



# Consumo hídrico y transpiración en juveniles de *Persea americana* y *Pinus pseudostrobus*

Water use and transpiration of *Persea americana* and *Pinus pseudostrobus* saplings

Fernando Quiroz Rivera<sup>1,2</sup>, Alberto Gómez-Tagle Chávez<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Programa de Institucional de Doctorado en Ciencias Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales (INIRENA), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

## Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2024

Manuscrito aceptado: 24 de febrero de 2025

Manuscrito publicado: diciembre 2025

## \*Autor para correspondencia

Alberto Gómez-Tagle Chávez

e-mail: alberto.gomez@umich.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7640-5205>

## Resumen

Méjico es el principal productor de aguacate a nivel mundial. En Michoacán existen unas 266,687 hectáreas dedicadas a este cultivo y se ha establecido una cantidad considerable de esta superficie reemplazando los bosques nativos. El impacto hidrológico de este cambio de uso del suelo es desconocido, en especial el consumo de agua de la especie. Por lo tanto, nos planteamos la siguiente pregunta; ¿Cuánta agua consume *Persea americana* en comparación con *Pinus pseudostrobus*? Para contestar esta pregunta, realizamos un experimento de campo empleando 10 individuos juveniles de *Pinus pseudostrobus* y 10 de *Persea americana* var. Hass, se cuantificó el consumo hídrico y se estimó la transpiración durante 95 días empleando mediciones gravimétricas cada 12 horas, abarcando la temporada seca y lluviosa de 2017, así como el área foliar. Las plantas de aguacate consumieron  $0.92 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ , lo que contrasta con los  $0.28 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$  consumida por los pinos. Bajo las mismas condiciones, los aguacates consumieron 6.6 veces más agua que los pinos en la temporada seca, y 1.85 veces en la lluviosa. En cuanto a la transpiración, ésta fue de  $0.90 \pm 0.69 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  para los aguacates y  $0.45 \pm 0.51 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  para los pinos. Las variables meteorológicas que mejor explican el consumo de agua y la transpiración en ambas especies son la temperatura media, el déficit de presión de vapor, la velocidad del viento y la humedad relativa. También se presenta y discute un escalamiento a nivel árbol y sitio/huerta empleando la información obtenida experimentalmente, datos de campo e imágenes satelitales.

**Palabras clave:** Aguacate, bosque de pino-encino, franja aguacatera, Michoacán.

## Abstract

Mexico is the world's top avocado producer. In Michoacan (central Mexico), roughly 266,687 hectares of land are dedicated to it. However, a considerable amount of this surface was established, replacing native forests; the hydrological impact of this land use change is unknown. In this contribution, we addressed the following question: How much water do avocado tree saplings use, and how does it compare to native forest tree species saplings? We conducted a field experiment with ten *Pinus pseudostrobus* and ten *Persea americana* var. Hass saplings to answer this question. Gravimetric water loss measurements were performed to quantify water consumption and plant transpiration in 12-hour intervals for 95-day periods, comprising both the dry and wet seasons (2017); we also measured plant leaf area. Results indicate that avocado saplings transpired  $0.90 \pm 0.69 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ , while pines transpired  $0.45 \pm 0.51 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ , corresponding to  $0.92 \text{ L} \cdot \text{day}^{-1}$  of water consumption per  $\text{m}^2$  of leaf area in avocados and  $0.28 \text{ L} \cdot \text{day}^{-1}$  in pines. During the dry season, avocado saplings used up to 6.6 times more water per  $\text{m}^2$  of leaf area than pines and 1.85 times more during the wet season. The best-explaining variables for water use and transpiration in both tested species were mean daily temperature, vapor pressure deficit, wind speed, and relative humidity. Upscaling water consumption at the stand/orchard level for a forest site and three avocado orchards are discussed.

**Keywords:** Avocado, avocado belt, Michoacán, pine-oak forest.

## Introducción

La vegetación juega un papel importante en la regulación de los flujos de humedad atmosférica (Ellison *et al.*, 2017), la cual suministra una gran parte del agua que se destina a satisfacer las necesidades domésticas, agrícolas, industriales y ecológicas (Hamilton *et al.*, 2009). De acuerdo con Peñuela-Arévalo y Carrillo (2013), las áreas de bosques de pino y encino (*Pinus* spp. y *Quercus* spp.) de las partes altas de las cuencas en el centro de México son zonas de recarga de acuíferos y proporcionan agua para más de 42.73 millones de personas (INEGI, 2013). Sin embargo, estas zonas se encuentran sujetas a procesos de cambio de cobertura y uso del suelo (Morales-Manilla y Cuevas, 2012).

En el estado de Michoacán, México, la transformación de los bosques está asociada al crecimiento de las superficies urbanas y a los cultivos, en especial al aguacate (*Persea americana*) (Garibay y Bocco, 2011; Denvir *et al.*, 2021; Latorre-Cárdenas *et al.*, 2023). Las plantaciones de aguacate se incrementaron cerca de 700% durante las últimas cuatro décadas, y en Michoacán se encuentra el 71% (266,687 ha) de la superficie nacional sembrada y se produce el 75% (1,826,415 ton) del volumen nacional (Chávez-León *et al.*, 2012; SIAP-SAGARPA, 2016; Morales-Manilla *et al.*, en proceso). Existe preocupación por los posibles efectos de este cultivo en el ciclo hidrológico a gran escala, en especial bajo condiciones de acceso limitado al recurso hídrico o condiciones de sequía. Los bosques funcionan como reguladores del clima, y mantienen la humedad y la buena calidad del aire, por lo que el cambio de uso del suelo altera el paisaje y los ciclos de lluvia/sequía (Muñoz-Villers *et al.*, 2015).

Aún cuando existe información sobre el consumo hídrico, la eficiencia en el uso del agua y la transpiración del cultivo del aguacate, una de las aproximaciones más comunes es establecer la relación entre consumo/eficiencia de riego y la producción de fruta (ej. Tapia *et al.*, 2012; Moreno-Ortega *et al.*, 2019). Tapia *et al.* (2012) mencionan que los bosques nativos y las huertas de aguacate, se comportan de la misma manera hidrológicamente. Sin embargo, no existe información sobre el consumo hídrico de este cultivo y de especies nativas de los bosques, obtenidos bajo las mismas condiciones, que permita establecer valores de referencia a nivel comparativo.

Por lo anterior, las preguntas de investigación en este trabajo fueron: ¿Cuál es el consumo de agua de las plantas de aguacate y de pino nativo (*Pinus pseudostrobus*)? y ¿Existe diferencia en el consumo hídrico entre ambas especies? Los objetivos de este trabajo fueron: i) cuantificar el consumo hídrico y la transpiración de individuos

juveniles de aguacate y una especie de pino nativa de la franja aguacatera del estado de Michoacán (*Pinus pseudostrobus*) bajo condiciones de campo, ii) comparar el consumo hídrico y la transpiración entre de individuos juveniles de *P. pseudostrobus* y aguacate (*Persea americana* var. Hass), iii) realizar un análisis de escalamiento de consumo hídrico empleando los datos experimentales y considerando sitios de bosque y huertas de aguacate.

## Materiales y métodos

### Sitio de estudio

Se realizó un experimento de campo en condiciones semicontroladas, empleando organismos juveniles de *Pinus pseudostrobus* y *Persea americana* var. Hass. Los experimentos se realizaron en una parcela de investigación ubicada en el Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales (INIRENA) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en la ciudad de Morelia, en el estado de Michoacán, México, con coordenadas 19°41'22" N y 101°15'00" W con una altitud de 1,900 msnm, en un área de exclusión de 441 m<sup>2</sup>, circundada con malla ciclónica, con acceso controlado y con vegetación de herbáceas anuales. El experimento se llevó a cabo entre el 23 de mayo del 2017 al 27 de agosto del mismo año (95 días) entre los días 144 al 239 del año.

