menor retención de la lluvia y tiempos de detención del escurrimiento pluvial más cortos, debido probablemente a sustratos menos profundos, contenidos de humedad generalmente más altos y mayor pendiente. En esta misma azotea verde, las áreas de sustrato desnudo fueron más propensas a saturarse que las áreas con vegetación. Finalmente, nos gustaría hacer un llamado para que se realicen más estudios enfocados a evaluar los efectos de la heterogeneidad espacial sobre los procesos hidrológicos que operan dentro de las azoteas verdes, ya que es importante para entender mejor el desempeño general de los sistemas de azoteas verdes envejecidos y bien establecidos, y que éstos sean representados adecuadamente en los modelos hidrológicos.

CAPÍTULO III

Evaporación de dosel seco y húmedo de azoteas verdes extensivas maduras durante las temporadas de lluvias y secas

La evapotranspiración (ET) es un factor clave en los beneficios hidrológicos de las azoteas verdes, ya que contribuye a remover y reciclar el agua, aportando humedad a la atmósfera y restaurando su capacidad de retención entre eventos de lluvia. A la fecha, la mayoría de las cuantificaciones de ET se han realizado en sistemas modulares jóvenes de EGR durante condiciones secas en zonas templadas, sin considerar el componente de interceptación de la lluvia por parte del dosel de la vegetación. En este contexto, el presente capítulo estima la ET total (en condiciones de dosel seco y húmedo) de dos azoteas verdes extensivas en la Ciudad de México, durante las temporadas de lluvias y secas comprendidas entre mayo 2017 y diciembre 2018.

3.1. Dinámica hídrica y evapotranspiración (ET) en azoteas verdes

La capacidad para almacenar la precipitación y retrasar el escurrimiento pluvial es uno de los beneficios hidrológicos más importantes y ampliamente reportados en la literatura científica de las azoteas verdes (Arellano-Leyva *et al.*, 2021; Hakimdavar *et al.*, 2014; Loiola *et al.*, 2019; Stovin *et al.*, 2012). Durante y después de un evento de lluvia, una porción del agua es interceptada y almacenada en la superficie de la vegetación (sin gotear al suelo) para regresar a la atmósfera a través del proceso de evaporación (González-Martínez y Holwerda, 2018; Poë *et al.*, 2015). El agua que se infiltra en el sustrato y supera la capacidad de almacenamiento de la azotea verde se convierte en flujo y escurrimiento (Stovin *et al.*, 2013; Voyde *et al.*, 2010); mientras que la porción restante se retiene en el sustrato para regresar a la atmósfera mediante la transpiración de las plantas y evaporación del suelo durante los períodos secos sin lluvia. De esta manera, se restaura parcial o totalmente la capacidad de almacenamiento de agua del

sustrato para el siguiente evento de lluvia, contribuyendo a su retención en conjunto con la interceptación (Jahanfar *et al.*, 2018; Poë *et al.*, 2015; Voyde *et al.*, 2010).

Con respecto a la estimación de la evapotranspiración (ET) se han empleado varias metodologías utilizando datos meteorológicos, modelos sencillos que requieren pocos datos como el de Thornthwaite (1948) que utiliza la temperatura, y el de Priestley-Taylor (1972) basado en la radiación solar, o bien modelos más complejos derivados a partir de las ecuaciones aerodinámicas para el flujo de calor latente y sensible, y el balance de energía, como el de Penman-Monteith (1965) que requieren más datos. El método de Penman-Monteith de la FAO relaciona las estimaciones de ET con las condiciones meteorológicas, la estructura y el tipo de vegetación del sitio, aunque originalmente fue desarrollado para calcular la ET de superficies agrícolas, es uno de los métodos mayormente empleados para predecir la ET en azoteas verdes (DiGiovanni *et al.*, 2013; Feng *et al.*, 2018; Jahanfar *et al.*, 2018; Marasco *et al.*, 2015; Poë *et al.*, 2015), ya que ha mostrado buenos resultados (Hilten, 2005; Scherrard y Jacobs, 2012; Schneider, 2011). Así también, varios estudios han demostrado que este último método tiene la capacidad de realizar buenas predicciones, si se contempla el coeficiente de cultivo y/o funciones de respuesta para corregir la evapotranspiración de referencia (ET_0) con respecto a las características de la vegetación y las condiciones de humedad prevalecientes (Feng *et al.*, 2018; Jahanfar *et al.*, 2018; Schneider *et al.*, 2011; Sherrard y Jacobs, 2012; Stovin *et al.*, 2013). Sin embargo, algunos estudios han reportado que el método de la FAO subestima la ET en las azoteas verdes, especialmente durante los períodos secos (Jahanfar *et al.*, 2018; Marasco *et al.*, 2014).

De acuerdo con Guderle y colaboradores (2015), la ET se puede estimar también de manera indirecta utilizando series de lluvia y cambios en el contenido de agua del suelo entre dos tiempos de observación. De hecho, la mayoría de los trabajos consultados estiman la ET

durante períodos secos mediante registros de contenido de humedad en el sustrato (Berretta *et al.*, 2014; Stovin *et al.*, 2013), lisímetros de pesaje (DiGiovanni *et al.*, 2013; Schneider *et al.*, 2011) o célula de carga (Voyde *et al.*, 2010; Poë *et al.*, 2015) para monitorear las pérdidas de humedad en sistemas modulares y en condiciones controladas generalmente, evaluando su desempeño en situaciones con y sin limitaciones de agua.

En general, existe poca investigación sobre los factores que controlan la ET en azoteas verdes maduras. De-Ville y colaboradores (2017) estudiaron el rendimiento de retención en sustratos relativamente envejecidos (5 años) a través de una técnica no invasiva. En su estudio encontraron un aumento significativo de los contenidos de humedad con la edad, que se atribuyeron al cambio a tamaños de poros más pequeños dentro de la matriz del sustrato. Sin embargo, los cambios observados en la retención de lluvia a causa del incremento en el contenido de humedad con la edad fueron un orden de magnitud menor que las diferencias de retención debido a variaciones estacionales en la ET. Por su parte, el trabajo de Mobilia y colaboradores (2017) es de los pocos que estiman la ET mediante el uso de relaciones empíricas en una EGR de naturación directa (22 m²) con una pendiente de 5° y 150 mm de profundidad de sustrato, caracterizada por plantas del género *Sedum* y con vegetación anual.

Las EGRs son generalmente plantadas con vegetación resistente a las sequías y a altos índices de radiación. Las especies del género *Sedum* son las más recurrentes en este tipo de azoteas verdes por sus estrategias de adaptación a condiciones de baja disponibilidad de agua. Sin embargo, estas características también pueden implicar una menor transpiración y contribución en la recuperación de la capacidad de almacenamiento del sustrato entre los eventos de lluvia, y por lo tanto, una menor retención pluvial (Farrell *et al.*, 2013). En este sentido, Voyde y otros (2010) evaluaron la influencia de las estrategias de consumo de agua y metabolismo de las plantas en la ET. Para ello, estudiaron dos especies vegetales en sistemas

modulares de azoteas verde dentro de invernadero y encontraron que la transpiración de *Sedum mexicanum* Britton con metabolismo CAM y *Disphyma australe* (W. T. Aiton) con metabolismo C3, contribuyeron casi el 50% de la ET total en condiciones sin limitación de agua; mientras que en condiciones de muy baja disponibilidad de agua, *S. mexicanum* mostró estrategias para conservar más el agua reduciendo sus tasas de ET, proporcionándole un tiempo de vida más largo que *D. australe*.

Algunos trabajos afirman que la interceptación de la lluvia por la vegetación es un componente importante en los procesos de retención de agua (Voyde *et al.*, 2010), sin embargo, hasta la fecha sigue siendo un parámetro sin explorar. Asimismo, el índice de área foliar (LAI), característica importante de la estructura de la vegetación, se incluye pocas veces en las estimaciones de la ET (Cascone *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019). El LAI es un parámetro importante de la ET porque determina 1) la cantidad de precipitación que es interceptada por el dosel y se evapora rápidamente tras una lluvia y 2) el tamaño de la superficie transpirante (Lambers *et al.*, 1998). Los valores del LAI de las azoteas verdes son dependientes de la fase de crecimiento y del tipo de vegetación, por lo que varían significativamente a lo largo del tiempo (Cascone *et al.*, 2019); sin embargo, en algunos trabajos lo consideran como un valor constante (cf. Li *et al.*, 2019). La fase de desarrollo de la vegetación tiene una influencia importante en las tasas de consumo de agua. Cuando el desarrollo de la vegetación (LAI) es bajo, el agua se pierde principalmente por evaporación del suelo, y una vez que la cubierta vegetal se desarrolla su tasa de consumo de agua (transpiración y evaporación del dosel húmedo) aumenta (Cascone *et al.* 2019; Tabares-Velasco y Srebric, 2011). Por lo tanto, estimaciones de ET real sin tomar en cuenta la interceptación de la lluvia y LAI, podrían estar subestimadas en los sistemas de azoteas verdes.

3.2. Métodos

3.2.1. Descripción de las azoteas verdes

Se estudiaron dos EGRs, ambas ubicadas en el edificio del Área de colecciones del Jardín Botánico de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) campus Ciudad Universitaria, en la ciudad de México. En el sitio de estudio se distinguen dos temporadas en el año, un periodo de lluvias que se concentra en los meses de mayo a octubre y representa aproximadamente el 80% de la precipitación total anual (Bravo *et al.*, 2014), y una época de secas que comprende de noviembre a abril. Los meses mayo y noviembre se consideran meses de transición de la temporada seca a la de lluvias y viceversa.

Las EGRs investigadas poseen diferentes características biofísicas mencionadas en el capítulo II. Las propiedades y la distribución de los tamaños de partículas del sustrato de las EGRs tomadas en cuenta en este capítulo se muestran en la Tabla 2. Entre las diferencias más importantes a destacar están la densidad aparente (DA) y la proporción de grava y arena.

Tabla 2. Propiedades y distribución de partículas del sustrato en las EGRs estudiadas (valores promedio, mínimos y máximos observados).

	EGRns	EGRws
DA [g cm ⁻³]	0.63 (0.48-0.74)	0.85 (0.76-0.97)
CC [%] LAB	38 (15-62)	29 (16-43)
MO [%]	15 (15-16)	12 (11-14)
Profundidad del sustrato [mm]	132 (89-156)	103 (66-142)
Proporción de las partículas de grava [%]	33 (15-18)	64 (5-80)
Proporción de las partículas de arena [%]	50 (4-14)	23 (1-11)

Proporción de las partículas de limo [%]	9 (1-3)	8 (0.3-4)
Proporción de las partículas de arcilla [%]	8 (7-9)	5 (2-9)

En cuanto a la vegetación, la EGRns presenta una mayor variedad de géneros con una altura promedio de la vegetación de 45 cm; mientras que en la EGRws la altura promedio de la vegetación es de 72 cm. Cabe mencionar que durante la temporada de lluvias, se instalan y crecen plantas anuales en ambas azoteas verdes. Por lo tanto, se distinguieron dos tipos de cobertura vegetal en cada EGR: 1) vegetación perenne (vg) y 2) vegetación anual o escasa vegetación (sp).

3.2.2. Mediciones en campo

El período de estudio tuvo una duración de 18 meses (del 30 de mayo de 2017 al 13 de diciembre de 2018) abarcando dos temporadas de lluvias, definidas del 15 de mayo al 31 de octubre, y una temporada seca comprendida del 1 de noviembre al 14 de mayo.

3.2.2.1. Variables meteorológicas

Las variables meteorológicas se obtuvieron a partir de los datos registrados por la estación del Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU) del Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur (CCH-Sur) localizada a ~930 m al noreste del sitio de estudio, y de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC-RUOA) ubicada a ~2 km al suroeste del sitio de estudio; ambas estaciones pertenecen a la Universidad Nacional Autónoma de México y las mediciones fueron realizadas desde torres ubicadas en techos de edificaciones.

Los datos de la radiación de onda corta (S_{in} , $W m^{-2}$) y velocidad del viento (U ; $m s^{-1}$) se obtuvieron del ICAYCC-RUOA (<https://www.ruoa.unam.mx/index.php?page=home>), los faltantes de datos fueron completados con observaciones de la estación del CCH-Sur. La información de temperatura (T , $^{\circ}C$), humedad relativa (HR, %) y presión atmosférica (hPa) se obtuvieron del CCH-Sur (https://www.ruoa.unam.mx/pembu/index.php?page=creditos_pembu). Todos los datos de las variables meteorológicas se obtuvieron a una resolución de 30 min y se analizaron a una resolución horaria y diaria para el presente estudio.

La precipitación (P , mm) se registró en intervalos de 5 min durante el período investigado utilizando un pluviómetro de balancín marca HOBO RG3-M (Onset, EUA; resolución de 0.2 mm) colocado en el sitio de estudio (1.20 m por encima del nivel del sustrato). Los datos se analizaron también a una resolución horaria y diaria. Los eventos de lluvia se definieron como períodos con una $P \geq 1$ mm, separados por un período sin lluvia ≥ 6 hr (Driscoll *et al.*, 1989; NOAA 2007; Voyde *et al.*, 2010; Wong y Jim, 2014).

3.2.2.2. Vegetación y cambios en cobertura

La vegetación en las EGRs muestra cambios estacionales marcados particularmente por el establecimiento de especies anuales durante la temporada de lluvias. Por tanto, el índice de área foliar (LAI; $m^2 m^{-2}$) fue medido mensualmente de 12:00-15:00 hrs durante un año (septiembre 2017 a 2018, excepto julio) a partir de la radiación fotosintéticamente activa por encima y debajo del dosel utilizando un ceptómetro AccuPAR modelo LP-80 (Decagon, EUA). Por muestreo, se realizaron 10 mediciones de radiación solar incidente y 15 mediciones con cinco repeticiones por sitio de radiación fotosintéticamente activa (PAR) sin distinguir entre coberturas vegetales (vg y sp) para cada EGR. Los datos de LAI se asignaron a la temporada de lluvias o seca de acuerdo al mes correspondiente.

A la par, los cambios en la cobertura vegetal en las EGRs fueron monitoreados mensualmente a lo largo de un año (agosto 2017 a 2018) por medio de fotografías aéreas tomadas con un dron DJI Phantom 4pro. Sin embargo, debido a la baja resolución de algunas fotografías sólo fue posible usar cinco y seis meses para la EGRns y EGRws respectivamente, de los cuales dos y tres meses corresponden a la temporada de lluvias, respectivamente, y tres meses a la temporada de secas. Se utilizó el software QGIS 3.10 para crear una capa ráster sobre las fotografías, georreferirlas y determinar los polígonos correspondientes a las coberturas vg y sp en cada EGR. Finalmente se sumaron dichos polígonos para calcular el área (m^2), el porcentaje total (%) y cuantificar la fracción de cobertura (k) de cada cobertura (vg y sp) por azotea verde.

Para completar los datos faltantes de LAI y cobertura vegetal durante el período de un año (de enero a diciembre) se realizaron interpolaciones lineales, y para abarcar el periodo completo de estudio (mayo de 2017 a diciembre de 2018) se asignó a los meses duplicados las mismas mediciones, considerando que de un año a otro los valores son similares.

3.2.2.3. Contenido de humedad en sustratos

El contenido de humedad en el sustrato (SWC) se registró instalando horizontalmente 14 sensores de capacitancia modelo 10HS-Soil Moisture Sensor (Decagon, EUA) a una profundidad de 5 cm abarcando las dos coberturas vegetales (vg y sp) en cada EGR. Las lecturas se registraron en intervalos de 5 min utilizando un datalogger Em50 marca Decagon, EUA. Los contenidos de humedad se obtuvieron a partir de la ecuación de calibración de sensores estándar para suelos minerales del Manual 10HS proporcionada por el fabricante [Ec. 5, capítulo II].

3.2.3. Determinación de la evapotranspiración (ET)

Para cada azotea verde, la ET diaria se determinó como la suma de la ET durante condiciones de dosel seco y la interceptación (I) de la lluvia por el dosel de la vegetación modelada. Para ello, se asumió que las condiciones de dosel seco comenzaban 3 h después del último registro de P de cada evento de lluvia y terminaban al primer registro de P del siguiente evento; mientras que las condiciones saturadas del dosel fueron definidas para las horas con una $P > 0.5$ mm extendido a un período de 3 h después del fin de la lluvia (Gash, 1979; González-Martínez y Holwerda, 2018), y sobre este conjunto de horas la evaporación del dosel húmedo fue calculada.

