

DINÁMICA DE LA HUMEDAD EN LA ZONA RADICULAR, EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR) Y RIEGO EFICIENTE EN EL AGUACATERO DE MICHOACÁN

Luis Mario Tapia Vargas^{1*}; Anselmo Hernández Pérez¹; Adelaida Stephany Hernández Valencia²; Juan Carlos Álvarez Hernández¹; José Ariel Ruiz Corral³

¹Instituto de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Av. Latinoamericana no. 1101, Col. Revolución. Uruapan C.P. 60150, Michoacán. Tel. 55-3871-8700

tapia.luisاريو@inifap.gob.mx – 55-38718700 (*Autor de correspondencia)

²Postgrado en Fitosanidad-Fitopatología. Colegio de Postgraduados Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, CP 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México.

³Centro Universitario de Ciencia Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara. Camino Ramón Padilla Sánchez 2100, La Venta del Astillero, Zapopan 451103

Resumen

El aguacate representa un ingreso de divisas por exportación de más de USD \$1.9 millardos de dólares anuales, sin embargo, se le identifica como un cultivo expoliador del agua y nutrientes del suelo. El objetivo fue evaluar la dinámica de humedad en la zona radicular del aguacate y cuantificar las variables relacionadas con el manejo eficiente del agua. El estudio fue realizado en dos huertas de las localidades de Tiamba y Cutzato en el municipio de Uruapan, Michoacán en climas C(w2) y (A)C(w2), respectivamente, en andosoles típicos, de baja fertilidad. Mediante tecnología FDR (Frequency Domain Reflectometry), se registró diariamente la dinámica de la humedad y la salinidad del suelo, en cuatro profundidades 0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 cm. El modelo de balance de humedad del suelo se utilizó para determinar evapotranspiración real (ET_r), coeficiente de cultivo (K_c) y eficiencias de uso de agua. Los resultados indicaron que ET_r es 66-73% del agua total en la profundidad 00-30 cm del suelo. La eficiencia de uso de agua es 4.4-5.6 kg de fruto m⁻³ de agua aplicada y 0.58-0.65% de relación ET_r y lámina de riego (L_r); K_c anual es 0.64 en Cutzato y 0.77 en Tiamba. El aguacate presenta bajo requerimiento de agua, no provoca lixiviación de agua, hidrológicamente el cultivo es respetuoso con el medio ambiente.

Palabras clave: Requerimientos hídricos del aguacate, eficiencia en el uso del agua.

Introducción

La agroindustria del aguacate en México es la más importante actividad dentro de la horticultura pues genera más de 67.0 millardos de pesos (SIAP, 2020). Asimismo, es el producto agrícola más importante generador de divisas para el estado de Michoacán con más de USD \$1.9 millardos de dólares anuales (Ayala, 2018), sin embargo, esta condición puede cambiar pues la apertura del mercado Norteamericano a otros países en condiciones legales, ambientales y mano de obra más competitiva, puede desplazar al aguacate michoacano (Moreno *et al.*, 2015). A pesar del crecimiento exponencial de la superficie sembrada, la cual de 1990 a 2014 creció de 77.0 mil ha a 150 mil ha (FAO, 2016), los rendimientos medios han permanecido inalterables desde hace más de 50 años, con alrededor de 11 ton/ha de fruto (Franco *et al.*, 2018), lo que puede ser por causas diversas relacionadas con el manejo del cultivo y factores externos como cambio climático y meteoros en general.

Entre otras prácticas de cultivo, el riego es indispensable para lograr productividad y calidad de fruto sin alternancia. En este sentido, López (2017) menciona que el agua es un insumo que se debe usar de manera eficiente, sobre todo en la agricultura, mientras que Caro *et al.*, (2021) indican que la sobre-explotación del agua propiciada por el aguacate puede empeorar las condiciones ambientales de los países pobres a pesar del soporte económico del cultivo. No obstante, esta conclusión, Cao *et al.*, (2022), refieren que el uso eficiente del agua para el proceso producción-consumo provee una nueva perspectiva para el manejo del agua en agricultura regional.