El clima de la zona de acuerdo con el sistema de García (2004) es templado subhúmedo con la mayor parte de lluvias en verano. La temperatura media anual es de 19.0 °C y la precipitación media anual es de 796.5 mm para el periodo 1951-2010 (Servicio Meteorológico Nacional, 2015), con tres temporadas bien marcadas; lluviosa (mediados de junio a octubre), seca-fría (noviembre a enero) y seca-cálida (febrero a mayo). La temperatura promedio mensual más elevada se alcanza antes del solsticio de verano, en mayo, mientras que la más baja en enero. La precipitación durante la temporada lluviosa es de 691.5 mm y corresponde al 86.8% de la precipitación total anual, mientras que en la temporada seca-fría y seca-caliente son de 27.0 mm y 78 mm que corresponden al 3.4% y 9.7% de la precipitación total anual, respectivamente.

### Material vegetal

Se emplearon 10 plantas de aguacate *Persea americana* var. Hass (injertadas sobre *Persea americana* var. Drymifolia) de 2 años de edad y 10 plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindley de 2.5 años de edad. Se usó la variedad Hass, debido a que es el cultivar con mayor

superficie sembrada en México (Mijares y López, 1998; Loza, 2015). Para el caso de los pinos, se decidió emplear una de las especies más representativas dentro de los bosques del estado de Michoacán, con mayor distribución y abundancia en el rango de elevaciones dentro de la franja aguacatera (1,800 a 2,500 msnm) y la de mayor importancia económica (Viveros-Viveros *et al.*, 2006). Los pinos se obtuvieron de un vivero de planta para reforestación de la Comisión Forestal del Estado de Michoacán, mientras que los aguacates en un vivero comercial en Uruapan, Michoacán.

Los árboles fueron cuidadosamente trasplantados a recipientes plásticos con volumen de 20 L. Se utilizó suelo derivado de ceniza volcánica, con propiedades ándicas y textura franco-arenosa, secado al aire y se recompactó hasta lograr una densidad de 1.1 g·cm<sup>-3</sup>. Los recipientes se cubrieron con material plástico impermeable y se sellaron con silicona, evitando la pérdida de agua desde el suelo o el ingreso de la misma durante los eventos de precipitación. Se acondicionó un tapón hermético que permitió realizar los riegos necesarios. Después del trasplante, se regó hasta alcanzar la capacidad de campo y se esperó 30 días para que las plantas se adaptaran a la nueva condición.

### Caracterización dasométrica

Se midió el diámetro del tronco de los árboles en su base con un vernier digital (Benewell, Inc.) (rango de 15.24 cm, precisión de 0.01 cm), y la altura del individuo con una cinta métrica ( $\pm 0.1$  cm) y dos diámetros de copa en direcciones Norte-Sur y Este-Oeste. La superficie proyectada de copa se calculó a partir del radio promedio de copa y la ecuación de cálculo de superficie del círculo. Por otro lado, se estimó el área foliar a partir de mediciones manuales, considerando el largo desde la base de la hoja hasta el ápice de la misma; el ancho fue entonces la distancia entre los bordes de la hoja en la parte más amplia. La superficie se approximó idealizando la lámina foliar (lanceloada) como dos triángulos isósceles opuestos por la base, empleando la expresión  $Af_{hoja} = ((L/2) \times A)$ , donde  $L$  corresponde a la longitud de la hoja en centímetros y  $A$  corresponde al ancho de la hoja en centímetros. El área foliar total de cada planta se obtuvo sumando todos los valores de  $Af_{hoja}$  obtenidos.

Para los pinos, cada planta se dividió en secciones de 15 cm a partir del tronco principal. En cada sección se seleccionaron al azar 10 fascículos, con cinco acículas cada uno y se midieron el largo y ancho de cada acícula, con un vernier digital. La superficie de cada acícula se calculó considerando una forma cilíndrica de longitud

$L_a$  y ancho  $a_a$  y empleando la expresión  $Af_{acicula} = (\pi \times a_a) \times L_a$ . El área foliar del fascículo se obtuvo como  $Af_{fas} = Af_{acicula} \times 5$ , ya que en *Pinus pseudostrobus*, los fascículos tienen en promedio cinco acículas. Las áreas foliares de los 10 fascículos correspondientes a cada sección, se promediaron  $Af_f$ . En cada sección del árbol, se contó la cantidad total de fascículos y posteriormente se multiplicó el área foliar promedio de los fascículos de cada sección ( $Af_f$ ) por la cantidad de fascículos en la misma. El área foliar de cada planta ( $Af_{planta}$ ) se obtuvo sumando el área foliar de las diferentes secciones.

Los datos de área foliar se obtuvieron semanalmente para cada planta y la superficie de área foliar para cada día se estimó empleando interpolación lineal entre las fechas de medición.

### Consumo hídrico y transpiración

Al inicio del experimento se agregó agua a hasta alcanzar la capacidad de campo del suelo y se pesó cada contenedor empleando una báscula digital portátil con capacidad de 40 kg con resolución de  $\pm 2$  gr (CRT global, Inc.) para determinar el peso inicial. Posteriormente, se realizaron mediciones gravimétricas a las 7:00 y 19:00 horas del tiempo local. Se escogieron estos horarios ya que se deseaba conocer la pérdida de peso por transpiración, la cual ocurre durante el día como parte de la actividad fotosintética (McCulloh *et al.*, 2007). La diferencia entre el peso medido en el horario matutino y el peso del horario vespertino correspondió a la pérdida de agua por transpiración. Se asumió que dado el corto tiempo del experimento (95 días), el efecto de la acumulación de biomasa por crecimiento de los individuos es mínimo y por lo tanto no se consideró.

Durante el experimento, se realizaron riegos periódicos para re establecer el contenido de humedad del sustrato y evitar el estrés hídrico extremo en la planta y se realizaron al alcanzarse una pérdida del 5% de la masa inicial, usualmente con una frecuencia de entre 3 y 5 días. La lámina de transpiración diaria (mm·día<sup>-1</sup>), se calculó para cada planta dividiendo el volumen de consumo diario entre la superficie proyectada de copa (m<sup>2</sup>). El volumen de consumo diario se calculó a partir de la diferencia de peso registrado entre las 7:00 a.m. y las 7:00 p.m. (kg·día<sup>-1</sup>), expresado en unidades de volumen (L·día<sup>-1</sup>), considerando un valor de densidad del agua de 1.0 g·cm<sup>-3</sup>. Con fines comparativos y estandarización, se estimó el consumo de agua diario por unidad de área foliar (L·m<sup>-2</sup>·día<sup>-1</sup>). Para ello se dividió el volumen de consumo diario (L·día<sup>-1</sup>) entre la superficie de área foliar para el día de medición (m<sup>2</sup>).

## Variables meteorológicas

Se registraron diferentes variables micrometeorológicas empleando una estación meteorológica automática Davis Vantage Pro2<sup>+</sup> (Davis, Inc.) calibrada mediante el método de Calder y Kidd (1978) y con resolución de lámina de precipitación de 0.2 mm. Los registros se realizaron cada 10 minutos para precipitación (mm), humedad relativa (%), radiación solar ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), temperatura (°C), velocidad del viento ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ), dirección del viento (° azimutal) y presión atmosférica (kPa). Los datos de las variables micrometeorológicas se agregaron a nivel diario y se procesaron para calcular la lámina de evapotranspiración de referencia (ETo) empleando el método de Pneman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), así como el déficit de presión de vapor a partir de las temperaturas máximas, mínimas y temperatura del punto de rocío en intervalos diarios (Allen *et al.*, 1998).

## Escalamiento

Con el fin de realizar un escalamiento y estimación de consumo hídrico a escala de parcela y rodal forestal, se consideraron los valores promedio de consumo hídrico obtenidos experimentalmente para cada una de las especies y se estimó el consumo hídrico para un sitio de bosque con dominancia de *Pinus pseudostrobus* en el área natural protegida de Barranca de Cupatitzio, en Uruapan Michoacán y tres huertas distintas; huerta de 15 años en la localidad de Zirahuén (H15), huerta de 40-50 años en el ANP Barranca de Cupatitzio (HBC) y huerta 30 años ubicada en el Instituto Tecnológico de Uruapan (HTec) en los que se realizó una caracterización del arbolado en campo (**Tabla 1**).