3.2.3.1. Modelo de ET para condiciones de dosel seco

Durante condiciones de dosel seco, la ET se estimó utilizando la ecuación 6 para cada una de las coberturas (vg y sp) en ambas azoteas verdes:

$$ET = K_c * f(LAI) * f(SWC) * ET_0$$

[Ec. 6]

donde ET_0 es la evapotranspiración del cultivo de referencia y su valor corresponde a las horas bajo condiciones de dosel seco, K_c es el coeficiente de cultivo que relaciona la ET real con la ET_0 en condiciones óptimas, es decir, cuando todas las funciones de respuesta tienen un valor igual a 1. Las funciones de respuesta se usaron para corregir la ET_0 con respecto a la densidad de la vegetación (LAI) y la humedad del sustrato (SWC) en el cálculo de la ET real. Estas funciones de respuesta están dadas por:

$$f(LAI) = \left(\frac{LAI}{LAI_{max}} \right)$$

[Ec. 7]

$$f(SWC) = \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right)$$

[Ec. 8]

$$f(SWC) = \left(\frac{\theta - \theta_{wp}}{\theta_{cr} - \theta_{wp}} \right)$$

[Ec. 9]

donde $f(LAI)$ indica la relación entre el índice de área foliar mensual real y el índice de área foliar máximo registrado durante todo el período de estudio (mayo 2017 a diciembre 2018) para cada una de las EGRs. Se usó la misma $f(LAI)$ para ambas condiciones de cobertura (vg y sp), dado que el muestreo no permitió separar por tipo de cobertura. Con la finalidad de establecer la función de humedad del sustrato que mejor representará la relación de la ET con la humedad del sustrato para ambas EGRs, se probaron dos $f(SWC)$: la función lineal (Ec. 8) y la escalonada (Ec. 9), ambas fueron parametrizadas por separado para cada tipo de cobertura y sus variables se explican a continuación. Cabe aclarar que en ambas funciones se utilizó el promedio diario del contenido volumétrico de agua del sustrato observado.

La función lineal, que ha sido empleada por varios estudios (Berretta *et al.*, 2014; Stovin *et al.*, 2013), asume una disminución instantánea de la ET cuando la humedad del sustrato (θ) está por debajo de su capacidad de campo (θ_{FC}), sin embargo en este estudio ese valor se sustituyó por el contenido volumétrico de agua máximo observado en el sustrato (θ_{max}), considerando todos los días secos (excluyendo el primer día después de un evento de lluvia) que se utilizaron para la calibración de los modelos de cada una de las EGRs y coberturas vegetales. La estimación de la ET utilizando la función lineal, expresa la ecuación 6 de la siguiente manera:

$$ET = K_c * \left(\frac{LAI}{LAI_{max}} \right) * \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right) * ET_0$$

[Ec. 10]

Por otra parte, la función escalonada asume que la ET disminuye cuando la humedad del sustrato está por debajo de un punto crítico (θ_{cr}), donde θ corresponde al contenido volumétrico de agua real del sustrato, θ_{cr} es equivalente al punto crítico de contenido volumétrico de agua y θ_{wp} toma el valor del contenido volumétrico de agua al punto de marchitez permanente. θ_{cr} y θ_{wp} se obtuvieron mediante una optimización no lineal como se explica más adelante en esta sección. La estimación de la ET utilizando la función escalonada, expresa la ecuación 6 de la siguiente manera:

$$ET = K_c * \left(\frac{LAI}{LAI_{max}} \right) * \left(\frac{\theta - \theta_{wp}}{\theta_{cr} - \theta_{wp}} \right) * ET_0$$

[Ec. 11]

Los modelos lineal y escalonado, designados según la función de humedad del sustrato que emplearon, se calibraron y validaron utilizando las estimaciones de la ET que se obtuvieron a partir del método de agotamiento de agua del sustrato para los días secos. Definiendo como días secos todos aquellos días sin lluvia con excepción del primer día seco después de un evento de lluvia, considerando que el escurrimiento pluvial ocurre durante las primeras 24 horas una vez finalizado el evento de precipitación (Arellano-Leyva *et al.*, 2021). Los cambios en el contenido de humedad del sustrato ($\Delta\theta$) durante los días secos a lo largo del período de estudio (mayo 2017 a diciembre 2018) que se utilizaron para estimar la ET diaria (mm d^{-1}) por cobertura vegetal y azotea verde, se determinaron con las siguientes ecuaciones:

$$\Delta\theta \left(\frac{m^3}{m^3} \right) = \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{100}$$

[Ec.12]

$$ET \left(\frac{mm}{d} \right) = \Delta\theta * z_r$$

[Ec.13]

donde θ_i es el contenido volumétrico de humedad promedio entre las 00:00 y 2:00 hrs en el día inicial (i), θ_{i+1} es el contenido volumétrico de humedad promedio entre las 00:00 y 2:00 hrs en el día i+1, y z_r es la profundidad del sustrato de la azotea verde (103 mm para la EGRws y 132 mm para la EGRns).

Para la calibración de los modelos se utilizó el 33% de los datos de los días secos, que fueron seleccionados cada 3er día comenzando desde el 1er día sin lluvia; mientras que, los días secos restantes (67%) se usaron para validar los modelos. A partir de los días de calibración, se hizo un ajuste no lineal por mínimos cuadrados para calcular los residuales entre la ET observada y la ET de los modelos para cada una de las EGRs y coberturas vegetales (vg y sp) utilizando el la función *scipy.optimize* del programa de acceso libre Python. Posteriormente, se optimizó el parámetro K_c en el modelo lineal y los parámetros K_c , θ_{cr} y θ_{wp} en el modelo escalonado (Tabla 3).

Los modelos se validaron por medio de regresiones lineales usando como variable x la estimación de ET de los modelos y como la variable y la ET medida con el método de agotamiento de agua del sustrato para cada EGR y cobertura vegetal. El desempeño de los modelos se evaluó mediante estadística cuantitativa, utilizando como métrica la raíz del error cuadrático medio (RMSE) que representa la desviación media de los valores predichos con respecto a los observados en las mismas unidades que los modelos evaluados:

$$RMSE (mm d^{-1}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

[Ec.14]

donde \hat{y} es la ET estimada por los modelos y y la ET observada.

También se determinó el error cuadrático medio normalizado (NRMSE) que relaciona el RMSE con \bar{y} , la media de la ET observada:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}}$$

[Ec.15]

La evapotranspiración de referencia (ET_0) se definió y calculó con el método de Penman-Monteith de la FAO56 (Allen *et al.*, 1998) utilizando datos meteorológicos y coeficientes de un cultivo hipotético de pasto de poca altura (12 cm) que crece en un suelo natural profundo y sin limitación de agua (bien regado). Adicionalmente, se corrigieron los datos de la radiación solar incidente por el efecto de la pendiente y orientación de las azoteas verdes, siendo para la EGRns de 2° con orientación este; mientras que para la EGRws fue de 14° con orientación norte. Para más detalles consultar el Apéndice.

3.2.3.2. Modelo de interceptación de la lluvia

La interceptación de la lluvia por el dosel (I , mm) en las EGRs estudiadas se estimó a nivel de evento de lluvia utilizando el modelo de interceptación de Liu (2001):

$$I \text{ (mm evento}^{-1}\text{)} = C_m \left[1 - \exp\left(-\frac{k}{C_m} P\right) \right] \left[1 - \frac{\bar{E}}{kR} \right] + \frac{\bar{E}}{R} P$$

[Ec. 16]

donde C_m es la capacidad de almacenamiento del dosel (mm), k es igual a la fracción de cobertura del dosel, es decir que $k = 1-p$, donde p es la fracción expuesta del dosel (Liu, 2001), \bar{E}/\bar{R} es la relación entre la tasa promedio de evaporación del dosel húmedo (\bar{E} , mm h⁻¹) y la intensidad promedio de las precipitaciones (\bar{R} , mm h⁻¹) correspondiente a cada temporada, lluvias y seca, y P es la precipitación total del evento (mm evento⁻¹).

El parámetro C_m se determinó a partir de los datos mensuales de LAI de ambas coberturas vegetales para cada EGR, la densidad del agua (1 kg L^{-1}) y un valor fijo consultado en bibliografía de 0.092 kg m^{-2} para la capacidad de almacenamiento específica del dosel (S) de *H. scoparium* Pomel, un arbusto xerófilo perenne (Wang *et al.*, 2012), dado que no se realizaron mediciones en campo y tampoco se hallaron datos para el tipo de vegetación perenne dominante de las EGRs estudiadas (*Sedum sp.*, *Agave sp.* Y *Opuntia sp.*) en la bibliografía consultada.

La evaporación promedio del dosel húmedo (\bar{E} , mm h^{-1}) en las EGRs y la intensidad promedio de las precipitaciones (\bar{R} , mm h^{-1}) se calcularon a partir de datos meteorológicos utilizando la ecuación de Penman durante condiciones de dosel húmedo (cf. González-Martínez y Holwerda, 2018; Rutter *et al.*, 1972). Se asumió que las mediciones de temperatura, humedad y velocidad del viento realizadas en las estaciones meteorológicas eran representativas de las condiciones a 2 metros por encima de la vegetación en las EGRs estudiadas. La radiación neta se estimó a partir de la radiación solar incidente (W m^{-2}), considerando una radiación de onda larga neta nula y un valor fijo de 0.28 para el albedo reportado en bibliografía por Marasco (2014). El flujo del calor en el suelo se asumió como cero. La resistencia aerodinámica (r_a) se estimó a partir de la ecuación de transferencia de momento en condiciones neutrales de estabilidad para cada una de las EGRs.

La estimación de las pérdidas diarias debido a la interceptación de la lluvia por el dosel (mm d^{-1}) se calcularon sumando las pérdidas de I por evento de lluvia (mm evento^{-1}) asignadas a un mismo día.

3.2.3.3. Determinación de la ET total

La estimación diaria de la ET total para cada una de las EGRs se calculó a partir de fracciones fijas de cobertura vegetal (k), la estimación de la ET para cada EGR y cobertura vegetal en

condiciones de dosel seco con el modelo escalonado, que representó mejor la relación de la ET con la humedad del sustrato, y las pérdidas de agua diarias debido a la interceptación de la lluvia por el dosel vegetal para cada EGR:

$$ET_{total} = k_{vg} * ET_{vg} + k_{sp} * ET_{sp} + I$$

[Ec. 17]

en el que k representa la fracción promedio de cobertura del mes de enero y diciembre para la vegetación perenne (k_{vg}) y la vegetación anual o escasa vegetación (k_{sp}).

3.3. Resultados

3.3.1. Precipitación

La precipitación (P) registrada durante las temporadas de lluvias de 2017 y 2018 fue de 996 y 1118 mm respectivamente, y de 79 mm durante la época seca. La P promedio mensual fue de 208 ± 101 (DE) mm en las temporadas de lluvias y de 10 ± 9 mm en la estación seca. La P promedio diaria fue de 6.5 ± 11 mm para las temporadas de lluvias con máximos diarios de hasta 82 mm, observados en el mes de agosto 2018. En la estación seca, la P promedio diaria fue de 0.4 ± 2 mm con acumulados diarios de hasta 15 mm registrados en el mes de marzo 2018 (Figura 12a).

3.3.2. Cambios estacionales en la cobertura de la vegetación

A lo largo de un año (enero a diciembre), el área bajo vegetación perenne (vg) cubrió el 91% y 51% de la superficie total de la EGRns en las temporadas de lluvias y de secas, respectivamente; mientras que en la EGRws la cobertura vg representó el 86% y 62% para cada temporada, respectivamente. Lo anterior sin considerar los meses de transición entre estaciones, en el cual mayo y noviembre mostraron una cobertura vg comparable entre azoteas

verdes equivalente al 62% y 79% en la EGRns y del 57% y 79% en la EGRws, respectivamente (Figura 12c).

El LAI promedio en la temporada de lluvias y seca fue ligeramente más alto en la EGRns (3.6 y 3.1, respectivamente) con respecto a la EGRws (3.3 y 2.8). Para los meses de transición, el LAI fue también comparable (2.9 y 3.9 en la EGRns y de 2.6 y 3.4 en la EGRws) (Figura 12c). Adicionalmente se muestra la variación temporal en la cobertura vegetal de las EGRs (Figura 13) y el verdor observado en la vegetación durante los recorridos de campo (Figura 12, barras inferiores horizontales), en los que se puede distinguir el crecimiento de la vegetación anual y la recuperación en la turgencia de las hojas de las especies perennes a lo largo de la temporada de lluvias hasta alcanzar su máxima altura (1.5 m), cobertura y biomasa vegetal en el año (meses de septiembre y octubre). Así mismo se observa el período de mayor floración, principalmente de las especies anuales. Una vez que finaliza la temporada de lluvias, las especies anuales de hoja decidua comienzan a marchitarse y perder sus hojas dejando únicamente tallos desnudos y secos. Esta disminución en cobertura vegetal se extiende durante la temporada seca hasta desaparecer y dejar áreas con sustrato expuesto en ambas EGRs. En cambio, la vegetación perenne muestra una menor variación estacional considerando que al inicio de la época seca las especies del género *Sedum* florecen; en general estas plantas comienzan a disminuir su turgencia en hojas, y en menor proporción hojas senescentes e internodos estrechos y leñosos para finales de la época seca.

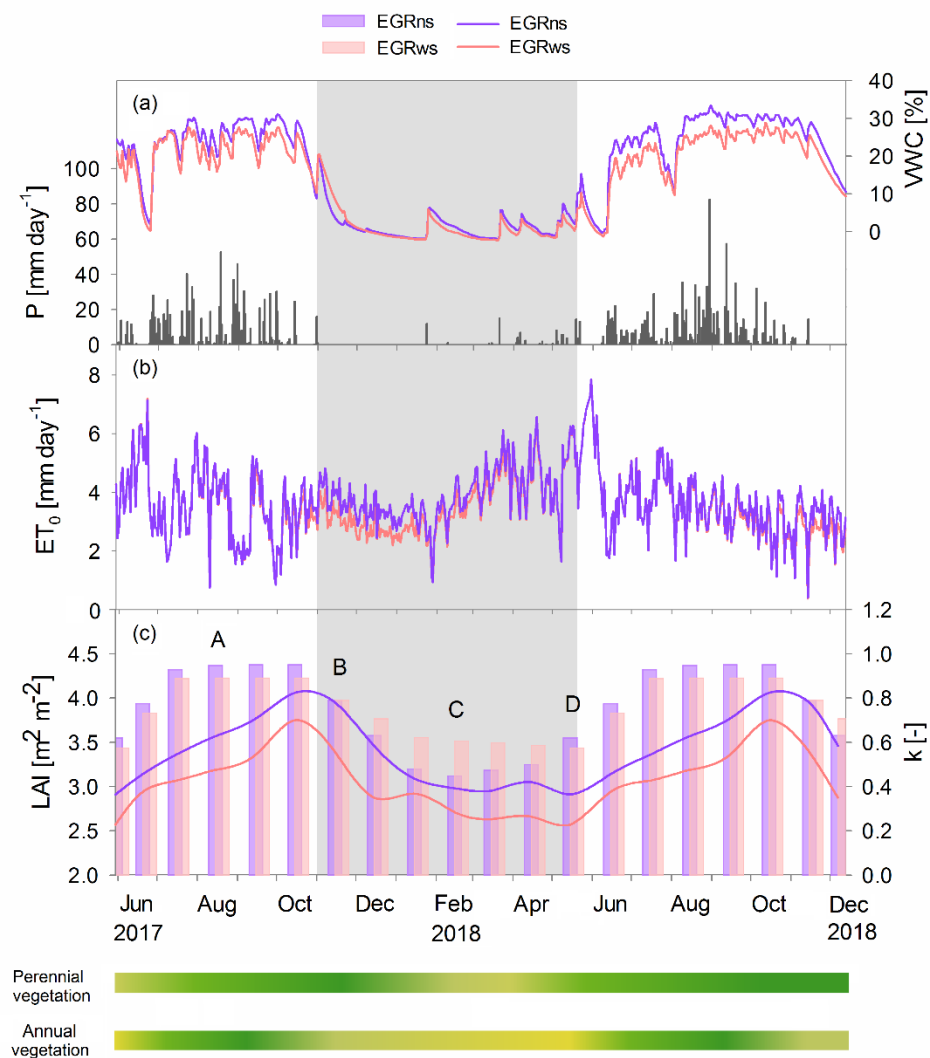


Figura 12. Promedios diarios de (a) precipitación P (barras negras) y contenido volumétrico de humedad del sustrato (líneas de color); (b) ET_0 referencia de Penman-Monteith de la FAO56; e (c) índice de área foliar LAI (líneas) y fracción de la cobertura del dosel k (barras) para la azotea verde sin pendiente EGRns (violeta) y azotea verde con mayor pendiente EGRws (magenta) durante mayo 2017 a diciembre 2018. El área gris indica la temporada de secas. Se muestra también los períodos de crecimiento vegetal (verde) y marchitamiento (amarillo) en la vegetación perenne y anual (barras horizontales inferiores). Las letras mayúsculas corresponden a los cambios en la cobertura vegetal de la Figura 13.