Reducir el uso del agua por medio del mejoramiento de la eficiencia del uso contribuye a mejorar la producción y el desarrollo socioeconómico regional (Rosa *et al.*, 2020). Aunado a ello, Gil *et al.*, (2012), consideran que el conocimiento de las relaciones suelo, agua, nutrición y absorción de nutrientes en el aguacate, podría proveer valiosa información para el manejo eficiente del riego y la nutrición en este cultivo. En fertirriego, tanto los nutrientes como el agua son suministrados en aguacate en bajas dosis y alta frecuencia para contrarrestar la baja fertilidad natural del suelo y maximizar calidad y producción de fruto (Hagin y Lowengart, 1996), asimismo, el agua está temporal y espacialmente disponible a tiempo, de manera inmediata en la zona radicular del cultivo, para favorecer amarre de fruto y máxima producción (Silber *et al.*, 2018).

Beyer *et al.*, (2021), refieren que hay una creencia general de que el aguacate tiene un alto requerimiento de agua, sin embargo, difícilmente el aguacate alcanza o supera los valores de ETo porque sus hojas ya maduras son coráceas y con cutícula cerosa que limitan la pérdida de agua foliar. Deanroy *et al.*, (2017), configuraron una aplicación para generar información con el fin de optimizar el riego, en base a la medición de la evapotranspiración de referencia (ETo) y los factores del clima con ahorros de hasta 68% de agua, mientras que la tecnología electrónica FDR (Frequency Domain Reflectometry), permite visualizar en línea y tiempo real la humedad del suelo a nivel radicular, lo cual puede ser una herramienta para mejorar la eficiencia del insumo, sin embargo, en el caso del aguacatero aún no se ha documentado este tipo de manejo. El objetivo fue estudiar

la dinámica de la humedad y la nutrición en la zona radicular y cuantificar las variables relacionadas con el manejo eficiente del agua.

Materiales y Métodos

Se establecieron dos sitios de evaluación en dos huertas de aguacate Hass de 10 años, sembradas en alta densidad 7 x 4 m (360 árboles ha⁻¹). Las huertas están en las localidades de Tiamba (19° 29' 49.4" latitud Norte y 102° 03' 43" longitud Oeste) y Cutzato (19° 21' 15" latitud Norte y 102° 07' 44" longitud Oeste) en el municipio de Uruapan, Michoacán en climas C(w₂) y (A)C(w₂), a 2,060 m y a 1,660 m sobre el nivel del mar, respectivamente. La precipitación media es de 2,100 y 1,500 mm anuales para Tiamba y Cutzato. Ambos suelos son andisoles típicos, de baja fertilidad, muy permeables y carentes de estructura, agregación, estabilidad y consistencia. Para evaluar las variables requerimiento de riego (ET_o) y lluvia, se colocó en cada huerta una estación climática automatizada en línea y tiempo real marca iMetos v. 3.3 (Pessl Instruments GMBH Weiz, Austria), con sondas capacitivas FDR (Frequency Domain Reflectometry) con sensores de humedad insertados cada 15 cm. El equipo transmite la información climática, de humedad del suelo (H_s) a través del servicio de datos y mensajes 4G SMS. La sonda capacitiva FDR se basa en la respuesta a cambios en la constante dieléctrica del medio (ε), usando una técnica de reflectometría de dominio de frecuencia a través de capacitores y osciladores de frecuencia variable (Ferré y Topp, 2002). Las huertas están equipadas con un sistema de fertirriego por goteo con goteros de 0.004 m³ hora⁻¹, insertados a 0.50 m de separación en manguera de 18 mm de diámetro, espesor 2.55 mm. La evaluación de las dos huertas transcurrió durante tres años desde el año 2019 al 2021, registrando H_s con sensores en cuatro puntos de muestreo a 0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 cm de profundidad. Se aplicó el modelo de balance de humedad del suelo para determinar la lámina promedio evapotranspirada (mm) por el cultivo, en los tres años de estudio junto con fertilización integral balanceada para asegurar óptima producción (Silber *et al.*, 2018). Mediante el balance de humedad (Mounzer *et al.*, 2008), se calculó la evapotranspiración real del cultivo (ET_r) de acuerdo con la expresión:

$$ET_r = W_f + P_e + R \pm \Delta S \quad (1)$$

Donde:

ET_r= evapotranspiración del cultivo (mm)