El escalamiento se realizó asumiendo una relación lineal entre el área foliar y el consumo hídrico de

cada especie. El área foliar a escala de sitio se estimó dividiendo el índice de área foliar (LAI por sus siglas en inglés) entre la superficie de copa promedio de cada sitio. Los valores de LAI se obtuvieron a partir del procesamiento de imágenes satelitales LANDSAT 8 de la NASA (*Path*: 028, *Row*: 046), disponibles a través de la plataforma *Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), para la temporada seca (2018-marzo-13; LC08\_L1TP\_028046\_20180313\_20200901\_02\_T1) y húmeda (2017-oct-20; LC08\_L1TP\_028046\_20171020\_20200902\_02\_T1), empleando el modelo METRIC, habilitado dentro del paquete *water* para el ambiente de programación R (Olmedo *et al.*, 2016; R Core Team, 2018) disponible en línea (<https://rdrr.io/cran/water/>).

## Análisis de datos

Los análisis estadísticos se realizaron empleando el ambiente de programación estadístico R (R Core Team, 2018). Se comparó el consumo hídrico y la transpiración entre especies y temporada seca (24/05/2017-23/06/2017) y lluviosa (24/06/2017-27/08/2017) empleando pruebas de T de Student (Ruxton, 2006) y se realizaron análisis de varianza (Heiberger *et al.*, 2017), así como correlaciones de Kendall para las series de tiempo de consumo hídrico y transpiración. También se exploraron relaciones a partir de regresiones lineales entre variables micrometeorológicas, área foliar y consumo hídrico y lámina de transpiración de las especies estudiadas. Para el escalamiento se realizaron comparaciones entre los diferentes sitios empleando análisis de varianza. Los niveles de significancia, incluyendo los errores estándar asociados con los parámetros de los modelos corresponden al intervalo de confianza de 95% ( $\alpha = 0.95$  o  $P < 0.05$ ).

**Tabla 1.** Ubicación, características generales y características dasométricas del arbolado en los sitios considerados para el escalamiento de consumo hídrico; altura, diámetro del tronco (D. tronco), superficie de copa (S. copa) y densidad del arbolado.

Sitio	Longitud (W)	Latitud (N)	Altitud (msnm)	Edad (años)	Superficie (ha)
Bosque	102°05'31"	19°25'43"	1 775	50	2.72
H15	101°43'20"	19°28'16"	2 260	15	1.20
HBC	102°05'46"	19°24'55"	1 805	40–50	2.97
HTec	102°04'32"	19°28'48"	1 900	30	4.20
Sitio	Altura (m)	D. tronco (m)	S. copa ( $\text{m}^2$ )	Densidad (árboles/ha)	
Bosque	22.3 ± 9.2	0.38 ± 0.20	148.2 ± 325	235.0	
H15	5.5 ± 1.4	0.19 ± 0.04 *	28.0 ± 11.8	156.2	
HBC	6.8 ± 2.4	0.47 ± 0.19 *	43.4 ± 33.6	100.0	
HTec	7.5 ± 3.5	-	55.4 ± 22.5	150.0	

\* Diámetro del tronco medido a 0.3 m

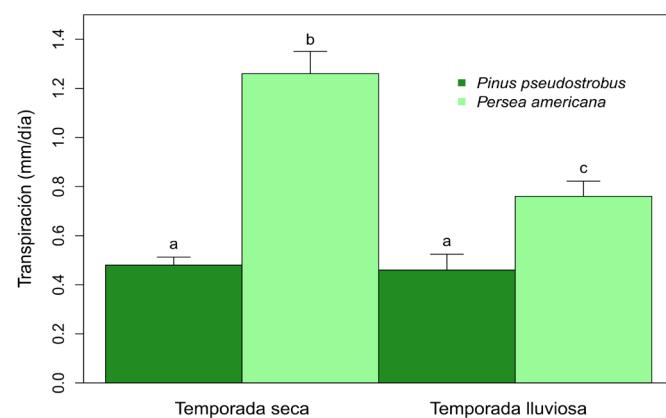
## Resultados

Las alturas promedio de los individuos experimentales fueron de 1.12 y 1.62 m, y el diámetro promedio del tronco fue 17.38 y 21.1 mm para los aguacates y pinos, respectivamente, sin diferencias entre las especies. En cuanto al área foliar de los pinos fue casi el doble ( $0.54 \text{ m}^2$ ) que la de los aguacates ( $0.26 \text{ m}^2$ ) con diferencia significativa ( $F=1161$ ,  $gl=1551$ ,  $p<0.001$ ), mientras que la superficie de copa fue similar  $0.24 \text{ m}^2$  para los aguacates y  $0.26 \text{ m}^2$  para los pinos, también con diferencia significativa ( $F=7.74$ ,  $gl=1552$ ,  $p=0.005$ ) (Tabla 2).

### Consumo hídrico y transpiración

Las plantas de aguacate transpiraron en promedio  $0.90 \pm 0.69 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ , que correspondió a  $0.92 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$  de consumo hídrico, mientras que los árboles de pino transpiraron  $0.45 \pm 0.51 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ , ( $0.28 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$  de consumo hídrico) (Tabla 3), el análisis de varianza indicó diferencia significativa para la transpiración ( $F=141.9$ ,  $gl=1181$ ,  $p<0.001$ ). El análisis de correlación de Mann-Kendall para la transpiración arrojó una  $\tau = -0.26$  ( $p<0.001$ ) para los aguacates y  $\tau = -0.12$  ( $p=0.12$ ) para los pinos, indicando que la transpiración por parte de los aguacates decrece, al pasar de la temporada seca a la temporada húmeda, en los pinos no se apreció una tendencia significativa. En cuanto al consumo hídrico, hubo diferencia significativa entre las especies ( $F=283.8$ ,  $gl=1377$ ,  $p<0.001$ ).

Al separar el conjunto de datos a nivel estacional, en época de estiaje los árboles de aguacate transpiraron en promedio  $1.26 \pm 0.86 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  ( $1.32 \pm 0.84 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ ) (Figura 1, Tabla 3) y los pinos transpiraron  $0.48 \pm 0.31 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  ( $0.20 \pm 0.12 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ ), mientras que en la temporada lluviosa los aguacates transpiraron  $0.76 \pm 0.59 \text{ mm}$  ( $0.65 \pm 0.47 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ ) y los pinos  $0.46 \pm 0.61 \text{ mm}$  ( $0.35 \pm 0.99 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ ) (Figura 1, Tabla 3). Estos resultados indican que las plantas de aguacate consumen 6.6 veces más agua por metro cuadrado de área foliar que los pinos en la época de estiaje, mientras que en la temporada lluviosa la proporción se reduce a 1.85 ve-



**Figura 1.** Transpiración para *Pinus pseudostrobus* y *Persea americana* var. Hass durante las temporadas seca y lluviosa de 2017, las letras indican diferencia estadística entre las medias junto con los errores estándar de las medias.

ces. Sin embargo, el análisis de varianza arrojó diferencias estadísticamente significativas en la transpiración entre las dos especies, tanto para el periodo de estiaje ( $F=121.9$ ,  $gl=304$ ,  $p<0.001$ ), como para el periodo húmedo ( $F=56.88$ ,  $gl=877$ ,  $p<0.001$ ) (Tabla 3, Figura 1).

### Relación entre consumo hídrico y las variables micrometeorológicas

*Variables micrometeorológicas.* La precipitación acumulada del periodo de estudio fue de 442.1 mm, que corresponde al 55.5% de la precipitación promedio anual, para la temporada de estiaje fue de 65.6 mm (2017-05-24 al 2017-06-23) y para la temporada lluviosa 376.5 mm (2017-06-24 al 2017-08-27) que corresponden a 8.2% y 47.3% de la precipitación promedio anual (796.5 mm).