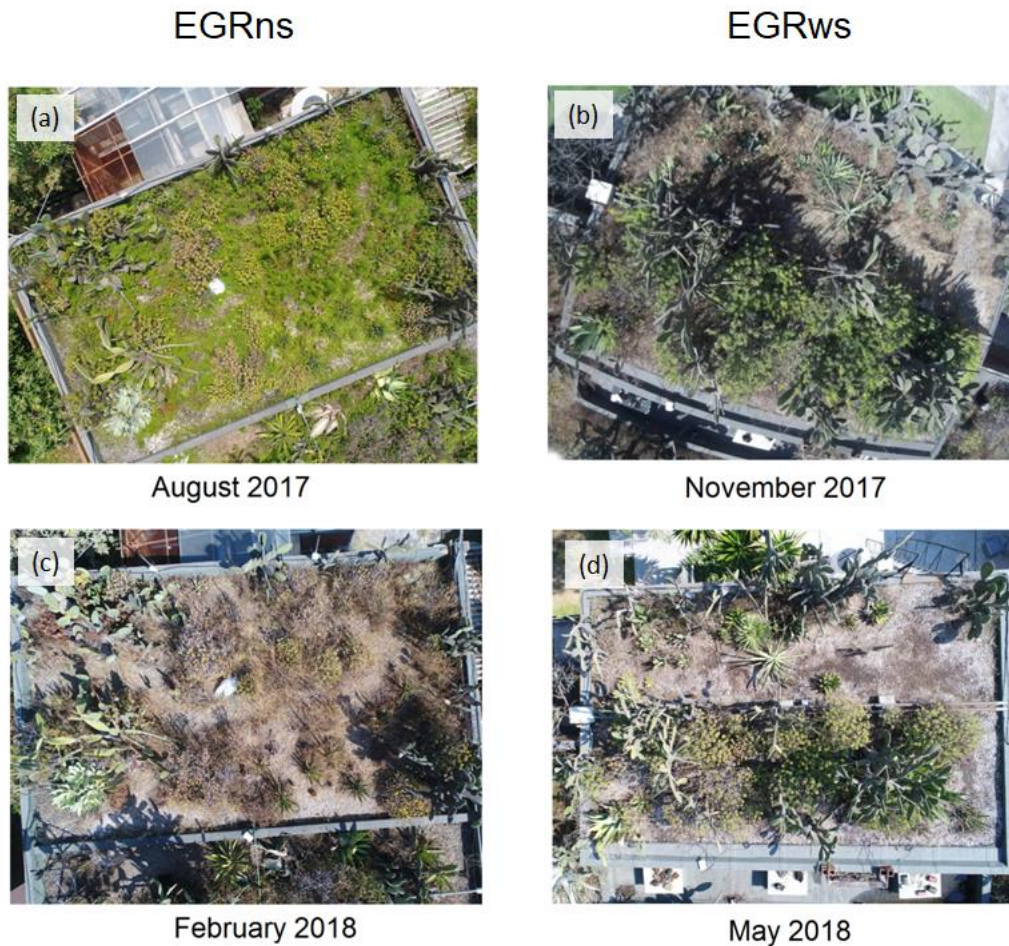


Figura 13. Cambios en la cobertura vegetal para la temporada de lluvias (a) y temporada de secas en la EGRNs (c); y para los meses de transición en la EGRws (b y d).

3.3.3. Evapotranspiración de referencia (ET_0) y humedad en el sustrato

Los promedios diarios de la ET_0 para las temporadas de lluvias y de secas fueron de 3.7 ± 1.2 mm (máx: 7.8 mm) y 3.8 ± 0.9 mm (máx: 6.6 mm) en la EGRNs, y de 3.6 ± 1.2 mm (máx: 7.8 mm) y 3.5 ± 1.0 mm (máx: 6.4 mm) en la EGRws (Figura 12b). Los valores un poco más bajos de ET_0 en la EGRws reflejan la corrección de la radiación solar (S_{in}) por el efecto de la pendiente. En los meses de primavera e inicio de las temporadas de lluvias, se aprecia el valor

más alto de ET_0 en ambas EGRs, lo cual coincide con períodos secos y de mayor irradiancia solar e inicio de las primeras lluvias

El promedio diario de los contenidos de humedad en el sustrato (SWC) fue significativamente mayor en la EGRns ($24 \pm 8 \%$) que en la EGRws ($20 \pm 8 \%$) durante las temporadas de lluvias (Figura 12a); en cambio durante la época de secas fueron muy similares ($2 \pm 3 \%$ en la EGRns y $2 \pm 4 \%$ en la EGRws). Dado que las temporadas de lluvias presentaron la mayor diferencia en los contenidos de humedad del sustrato entre EGRs, la Figura 14 muestra la humedad en el sustrato durante los meses de mayor precipitación (julio a octubre) por tipo de cobertura vegetal y azotea verde. En el gráfico se observa que la EGRns tiene una mayor retención de humedad para ambas coberturas ($22 \pm 4\%$ en la NSvg y $26 \pm 5\%$ en la NSsp) en comparación con la EGRws ($19 \pm 3\%$ en la WSvg y $23 \pm 4\%$ en la WSsp), siendo significativa. Asimismo, la retención de humedad en el sustrato con cobertura sp es 4% mayor en promedio que la cobertura vg en ambas EGRs.

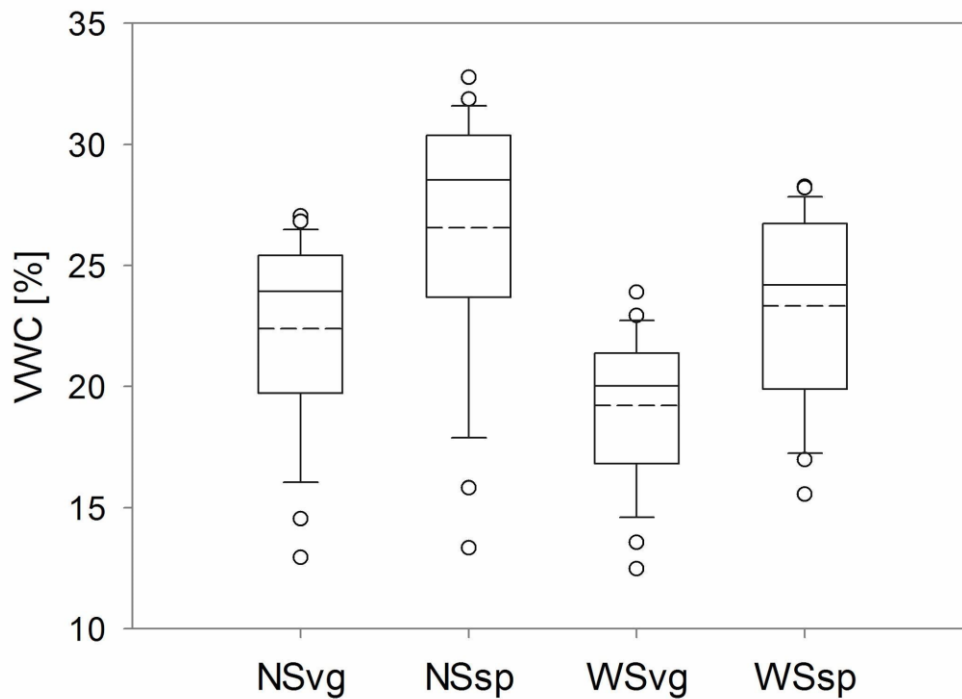


Figura 14. Contenido volumétrico de agua en el sustrato (VWC) para la EGR sin pendiente debajo de vegetación perenne (NSvg) y debajo de vegetación anual o escasa vegetación (NSsp), y para la EGR con mayor pendiente debajo de vegetación perenne (WSvg) y debajo de vegetación anual o escasa vegetación (WSsp) durante los meses de mayor precipitación (julio a octubre).

3.3.4. Calibración del modelo de ET para condiciones de dosel seco

Las valoraciones preliminares para los parámetros K_c , θ_{cr} y θ_{wp} de los modelos fueron 0.5, 10% y 0% respectivamente, a partir de las cuales se obtuvieron los residuales del modelo lineal y escalonado para los días secos y de calibración; posteriormente de su optimización por mínimos cuadrados, los valores de los parámetros K_c del modelo lineal y K_c , θ_{cr} y θ_{wp} del modelo escalonado para los días secos de calibración en cada una de las EGRs y condiciones de cobertura vegetal se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros ajustados para el modelo lineal y escalonado en los días de calibración para cada EGRs y cobertura vegetal.

Días para calibración	59	55	48	57
Modelo lineal				
EGR-cobertura vegetal	NSvg	NSsp	WSvg	WSsp
K_c [-]	0.654	0.663	0.561	0.622
θ_{max} [%]	28	32	23	29
Modelo escalonado				
K_c [-]	0.481	0.529	0.418	0.458
θ_{wp} [%]	-0.583	-0.336	-1.864	-1.449
θ_{cr} [%]	8.351	10.323	9.735	9.969

3.3.4.1. Relaciones entre ET/ET₀ y la humedad del sustrato

La Figura 15 muestra que el modelo escalonado predice mejor la respuesta de la vegetación en función de la humedad en ambas EGRs y tipo de cobertura vegetal. Aunque los datos observados muestran una alta dispersión, se observa una tendencia de la vegetación a transpirar y del sustrato a evaporar a su tasa máxima ($\sim 2 \text{ mm día}^{-1}$) en un amplio rango de contenidos de humedad (entre el 10 y el 30%), mientras que la tasa de ET decae cuando se ve limitada por el bajo contenido de humedad ($< 10\%$). Por su parte, los resultados del modelo lineal, como su nombre lo indica, muestra que las tasas máximas de ET se alcanzan únicamente cuando la humedad del sustrato es máxima y disminuye progresivamente cuando la humedad desciende.

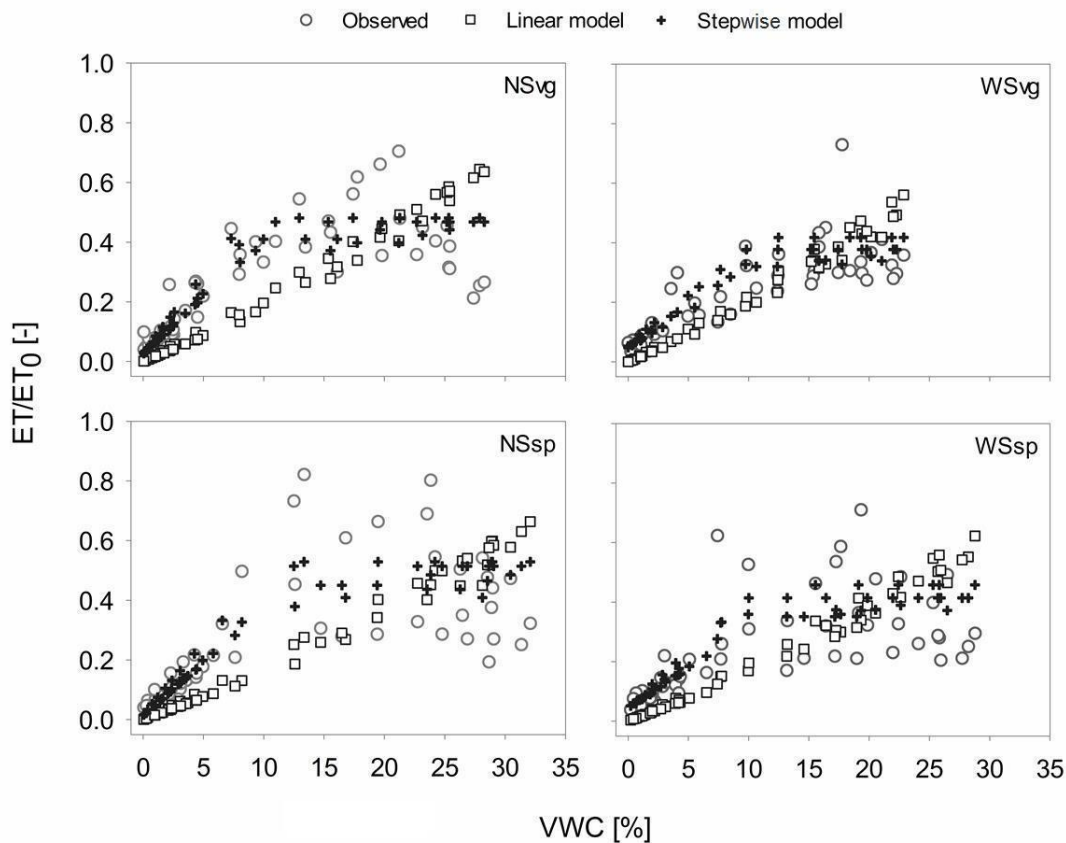


Figura 15. Relación entre la ET para las condiciones de dosel seco con ET_0 y el contenido volumétrico de agua en el sustrato en la EGRns (NS) y EGRws (WS) para ambas condiciones de cobertura vegetal, vg y sp. Se comparan las estimaciones de ET observadas (círculos) con el modelo lineal (cuadros) y el modelo escalonado (cruces) para los días de calibración.

3.3.4.2. Validación del modelo de ET para condiciones de dosel seco

Las tasas promedio diarias de ET para los días de validación muestran un patrón muy similar al descrito anteriormente para el conjunto de datos de calibración. En la Figura 16 se observa que el modelo lineal subestima las tasas de ET y presentan una mayor dispersión en el conjunto de datos, lo que indica un pobre ajuste entre la ET modelada y la observada. Así mismo, los parámetros de las regresiones lineales y estadísticas de desempeño de los modelos (Tabla 4)

confirman que el modelo escalonado es el que mejor predice las tasa de ET en las EGRs dado que presenta los coeficientes de determinación r^2 y las pendientes a más cercanas a 1 y de intercepto b cercanos a 0, indicando una mayor precisión y exactitud en comparación con el modelo lineal. Adicionalmente la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y su normalización (NRMSE) son menores para ambas EGRs y condiciones de cobertura vegetal en el modelo escalonado en comparación con el modelo lineal. Debido a los resultados mencionados anteriormente, la ET del dosel seco se calculó utilizando el modelo escalonado.

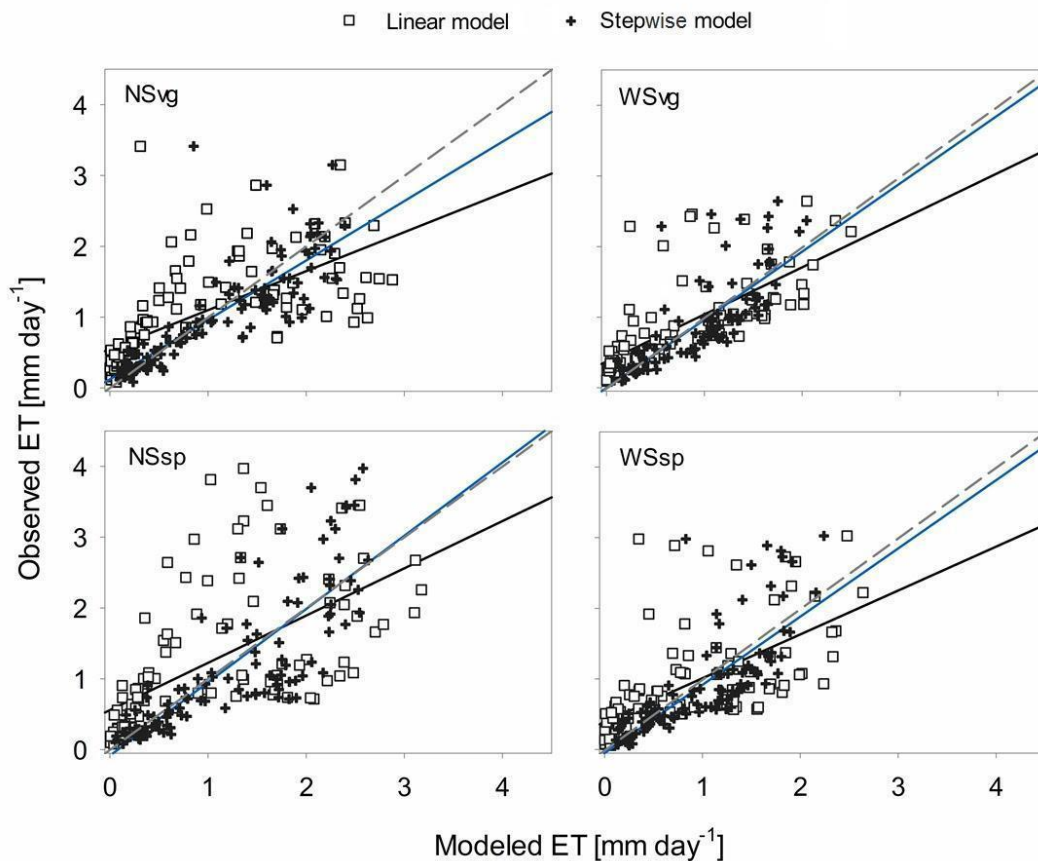


Figura 16. Correlación entre las estimaciones diarias de ET observadas y modeladas para ambas EGRs (NS y WS) y condiciones de cobertura vegetal (vg y sp). Las regresiones lineales se representan con líneas continuas, en azul la que corresponde al modelo lineal y en negro al modelo escalonado. La regresión 1:1 (línea punteada gris) se muestra a modo de comparación.

Tabla 4. Parámetros de la regresión (intercepto b , pendiente a y coeficiente de determinación r^2), RMSE y NRMSE de cada modelo (lineal y escalonado) para los días para validación por EGR y condición de cobertura.