W_f= cantidad de agua disponible al inicio del periodo

P_e= precipitación efectiva (mm)

R= riego aplicado (mm)

ΔS= cambio en la humedad almacenada del suelo

De acuerdo con García y Castel (2007), el aporte de lluvia por su alta intensidad, en el verano hasta el inicio del otoño no fue tomado en cuenta en el modelo de balance, por lo que la ecuación se reduce a solo el estudio de los cambios en la humedad del suelo por el riego (ΔS):

$$\Delta S = \sum_{i=0}^n (\theta_i - \theta_{i-1}) \Delta z_i \quad (2)$$

Donde:

ΔS = variación de la humedad promedio anual del suelo (mm)

$\theta_i - \theta_{i-1}$ = contenido volumétrico de agua de un estrato de suelo en dos periodos entre riegos ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

Δz_i = espesor de cada profundidad de suelo (m)

n = número de profundidades estudiadas

Para determinar las variables de eficiencia de riego se calcularon los siguientes conceptos (Tapia *et al.*, 2016), volumen de agua que aplica (V_a), el emisor referido a 1:00 ha:

$$V_a = n q_e \frac{m^3}{hr m} \times \frac{100 m}{dh} \times 100 m \quad \frac{m^3}{hr} \quad (2)$$

Donde:

n = número de regantes por hilera de árboles (2 regantes separadas a 80 cm en ambas localidades)

q_e = caudal del emisor ($8 \text{ L hr}^{-1} \text{ m}^{-1}$)

dh = distancia entre hileras de árboles (m)

El volumen de agua requerido por el cultivo (V_r) referido a 1:00 ha y al 100% de E_{To} se

calcula como:

$$V_r = [E_{To} \times A] c \quad \frac{m^3}{dia} \quad (3)$$

Donde:

E_{To} = evapotranspiración de referencia diaria (m dia^{-1}), tomado de la estación climática

A = 10000 m^2 (1:00 ha)

C = fracción de suelo efectivamente regado en riego por goteo ($c = 0.33$, Pizarro, 1996)

El tiempo de riego (T_r) para aplicar la cantidad de agua que el cultivo requiere es:

$$T_r = \frac{V_r}{V_a} \quad (\text{hr dia}^{-1}) \quad (4)$$

Finalmente, la lámina de riego aplicada (L_r), en función del volumen neto aplicado (V_{AN}), se estimó con:

$$L_r = \frac{V_{AN}}{10000 \text{ m}^2 \times c} \quad (\text{m}) \quad (5)$$

Donde:

$$V_{AN} = V_a \times T_r \times N \quad (\text{m}^3) \quad (5)$$

N = número de días de cada mes

De acuerdo con el enfoque del coeficiente del cultivo (FAO 1979), la evapotranspiración real del cultivo E_{Tr} se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia E_{To} y el coeficiente del cultivo, K_c :

$E_{Tr} = K_c E_{To}$ (FAO, 1979) despejando K_c entonces

$$K_c = \frac{E_{Tr}}{E_{To}} \quad (6)$$

donde

E_{Tr} = evapotranspiración real del cultivo [mm],
 K_c = coeficiente del cultivo [adimensional],
 E_{To} = evapotranspiración de referencia [mm].

De acuerdo con Zamora *et al.* (2011), la eficiencia de uso de agua (EUA) se calculó con la relación rendimiento de fruto (YF) y agua evapotranspirada por el cultivo (E_{Tr}); mientras que el índice de uso de agua (IUA) se calculó según Cao *et al.* (2020), mediante la relación E_{Tr} y L_r :

$$EUA = \frac{YF}{E_{Tr}} \quad IUA = \frac{E_{Tr}}{L_r}$$

Donde:

YF = rendimiento de fruto (kg/árbol)
 E_{Tr} = evapotranspiración real del cultivo (mm)
 L_r = lámina de riego aplicada (mm)