En cuanto a la temperatura, ésta osciló entre  $11.3^\circ\text{C}$  y  $32.10^\circ\text{C}$  en el periodo de estudio. Las temperaturas máximas, fueron mayores durante la temporada de estiaje ( $29.0^\circ\text{C} \pm 1.3$ ) que en la temporada lluviosa ( $25.3^\circ\text{C} \pm 1.8$ ), la prueba de t de Student indicó diferencias significativas entre las temporadas ( $t = 11.137$ ,  $gl = 77.383$ ,  $p < 0.001$ ), así como también entre las temperaturas mínimas  $15.9^\circ\text{C} \pm 1.3$  y  $14.9^\circ\text{C} \pm 1.0$  para las temporadas seca y lluviosa ( $t = 3.3921$ ,  $gl = 45.565$ ,  $p < 0.01$ ) y las

**Tabla 2.** Características dasométricas y área foliar de los individuos experimentales de *Persea americana* var. Hass y *Pinus pseudostrobus*. Letras diferentes indican diferencia significativa entre especies de acuerdo con el análisis de varianza.

Especie	Variable			
	Altura (m)	Diámetro (mm)	Superficie de Copa ( $\text{m}^2$ )	Área foliar ( $\text{m}^2$ )
<i>Persea americana</i> var. Hass (n = 10)	$1.12 \pm 0.26$	$17.38 \pm 5.21$	$0.24 \pm 0.11$ a	$0.26 \pm 0.06$ a
<i>Pinus pseudostrobus</i> (n = 10)	$1.62 \pm 0.32$	$21.2 \pm 5.26$	$0.26 \pm 0.13$ b	$0.54 \pm 0.19$ b
			$F=1161$ , $gl=1551$ , $p<0.001$	$F=7.74$ , $gl=1552$ , $p=0.005$

**Tabla 3.** Resultados experimentales del consumo hídrico y transpiración para individuos de *Pinus pseudostrobus* y *Persea americana* var. Hass. Se presentan los valores promedio y las desviaciones estándar. Las letras indican diferencias estadísticas significativas con valores de  $p \leq 0.05$ . El consumo hídrico está reportado en volumen (L) por superficie de área foliar ( $\text{m}^2$ ) por unidad de tiempo (día).

Especie	Consumo hídrico ( $\text{l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ )	Transpiración ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ )
	General	
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$0.28 \pm 0.55$ a	$0.45 \pm 0.51$ a
<i>Persea americana</i>	$0.92 \pm 0.69$ b	$0.90 \pm 0.69$ b
Temporada seca		
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$0.20 \pm 0.12$ a	$0.48 \pm 0.31$ a
<i>Persea americana</i>	$1.32 \pm 0.84$ c	$1.26 \pm 0.86$ c
Temporada lluviosa		
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$0.35 \pm 0.99$ a	$0.46 \pm 0.61$ a
<i>Persea americana</i>	$0.65 \pm 0.47$ b	$0.76 \pm 0.59$ b

temperaturas promedio de  $21.6^\circ\text{C} \pm 1.1$  y  $19.1 \pm 1.0$  para las temporadas seca y lluviosa, respectivamente ( $t = 10.678$ ,  $gl = 55.4$ ,  $p < 0.001$ ) (Figura 2).

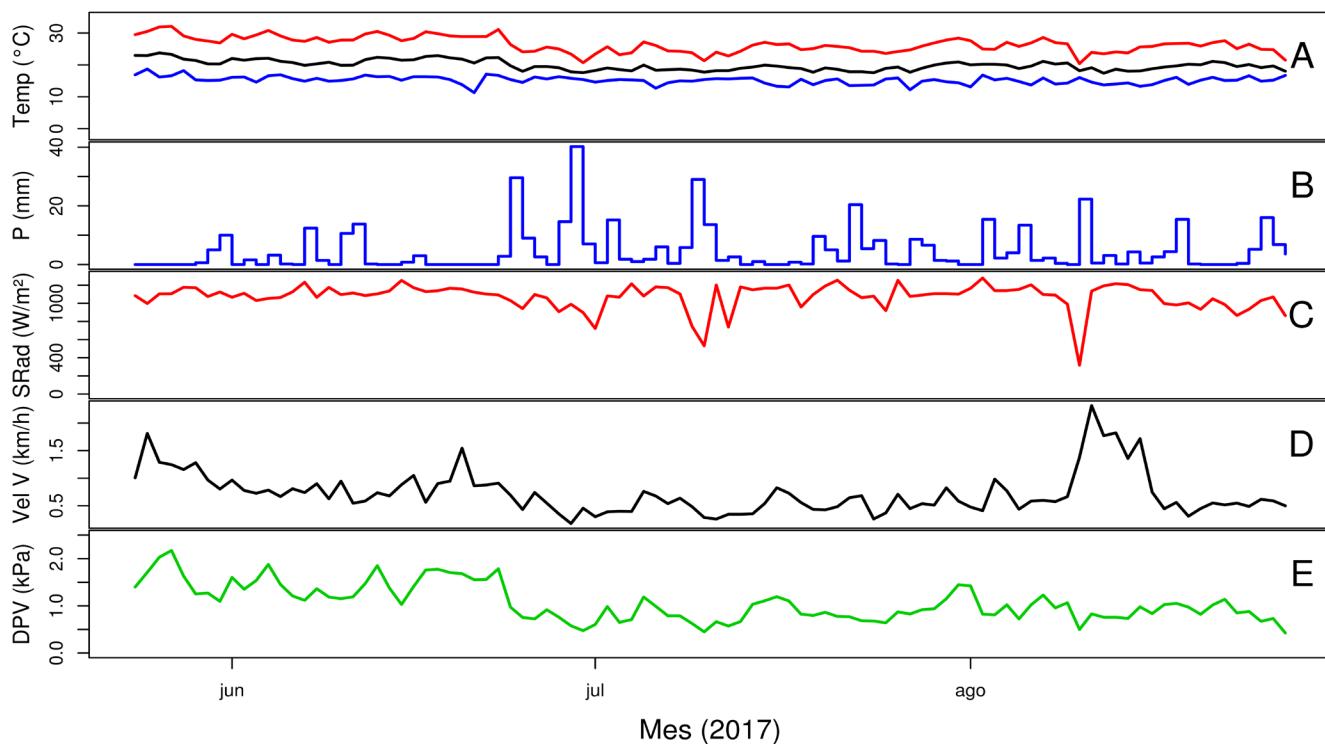
La humedad relativa varió entre 19.0% y 96.5% en el periodo de estudio, sin embargo, la oscilación promedio diaria para la temporada seca fue significativamente mayor que en la temporada lluviosa con 54.4% y 42.5%,

respectivamente, con diferencia significativa entre las temporadas ( $t = 6.7505$ ,  $gl = 56.806$ ,  $p < 0.001$ ). La humedad relativa promedio diaria fue mayor en la temporada lluviosa ( $77.5\% \pm 7.0$ ) que en la temporada seca ( $64.7\% \pm 4.9$ ) ( $t = -9.108$ ,  $gl = 42.672$ ,  $p < 0.001$ ).

El déficit de presión de vapor, durante la temporada de estiaje osciló entre 1.03 y 2.17 kPa mientras que en la época lluviosa entre 0.43 y 1.79 kPa. Los valores diarios promedio fueron de  $1.49 \pm 0.29$  kPa y  $0.87 \pm 0.24$  kPa para las épocas seca y lluviosa, respectivamente, encontrándose diferencia significativa entre las temporadas ( $t = 10.307$ ,  $gl = 48.35$ ,  $p < 0.001$ ).

La velocidad del viento que tuvo promedios diarios de  $0.92 \pm 0.29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $0.64 \pm 0.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para las temporadas de estiaje y lluviosa, respectivamente, con diferencia estadística significativa entre las temporadas ( $t = 3.9498$ ,  $gl = 75.064$ ,  $p < 0.001$ ).