Días para validación	116	109	94	112
Modelo lineal				
EGR-cobertura vegetal	NSvg	NSsp	WSvg	WSsp
b	0.5482	0.5573	0.3705	0.3874
a	0.5509	0.6677	0.6685	0.6219
r^2	0.4502	0.3694	0.5144	0.4222
RMSE [mm día ⁻¹]	0.69	0.88	0.51	0.61
NRMSE [%]	68	74	58	71
Modelo escalonado				
b	0.1215	-0.0824	-0.0033	-0.0479
a	0.8393	1.0348	0.9663	0.9666
r^2	0.6970	0.6736	0.6147	0.6066
RMSE [mm día ⁻¹]	0.42	0.57	0.40	0.45
NRMSE [%]	41	48	45	52

3.3.5. Interceptación de la lluvia por el dosel de la vegetación

Se identificaron un total de 179 y 14 eventos de lluvia para las temporadas de lluvias y secas, respectivamente, a partir de las series de datos horarias. La cantidad promedio de los eventos fue de 11.8 ± 11.9 mm (máx: 69.6 mm) para las temporadas de lluvias y de 6.5 ± 5.6 mm (máx: 17 mm) para la de secas.

Las pérdidas promedio por interceptación (I) a nivel de evento de precipitación para ambas temporadas de lluvias fueron similares entre azoteas verdes (0.5 y 0.6 mm evento⁻¹ en la EGRns y EGRws respectivamente), correspondientes en promedio al 5% de la P . Para la temporada de secas, el valor de I fue más alto pero comparable también entre azoteas verdes (0.8 y 0.9 mm evento⁻¹ para la EGRns y EGRws, respectivamente), lo que equivalió al 12 y 14% de la P . La Figura 17 muestra que la EGRns presenta una mayor I para eventos pequeños de P (< 10 mm), mientras que en eventos de $P > 10$ mm, la EGRws muestra una I mayor. La resistencia aerodinámica (r_a) disminuye con el aumento de la altura de la vegetación, que en este caso es mayor en la EGRws, por consiguiente presenta una mayor evaporación del dosel húmedo (\bar{E}). La \bar{E} promedio fue de 0.07 y 0.21 mm h⁻¹ en la EGRns y de 0.10 y 0.28 mm h⁻¹ en la EGRws para todas las horas con intensidad promedio de precipitación $R > 0.5$ mm h⁻¹ para las temporadas de lluvias y secas, respectivamente. En este caso, el valor promedio de R fue de 4.01 mm h⁻¹ para las temporadas de lluvias y de 2.54 mm h⁻¹ para la de secas, lo que sugiere una tasa de evaporación relativa media (\bar{E}/R) de 0.02 y 0.08 en la EGRns y de 0.03 y 0.11 en la EGRws para las temporadas de lluvias y secas, respectivamente.

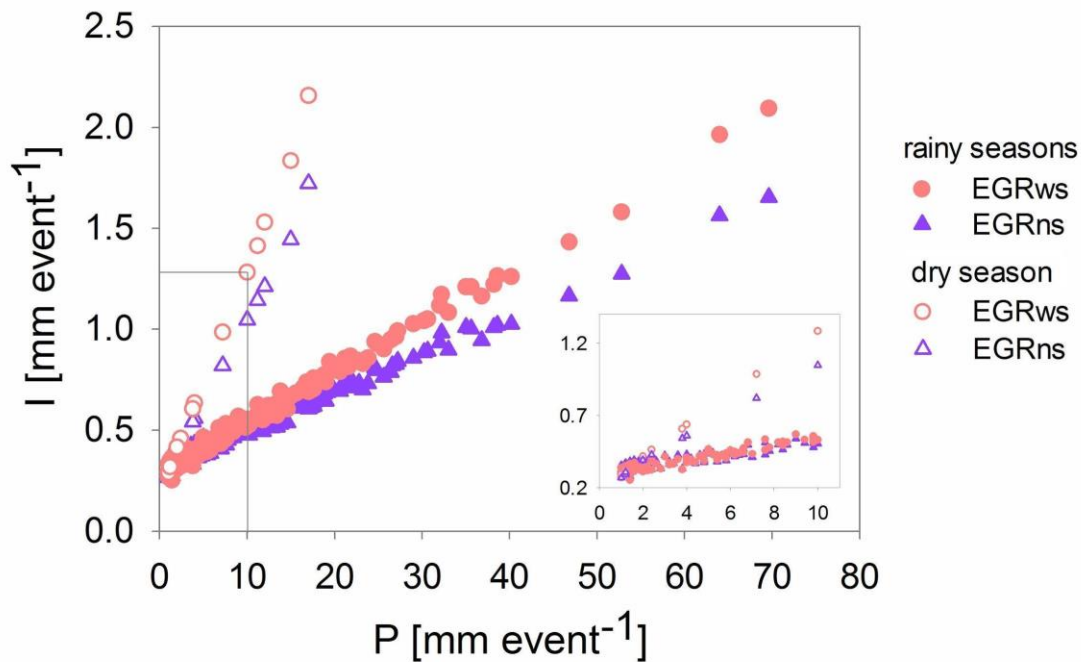


Figura 17. Interceptación de la lluvia por el dosel (I) contra la precipitación (P) por evento de lluvia de las EGRs para las temporadas de lluvias y de secas. El acercamiento (*inset*) muestra los datos para $P \geq 10$ mm.

3.3.6. Estimación de la ET total y comparación con la ET_0

La Tabla 5 presenta la estimación de la ET para la condición de dosel seco con el modelo escalonado para cada azotea verde y cobertura vegetal, en el que se observa una tasa promedio diaria más alta durante las temporadas de lluvias en ambas EGRs; mientras que para el periodo completo, la EGRns mostró ligeramente una mayor ET. Con respecto a la cobertura, la tasa de ET promedio diaria fue mayor en la sp para ambas EGRs durante las temporadas de lluvias. Sin embargo, se observa que la ET promedio diaria en la EGRns fue igual en ambos tipos de cobertura (vg y sp) durante la época seca. Después de ponderar los datos con las fracciones fijas de cobertura, las tasas promedio de ET en la EGRns fueron mayores para las temporadas

de lluvias y de secas, mientras que la interceptación (I) promedio diaria del dosel durante el periodo completo fue similar entre EGRs, representando en promedio el 20 y 15% de la ET total en la EGRws y EGRns respectivamente.

En resumen, las tasas de ET del dosel seco fueron ligeramente mayores en la EGRns, I fue similar entre azoteas y las tasas de ET total también fueron ligeramente mayores en la EGRns. Los valores promedio correspondientes a la evapotranspiración de referencia (ET_0) fueron más altos en la EGRns para ambas temporadas; mientras que, la relación ET/ET_0 fue mayor en la EGRns durante las temporadas de lluvias, pero similar entre EGRs para la época de secas. En general, la ET real representó una fracción pequeña de la ET_0 .

Tabla 5. Estimación promedio de ET en condiciones de dosel seco, ponderación, interceptación (I), ET total, ET_0 y ET/ET_0 , unidades en mm día^{-1} .

	Estimación de ET (modelo escalonado)				ET ponderada		I		ET total		ET_0		ET/ET_0	
	NSvg	NSsp	WSvg	WSsp	NS	WS	NS	WS	NS	WS	NS	WS	NS	WS
EGR	NSvg	NSsp	WSvg	WSsp	NS	WS	NS	WS	NS	WS	NS	WS	NS	WS
Periodo completo	1.01	1.11	0.79	0.90	1.05	0.83	0.19	0.21	1.24	1.03	3.70	3.51	0.36	0.32
Lluvias	1.36	1.52	1.10	1.22	1.43	1.14	0.29	0.32	1.73	1.46	3.71	3.64	0.50	0.44
Seca	0.34	0.34	0.24	0.34	0.34	0.28	0.05	0.06	0.38	0.33	3.85	3.49	0.10	0.10

En la Figura 18 se observa que la ET total diaria siguió un claro patrón estacional en ambas azoteas verdes, con valores más bajos durante la época de secas y valores más altos durante las temporadas de lluvias, comportamiento estrechamente relacionado con el contenido

de humedad disponible en el sustrato. Con respecto a la ET_0 , se aprecia también una disminución durante el otoño (23 septiembre-21 diciembre) seguida por el incremento más alto observado durante los meses de la primavera (20 marzo-21 junio), lo cual está relacionado con los cambios en la radiación solar y temperatura atmosférica.

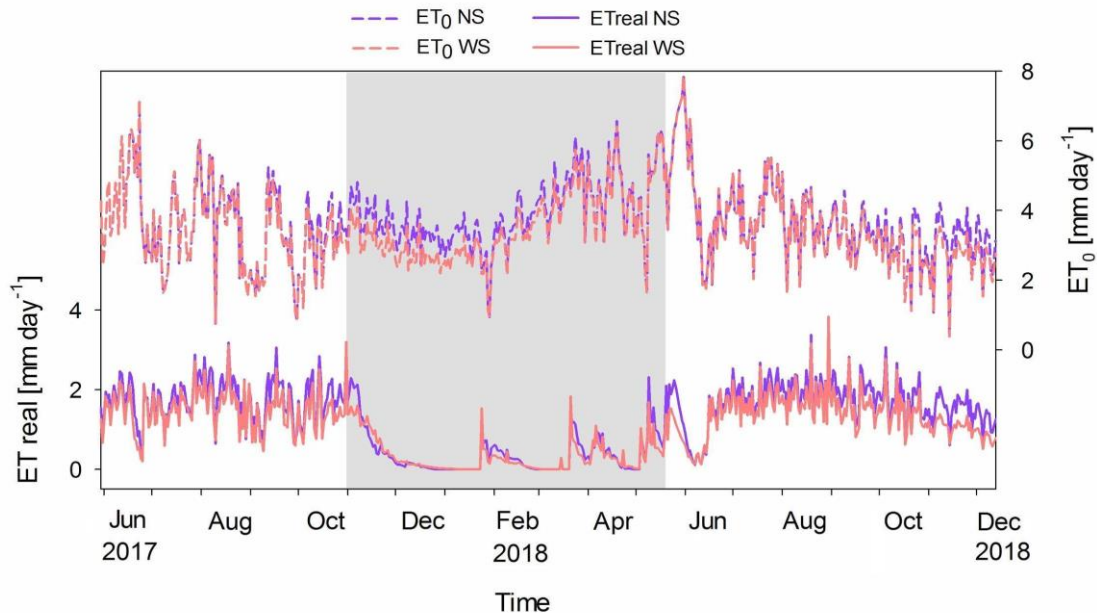


Figura 18. Comparación entre la ET diaria total (línea sólida) y la ET_0 de la FAO (línea punteada) para ambas EGRs durante el periodo de estudio. El área gris indica la temporada de secas.

3.4. Discusión

3.4.1. ET en condiciones de dosel seco y húmedo

El presente estudio estimó la ET diaria para las condiciones de dosel seco y dosel húmedo de dos EGR diferentes durante dos temporadas de lluvias y una de secas. Para ello se realizaron mediciones continuas de precipitación y humedad del sustrato, y mediciones mensuales del índice de área foliar y cobertura vegetal. Se utilizaron y compararon dos modelos para estimar la ET en condiciones de dosel seco, empleando datos de campo para calibrar y validar los modelos, así como variables climáticas para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_0).

La interceptación de la lluvia por el dosel de la vegetación se estimó a nivel de evento a partir del modelo de Lui (2001).

El presente trabajo realizó el análisis a partir de los descensos de humedad en el sustrato (Figura 12). En general, el modelo de tipo lineal ha mostrado un buen desempeño en la predicción de la ET en trabajos previos (Berretta *et al.*, 2014; Stovin *et al.*, 2013); sin embargo, las estimaciones de ET que este trabajo realizó utilizando el modelo escalonado, mostraron un mejor ajuste con los valores observados (Figura 15), reduciendo el error de predicción a un rango de 41 a 52% (NRMSE) en comparación con el modelo lineal (58-74%) en ambas azoteas verdes. Los valores de RMSE del modelo escalonado, que oscilaron entre 0.40 y 0.57 mm día⁻¹, así como las pendientes y coeficientes de determinación de la relación de regresión lineal entre la ET observada y el modelo fueron cercanos a la unidad (Figura 16), lo cual corrobora su mejor predicción de las tasas de ET de las azoteas verdes. El desempeño de los modelos evaluados en estudios previos para el método de Penman-Monteith de la FAO56 y otros métodos se reportan en la Tabla 6.

Las estimaciones de ET en condiciones de dosel seco mostraron que, ambas azoteas verdes evapotranspiran a su tasa máxima (~ 2 mm día⁻¹) en un rango de humedad entre el 10 y 30%, lo cual sugiere que en este rango las plantas no parecen experimentar un déficit hídrico. Esto podría estar relacionado con una alta densidad de las raíces dentro del sustrato, dado que las azoteas verdes tienen una antigüedad de aproximadamente 20 años al momento del estudio, por lo tanto, presentan zonas con vegetación perenne madura y bien establecida, en su mayoría crasuláceas. Sin embargo, la tasa de ET disminuye rápidamente cuando los contenidos de humedad descienden por debajo del 10% debido probablemente a una menor disponibilidad de agua en el sustrato para evapotranspirar. Stovin y colaboradores (2013) utilizaron la relación entre el contenido de humedad observado y el contenido de humedad a capacidad de campo

para estimar ET real en condiciones de humedad limitada en un modelo de flujo hidrológico, validado en sistemas modulares de azoteas verdes en Sheffield, Reino Unido, donde encontraron que el modelo lineal presenta un buen desempeño en la estimación de las tasas de ET para las azoteas verdes.

El modelo de Penman-Monteith de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (PM-FAO56) permite estimar la ET diaria teniendo en cuenta numerosos procesos físicos y algunas características de la vegetación (Cascone *et al.*, 2019). En este contexto, el coeficiente de cultivo (K_c) refleja las diferencias físicas y fisiológicas entre la azotea verde estudiada y el cultivo de referencia. Los valores del K_c optimizados para el modelo lineal (0.56, 0.62, 0.65, 0.66) y escalonado (0.42, 0.46, 0.48, 0.53) en el presente estudio son un poco menores a lo reportado en la literatura científica. Berretta y colaboradores (2014) obtuvieron valores de K_c de 0.69, 0.65 y 1.36 para diferentes sustratos (HLS, SCS y LECA) utilizando el método Penman-Monteith de la FAO56. Para el mismo método, Marasco *et al.* (2015) concluyeron que el K_c para una azotea verde con cobertura vegetal completa era aproximadamente la unidad.

Este trabajo incluyó también dos funciones de respuesta, la primera referente a la disponibilidad de agua y la segunda al índice de área foliar. En cuanto a la primera, los resultados nos indican que podría existir una limitación importante en la representatividad del frente de evaporación y el perfil de humedad en el sustrato por la forma en cómo fueron instalados los sensores de medición; se profundiza más al respecto en la sección 4.2. En cuanto a la segunda, es necesario parametrizar la $f(LAI)$ para cada tipo de cobertura (vg y sp) en las azoteas verdes con el fin de mejorar las estimaciones de ET, lo cual es importante en azoteas verdes con diversidad vegetal. Actualmente, son pocos los estudios en estos sistemas que incorporan mediciones de índice de área foliar en las estimaciones de ET (Feng *et al.*, 2018; Li

et al., 2019), y muchos menos los que incorporan el componente de interceptación de lluvia por el dosel de la vegetación.

En general, los sustratos debajo de vegetación escasa (sp) presentaron una mayor retención de humedad en comparación con los sustratos con mayor cobertura vegetal (vg) en ambas azoteas verdes, lo que puede atribuirse a la compactación del sustrato y posiblemente a una acumulación de partículas finas en las capas inferiores del sustrato (Berretta *et al.*, 2014); mientras que en las áreas más vegetadas presentaron una menor densidad aparente y probablemente las raíces abarcan gran parte del espacio reduciendo la capacidad de almacenamiento en el sustrato, al igual que contribuyen a la percolación más rápida del agua a través de flujos preferenciales. Asimismo, las zonas sp presentaron una mayor ET principalmente durante la temporada de lluvia, posiblemente debido a que se establece vegetación anual abarcando gran parte del área expuesta en las azoteas verdes, combinado con la evaporación del sustrato. Las plantas anuales establecidas, en general herbáceas presentan un metabolismo C3 o C4 que se caracterizan por mantener sus estomas abiertos durante el día para el intercambio gaseoso, por lo cual presentan una mayor transpiración en comparación a las especies perennes con metabolismo ácido de crasuláceas (CAM).

Los resultados del presente estudio mostraron que durante el período completo de estudio, la interceptación de la lluvia por la vegetación de la EGRns y EGRws representó el 15 y 20% de la ET total, respectivamente. Es importante mencionar que existen pocos estudios que incluyen las pérdidas de agua por evaporación durante condiciones de dosel húmedo en sus estimaciones de ET (Li *et al.*, 2019), a pesar de que varios estudios coinciden en que la interceptación de agua por la vegetación es un componente importante en la retención pluvial (Berghage *et al.*, 2007; Voyde *et al.*, 2010).

Las tasas promedio de evaporación durante condiciones de dosel húmedo (\bar{E}) fueron bajas durante las temporadas de lluvias (0.02 en la EGRns y 0.03 en la EGRws), lo que indica que este componente fue muy pequeño comparado con las intensidades promedio de la precipitación (R) correspondientes; mientras que para la época de secas, las tasas de \bar{E} fueron mayores (0.08 y 0.11 en la EGRns y EGRws, respectivamente) debido a cantidades e intensidades de lluvia más bajas.