Resultados y Discusión

El promedio de las variables climáticas durante los tres años de estudio (2019-2021) en las localidades de Cutzato y Tiamba, se aprecia que en la localidad de Tiamba el clima es más fresco y la precipitación acumulada anual supera en 52% la precipitación de Cutzato (Cuadro 1), lo cual confirma el gradiente negativo de precipitación del municipio de Uruapan en dirección Norte-Sur (Tapia *et al.*, 2011). La temperatura media es más baja en Tiamba (15.0 °C) que en Cutzato (20.3 °C), mientras que E_{To} es más alta en Cutzato (3.7 mm día⁻¹) que en Tiamba (3.5 mm día⁻¹), estos valores aunque semejantes, la diferencia anual es de 183 mm que significa de manera práctica, más riego en Cutzato que en Tiamba, equivale a dos meses de E_{To} en Tiamba y un mayor estrés para el cultivo por el incremento de la demanda de agua por el medio, la cual debe suministrarse necesariamente para no afectar la productividad del cultivo (Holzapfel *et al.*, 2017). Destaca también que las temperaturas más altas ocurren entre los meses de marzo a mayo, registrándose en verano una disminución de la temperatura por efecto de la lluvia que coincide al fin de la primavera de cada año, continuando la disminución de las temperaturas en el otoño e invierno, reiniciando el ciclo en marzo.

Cuadro 1. Valores promedio (2019-2021) de tres variables climáticas en dos localidades experimentales de aguacate de Uruapan, Michoacán.

Mes	Cutzato			Tiamba		
	Temperatura Media (°C)	Precipitación (mm)	ETo (mm)	Temperatura Media (°C)	Precipitación (mm)	ETo (mm)
Enero	18.4	0.7	2.7	12.1	10.6	80.6
Febrero	19.4	17.3	3.1	12.0	50.8	84.0
Marzo	21.3	0.3	4.8	14.8	1.7	133.3
Abril	22.3	0.1	5.1	15.9	0.4	138.0
Mayo	22.4	44.6	4.7	16.9	51.9	136.4
Junio	20.7	196.7	4.1	16.5	319.2	90.0
Julio	20.1	273.3	3.6	16.6	529.8	89.9
Agosto	20.0	359.8	3.7	16.5	502.3	89.9
Septiembre	19.7	407.7	3.1	16.2	504.1	78.0
Octubre	20.0	132.9	3.2	16.2	198.3	96.1
Noviembre	20.0	9.7	3.3	13.5	12	87.0
Diciembre	19.1	2.0	2.8	12.8	15.1	77.5
Promedio	20.3	1444.9	3.7	15.0	2196.2	1180.7

ETo: Evapotranspiración de referencia (mm)

Evaluación de la humedad del suelo

En la Figura 1, se presenta la información de la humedad del suelo promedio anual del periodo 2019-2021 de Cutzato. En las cuatro profundidades estudiadas, se aprecia claramente que la evapotranspiración real (ETr) es máxima en la profundidad 0-15 cm, lo cual demuestra que la mayor cantidad de agua absorbida por el cultivo es en la capa superior del suelo y hay también condiciones para afirmar que las raíces del aguacate son muy superficiales y, por tanto, el agua y los nutrientes deben estar presentes lo más superficial posible. En esta profundidad (00-15 cm), es importante notar que en los meses secos de noviembre a mayo, la humedad del suelo desciende muy rápidamente a niveles incluso más bajos que el 50% de la capacidad de campo, variable que únicamente se alcanza en la temporada de lluvias de junio a octubre, pero el alto consumo de agua en esta época del año a pesar de las fuertes lluvias, agota el agua hasta un 60% de la capacidad de campo, demostrándose el alto poder de absorción del sistema radicular en este estrato 00-15 cm y un gradiente negativo de absorción a medida que se profundiza en el suelo, es al menos 25.4% menor en el siguiente estrato 15-30 cm, en este caso de Cutzato, lo deseable sería que esté alrededor de 50% de la humedad del suelo, para no perjudicar la productividad del aguacate. Destaca también que en las capas inferiores (15-30, 30-45 y 45-60 cm), no existe un consumo significativo del agua, permaneciendo casi constante en $40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, lo cual prueba que el aguacate es un cultivo de bajo consumo de agua, el cual se reduce solo a la capa más superficial del suelo (00-15 cm) y de que en esta área es donde deben estar presentes los insumos agua y fertilizante para un correcto desarrollo del cultivo.