Los análisis de regresión lineal entre la transpiración y las diferentes variables micrometeorológicas consideradas (Figura 3) indican que la velocidad del viento explicó el 19 y 23% de la variación en pinos y aguacates, respectivamente, mientras que la temperatura media el modelo explicó el 7 y 24% de la variación de la transpiración, respectivamente. El déficit de presión de vapor también ejerce control sobre la transpiración de ambas especies, siendo altamente significativo en el caso de los



**Figura 2.** Variables micrometeorológicas para el periodo de estudio (24 de mayo 2017 al 27 de agosto 2017): A) Temperatura máxima (rojo), media (negro) y mínima (azul) diaria ( $^\circ\text{C}$ ), B) precipitación diaria (mm), C) Radiación solar máxima diaria ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), D) velocidad del viento (km/h) y E) déficit de presión de vapor (kPa).

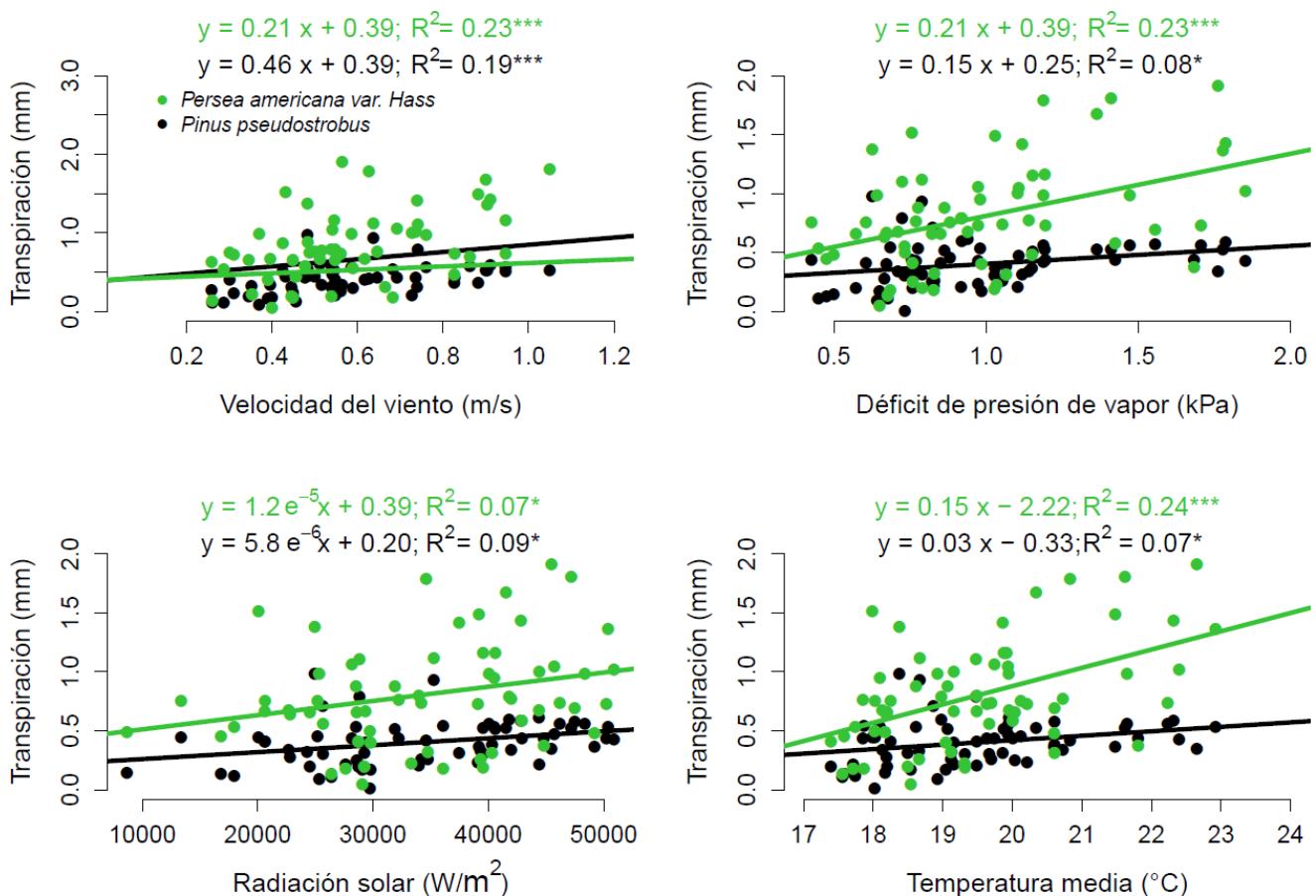


Figura 3. Relación entre variables micrometeorológicas y la transpiración para *Pinus pseudostrobus* y *Persea americana* var. Hass.

aguacates. Inesperadamente, la radiación solar fue la variable meteorológica que influyó en menor medida en la transpiración de ambas especies (Figura 3).

### Escalamiento

El análisis de varianza indicó diferencias estadísticamente significativas ( $F=67.9$ ,  $p < 0.001$ ) para el índice de área foliar de los distintos sitios bosque y las huertas H15, HBC y HTec. Los valores de LAI y área foliar para cada temporada y sitio (Tabla 4) indican que, para todos los sitios, tanto el LAI como el área foliar incrementó en la temporada lluviosa, respecto a la seca, excepto la huerta HBC en la que el LAI se redujo de 2.12 a 2.08, posiblemente asociado a la realización de una poda de saneamiento de los árboles en la huerta.

Al realizar el escalamiento a nivel de individuo promedio, para el bosque, los consumos fueron de  $35.9 \text{ L} \cdot \text{día}^{-1}$  a  $94.9 \text{ L} \cdot \text{día}^{-1}$ , mientras que en las huertas varió entre  $29.6 \text{ L} \cdot \text{día}^{-1}$  para la huerta H15 durante la época seca a  $217.14 \text{ L} \cdot \text{día}^{-1}$  para la huerta HTec (Tabla 5).

Por otro lado, en cuanto al consumo promedio en me-

tros cúbicos estimado por año para *Persea americana*, encontramos que la huerta H15 llega a consumir en promedio  $2,430.9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  ( $16.2 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ), la huerta HBC  $3,290.6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  ( $32.9 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ), mientras que para la huerta HTec se estimó un consumo de  $9,501.2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  ( $63.3 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ) (Tabla 5). El consumo promedio anual del sitio de bosque se estimó en  $5,609.7 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  ( $23.9 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ).

El bosque tiene un mayor consumo que la huerta H15 la para la temporada seca, mientras que el consumo de HTec es 3.86 veces el del bosque para la misma temporada. Sin embargo, el consumo estimado en el sitio de bosque, sobrepasó al de todas las huertas en la temporada lluviosa (Tabla 5).

### Discusión

#### Transpiración

La transpiración promedio de las plantas de aguacate fue de  $0.90 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  ( $0.92 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ ), mientras que

**Tabla 4.** Índice de área foliar (LAI) y área foliar promedio por árbol estimadas para un sitio de bosque y tres huertas para temporada seca y lluviosa.