La contribución del almacenamiento del dosel y la evaporación de la lluvia relativas a la interceptación promedio, pueden estimarse a partir del primer y segundo término de la ecuación 16 (Liu, 2001). De la interceptación promedio de 0.5 mm evento⁻¹ en la EGRns y de 0.6 mm evento⁻¹ en la EGRws para las temporadas de lluvias, se estimó que 0.22 mm (41%) y 0.30 mm (51%) respectivamente, corresponden a la evaporación del agua almacenada en el dosel durante la lluvia. Por otro lado durante la temporada seca, la interceptación promedio fue de 0.8 y 0.9 mm evento⁻¹ para la EGRns y EGRws, de los cuales 0.53 mm (70%) y 0.71 mm (78%) respectivamente, fueron resultado de la evaporación durante las precipitaciones.

Existe un claro patrón estacional en las estimaciones de ET para ambas azoteas verdes, en las que se observaron tasas más altas durante las temporadas de lluvias (Tabla 5 y Figura 18). Las tasas promedio de ET total de 1.7 mm día⁻¹ en la EGRns y de 1.5 mm día⁻¹ en la EGRws durante las temporadas de lluvias se asocian con humedades iniciales mayores en el sustrato y a las condiciones más cálidas (en primavera y verano). Mientras que las tasas promedio de ET total se reducen aproximadamente al quíntuple (EGRns: 0.4 y EGRws: 0.3 mm día⁻¹) cuando la humedad inicial es baja con condiciones más frías durante la época de secas (otoño e invierno). Esta disminución de la ET en la temporada de secas, se podría relacionar además, con la pérdida de hojas, el marchitamiento de la vegetación y en

consecuencia la disminución de la cobertura vegetal y por tanto la transpiración vegetal en ambas EGRs.

3.4.2. ET total en azoteas verdes: trabajo actual y estudios previos

Como parte de la búsqueda bibliográfica se reunió una selección de estudios sobre evapotranspiración en azoteas verdes a varias escalas espaciales, con diferencias en diseño y antigüedad para varios climas, de los cuales se han obtenido tasas de ET utilizando distintas metodologías. Aunque los estudios no pueden compararse directamente debido a las diferencias antes mencionadas, se pueden realizar algunas observaciones con respecto a la ET (Tabla 6).

En primer lugar, hay que tener en cuenta que el presente estudio se realizó en azoteas verdes con 19 años de antigüedad al tiempo del estudio, por lo que su vegetación perenne se encuentra bien establecida y la vegetación anual se desarrolla principalmente durante las temporadas de lluvias. Estudios en azoteas verdes con estas características son poco comunes y aún menos los enfocados a estudiar todos los componentes de la evapotranspiración (Feng *et al.*, 2018; Mobilia *et al.*, 2017).

En general, nuestros resultados demostraron que la ET total diaria promedio es similar entre EGRs para las temporadas de lluvias y la seca. Particularmente, la ET del dosel seco tuvo una mayor contribución a la ET total para ambas EGRs en ambas temporadas (lluvias y secas); mientras que la evaporación durante las condiciones de dosel húmedo fue una proporción relativamente pequeña de la ET total, tanto en la EGRns (del 15%) como en la EGRws (20%) (Tabla 5). Por su parte, Li y colaboradores (2019) plantearon un modelo hidrológico modificado para azoteas verdes con una capa de almacenamiento adicional, que describió la interacción del escurrimiento y la ET real para condiciones secas y húmedas en Shenzhen (China), sus resultados mensuales indicaron que el promedio de ET real es mayor en la estación

húmeda que en la seca y que la ET real disminuye a medida que el antecedente de precipitación aumenta. Poe y colaboradores (2015) descubrieron que la ET de las azoteas verdes en condiciones típicas de la primavera y el verano británicos oscila entre 0.6 y 1.0 mm día⁻¹ y entre 0.7 y 1.25 mm día⁻¹, respectivamente.

Las tasas diarias promedio de ET₀ de referencia de Penman-Monteith fueron mayores en la EGRns. Los valores altos de la ET₀ durante la época seca, están asociados al cultivo de referencia, que representa una superficie extensa de pasto de altura uniforme, sin limitaciones de agua o estrés hídrico (Allen *et al.*, 1998), lo cual contrasta con las tasas de ET total de las azoteas verdes, de vegetación perenne y anual que se encuentran expuestas a altas intensidades de radiación y viento, así como a condiciones de déficit hídrico durante las temporadas secas, y que únicamente se mantiene con la precipitación que recibe durante el año. Experimentos en invernadero realizados en Auckland, han demostrado que la ET puede estar entre 3 y 5 mm día⁻¹ cuando el agua no es limitante, y descender a menos de 1 mm día⁻¹ una vez que el agua se vuelve limitante (Voyde *et al.*, 2010, 2009).

La baja relación promedio ET/ET₀ de ambas azoteas verdes (0.10) obtenida durante la época seca, también indica una menor disponibilidad de agua para el proceso de ET durante dichos períodos. En cambio en las temporadas de lluvias, cuando el sustrato presenta largos períodos sin limitaciones de agua, la relación de ET/ET₀ aumenta (EGRns: 0.50 y EGRws: 0.44). Son pocos los estudios que reportan los valores de la ET de referencia en sus publicaciones. Sin embargo, DiGiovanni y colaboradores (2013) quienes evaluaron el rendimiento de dos métodos para la predicción de ET en azoteas verdes utilizando conjuntos de datos disponibles *in situ* y a nivel regional, reportaron que la ET de referencia estandarizada de la ASCE (2005) sobreestimó la ET medida en un 2.3% para condiciones sin limitaciones por agua; mientras que la ET de referencia del Centro Climático Regional del Noreste (NRCC) las subestimó en un 47%, lo cual los llevó a concluir que los productos de datos de ET

disponibles a nivel regional podrían introducir un error sustancial en la estimación de la ET en un paso temporal diario.

Tabla 6. Tipo de sistema de estudio de azotea verde, métodos y resultados principales obtenidos por trabajos seleccionados de evapotranspiración (ET) realizados en diferentes zonas climáticas.

Localización (zona climática)	Tipo de azotea verde (área)	Características del sustrato y tipo de vegetación	Método	Tasas de ET	Estimación de ET_0	Resultados principales	Referencia
Ciudad de México, México. (Tropical)	Instalación directa y a escala real (EGRns 32 m ² y EGRws 36.7 m ²)	Sustrato de grava, tepojal, fibra de coco, composta y suelo franco arenoso. Profundidad del sustrato (EGRns 132 mm y EGRws 103 mm) Vegetación perenne, géneros dominantes: <i>Opuntia</i> , <i>Agave</i> y <i>Sedum</i> . Vegetación anual durante la temporada de lluvias.	Duración del estudio: 18 meses La ET se determinó por separado para las condiciones de dosel seco y dosel húmedo. La ET observada se estimó a partir de los cambios en el contenido de humedad del sustrato en condiciones de dosel seco en las cubiertas debajo de la vegetación (vg) y debajo de vegetación anual o de escasa vegetación (sp), empleando dos modelos (lineal y escalonado). La evaporación del dosel húmedo se estimó a partir de datos meteorológicos utilizando la ecuación de Penman. La ET total se calculó en función de la ET de referencia (ET_0) con el método de Penman-Monteith de la FAO56, las funciones de respuesta (SWC y LAI) y la interceptación de la lluvia (I) modelada con el método de Liu (2001).	0.33-1.73 mm d ⁻¹ , valores mínimos durante la época de secas y máximos durante las temporadas de lluvias.	3.49-3.85 mm d ⁻¹	<ul style="list-style-type: none"> - Las EGRs evapotranspiran a su tasa máxima (~ 2 mm día⁻¹) entre el 10 y 30% de humedad, debajo del 10% disminuye la ET. - El modelo escalonado mostró una mejor estimación de ET y ajuste con los valores observados, reduciendo el error de predicción en ambas azoteas verdes. - La ET en condiciones del dosel seco y la cobertura sp tuvieron una mayor aporte a la ET total en ambas azoteas verdes. - La interceptación representó entre el 15 y 20% de la ET total para el periodo completo de estudio. La interceptación fue mayor en la EGRws. - La ET total promedio fue 15 y 13% mayor en la EGRns en comparación con la EGRws para las temporadas de lluvias y seca, respectivamente. - La ET/ET_0 promedio fue mayor durante las temporadas de lluvias (0.47) en comparación con la época seca (0.10). 	Este estudio
Sheffield, Reino Unido (Oceánico templado, Cfb)	Módulos de prueba (3m ²)	80 mm de sustrato. Brezo con sustrato de lavanda (HLS) (TB1 y TB4), sustrato de alfombra de <i>Sedum</i>	Se utilizaron reflectómetros de contenido de agua ubicados a tres profundidades diferentes del sustrato para medir el perfil	0.35 - 1.60, mm d ⁻¹ , asociados a los niveles de humedad	–	-Los perfiles verticales del contenido de humedad variaron de forma consistente, registrando niveles de humedad ligeramente elevados en la capa más	Berretta <i>et al.</i> , 2014

		(SCS) (TB2) y agregado de arcilla expandida ligera (LECA) (TB3). Tres módulos de prueba están vegetadas con alfombra de Sedum Alumas Blackdown (sustratos TB1, TB2 y TB3) y la cuarta cama de prueba no tiene vegetación (TB4).	de humedad y registrar los cambios temporales. Modelo hidrológico basado en el balance hídrico: $\Delta\theta/\Delta t = P - R - ET$ con dos modelos potenciales de PET: 1985 Hargreaves y FAO-56 Penman-Monteith Ambos combinados con una función de extracción de la humedad del suelo (SMEF). También un factor de corrección específico del sistema (K_s), del sustrato y vegetación, mediante el método de los mínimos cuadrados. $ET_t = PET_t \cdot \frac{\theta_t}{\theta_{FC}} \cdot K_s$ Valores de $K_s(-)$ Hargreaves: 0.68, 0.64 y 1.36 $K_s(-)$ Penman-Monteith: 0.69, 0.65 y 1.36 respectivamente para los sustratos HLS, SCS y LECA con vegetación.	inicial y a las condiciones más frías o cálidas.		profunda del sustrato en los sistemas con vegetación. - Se observó una menor pérdida de humedad/evapotranspiración cuando la humedad del suelo estaba restringida. - La presencia de vegetación dio lugar a una mayor pérdida de humedad diaria. - Los datos de contenido de humedad observados se pudieron simular con precisión utilizando un modelo hidrológico basado en el balance de agua y dos modelos convencionales de ET potencial (Hargreaves y FAO-56 Penman-Monteith) combinados con una función de extracción de humedad del suelo. Los dos modelos de ET potencial utilizados no mostraron diferencias significativas. - Las mejoras en el rendimiento del modelo se lograron mediante la aplicación de factores de corrección de configuración específicos derivados de los datos observados.	
Auckland, Nueva Zelanda (Subtropical húmedo con estación seca, Cwa)	Módulos de prueba en invernadero (0.07 m ²)	70 mm de sustrato Tratamientos: sin vegetación, plantado con <i>Sedum mexicanum</i> , y plantado con <i>Disphyma australe</i> .	La masa de los módulos se midió con células de carga. El cambio en la masa representó la pérdida de agua por ET para los modulares con plantas y por E para el sustrato desnudo. La transpiración de las plantas se determinó como la diferencia entre la ET medida y la E. Se generó un modelo de regresión empírica simple de las tasas de ET de verano para cada una de los tres tratamientos (plantada con <i>S. mexicanum</i> o	2.19 mm d ⁻¹ y 2.21 mm d ⁻¹ para <i>S. mexicanum</i> y <i>D. australe</i>	-	- La pérdida de agua, y por tanto la recuperación del almacenamiento del sustrato, fue mayor en los primeros 9 días. -La transpiración de <i>S. mexicanum</i> contribuyó hasta el 48% de la ET total (2.19 mm d ⁻¹) y <i>D. australe</i> contribuyó hasta el 47% de la ET total (2.21 mm d ⁻¹). - Después de la tasa inicial de pérdida rápida de agua y una vez que el agua se volvió limitante, las plantas conservaron el agua y la ET no fue significativamente diferente de la evaporación del sustrato sin plantar.	Voyde <i>et al.</i> , 2010

			<p><i>D. australe</i> o sin plantar) utilizando los conjuntos de datos experimentales del invernadero para ambos ensayos. Los totales diarios de ET para cada condición se graficaron contra el día del ensayo (igual al número de días desde la última lluvia a saturación). Se ajustó una curva exponencial a los datos. La aplicación del modelo de regresión empírica permitió formular un balance hídrico diario con el objetivo de cuantificar la retención de aguas pluviales en una simulación</p> $\frac{\Delta S}{\Delta t} = P - R - ET$ <p>continua:</p>			-La vegetación mejoró la eficiencia de retención debido a la transpiración y al potencial de interceptación, particularmente cuando las lluvias son frecuentes, evitando así que las plantas se estresen.	
Nueva York, Estados Unidos de América (Subtropical húmedo, Cfa)	Lisímetro (0.72 m ²)	100 mm de sustrato. Se plantaron seis especies diferentes de <i>Sedum</i> para formar la capa vegetativa (<i>Sedum album</i> , <i>S. sexangulaire</i> , <i>S. reflexum</i> , <i>S. floriferum</i> , <i>S. hybridum</i> y <i>S. spurium</i>).	<p>Las estimaciones de la ET real se aproximaron con una variación de Thornthwaite-Mather (1955):</p> $AET = \frac{\theta_i - \theta_{wp}}{\theta_{fc} - \theta_{wp}} PET$ <p>La evapotranspiración de referencia (RET o ET₀) se calculó utilizando la ecuación de ET de referencia estandarizada de la ASCE. Las estimaciones de la evapotranspiración potencial (PET) se obtuvieron del Modelo de MORECS utilizado por el Centro Climático Regional del Noreste basado en la ecuación</p>	*2.27 mm d ⁻¹ para <i>Sedums</i> (in Feng, 2018)	2.84 mm d ⁻¹	-Las estimaciones de ASCE RET junto con el factor de atenuación simplista de Thornthwaite-Mather pueden dar resultados razonables para la estimación de la ET real. Sin embargo, se ha demostrado que la capacidad de campo es un parámetro sensible con cambios porcentuales en este factor que se relacionan inversamente con cambios comparables en las estimaciones de la ET real. Además, en este análisis no se determinó la sensibilidad del valor del punto de marchitez, lo que podría ser otra fuente de variabilidad, en particular para los estudios de campo para los que este valor puede ser difícil de derivar.	DiGiovanni <i>et al.</i> , 2013

			original de Penman-Monteith (1965).				
Pennsilvania, Estados Unidos de América (Continental húmedo, Df y templado húmedo, Cf)	Modulares de prueba en invernadero	Las plantas utilizadas fueron una proporción 1:1 de <i>Delosperma nubigenum</i> y <i>Sedum album</i> .	* Se compararon las ecuaciones de ET de Blaney-Cridde, Penman, Penman modificado (FAO) y Penman-Monteith con los datos de ET observados.	0.61 mm d ⁻¹ (durante el invierno) y 1.12 mm d ⁻¹ (temporada de primavera/otoño) por cada día seco. * Tasas de ET de 1.68 mm d ⁻¹ para los sedums (en Feng <i>et al</i> , 2018)	–	- Las módulos plantadss evapotranspiraron un 28% y un 57% más de agua a la atmósfera que la que se evaporó en los módulos no plantados durante el invierno y la primavera/otoño, respectivamente. - Los modelos de ET de la ecuación original de Penman y de Penman-Monteith explicaron muy bien las tasas de ET observadas con coeficientes de cultivo de 0.74 en invierno y de 1.97 en otoño/primavera.	Rezaei F., 2005 *Información adicional de: Voyde et al., 2010 y Feng <i>et al.</i> , 2018
Utah, Estados Unidos de América (Continental templado, Dfa)	Módulos de pruebas de lisímetros de pesaje (0.74 m ²)	254 mm de sustrate. Cobertura vegetal de <i>Sedums</i> y pasto.	La ET real se determinó como el cambio de masa registrado por los lisímetros de pesaje. Ecuaciones: Penman modificado (FAO), Penman-Monteith y Thornthwaite-Mather. Las resistencias estomáticas diurnas de las especies de <i>Sedum</i> y el pasto se midieron una vez para corroborar las estimaciones de ET. El área foliar se estimó mediante el muestreo de ramas y el análisis de imágenes a través de Easy Leaf Area. ET ₀ calculada con la ecuación Penman-Monteith de la FAO. La ET ₀ acumulada diariamente se puede ajustar con un coeficiente de cultivo y un	2.52 mm d ⁻¹ 2.69 mm d ⁻¹ para <i>Sedums</i> y pasto.	–	-La región con escasez de lluvias no implica necesariamente una menor tasa de ET anual de la cubierta verde en comparación con la región rica en lluvias. - Las resistencias superficiales anuales de los <i>Sedums</i> y el pasto se estimaron en 678 s m ⁻¹ y 651 s m ⁻¹ , respectivamente. -Las resistencias estomáticas de los <i>Sedums</i> y el pasto durante la fase media de crecimiento (a medida que la superficie de las hojas varía) se estimaron en 958 y 606 s m ⁻¹ , respectivamente. -La eficacia de los tres métodos sigue generalmente el patrón de FAO56 > T-M > P-M para los <i>Sedums</i> , y FAO56 > P-M > T-M para el pasto. -Los modelos mejorados (por ejemplo, no lineales) de Kc y Ks se recomiendan para las regiones secas que dependen del riego.	Feng <i>et al.</i> , 2018