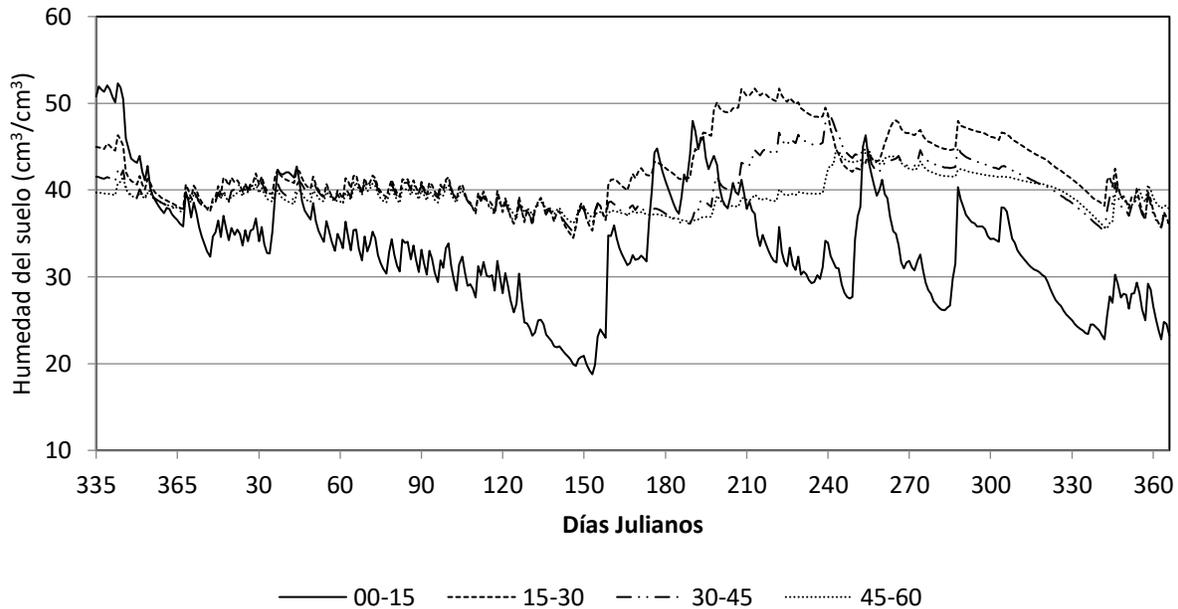


Figura 1. Humedad volumétrica del suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) promedio anual en la zona radicular del aguacate en las profundidades medidas en la localidad de Cutzato, municipio de Uruapan, Mich.

En la Figura 2 se presenta la evaluación de la humedad volumétrica del suelo en la localidad de Tiamba, resultados que de manera inmediata reflejan un tipo de suelo diferente al de la localidad Cutzato, pues este suelo es más ligero con mayor contenido de arena y un valor menor de la capacidad de campo, en alrededor de $44 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ sin embargo, la tendencia de mayor consumo de agua del cultivo en la capa superior (00-15 cm) es clara, pero hay un fuerte gradiente negativo de la absorción del agua de menores tasas en las capas inferiores, llegando hasta la más inferior a 60 cm. También por ser una región más lluviosa, la humedad del suelo en todos los estratos se conserva cerca de capacidad de campo desde el inicio de la temporada de lluvias hasta el final (mayo-octubre) y a partir de noviembre la humedad del suelo baja rápidamente hasta propiciar el reinicio de los riegos en diciembre. Por tanto, aunque en menor medida que en Cutzato, la capa más superficial es también la más importante para rápida absorción de agua en esta localidad.