Sitio	LAI temporada seca	Área foliar temporada seca ( $m^2$ )	LAI temporada lluviosa	Área foliar temporada lluviosa ( $m^2$ )
Bosque	$1.21 \pm 0.27$	179.3	$1.83 \pm 0.22$	271.2
H15	$3.40 \pm 0.02$	95.2	$3.87 \pm 0.12$	108.4
HBC	$2.12 \pm 0.27$	92.0	$2.08 \pm 0.21$	90.56
HTec	$2.97 \pm 0.61$	164.5	$3.61 \pm 0.34$	199.9

*P. pseudostrobus* transpiró en promedio  $0.45 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  ( $0.28 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ ). Los valores reportados para los pinos varían poco en comparación a lo reportado para otras especies del mismo género, *P. sylvestris* transpira  $0.22 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  (Llorens *et al.* 2003). Ghimire *et al.* (2014) reportan  $0.7 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  para *P. roxburghii*, mientras que Tapia *et al.* (2012) encontraron que un bosque conífero cercano a la zona de estudio transpira en promedio  $0.40 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  siendo este valor muy similar al encontrado en el presente estudio. De forma que aún cuando la parte experimental del estudio se realizó con individuos juveniles de esta especie, el valor de Tapia *et al.* (2012) permite inferir que en términos de lámina de transpiración los árboles maduros y los juveniles se comportan en forma similar, apuntalando la validez del escalamiento considerando la lámina de transpiración y el área foliar calculada (**Tablas 4 y 5**). Además, del hecho de que *P. pseudostrobus* es una especie dominante en los bosques de coníferas de la zona aguacatera del estado de Michoacán (Castellanos *et al.*, 2015).

Para el caso de *Persea americana*, la transpiración encontrada en este trabajo se encuentra por debajo de lo reportado por Fassio *et al.* (2009), quienes reportan consumos de entre  $1.2$  y  $1.7 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  para la variedad

Hass, mientras que Tapia *et al.* (2012) reportan  $1.6 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  en la franja aguacatera en Michoacán.

La menor transpiración encontrada en nuestro estudio para los individuos de aguacate puede explicarse a que empleamos árboles juveniles en etapa vegetativa, en donde no hay formación de flores ni frutos, caso contrario al trabajo de Tapia *et al.* (2012), quienes trabajaron con árboles adultos en etapa productiva. Además, se ha probado que la transpiración aumenta en las etapas reproductivas y de producción de fruto (Rana *et al.*, 2004; Pimentel *et al.*, 2010; Silber *et al.*, 2019).

Las diferencias en el consumo hídrico suele asociarse a la variación del área foliar, ya que al existir una mayor superficie de hojas, se esperaría tener mayor cantidad de superficie estomática por árbol, por lo cual el intercambio gaseoso sería mayor. Este estudio señala lo contrario, ya que los pinos presentaron casi el doble de área foliar ( $0.54 \pm 0.19 \text{ m}^2$ ) que los aguacates ( $0.26 \pm 0.06 \text{ m}^2$ ) (**Tabla 2**), sin embargo, los árboles de aguacate consumieron 3.2 veces más agua por metro cuadrado de área foliar (**Tabla 3**).

Una característica fisiológica que tiene incidencia en la transpiración es la resistencia o conductancia estomática ( $gs$ ) de las hojas, la cual se define como la resistencia de los estomas a la apertura y cierre. Para el género *Pinus* se reportan valores de  $gs$  con rangos entre 200 y 400  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (Niinemets, 2002; Addington *et al.*, 2004; Domec *et al.*, 2009; Alvarado-Barrientos, 2013). Para el género *Persea*, se reportan conductancias entre 147 a 250  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (Sanclemente *et al.*, 2014; Schaffer *et al.*, 1991). Si bien los valores de  $gs$  son similares, la diferencia en transpiración puede ser explicada por la diferencia en la densidad estomática entre especies de *Pinus* (29-74 est. $\cdot$  $\text{mm}^{-2}$ ; Jinxing *et al.*, 2001; Tiwari *et al.*, 2013) y *Persea americana* (200 y 453 est. $\cdot$  $\text{mm}^{-2}$ ; Barrientos-Priego *et al.*, 2003). De forma que aún con valores similares de  $gs$  la cantidad de estomas en el caso de *Persea americana* es mayor que en los pinos, lo que facilitaría el proceso de pérdida de agua por transpiración

**Tabla 5.** Resultados del escalamiento consumo hídrico en un sitio de bosque y tres huertas, para las temporadas seca y lluviosa.

Sitio	Consumo ( $l \cdot \text{día}^{-1}$ ) Temporada de seca		Consumo ( $l \cdot \text{día}^{-1}$ ) Temporada lluviosa		Consumo ( $\text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ) Promedio anual*	
	Árbol	Hectárea	Árbol	Hectárea	Árbol	Hectárea
Bosque	35.9	8 427.1	94.9	22 306.2	23.9	5 609.7
H15	125.7	19 628.7	70.5	11 005.9	35.8	9 173.6
HBC	121.4	12 144.0	58.9	5 886.4	32.9	3 290.6
HTec	217.1	32 571.0	129.9	19 490.3	63.3	9 501.2

\* Para el cálculo de consumo promedio anual se consideraron los promedios de la época lluviosa y seca para cada sitio.

## Influencia de las variables meteorológicas

La transpiración de las plantas varía de acuerdo a su comportamiento fisiológico, derivado de la adaptación al medio en el que se encuentran. La conductancia estomática está influida por la radiación solar, la temperatura y el déficit de presión de vapor (Allen *et al.*, 1998). La transpiración de ambas especies se relacionó con la velocidad del viento, la humedad relativa y el déficit de presión de vapor. Ghimire *et al.*, (2014) y Alvarado-Barrantes (2013) reportan que los principales controles meteorológicos en la transpiración para *P. roxburghii* y *P. patula*, respectivamente, fueron la radiación solar y el déficit de presión de vapor. La humedad relativa ha sido reportada como variable que regula la transpiración, como en el caso de *Acacia mangium* ( $R^2 = 0.85$ ) ó con plantas de café (*Coffea arabica*,  $R^2 = 0.80$ ) (Cienciala *et al.*, 2000; Pimentel *et al.*, 2010). Cabe resaltar que se esperaba una mayor relación de la transpiración de los aguacates con esta variable, y que el modelo lineal sólo explicó el 6% de la variación (**Figura 3**).

## Escalamiento en bosque y huertas de aguacate

Considerando los supuestos en que este escalamiento se basa; i) el consumo por unidad de área foliar obtenido para los árboles juveniles es considerado como válido para organismos adultos, ii) el consumo está determinado por el área foliar y iii) para el sitio de bosque escalado, se considera una condición homogénea y presencia de *Pinus pseudostrobus* como especie única, entonces el consumo total de agua dependerá de la superficie del área foliar, la cual a su vez, está en función del manejo y la edad de la huerta para el cultivo de aguacate.

Al escalar a nivel de huerta/rodal, se estima que la hectárea de bosque nativo dominado por *Pinus pseudostrobus* consume aproximadamente el 43% de la huerta H15 en la temporada seca. Esta situación se revierte en la temporada lluviosa, pues el bosque consumiría cerca del doble de lo que consume la huerta H15. Al comparar el sitio de bosque con la huerta HBC (a escasos 500 m de distancia), la huerta consumió 1.4 veces más que el bosque en la temporada seca, pero en la temporada de lluvias el bosque consumió 1.7 veces más, mientras que la huerta HTec, consumió 3.86 veces lo que consume el bosque en la temporada seca y 0.87 veces en la lluviosa (**Tabla 5**).

Es importante notar que, para la mayoría de los sitios, tanto el LAI, como el área foliar incrementan, excepto para la huerta HBC donde el LAI pasa de 2.12 a 2.08, reducción posiblemente asociada a las podas de saneamiento en la huerta. Sin embargo, el mayor incremento en LAI se presentó en la huerta HTec que

pasó de 2.97 por árbol a 3.61 (**Tabla 4**). Los datos experimentales (**Tabla 5**) muestran cómo el consumo incrementa en *Pinus pseudostrobus* y decrece en *Persea americana*, entre temporadas, por lo que en el caso de *Persea americana*, aun cuando se incrementa el área foliar, el consumo por hectárea decrece, pues depende también de la densidad arbórea, siendo 1.7 más denso el bosque que las huertas (**Tabla 1**).

El incremento en el consumo de agua del cultivo del aguacate durante la época de estiaje en el centro de México implica que en esta temporada se pueden presentar problemas de estrés hídrico. Esta es una situación bien conocida por los productores, quienes implementan sistemas de riego de auxilio a partir de fuentes de agua subterráneas o superficiales con el fin de hidratar el cultivo, evitar pérdidas e incrementar la producción. Se sabe que bajo estrés hídrico ligero a moderado, se afecta la producción de aguacate y puede reducirse hasta 34% en ambientes mediterráneos (Silber *et al.*, 2019).