			coeficiente de estrés hídrico para calcular la ET real.				
Shenzhen, China (Subtropical húmedo, Cfa)	Lisímetro cilíndrico de PVC (0.20 m ²)	100 mm de sustrato y una capa de almacenamiento de hasta 50 mm de profundidad. <i>Sedum lineare</i>	Modelo basado en el concepto de equilibrio hídrico, considerando la capa de sustrato y la capa de almacenamiento de las cubiertas verdes como dos depósitos de agua que interactúan. La interacción incluyó la filtración de la capa de sustrato a la capa de almacenamiento durante los períodos de lluvia y la evaporación de la capa de almacenamiento (E stor) a la capa de sustrato durante los períodos secos, estimada con la ecuación modificada de Dalton. -AETsurf es la evapotranspiración real de la superficie y se compuso de la evaporación real del suelo (Ea) y la transpiración real de las plantas (Ta). - La evaporación potencial (Ep) y la transpiración (Tp) se separaron mediante la ley de Beer de la evapotranspiración potencial (PET). -La PET se calculó mediante el modelo Penman-Monteith. - Se consideró el contenido de humedad del suelo para calcular la evaporación real del suelo (Ea). - La función de absorción de agua por las raíces de Feddes se utilizó para calcular la transpiración real (Ta) y las	Aproximadamente de 0.9 a 1.2 mm d ⁻¹ a medida que la profundidad de la capa de almacenamiento o cambia de 0 mm a 50 mm.	-	-La AET diaria de las cubiertas verdes disminuyó con el aumento del periodo seco antecedente. - Una capa de almacenamiento adicional puede aumentar la AET de las cubiertas verdes. El efecto podría ser más pronunciado en condiciones meteorológicas con mayor temperatura, mayor cantidad de lluvia y mayor ADP. - La AET mensual promedio fue mayor en la estación húmeda que en la estación seca. - Los resultados indicaron que los beneficios hidrológicos (por ejemplo, la reducción del escurrimiento y el aumento de la AET) de las azoteas verdes se fortalecen con el aumento de la profundidad de la capa de almacenamiento; sin embargo, la tasa de aumento se reduce significativamente cuando la profundidad de la capa de almacenamiento es mayor de 20 mm.	Li <i>et al.</i> ,2019

			funciones van Genuchten (1980)-Mualem (1976). -El LAI se estimó mediante imágenes digitales de cobertura y su valor medio fue de 0.88.				
Sheffiled, Reino Unido Unido (Oceánico templado, Cfb)	Cámara climatizada Módulos de prueba en células de carga (0.06 m ²)	80 mm de sustrato. Se evaluaron diferentes tipos de sustrato (LECA, HLS y SCS) <i>Sedum</i> , flor de la pradera y sin vegetación.	- Se estableció un montaje experimental para supervisar continuamente los cambios en el balance de masas (inferidos como cambios en la humedad, es decir, ET). - Los datos experimentales se utilizaron para evaluar el modelo simple de balance de humedad propuesto por Stovin et al. (2013). Éste tiene en cuenta los factores climáticos (en el cálculo de la PET) y el contenido de humedad (mediante la consideración de S_{MAX} y S_t) para predecir la ET (ET Pred): $ET_{Pred} = \frac{S_t}{S_{MAX}} \times PET$ - Se utilizó el enfoque Penman-Monteith de la FAO-56 para determinar la PET .	2.0 mm d ⁻¹ en primavera y 3.4 mm d ⁻¹ en verano.	1.8 mm d ⁻¹ para primavera y 4.5 mm d ⁻¹ Verano.	-La ET fue mayor en las condiciones más cálidas del verano que en las temperaturas más bajas de la primavera. - El contenido de humedad es un factor crítico que influye en las tasas de ET y en la capacidad de retención. Debe aplicarse un factor a la PET para corregir el descenso de la ET cuando disminuye la disponibilidad de humedad. - No se identificaron diferencias significativas en la ET entre los sistemas con vegetación de <i>Sedum</i> y Flor de la Pradera. - Las diferencias en las características hídricas y edáficas de un sustrato pueden tener una influencia significativa en la ET (por ejemplo, LECA frente a HLS). Sin embargo, cuando las características hídricas y edáficas son relativamente similares (por ejemplo, HLS frente a SCS), las diferencias no fueron significativas. -La ET se puede predecir con muy buena precisión mediante un modelo simplista que tiene en cuenta el clima (con un cálculo de la PET) y el balance de humedad (utilizando una función de extracción de la humedad del suelo).	Pöe <i>et al.</i> , 2015

1 **3.5. Conclusiones**

2 Este trabajo cuantificó la evapotranspiración en dos azoteas verdes extensivas bien establecidas
3 con aproximadamente 20 años de edad y diferentes características en pendiente, propiedades
4 del sustrato y cobertura vegetal durante dos temporadas de lluvias y una de secas (19 meses)
5 en la Ciudad de México. Para ello se utilizaron datos observados de contenido de humedad en
6 el sustrato, variables meteorológicas y cobertura vegetal. La ET se calculó a partir de ET_0 , el
7 coeficiente de cultivo (K_c) que relaciona ET y ET_0 en condiciones óptimas, y las funciones f
8 (LAI) y f (SWC) que toman en cuenta efectos de la densidad de la vegetación y de déficit
9 evaporativo sobre la ET. Además, se incluyó un modelo de interceptación para las condiciones
10 de dosel húmedo con el objetivo de determinar la ET total durante el periodo estudiado.

11 Los resultados mostraron que la humedad en el sustrato es el parámetro limitante que
12 regula la ET en las azoteas verdes estudiadas. La vegetación evapotranspira a su tasa máxima
13 ($\sim 2 \text{ mm día}^{-1}$) sobre el rango de humedad entre 10 y 30%; sin embargo, se observó que la tasa
14 de ET disminuye rápidamente cuando la humedad desciende por debajo del 10%. De los
15 modelos utilizados, la estimación de ET empleando el modelo escalonado mostró un mejor
16 ajuste con los valores observados y redujo el error de predicción en ambas azoteas verdes. Así
17 también, mostraron que las zonas con cobertura vegetal de crecimiento anual tuvieron un mayor
18 aporte a la ET de las azoteas verdes en comparación con las zonas de vegetación perenne,
19 principalmente durante las temporadas de lluvias.

20 Por otra parte, la interceptación de la lluvia por el dosel y su contribución a la ET de las
21 azoteas verdes es un parámetro no explorado. Las estimaciones con el modelo de Liu del
22 presente estudio, reportan que la interceptación tuvo una contribución de entre 15 y 20 % a la
23 ET total.

1 Por último, se observó un claro patrón estacional en las estimaciones de ET total para
2 ambas azoteas verdes, con tasas altas durante las temporadas de lluvias y bajas en la época
3 seca, donde la ET total promedio fue mayor en la EGRns para las temporadas de lluvias y la
4 seca. Concretamente, las tasas de ET para las condiciones de dosel seco tuvieron una mayor
5 contribución en la ET total. Asimismo, la relación promedio de ET/ET_0 fue mayor en las
6 azoteas verdes (EGRns: 0.50 y EGRws: 0.44) durante las temporadas de lluvias debido a la alta
7 disponibilidad de agua en el sustrato; mientras que esta misma relación para la temporada de
8 secas fue menor (0.10), asociado a una mayor limitación de agua en el sustrato.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

4.1. Procesos hidrológicos en las azoteas verdes extensivas estudiadas

A través de la literatura científica, se ha mostrado que las azoteas verdes retienen eficazmente un porcentaje de la precipitación en función de sus características biofísicas (la estructura y materiales que conforman la capa anti-raíz y de drenaje, tipo, propiedades y profundidad del sustrato, edad y tipo de vegetación) y factores abióticos (temperatura, humedad relativa, precipitación), incluyendo las características de la lluvia (cantidad, duración e intensidad de eventos) los cuales determinan de forma importante sus rendimientos hídricos. Los sistemas extensivos de azoteas verdes son los más comunes debido a que su implementación conlleva una menor carga de peso sobre las edificaciones y ayudan a reducir la huella impermeable de una construcción. Asimismo las especies suculentas, en específico las del género *Sedum*, son las más recurrentes en este tipo de azoteas verdes por su capacidad de adaptación a condiciones de baja disponibilidad de agua.

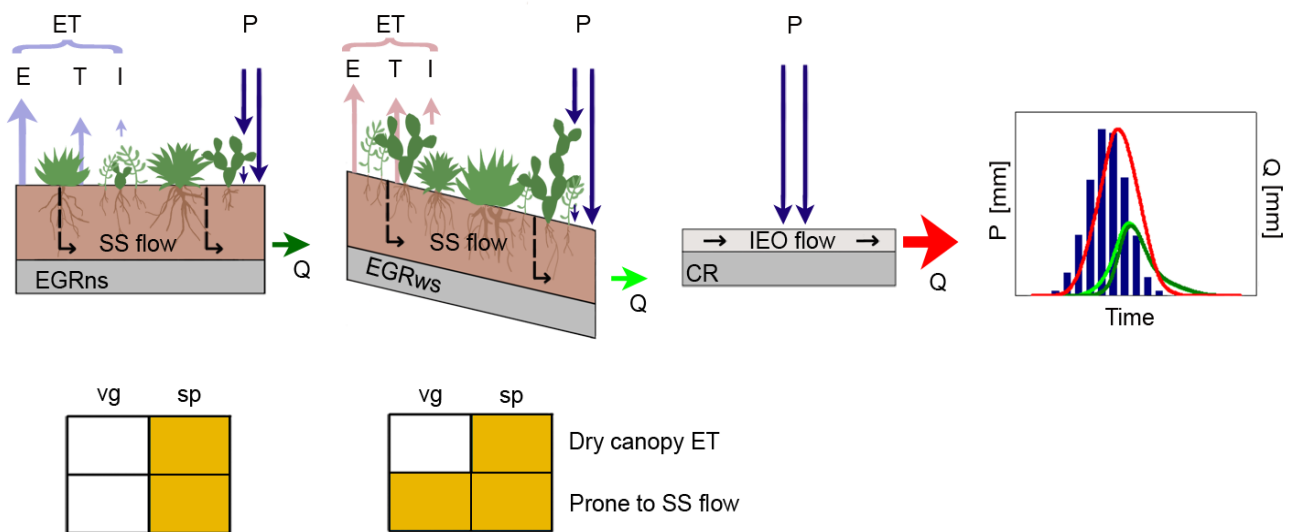
De acuerdo a los resultados obtenidos en ambos capítulos de investigación, la interceptación de lluvia durante y después de un evento (evaporación en condiciones de dosel húmedo) fue un poco mayor en la azotea con 14° de pendiente (EGRws) debido probablemente a un mayor desarrollo y altura de su vegetación en comparación con la azotea con menos pendiente (EGRns). Se observó que al inicio de los eventos de lluvia, la humedad del sustrato en ambas azoteas verdes estuvo generalmente por debajo de la capacidad de campo (FC). Sin embargo, los contenidos de agua en el sustrato fueron aumentando rápidamente en ambas coberturas (con vegetación perenne y escasa vegetación) con el progreso de la lluvia, de manera que el escurrimiento ocurrió antes de alcanzar la FC local o en los picos máximos de precipitación. Por lo tanto, la generación del escurrimiento en ambas azoteas estuvo controlada

1 principalmente por flujos subsuperficiales (SS) y en menor medida por flujos superficiales por
2 exceso de saturación (8-9%, SEO); mientras que en la azotea convencional ocurrieron
3 únicamente flujos superficiales por exceso de infiltración (IEO) en respuesta a la lluvia. Lo
4 cual es consistente con la mayoría de los estudios previos en azoteas verdes (Stovin *et al.*, 2012;
5 Villarreal y Bengtsson, 2005), donde reportan una dominancia de escurrimientos por flujos
6 subsuperficiales debido a la alta porosidad y permeabilidad que caracteriza a las azoteas verdes.

7 En general, la EGRws presentó una mayor respuesta a la lluvia, rebasando la humedad
8 a capacidad de campo local en un mayor porcentaje de eventos (71%) en comparación con la
9 EGRns (53%). Al integrar estos resultados con el estudio de evapotranspiración (Capítulo III),
10 podemos concluir que este comportamiento se debe a un mayor contenido de grava (64%) y
11 alta porosidad del sustrato (77%) en la EGRws, que en consecuencia le brinda una mayor
12 conductividad hidráulica (K_{fs}), aunado a la menor profundidad de sustrato y su pendiente más
13 pronunciada, y en menor medida a los contenidos de humedad del sustrato. Particularmente,
14 los sustratos debajo de vegetación escasa (sp) presentaron una mayor retención de humedad en
15 ambas azoteas verdes, lo que puede atribuirse a la compactación del sustrato y una
16 posiblemente una acumulación de partículas finas en las capas inferiores del sustrato (Berretta
17 *et al.*, 2014); mientras que las áreas más vegetadas (vg) presentaron una menor densidad
18 aparente, debido probablemente a las raíces que abarcan gran parte del espacio reduciendo la
19 capacidad de almacenamiento en el sustrato, al igual que contribuyen a la percolación más
20 rápida del agua a través de flujos preferenciales.

21 En eventos de lluvia, el retraso observado en el inicio del escurrimiento pluvial fue
22 mayor en la EGRns (117 min en promedio) que en la EGRws (87 min), lo cual se atribuye a
23 una mayor profundidad del sustrato (+22%), una menor pendiente y menor porosidad de la
24 EGRns. Por otra parte, el tiempo que se prolongó el escurrimiento una vez finalizado el evento

1 de lluvia fue muy comparable entre azoteas verdes (~340 min). En promedio, la retención de
 2 lluvia en las azoteas verdes estudiadas fue del 60%. Aunque las diferencias en retención fueron
 3 mínimas entre ellas, la EGRns retuvo el doble de los eventos de lluvia en su totalidad en
 4 comparación con las EGRws, lo que puede atribuirse a su mayor profundidad de sustrato y a
 5 la menor pendiente. En ambas EGRs, un menor antecedente de precipitación (AP_7) implicó una
 6 mayor retención de la lluvia. En cambio, la azotea convencional mostró una mínima retención
 7 de lluvia (3%), retrasos cortos en el inicio del escurrimiento pluvial (20 min) y duraciones
 8 cortas del escurrimiento una vez finalizado el evento de lluvia (258 min).



9
 10 Figura 19. Diagrama conceptual de los procesos hidrológicos en las azoteas verdes extensivas
 11 estudiadas. El color amarillo muestra la cobertura del sustrato (vg, sp) con mayor contribución
 12 a la ET de dosel seco y al flujo subsuperficial (SS) en cada azotea verde.

13
 14 Una vez concluida la lluvia y durante los períodos secos observados entre los eventos
 15 de P (condiciones de dosel seco), se observó que ambas azoteas verdes evapotranspiran a su
 16 tasa máxima ($\sim 2 \text{ mm día}^{-1}$) sobre un rango amplio de humedad; sin embargo cuando los
 17 contenidos de agua en el sustrato llegaron a un valor crítico, en este caso $\sim 10\%$, la

1 evapotranspiración (ET) disminuyó drásticamente. Al comparar entre las distintas condiciones
2 (dosel húmedo y seco), la ET del dosel seco tuvo la mayor contribución a la ET total en ambas
3 azoteas verdes; y por coberturas, las áreas con escasa vegetación o de crecimiento anual
4 presentaron un mayor aporte a la ET del dosel seco en ambas azoteas verdes en comparación
5 con las zonas de vegetación perenne, principalmente durante las temporadas de lluvias. Sin
6 embargo durante la época seca, las tasa de ET fueron muy bajas.

7 Por otro lado, la EGRns presentó una mayor ET total diaria para ambas temporadas
8 (lluvias y seca), lo que probablemente se deba a una mayor capacidad de almacenamiento en
9 el sustrato debido a que tiene una profundidad superior comparada con la EGRws. La
10 disminución de la ET a una cuarta parte en la temporada de secas, se relacionó con humedades
11 iniciales más bajas y menores temperaturas ambientales, además del marchitamiento y la
12 pérdida de hojas de la vegetación, que en consecuencia disminuyó la cobertura vegetal en
13 ambas EGRs. Resultados similares fueron obtenidos por Li y colaboradores (2019), quienes
14 plantearon un modelo hidrológico modificado para azoteas verdes e indicaron que el promedio
15 de ET real fue mayor en la estación húmeda que en la seca y que la ET real disminuyó a medida
16 que el antecedente de precipitación aumentó.

17 **4.2. Consideraciones y trabajo a futuro**

18 El estudio de los procesos hidrológicos en azoteas verdes extensivas maduras, con diversidad
19 vegetal en una región tropical, al igual que la estimación de la ET real y la contribución de sus
20 distintos componentes (evaporación de dosel seco y húmedo) fueron la aportación más
21 importante de este trabajo de tesis. Sin embargo, se presentaron algunas limitaciones durante
22 el desarrollo del presente trabajo de investigación cómo se explican a continuación.