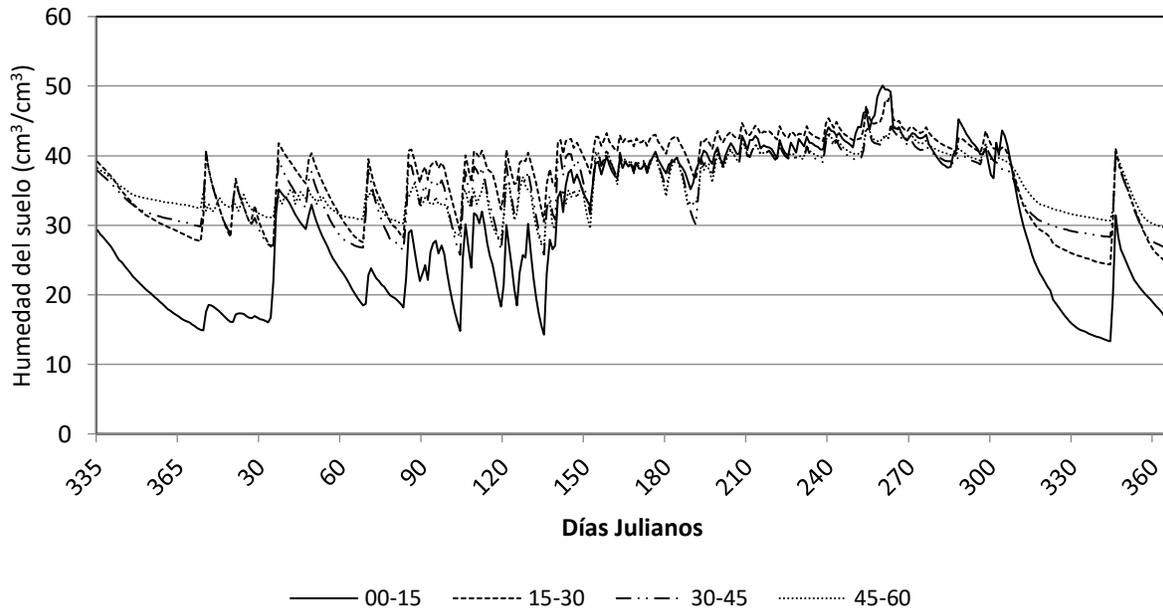


Figura 2. Humedad volumétrica del suelo en 4 profundidades de muestreo en la localidad de Tiamba en un promedio de tres años

Claramente en ambas localidades se aprecia máxima cantidad de absorción de agua en la capa más superficial del suelo (00-15 cm) en Cutzato, en esta capa se absorbió un 46.3% de la relación E_{Tr}/L_r , mientras que en Tiamba se obtuvo un 34.5% en esta misma profundidad, aunque en total, en todas las capas de suelo en Tiamba se tuvo 70% de porcentaje de E_{Tr}/L_r , mientras que en Cutzato fue menor con 65%, Salgado y Cautin (2008), mencionan que la textura del suelo puede significar la diferencia en la cantidad de E_{Tr} , siendo los suelos con mayor contenido de arcilla los que permiten una mayor E_{Tr} , lo que en este trabajo se encontró lo contrario pues el suelo más ligero de Tiamba permitió una mayor E_{Tr} que el suelo más fino de Cutzato. Por su parte, Carr (2013) reporta que el aguacate puede consumir agua y nutrientes hasta 60 cm de profundidad, pues la mayoría de las raíces absorbentes están en este límite, los resultados aquí documentados comprueban estos datos, ya que, a mayor profundidad, esto es de 45 a 60 cm de la superficie, la tasa de absorción es menor que a capas superficiales. En esta capa más profunda evaluada se obtuvo 16.4% de absorción en Cutzato y 13.2% en Tiamba, esto significa que, a mayor profundidad, la tasa de extracción puede ser menor. En este sentido Salgado y Cautin (2008), refieren que la mayor densidad radicular se tiene hasta 50-60 cm de profundidad, lo cual coincide con los resultados de este trabajo. El conocimiento de la distribución de la humedad en la zona radicular del aguacate puede mejorar otras actividades de manejo como la nutrición o la aplicación de agroquímicos Purbopuspito y Van Rees(2002), para optimizar los insumos de este fruto.

Evapotranspiración real (ET_r) del aguacate

En el Cuadro 2 se informan los resultados de la determinación del consumo de agua real (ET_r) del aguacate en las dos localidades estudiadas. Se destaca que a pesar de la diferencia de clima en las dos localidades, se observa semejanza en ET_r, este hecho obtenido en dos localidades tan contrastantes en clima (Cuadro 1), claramente indica que el aguacate tiene limitaciones en la transpiración de agua por sus hojas; parece ser también que el consumo de agua por parte del aguacatero no se ve afectado por el clima prevaleciente en su entorno, pues a pesar de ser más cálida la región de Cutzato con respecto a Tiamba, la ET_r de Cutzato es 110 mm menor a la de Tiamba. Resalta también que en la capa superior (00-15 cm) la ET_r es al menos 57% y 20% más alta que en las capas inferiores de Cutzato. Aunado a ello, los meses de mayor ET_r son de diciembre a mayo en ambas localidades, con un total de 617 mm en Cutzato y de 592 mm en Tiamba, que corresponden al tiempo de fertirriego en ambas huertas. Finalmente, la ET_r total anual del aguacate en los dos tipos de clima más importantes de las regiones productoras de Michoacán, es de 921.6 mm en climas templados C_(w) como el de Tiamba y de 965.3 mm en climas semicálidos (A)C_(w) como el de Cutzato.