De acuerdo con la literatura, las estimaciones de consumo anual de las huertas H15 y HBC (**Tabla 5**), están por debajo de los valores reportados en otros trabajos para plantaciones de *Persea americana*, como Lahav y Kalmar (1977), quienes registraron  $6,680 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  ( $32 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ ) en Israel, o valores similares a los encontrados por Gustafson *et al.*, (1979), que reportan  $7,875 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  con árboles de 6 años en California, Estados Unidos ó los  $6,503 \pm 328 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{temporada}^{-1}$  reportados por Moreno-Ortega *et al.* (2019) en el sur de España. Hoffman y Du Plessis (1999) reportan un consumo de  $8,900 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  ( $15 \text{ a } 40 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ ) en Nelspruit, Sud-Africa. En nuestro caso, el valor de la huerta HTec;  $9,501.2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  ( $63.3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ ) (**Tabla 5**) es similar a los valores reportados por Hoffman y Du Plessis (1999). Moreno-Ortega *et al.* (2019) indican que la producción de aguacate en el sur de España (Andalucía) está limitada a la disponibilidad de agua para riego, usualmente  $5,300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{temporada}^{-1}$ , y que bajo ciertas condiciones llega a alcanzar los  $7,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{temporada}^{-1}$ .

Las diferencias del consumo resultado de este trabajo y aquellos reportados en la literatura se pueden atribuir a las estimaciones de consumo hídrico por superficie de hojas empleadas como referencia, que fueron calculadas a partir de árboles juveniles y en etapa vegetativa, sin producir flores ni frutos. Whiley *et al.* (1988) reportan que las plantas de aguacate, requieren una condición de hidratación óptima durante la floración y que en la fructificación la demanda de agua se incrementa significativamente. En el caso de este cultivo, en

condiciones de estrés hídrico, ocurre abscisión floral masiva y el aborto de frutos, la cual puede alcanzar hasta 1.3 millones de flores por árbol en condiciones normales y aproximadamente solo el 1% de los frutos llega a la maduración (Silber *et al.*, 2019).

Aún con las restricciones que pudieran tener los valores escalados en el presente trabajo, se considera que éstos pueden servir como información base respecto a las magnitudes de consumo hídrico del cultivo de aguacate en la franja aguacatera del estado de Michoacán. Debido a la metodología de escalamiento y representatividad de los datos, trabajos posteriores deberán enfocarse al determinar el consumo hídrico y la transpiración en cultivos de aguacate establecidos (huertas) y bosques, bajo diferentes condiciones ambientales, y considerando métodos directos como la medición mediante sensores de flujo de savia, con el fin de poder establecer cifras que permitan comparar mejor entre sitios de bosque y de cultivo de aguacate, así como aproximar a nivel espacial y escala de paisaje el consumo hídrico y la transpiración respectiva de este cultivo.

## Conclusiones

Los árboles juveniles de *Persea americana* presentaron mayor consumo hídrico y transpiración que los árboles juveniles de *Pinus pseudostrobus*, aun cuando los aguacates presentaron áreas foliares menores (la mitad) a la de los pinos. Los aguacates tuvieron mayor consumo hídrico y mayores tasas de transpiración durante la temporada de estiaje, mismas que se redujeron en forma significativa para la temporada lluviosa, diferencia atribuida al incremento de la humedad relativa del aire en la temporada lluviosa y por lo tanto la reducción del déficit de presión de vapor. Los valores más altos de consumo hídrico y de transpiración, para la temporada lluviosa ocurrieron en un día con déficit de presión de vapor intermedio, pero con velocidad de viento considerable. Además, fisiológicamente se sabe que la resistencia estomática de las hojas de aguacate es similar a la de los pinos, pero la densidad de estomas es mas alta, lo que explica el mayor consumo de agua aún con menor área foliar por parte de los aguacates. El ejercicio de escalamiento, aun cuando está limitado por uso del área foliar como variable predictora y considerando que las mediciones se realizaron en organismos juveniles en etapa vegetativa y no adultos en producción, proporcionó valores de consumo hídrico dentro de los valores reportados por la literatura, por lo que la información generada en el presente estudio puede servir como referencia general para el consumo hídrico del cultivo

de aguacate bajo condiciones similares en el centro de México. Sin embargo, estudios comparativos en huertas en producción y bosques establecidos empleando métodos de medición directa son indispensables para realizar estas comparaciones dentro de un marco analítico con mayor robustez.

## Referencias

- Addington R, Mitchell R, Oren R, Donovan L (2004). Stomatal sensitivity to vapor pressure deficit and its relationship to hydraulic conductance in *Pinus palustris*. *Tree Physiology* 24:561-569. doi: 10.1093/treephys/24.5.561.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome* 300(9):D05109.
- Alvarado-Barrientos MS (2013). *Plant water use and canopy-fog interactions across a land-use change trajectory in a montane cloud belt*. Tesis doctoral, Universidad de New Hampshire, Durham, Estados Unidos de América.
- Barrientos-Priego AF, Borys MW, Trejo C, López LL (2003). Índice y densidad estomática foliar en plántulas de tres razas de aguacatero. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26(4):291-299.
- Calder IR, Kidd CHR (1978). A note on the dynamic calibration of tipping-bucket gauges. *Journal of hydrology* 39(3-4):383-386. doi:10.1016/0022-1694(78)90013-6.
- Castellanos D, Lindig CR, Sáenz-Romero C. (2015). Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere* 6(1):1-16. doi:10.1890/ES14-00375.1.
- Cienciala E, Kučera J, Malmer A (2000). Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. *Journal of Hydrology* 236(1-2):109-120. doi:10.1016/S0022-1694(00)00291-2.
- Chávez-León G, Tapia Vargas L, Bravo Espinoza M, Sáenz Reyes J, Muñoz Flores HJ, Vidales Fernández I, Larios Guzmán A, Rentería Ánima JB, Villaseñor Ramírez FJ, Sánchez Pérez J, Alcántar Rocillo JJ, Mendoza Cantú M (2012). *Impacto del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate*. Primera Edición edn. INIFAP, México, D.F.
- Denvir A, Arima EY, González-Rodríguez A, Young KR (2022). Ecological and human dimensions of avocado expansion in México: Towards supply-chain sustainability. *Ambio* 51(1):152-166. doi:10.1007/s13280-021-01538-6.
- Domec J-C, Palmroth S, Ward E, Maier CA, Therezien M, Oren R (2009) Acclimation of leaf hydraulic conductance and stomatal conductance of *Pinus taeda* (loblolly pine) to long-term growth in elevated CO<sub>2</sub> (free-air CO<sub>2</sub> enrichment) and N-fertilization. *Plant, Cell & Environment* 32(11):1500-1512. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02014.x>.

Ellison D, Morris CE, Locatelli B, Sheil D, Cohen J, Murdiyarso D, Sullivan CA (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43:51-61. doi:10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002.

Fassio C, Heath R, Arpaia ML, Castro M (2009). Sap flow in "Hass" avocado trees on two clonal rootstocks in relation to xylem anatomy. *Scientia Horticulturae* 120(1):8-13. doi:10.1016/j.scienta.2008.09.012.

García E (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5ta ed.). México, CDMX: Instituto de Geografía, UNAM.

Garibay C, Bocco G (2011). *Cambios de uso del suelo en la meseta purépecha (1976-2005)* (1era Ed.). México: UNAM.

Ghimire CP, Lubczynski MW, Bruijnzeel LA, Chavarro-Rincón D (2014). Transpiration and canopy conductance of two contrasting forest types in the Lesser Himalaya of Central Nepal. *Agricultural and Forest Meteorology* 197:76-90. doi:10.1016/j.agrformet.2014.05.012.