1 Algunas de las determinaciones de las propiedades del sustrato realizadas en laboratorio
2 e *in situ* mostraron diferencias importantes (densidad aparente, humedad a capacidad de
3 campo) o incluso no pudieron realizarse en laboratorio (por ejemplo, la permeabilidad) debido
4 a las propiedades particulares de los sustratos en las azoteas verdes, como fueron altos
5 contenidos de grava (33-64%), arena (23-50%) y materia orgánica (12-15%). Asimismo, tanto
6 Fassman y Simcock (2012) como Berretta *et al.* (2014) encontraron que los métodos estándar
7 de laboratorio (como FLL 2002; 2008; ASTM 2011) no proporcionan estimaciones adecuadas
8 para las determinaciones de las propiedades del sustrato *in situ*, dado que se realizan en
9 sustratos pre-saturados y no consideran el sistema radicular de la vegetación, la compactación
10 en el sustrato, ni otros elementos de las azoteas verdes en campo. Por lo tanto, es necesario
11 seguir realizando más investigación para establecer mejores métodos de determinación de las
12 propiedades hidrofísicas del sustrato en las azoteas verdes.

13 Otro aspecto importante para obtener una mejor representación de los contenidos de
14 humedad en el sustrato de las azoteas verdes, es la colocación adecuada de los sensores basados
15 en capacitancia o en reflectometría de dominio del tiempo (TDR) en el perfil del sustrato. Para
16 ello, se sugiere tomar en cuenta la profundidad del sustrato y el área de detección de los
17 sensores, para colocarlos en disposición vertical a profundidades alternadas y medir los
18 contenidos de humedad en el sustrato a lo largo del todo el perfil. Terminado el experimento
19 en campo, sugerimos realizar la calibración de los sensores de humedad por un período de tres
20 meses en laboratorio, para registrar por lo menos dos ciclos de humedecimiento y secado de
21 forma natural en las muestras extraídas, dado que la compactación de las mismas puede dar
22 lugar a un comportamiento diferente (Berretta *et al.*, 2014), además de tener varias réplicas
23 para obtener resultados más confiables.

1 La evapotranspiración es un componente importante en los modelos de balance hídrico
2 de las azoteas verdes, aunque se reconoce que es un parámetro difícil de medir con precisión
3 (Starry *et al.*, 2016). La ecuación Penman-Monteith de la FAO-56 fue un método que permitió
4 calcular la ET real a partir de la ET de referencia (ET_0), el coeficiente de cultivo K_c y las
5 funciones de respuesta (el contenido de humedad en el sustrato y el índice de área foliar). No
6 obstante habrá que tomar en cuenta las siguientes consideraciones para mejorar futuras
7 estimaciones de ET: 1) Parametrizar la función de LAI separando por tipo de cobertura (en este
8 caso vegetada y con escasa vegetación) en azoteas verdes y con diversidad vegetal y 2) Realizar
9 mediciones para determinar la capacidad de almacenamiento específica del dosel (S) en las
10 plantas presentes en las azoteas verdes con el objetivo de estimar mejor la capacidad de
11 almacenamiento del dosel (C_m), parámetro que se utiliza en el modelo de interceptación de Liu
12 (2001).

13 Futuros estudios podrían incorporar las consideraciones anteriormente mencionadas
14 para mejorar las estimaciones de la ET y/o investigar la influencia de distintas profundidades
15 del sustrato en los procesos hidrológicos de las azoteas verdes. También podrían determinarse
16 las diferencias en la morfología de las raíces de las plantas (diámetro, densidad y longitud de
17 las raíces) para evaluar su impacto en la conducción de agua y posible flujo preferencial. Otra
18 oportunidad de investigación podría medir el efecto de diferentes prácticas de manejo en la ET
19 y el escurrimiento de las azoteas verdes.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35

REFERENCIAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration–guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>

Arellano-Leyva, E. A. (2017). *Efecto de la naturación en la generación de escurrimiento por lluvias en azoteas* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Arellano-Leyva, E. A., Hernández-Quiroz, M., Huerta-Guzmán R. G., & Collazo-Ortega, M. (2016). Extensive green roofs as a means to capture polycyclic aromatic hydrocarbons. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 37, 280-291 <https://doi.org/10.1080/10406638.2015.1105827>

Arellano-Leyva, E. A., López-Portillo M., Muñoz-Villers L. E., & Prado-Pano B. L. (2021). Rainfall retention and runoff generation processes in tropical mature green roof ecosystems. *Hydrological Processes*, 35(11), 1-14. <https://doi.org/10.1002/hyp.14382>

ASTM. (2011). Standard test method for maximum media density for dead load analysis of green roof systems. E2399-11, ASTM, West Conchohocken, PA.

Ávila-Hernández, A., Simá, E., Xamán, J., Hernández-Pérez I., Téllez-Velázquez E., & Chagolla-Aranda M. A. (2020). Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico. *Energy & Buildings*. 209. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109709>

Bengtsson, L., Grahn, L., & Olsson, J. (2004). Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Nordic Hydrology*, 36(3), 259-268. <https://doi.org/10.2166/nh.2005.0019>

Berghage, R., Jarrett, A., Beattie, D., Kelley, K., Husain, S., Rezai, F., Long, B., Negassi, A., & Cameron R. (2007). Quantifying Evaporation and Transpiration Water Losses from Green Roofs and Green Roof Media Capacity for Neutralizing Acid Rain. Penn State University, University Park, Pennsylvania.

Berretta, C., Poë, S., & Stovin V. (2014). Moisture content behavior in extensive green during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *Journal of Hydrology*, 511, 374-386. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.036>

Bravo, J. L., Azpra, E., Zarraluqui, V., & Gay, C. (2014). Some variations of the rainfall in Mexico City from 1954 to 1998 and their statistical significance. *Atmósfera*, 27(4), 367-376. <https://doi.org/10.20937/ATM.2014.27.04.03>

Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59(1), 39-46.

- 1 Cano Vázquez Gabriela. (2021). *Evaluación del desempeño de azoteas verdes*
2 *extensivas en la retención de contaminantes, Ciudad de México.* (Tesis de Maestría).
3 Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- 4 Carpenter, D. D., & Kaluvakolanu, P. (2011). Effect of roof surface type on storm-
5 water runoff from full-scale roofs in a temperate climate. *Journal of Irrigation and Drainage*
6 *Engineering*, 137(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000185](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000185)
- 7 Carpenter, C. M. G., Todorov, D., Driscoll, Ch. T., & Montesdeoca, M. (2016). Water
8 quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring
9 observations. *Environmental Pollution*, 218, 664-672.
10 <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.056>
- 11 Carter, T. L., & Rasmussen, T. C. (2006). Hydrologic behavior of vegetated roofs.
12 *Journal of the American Water Resources Association*, 42(5), 1261-1274.
13 <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb05299.x>
- 14 Cascone, S., Coma, J., Gagliano, A., & Pérez, G. (2019). The evapotranspiration
15 process in green roofs: A review. *Building and Environment*. 147:337-355.
16 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>
- 17 Clothier, B. E., & White, I. (1981). Measurement of sorptivity and soil water
18 diffusivity in the field. *Soil Science Society of America. Journal*, 45(2), 241–245.
19 <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500020003x>
- 20 DeNardo, J. C., Jarret, A. R., Manbeck, H. B., Beattie, D. J., & Berghage, R. D.
21 (2005). Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions*
22 *of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 48(4), 1491-1496.
- 23 De-Ville, S., Menon, M., Jia, X., Reed, G., & Stovin V. (2017). The impact of green
24 roof ageing on substrate characteristics and hydrological performance. *Journal of Hydrology*.
25 547, 332-344. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.006>
- 26 DiGiovanni, K., Montalto, F., Gaffin, S., & Rosenzweig, C. (2013). Applicability of
27 Classical Predictive Equations for the Estimation of Evapotranspiration from Urban Green
28 Spaces: Green Roof Results. *Journal of Hydrologic Engineering*. 18(1):99-107.
29 <https://dx.doi.org/10.1061/41173%28414%2980?src=recsys>
- 30 Driscoll, E. D., Palhegyi, G. E., Strecker, E. W., & Shelley, P. E. (1989). *Analysis of*
31 *storm events characteristics for selected rainfall gauges throughout the United States.*
32 Washington, DC: US Environmental Protection Agency.
- 33 Fassman, E., & Simcock R. (2012). Moisture measurement as performance criteria for
34 extensive living roof substrates. *Journal of Environmental Engineering*. 138, 841-851.
35 <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0000532>

- 1 Feng, Y., Burian, S. J., & Pardyjak, E. R. (2018). Observation and Estimation of
2 Evapotranspiration form an Irrigated Green Roof in a Rain-Scarce Environment. *Water*. 10(3),
3 262. <https://doi.org/10.3390/w10030262>
- 4 Ferrans, P., Rey, C. V., Pérez, G., Rodríguez, J. P., & Díaz-Granados, M. (2018).
5 Effect of green roof configuration and hydrological variables on runoff water quantity and
6 quality. *Water*, 10(7), 960 p. <https://doi.org/10.3390/w10070960>
- 7 FLL (Forschungsgessellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau). 2002.
8 Guidelines for the planning, execution, and upkeep of green-roof sites. Forschungsgessellschaft
9 Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V., Bonn, Germany.
- 10 FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau), 2008.
11 Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing.
12 Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V, Bonn, Germany.
- 13 García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen
14 (5th ed., p. 90). México D. F.: Instituto de Geografía UNAM. Retrieved from
15 [http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/
16 modific_al_sis.pdf](http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf)
- 17 Gash, J. H. C. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests.
18 *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 105 (443): 43.55.
19 <https://doi.org/10.1002/qj.49710544304>
- 20 Getter, L. K., Rowe, B. D., & Andresen, J. A. (2007). Quantifying the effect of slope
21 on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31, 225-231.
22 <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004>
- 23 Gómez-Tagle, C. A., Gómez-Tagle, R. A. F., Batlle-Sales, J., Zepeda, C. H., Guevara,
24 S. M. A., Maldonado, L. S., & Pintor, A. J. E. (2008). Conductividad hidráulica saturada de
25 campo: uso de un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. *Terra Latinoamericana*,
26 26, 287-297.
- 27 González-Martínez, T. M. & Holwerda, F. (2018). Rainfall and fog interception at the
28 lower and upper altitudinal limits of cloud forest in Veracruz, Mexico. *Hydrological Processes*.
29 32:3717-3728. <https://doi.org/10.1002/hyp.13299>
- 30 Guderle, M., & Hilderbrandt, A. (2015). Using measured soil wáter contents to
31 estimate evapotranspiration and root wáter uptake profile – a comparative study. *Hydrology
32 and Earth System Sciences*. 19: 409-425. [www.hydrol-earth-syst-
33 sci.net/19/409/2015/doi:10.5194/hess-19-409-2015](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/409/2015/doi:10.5194/hess-19-409-2015)
- 34 Hakimdavar, R., Culligan, P. J., Finazzi, M., Barontini, S., & Ranzi, R. (2014). Scale
35 dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall

- 1 characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. *Ecological*
2 *Engineering*, 73, 494-508. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.080>
- 3 Hilten, R. (2005). An Analysis of the Energetics and Stormwater Mediation Potential
4 of Greenroofs. Master's thesis: University of Georgia, Department of Biological and
5 Agricultural Engineering.
- 6 Hoelscher, M.-T., Nehls, T., Jänicke, B., y Wessolek, G. (2016). Quantifying cooling
7 effects of facade greening: shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*. 114:
8 283-290. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>
- 9 Huang K., Li, X., Liu, X., & Seto, C. K. (2019). Projecting global urban land expansion
10 and heat island intensification through 2050. *Environmental Research Letters*. **14** 114037.
11 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4b71>
- 12 IPCC (2018). Chapter 3: Impacts of 1.5° C of global warming on natural and human
13 systems. In: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global*
14 *warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission*
15 *pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change,*
16 *sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.
17 O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R.
18 Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T.
19 Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva,
20 Switzerland, 175 p.
- 21 Jahanfar, A., Drake, J., Sleep, B. & Gharabaghi, B. (2018). A modified FAO
22 evapotranspiration model for refined water Budget analysis for Green Roof systems.
23 *Ecological Engineering*. 119:45-53. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.021>
- 24 Jim & Peng, 2012. Weather effect on thermal and energy performance of an extensive
25 tropical green roof. *Urban Forestry & Urban Greening*. 11:73-85.
26 <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.10.001>
- 27 Kazemi, F., & Mohorko, R. (2017). Review on the roles and effects of growing media
28 on plant performance in green roofs in world climates. *Urban Forestry & Urban Greening*. 23,
29 13-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2017.02.006>
- 30 Kemp, S., Hadley, P., & Blanuša, T. (2019). The influence of plant type on green roof
31 rainfall retention. *Urban Ecosystems*, 22, 355-366. [https://doi.org/10.1007/s11252-018-0822-](https://doi.org/10.1007/s11252-018-0822-2)
32 2
- 33 Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, L. P. (2006). *Plant physiological ecology*.
34 Springer-Science + Business Media, LLC, New York 2006, 540 p.

- 1 Li, S., Qin, H., Peng, Y., & Khu, T. S. (2019). Modelling the combined effects of
2 runoff reduction and increase in evapotranspiration for green roofs with a storage layer.
3 *Ecological Engineering*. 127:302-311. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.003>
- 4 Li, Y., Zhou, Y., Wang, H., Jiang, H., Yue, Z., Zheng, K., Wu, B., & Banahene, P.
5 (2022). Characterization and sources apportionment of overflow pollution in urban separate
6 stormwater systems inappropriately connected with sewage. *Journal of Environmental*
7 *Management*. 303: 114231. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114231>
- 8 Liu, S. G. (2001). Evaluation of the Liu model for predicting rainfall interception in
9 forests world-wide. *Hydrological Processes*. 15 (12): 2341-2360.
10 <https://doi.org/10.1002/hyp.264>
- 11 Liu, W., Feng, Q., Chen, W., & Wei, W. (2020). Assessing the runoff retention of
12 extensive green roofs using runoff coefficients and curve numbers and the impacts of substrate
13 moisture. *Hydrology Research*, 51 (4): 635-647. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.167>
- 14 Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnberg-Nielsen, K., Jensen, M. B., &
15 Binning, P. J. (2014). Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage
16 applications. *Journal of Hydrology*, 519, 3237–3248.
17 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.030>
- 18 Loiola, C., Wellington, M., & Pimentel da Silva, L. (2019). Hydrological performance
19 of modular-tray green roof systems for increasing the resilience of mega-cities to climate
20 change. *Journal of Hydrology*, 573, 1057-1066. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.004>
- 21 Manley, E., Ogneva-Himmelberger, Y., Ruelle, M., Hanumantha R., Mazari-Hiriart,
22 M., & Downs, T. J. (2022). Land-cover change and urban growth in the Mexico-Lerma-
23 Cutzamala Hydrological Region, 1993–2018. *Applied Geography*. 147: 102785.
24 <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102785>
- 25 Marasco, D. E., Culligan, P. J., & McGillis, W. R. (2015). Evaluation of common
26 evapotranspiration models based on measurements from two extensive green roofs in New
27 York City. *Ecological Engineering*. 84:451-462.
28 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.001>
- 29 Marasco, D. E., Hunter, B. N., Culligan, P. J., Gaffin, S. R., & McGillis, W. R. (2014).
30 Quantifying Evapotranspiration from Urban Green Roofs: A Comparison of Chamber
31 Measurement with Commonly Used Predictive Methods. *Environmental Science &*
32 *Technology*. 48(17): 10273 – 10281. <https://doi.org/10.1021/es501699h>
- 33 Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the
34 rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*,
35 77(3), 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>