Gustafson CD, Marsh RL, Branson RL, Davis S (1979). Drip irrigation on avocados. *California Avocado Society Yearbook* 63:95-134.

Hamilton LS, Dudley N, Greminger G, Hassan N, Lamb D, Stolton S, Tognetti S (2009). *Los bosques y el agua: Estudio temático elaborado en el ámbito de la evaluación de los recursos forestales mundiales 2005*. Roma, Italia: Estudio FAO: Montes.

Heiberger RM, Freeny AE, Chambers JM (2017). Analysis of variance; designed experiments. En: Chambers JM, Hastie TJ (Eds). *Statistical models in S*. Londres, Inglaterra: Routledge, pp. 145-193.

Hoffman JE, Du Plessis SF (1999). Seasonal water requirements of avocado trees grown under subtropical conditions. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 5:191-194.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2013). *Censo de población y vivienda 2010*. México: INEGI. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/consulta.asp?p=17159&c=17547&s=est>.

Jinxing L, Jach ME, Ceulemans R (2001). Stomatal density and needle anatomy of Scots pine (*Pinus sylvestris*) are affected by elevated CO<sub>2</sub>. *New Phytologist* 150:665-674. doi:10.1046/j.1469-8137.2001.00124.x.

Lahav E, Kalmar D (1997). Water requirements of avocado in Israel I. Tree and soil parameters. II. Influence on yield, fruit growth and oil content. *Australian Journal of Agricultural Research* 28:859-877. doi:10.1071/AR9770859.

Latorre-Cárdenas MC, González-Rodríguez A, Godínez-Gómez O, Arima EY, Young KR, Denvir A, Ghilardi A (2023). Estimating fragmentation and connectivity patterns of the temperate forest in an avocado-dominated landscape to propose conservation strategies. *Land* 12(3):631.

Llorens P, Oliveras I, Poyatos R (2003). Temporal variability of water

fluxes in a *Pinus sylvestris* forest patch in Mediterranean mountain conditions (Vallecebre research catchments, Catalan Pyrenees). En: E Servat, W Najem, C Leduc, A Shakeel (Eds.), *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions*. Montpellier, France: IAHS Publication, pp. 101-105.

Loza HA (2015). *Situación Actual del Sistema Producto Aguacate*. México: Dirección de Estudios sobre Soberanía Alimentaria y Nueva Ruralidad. H. Cámara de Diputados, Cd. de México, México, 71 p. <http://www.cedrssa.gob.mx/files/10/16Situación actual del sistema producto aguacate.pdf>

McCulloh KA, Winter K, Meinzer FC, Aranda J, Lachenbruch B (2007). A comparison of daily water use estimates derived from constant-heat sap-flow probe values and gravimetric measurements in pot-grown saplings. *Tree Physiology* 27:1355-1360. doi:10.1093/treephys/27.9.1355.

Mijares OP, López LL (1998). Variedades de aguacate y su producción en México. En: *Memoria Fundación Salvador Sánchez Colín*. Coatepec Harinas, México: CICTAMEX SC. Recuperado de: [http://www.avocadosource.com/Journals/CICTAMEX/CICTAMEX\\_1998-2001/CICTAMEX\\_1998-2001\\_PG\\_089-099.pdf](http://www.avocadosource.com/Journals/CICTAMEX/CICTAMEX_1998-2001/CICTAMEX_1998-2001_PG_089-099.pdf)

Morales-Manilla LM, Cuevas G, Bocco G en proceso (2024). Actualización de la superficie de cultivo de aguacate en la franja aguacatera del estado de Michoacán. En Avances y resultados del proyecto PERSEA, *Estrategias para la regulación del cambio de uso del suelo y mecanismos de incidencia para mitigar el impacto socio ambiental en la franja aguacatera de Michoacán*. Proyecto CONAHCyT-00322772.

Moreno-Ortega G, Pliego C, Sarmiento D, Barceló A, Martínez-Ferri E (2019). Yield and fruit quality of avocado trees under different regimes of water supply in the subtropical coast of Spain. *Agricultural Water Management* 221:192-201. doi:10.1016/j.agwat.2019.05.001.

Morales-Manilla LM, Cuevas G (2012). *Inventario 2011 y evaluación del impacto ambiental forestal del cultivo del aguacate en el estado de Michoacán*. Morelia, México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM.

Muñoz-Villers LE, Holwerda F, Alvarado-Barrientos MS, Geissert D, Marín-Castro B, Gómez-Tagle A, Adrian Bruijnzeel L (2015). Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque (Valdivia)* 36(3):395-407. doi:10.4067/S0717-92002015000300007.

Niinemets U (2002). Stomatal conductance alone does not explain the decline in foliar photosynthetic rates with increasing tree age and size in *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. *Tree Physiology* 22:515-535. doi:10.1093/treephys/22.8.515.

Olmedo F, Ortega-Farías S, Fuente-Sáiz DD, Fonseca D, Fuentes-Peñaillillo F (2016). Water: tools and functions to estimate actual evapotranspiration using land surface energy balance models in R. *The R Journal* XX:1-18.

Peñuela-Arévalo LA, Carrillo RJ (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores

superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM* 81:18–32.

Pimentel J da S., Silva TJA, Júnior JCJB, Folegatti MV, Montenegro AAA (2010). Estimativa da transpiração em cafeeiros utilizando-se sensores de dissipação térmica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14(2):87–195.

R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

Rana G, Katerji N, De Lorenzi F (2004). Measurement and modelling of evapotranspiration of irrigated citrus orchard under Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 128:199–209. doi:10.1016/j.agrformet.2004.11.001.

Ruxton GD (2006). The unequal variance t-test is an underused alternative to Student's t-test and the Mann–Whitney U test. *Behavioral Ecology* 17(4):688–690. doi:10.1093/beheco/ark016.

Sanclemente M, Schaffer B, Gil P, Vargas A, Davies F (2014.). Pruning after flooding hastens recovery of flood-stressed avocado (*Persea americana* Mill.) trees. *Scientia Horticulturae* 169:27–35. doi:10.1016/j.scienta.2014.01.034.

Schaffer B, Whiley A, Kohli R (1991). Effects of leaf age on gas exchange characteristics of avocado (*Persea americana* Mill.). *Scientia Horticulturae* 48:21–28. doi:10.1016/0304-4238(91)90149-S.

Servicio Meteorológico Nacional [SMN] (2015). *Normales climatológicas, Estación: 16080 Morelia (OBS)*. Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales5110/NORMAL16080.TXT>.

Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera – Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SIAP–SAGARPA] (2016). *Avance de Siembras y Cosechas Resumen nacional por cultivo*. Mexico: SIAP–SAGARPA.

Silber A, Naor A, Cohen H, Bar-Noy Y, Yechiel N, Levi M, Noy M, Peres M, Duari D, Narkis K, Assouline S (2019). Irrigation of 'Hass' avocado: effects of constant vs. temporary water stress. *Irrigation Science* 37(4):451–460. doi:10.1007/s00271-019-00622-w.

Tapia Vargas L, Larios Guzmán A, Vidales Fernández I, Bravo Espinoza M (2012). Consumo de agua. In: Chávez-León G, Tapia Vargas L, Bravo Espinoza M et al. (eds). *Impacto del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate*. INIFAP, México, D.F., pp. 39–46.

Tiwari SP, Kumar P, Yadav D, Chauhan DK (2013). Comparative morphological, epidermal, and anatomical studies of *Pinus roxburghii* needles at different altitudes in the North-West Indian Himalayas. *Turkish Journal of Botany* 37:65–73. doi:10.3906/bot-1110-1.

Viveros-Viveros H, Sáenz-Romero C, Vargas-Hernández J, López-Upton J (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29(2):121–126.

Whiley AW, Chapman KR, Saranah JB (1988). Water loss by floral structures of avocado (*Persea americana* cv. Fuerte) during flowering. *Australian Journal of Agricultural Research* 39:457–467. doi:10.1071/AR9880457.