- 1 Mobilia, M., Longobardi, A., & Sartor, J. F. (2017). Including A-Priori Assessment
2 of Actual Evapotranspiration for Green Roof Daily Scale Hydrological Modelling. *Water*, 9(2),
3 72. <https://doi.org/10.3390/w9020072>
- 4 Monteith, J. L. (1965). Evaporation and the Environment. In the State and Movement
5 of Water in Living Organisms. Proceedings of the Society for Experimental Biology,
6 Symposium No. 19, *Cambridge University Press*, Cambridge. pp. 205-234.
- 7 Moran, A. C., Hunt, W. F., & Smith, J. T. (2005). Green roof hydrologic and water
8 quality performance from two field sites in North Carolina. Paper presented at: Watershed
9 Management Conference, Williamsburg, Virginia. [https://doi.org/10.1061/40763\(178\)99](https://doi.org/10.1061/40763(178)99)
- 10 Nagase, A., & Dunnett, N. (2011). The relationship between percentage of organic
11 matter in substrate and plant growth in extensive green roofs. *Landscape and Urban Planning*.
12 103 (2): 230-236. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.012>
- 13 National Oceanic and Atmospheric Administration. (2007). Storm Data Preparation
14 National Weather Service Instruction (NWSI), 10-1605. Asheville, North Carolina.
- 15 Nawaz, R., McDonald, A., & Postoyko, S. (2015). Hydrological performance of a
16 full-scale extensive green roof located in a temperate climate. *Ecological Engineering*, 82, 66-
17 80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.061>
- 18 Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R.R, Doshi, H., Dunnett, N.,
19 Gaffin, S., Köhler, M., Liu, Y. K. & Rowe, B. (2007). Green Roofs as urban ecosystems:
20 ecological structures, functions, and services. *Bioscience*. 57:823–33.
21 <http://www.jstor.org/stable/10.1641/B571005>.
- 22 Palla, A., Gnecco, I., & Lanza, L. G. (2010). Hydrologic restoration in the urban
23 environment using green roofs. *Water*, 2(2), 140–154. <https://doi.org/10.3390/w2020140>
- 24 PEMBU - UNAM (2020). Datos meteorológicos históricos. Programa de Estaciones
25 Meteorológicas del Bachillerato Universitario, México. Retrieved from
26 https://www.ruoa.unam.mx/pembu/index.php?page=historical_facts (last access: 17 August
27 2020).
- 28 Pfahl, S., O’Gorman, P. A., & Fischer, E. M. (2017). Understanding the regional
29 pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, 7, 423-
30 427. <https://doi.org/10.1038/nclimate3287>
- 31 Pöe, S., Stovin, V., & Berretta, C. (2015). Parameters influencing the regeneration of
32 a green roof’s retention capacity via evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 523, 356-367.
33 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.002>

- 1 Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux
2 and Evaporation Using Large Scale Parameters. *Monthly Weather Review*. 100, 81-92.
3 [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081: OTAOSH>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081: OTAOSH>2.3.CO;2)
- 4 Rassaghmanesh, M., Beechem, S., & Salemi, T. (2016). The role of green roofs in
5 mitigation Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia.
6 *Urban Forestry & Urban Greening*. 15: 89-102. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.11.013>
- 7 Rutter, A. J., Robins, P. C., Morton, A. J., & Kershaw, K. A. (1972). A predictive
8 model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a
9 plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*. 9(5-6): 367-384.
10 [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90034-3](https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90034-3)
- 11 Schneider, D., Wadzuk, B. M., & Traver, R. G. (2011). Using a Weighing Lysimeter
12 to Determine a Crop Coefficient for a Green Roof to Predict Evapotranspiration with the FAO
13 Standardized Penman-Monteith Equation. In *World Environmental and Water Resources*
14 *Congress: Bearing Knowledge for Sustainability*.
15 <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/41173%28414%29380>
- 16 Shafique, M., Kim, R., & Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and
17 challenges-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 90, 757-773.
18 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>
- 19 Sherrard, J. A., & Jacobs, J. M. (2012). Vegetated Roof Water-Balance Model:
20 Experimental and Model Results. *Journal of Hydrologic Engineering*. 17(8).
21 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000531](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000531)
- 22 Sims, A. W., Robinson, C. E., Smart, C. C., Voogt, J. A., Hay, G. J., Lundholm, J. T.,
23 ... O'Carroll, D. M. (2016). Retention performance of green roofs in three different climate
24 regions. *Journal of Hydrology*, 542, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.055>
- 25 Sinha, S., Rode, M., & Borchardt D. (2016). Examining runoff generation processes
26 in the Selke catchment in central Germany: Insights from data and semi-distributed numerical
27 model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 7,38-54.
28 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.06.002>
- 29 Soulis, K. X., Ntoulas, N., Nektarios, P. A., & Kargas, G. (2017). Runoff reduction
30 from extensive green roofs having different substrate depth and plant cover. *Ecological*
31 *Engineering*, 102, 80-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.031>
- 32 Speak, A. F., Rothweell, J. J., Lindley, S. J., & Smith, C. L. (2013). Rainwater runoff
33 retention on an aged intensive green roof. *Science of the Total Environment*, 461-462, 28-38.
34 <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.085>

- 1 Starr, J. L., & Paltineanu, I. C. (2002). Methods for measurement of soil water content:
2 Capacitance devices. In *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods* (pp. 463-474). Dane,
3 J. H. & Topp, G. C. (Eds.) Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.
- 4 Starry, O., Lea-Cox, J., Ristvey, A., & Cohan, S. 2016. Parameterizing a Water-
5 Balance Model for Predicting Stormwater Runoff from Green Roofs. *Journal of Hydrologic*
6 *Engineering*. 21 (12):04016046. [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001443)
7 [5584.0001443](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001443)
- 8 Stovin, V., Poë, S., & Berretta C. (2013). A modelling study of long term green roof
9 retention performance. *Journal of Environmental Management*. 131, 206-215.
10 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.026>
- 11 Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a
12 green roof test bed under UK climate conditions. *Journal of Hydrology*, 414-415, 148-161.
13 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022>
- 14 Stovin, V., Poë, S., De-Ville, S., & Berretta, C. (2015). The influence of substrate and
15 vegetation configuration on green roof hydrological performance. *Ecological Engineering*, 85,
16 159-172. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.076>
- 17 Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a
18 green roof test bed under UK climate conditions. *Journal of Hydrology*, 414-415, 148-161.
19 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022>
- 20 Talebi, A., Bagg, S., Sleep, E. & O'Carroll, M. (2019). Water retention performance
21 of green roof technology: A comparison of canadian climates. *Ecological Engineering*, 126, 1-
22 15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.10.006>
- 23 Tabares-Velasco, P. C., & Srebric, J. (2011). Experimental quantification of heat and
24 mass transfer process through vegetated roof samples in a new laboratory setup. *International*
25 *Journal of Heat and Mass Transfer*. 54 (25-26): 5149-5162.
26 <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.08.034>
- 27 Teemusk, A., Kull A., Kanal, A., & Mander, Ü. (2019). Environmental factors
28 affecting greenhouse gas fluxes of green roofs in temperate zone. *Science of the Total*
29 *Environment*. 694. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133699>
- 30 Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate.
31 *American Geographical Society*. 38(1): 55-94. <http://dx.doi.org/10.2307/210739>
- 32 Thuring, C. E., & Dunnett, N. (2014). Vegetation composition of old extensive green
33 roofs (from 1980s Germany). *Ecological Processes*, 3,4. [https://doi.org/10.1186/2192-1709-3-](https://doi.org/10.1186/2192-1709-3-4)
34 [4](https://doi.org/10.1186/2192-1709-3-4)

- 1 Uhl, M., & Schiedt, L. (2008). Green roof storm water retention – monitoring results.
2 Paper presented at: 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland,
3 UK, 31/8-5/9.
- 4 United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division
5 (2022). World Population Prospects 2022: Summary of Results. UN DESA/POP/2022/TR/NO.
6 3.
- 7 Van Renterghem, T., & Botteldooren, D. (2011). In-situ measurements of sound
8 propagating over extensive green roofs. *Building and Environment*. 46:729-738.
9 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.006>
- 10 VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., Fernandez, R. T., &
11 Xiao, L. (2005). Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope and media
12 depth. *Journal of Environmental Quality*, 34, 1036-1044. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0364>
- 13 Viessman, W., Lewis, G. L., & Knapp, J. W. (1989). *Introduction to hydrology*. (3^a
14 ed.). Harper y Row Publishers, New York, NY.
- 15 Villarreal, E. L., & Bengtsson, L. (2005). Response of a *Sedum* green-roof to
16 individual rain events. *Ecological Engineering*, 25, 1-7.
17 <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.11.008>
- 18 Voyde, E., Fassman, E., & Simcock, R. (2010). Hydrology of an extensive living roof
19 under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *Journal of Hydrology*,
20 394,384-395. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.013>
- 21 Voyde, E., Simcock, R., Fassman, E.A., y Wells, J. (2010). Evapotranspiration rates
22 from New Zealand green roof plant species. In: 32nd Hydrology and Water Resources
23 Symposium 2009, Newcastle, Australia.
- 24 Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Dgtjareff method for
25 determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration
26 method. *Soil Science*, 37(1), 29–38.
- 27 Wan, X., Li, H., & Sodoudi, S. (2022). The effectiveness of cool and green roofs in
28 mitigating urban heat island and improving human thermal comfort. *Building and*
29 *Environment*. 217: 109082. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109082>
- 30 Wang, X., Zhang, Y., Hu, R., Pan, Y., & Berndtsson R. (2012). Canopy storage
31 capacity of xerophytic shrubs in Northwestern China. *Journal of Hydrology*. (454-455):152-
32 159 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.003>
- 33 Wong, G. K. L., & Jim, C. Y. (2014). Quantitative hydrology performance of
34 extensive green roof under humid-tropical rainfall regime. *Ecological Engineering*, 70, 366-
35 378. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.025>

- 1 Wu, L., and L. Pan. 1997. A generalized solution to infiltration from single-ring
2 infiltrimeters by scaling. *Soil Science Society America Journal*. 61:1318–1322
- 3 Xu, Z., Xiong, L., Li, H., Liao, Z., Yin, H., Wu, J., Xu, J., & Chen H. (2017). Influence
4 of rainfall variables and antecedent discharge on urban effluent concentrations and loads in wet
5 weather. *Water Science & Technology*. 75(7):1584-1598. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.020>
- 6 Yin, H., Kong, F., & Dronova, I. (2019). Hydrological performance of extensive green
7 roofs in response to different rain events in a subtropical monsoon climate. *Landscape and*
8 *Ecological Engineering*, 15, 297-313. <https://doi.org/10.1007/s11355-019-00380-z>
- 9 Yio, M. H. N., Stovin, V., Werdin, J., & Vesuviano, G. 2013. Experimental analysis
10 of green roof substrate detention characteristics. *Water Science & Technology*, 68(7), 1477-
11 1486. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.381>
- 12 Zhu, H., Liu, T., Xue, B., Yinglan, A., & Wang, Q. 2018. Modified Richards' equation
13 to improve estimates of soil moisture in two-layered soils after infiltration. *Water*, 10, 1174.
14 <https://doi.org/10.3390/w10091174>
- 15 Zwartendijk, B. W., van Meerveld, H. J., Ghimire, C. P., Ravelona, M., Lahitiana, J.,
16 & Bruijnzeel, L. A. (2020). Soil water- and overland flow dynamics in a tropical catchment
17 subject to long-term slash-and-burn agriculture. *Journal of Hydrology*, 582, 124287.
18 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124287>

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22

APÉNDICE

Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET₀)

La evapotranspiración de referencia (ET₀) se calculó a partir de datos meteorológicos utilizando el método de Penman-Monteith de la FAO56 (Allen *et al.*, 1998):

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

[Ec.1]

donde Δ es la pendiente de la curva de presión de saturación del vapor de agua (kPa K⁻¹), donde R_n es la radiación neta (W m⁻²), G es el flujo del calor en el suelo (W m⁻²), ρ_a es la densidad del aire (kg m⁻³), c_p es el calor específico del aire a presión constante (1005 J kg⁻¹ K⁻¹), $(e_s - e_a)$ es el déficit de presión de vapor del aire (kPa), γ es la constante psicrométrica (kPa K⁻¹), r_s y r_a son la resistencia superficial (total, s m⁻¹) y aerodinámica (m s⁻¹), cuya derivación se hizo a partir del cultivo de referencia (pasto). La radiación neta se estimó a partir de la radiación solar incidente (W m⁻²) y considerando un valor fijo de 0.28 para el albedo reportado en bibliografía por Marasco (2014).

La radiación solar se corrigió por el efecto de la pendiente del techo (i) y la orientación desde el sur (b) de cada una de las azoteas verdes, que corresponden a 2° al este en la EGRns y 14° al norte en la EGRws, calculando el ángulo cenital relativo a la pendiente Z^* , con las siguientes ecuaciones:

$$\psi^* = \sin^{-1}(\sin\psi\cos i - \cos\psi\sin i\cos b)$$

[Ec.2]

$$g = \sin^{-1}(\sin i \sin b \sec \psi^*)$$

1 [Ec.3]

$$2 \quad \cos Z = \sin \psi \sin \delta + \cos \psi \cos \delta \cos(\Omega - g)$$

3 [Ec.4]

4
5 donde δ es la declinación, ψ es la latitud y Ω es el ángulo de tiempo solar en el punto
6 medio del período:

$$7 \quad \Omega = \left(\frac{\pi}{12}\right) ((t + 0.06667(Lz - |Lm|) + Sc) - 12)$$

8 [Ec.5]

9 en el cual, Lz es la longitud del centro del huso horario local, Lm es la longitud del sitio
10 y Sc es la corrección estacional del tiempo solar:

$$11 \quad Sc = 0.1645 \sin 2b - 0.1255 \cos b - 0.025 \sin b$$

12 [Ec.6]

13 R_D es la relación entre la radiación directa en la pendiente y la radiación directa en una
14 superficie horizontal. Para cualquier declinación (δ) el valor de R_D a cualquier hora del día es
15 de $\cos Z_p / \cos Z$, donde Z son los datos del ángulo cenital en el punto medio del período en un
16 intervalo de tiempo de hora (Revfeim, 1978).

17 La nubosidad se estimó como la relación de la radiación real y la del cielo despejado,
18 con un valor umbral de 0.80 ya que el criterio para determinar si una determinada observación
19 se realizó en condiciones de nubosidad, consiste en el requisito de que la observación de la
20 radiación global constituya menos del 80% de la radiación global máxima potencial (Van der
21 Molen, 2002). En condiciones de cielo despejado, la radiación solar directa se calculó como la
22 diferencia entre la radiación solar observada y la radiación difusa estimada. En condiciones de
23 cielo nublado se considera que toda la radiación es difusa (Van der Molen, 2002). La
24 estimación de la nubosidad también se usó para calcular la radiación neta de onda larga, en el

1 que se supuso que la nubosidad durante los períodos nocturnos es igual a la nubosidad durante
2 las tres horas anteriores de la puesta del sol cada día (ASCE-EWRI, 2002).

3 El flujo del calor en el suelo se asumió como cero. La constante psicométrica γ (kPa K⁻¹)
4 se calculó con la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{c_p P_a}{0.62 \lambda}$$

[Ec.7]

7 donde P_a es la presión atmosférica (kPa), λ es el calor latente de vaporización (J kg⁻¹).

8 Se estimaron con las siguientes ecuaciones:

$$P_a = 101.3 \left[\frac{293 - 0.065(z)}{293} \right]^{5.26}$$

[Ec.8]

$$\lambda = 1E06 (2.501 - 0.002361(T))$$

[Ec.9]

13 donde z es la elevación del sitio de estudio (2330 msnm) y T la temperatura promedio
14 a escala de 1 hora. La curva de presión de saturación del vapor de agua (kPa °C⁻¹), se calculó
15 con la siguiente expresión:

$$\Delta = \frac{4098(e_{sat})}{(237.3 + T(^{\circ}\text{C}))^2}$$

[Ec.10]

18 donde e_{sat} es la presión de vapor de saturación y se calculó con la siguiente ecuación:

$$e_{sat} = 0.6108 \exp \left(\frac{17.27 * T (^{\circ}\text{C})}{237.3 + T (^{\circ}\text{C})} \right)$$

[Ec.11]

1 La presión de vapor (e) se calculó a partir de la ecuación de la humedad relativa.

$$2 \quad e = \frac{RH * e_{sat}}{100}$$

3 [Ec.12]

4 El déficit de presión de vapor de agua (DPV) se calculó a partir de la presión de vapor
5 de saturación (e_{sat}) y la humedad relativa (RH, %) a temperatura T (°C) (Holwerda *et al.*, 2013)
6 con la siguiente relación:

$$7 \quad DPV \text{ (kPa)} = (e_{sat} - e)$$

8 [Ec.13]

9 Si se asume una altura constante de cultivo de 0.12 m y una altura estandarizada para
10 la medición de la velocidad del viento, temperatura y humedad de 2 m ($z_m = z_h = 2m$), la
11 resistencia aerodinámica r_a para la superficie de referencia se convierte en:

$$12 \quad r_a = \frac{208}{u_2}$$

13 [Ec.14]

14 Los datos de velocidad del viento del ICAyCC-UNAM se asumieron como
15 representativos de la velocidad del viento a la altura normalizada de 2 m.

16 Por otro lado, la resistencia superficial r_s para el pasto se simplifica como:

$$17 \quad r_s = \frac{r_l}{LAI_{activo}} \approx 70 \text{ s m}^{-1}$$

18 [Ec.15]

19 donde r_l , es la resistencia estomática de una sola hoja y tiene un valor de alrededor de
20 100 s m^{-1} bajo condiciones bien regadas; la ecuación general para el $LAI_{activo}=(0.5)$ (LAI)
21 considerando que solamente la mitad superior del pasto denso está contribuyendo activamente

1 a la transferencia superficial de calor y vapor de agua; mientras que la ecuación general para
2 $LAI = 24 h$, donde h es la altura del cultivo y se asume de 0.12 m.

3 Para estimar la ET real durante las condiciones de dosel seco con los modelos, se calculó
4 la ET_0 sobre una base horaria y se excluyeron las horas durante las cuales el dosel se consideró
5 húmedo, es decir, durante las horas con una $P > 0.5$ mm y un período adicional de 3 h después
6 del fin de la lluvia (Gash, 1979; González-Martínez y Holwerda, 2018).