Cuadro 2. Evapotranspiración real (ET_r) promedio del aguacate en tres años de estudio en las localidades de Cutzato y Tiamba, municipio de Uruapan, Michoacán, México.

Mes	Cutzato					Tiamba				
	Profundidad del suelo (cm)				ET _r (mm)	Profundidad del suelo (cm)				ET _r (mm)
	0-15	15-30	30-45	45-60		0-15	15-30	30-45	45-60	
Dic	27.1	13.2	7.3	55.7	103.3	18.6	20.9	19.3	17.0	75.8
En	15.9	16.3	15.0	8.7	55.8	25.5	24.8	28.9	10.2	89.4
Feb	55.4	20.6	15.3	12.1	103.4	22.1	10.2	26.8	6.3	65.3
Mar	36.2	14.5	18.2	14.4	83.4	16.3	47.5	25.1	16.8	105.6
Abr	76.5	30.3	17.9	16.5	141.2	35.6	54.1	42.2	16.3	148.2
May	61.1	25.7	25.5	19.0	131.2	23.2	32.0	34.7	17.9	107.8
Jun	21.3	8.3	9.3	1.6	40.5	7.8	18.6	14.8	7.8	49.1
Jul	31.3	3.9	5.5	2.5	43.2	9.7	14.2	10.4	3.4	37.7
Ag	23.0	15.1	9.0	1.4	48.5	12.4	18.5	13.1	8.6	52.5
Sep	28.8	3.5	8.4	5.3	45.9	165.2	16.5	12.8	9.2	50.2
Oct	20.0	6.1	4.1	3.3	33.5	12.1	14.4	12.9	11.5	50.8
Nov	23.1	11.0	8.8	5.7	48.5	8.3	10.9	9.0	9.1	37.3
Dic	28.2	25.4	19.7	13.5	86.7	14.7	16.7	11.9	8.6	51.9
suma	447.8	194.0	163.9	159.7	965.3	371.5	299.1	261.7	142.8	921.6

En ambas localidades la ET_r supera los 900 mm año⁻¹, ello indica un consumo de agua importante que refleja las necesidades de agua que engloban tanto la evaporación y la transpiración como argumenta Shereif y Thiaf (2019), la cual puede ser muy variable en el tiempo, influida por el cambio climático y el clima prevaleciente, esto parece no confirmarse en este trabajo pues a pesar de la diferencia climática (Cuadro 1), ET_r en ambas localidades es semejante, esto parece probar que el aguacate tiene mecanismos

reguladores para reducir ETr a pesar de diferencias en el clima de cada región, ya que cabría esperar una mayor ETr en climas cálidos. Este desempeño del aguacate con respecto a la ETr en dos localidades contrastantes en cuanto a clima podría limitar algún programa de ahorro de agua en aguacate de climas templados Lichang *et al.*, (2022), menciona una posible afectación económica y productiva en programas de ahorro de agua.

Eficiencia de Uso de Agua

Las variables relacionadas con el uso eficiente del agua EUA, IUA y Kc del aguacate, son desconocidas a la fecha en el estado de Michoacán y a nivel nacional. En el Cuadro 3, se observa que el coeficiente de cultivo fue obtenido aplicando el 100% de la ETo de cada localidad, lo cual da pauta a considerar que el aguacate puede manejarse a una menor tasa de ETo sin afectar el desempeño del aguacate, sin embargo, se puede notar que en Tiamba, a pesar de haber menor demanda evapotranspirativa del medio, la eficiencia del uso de agua (EUA), es mayor 9%, pero también el IUA es mayor en 22%. Respecto al Kc, los valores obtenidos de acuerdo con la localidad variaron, en Cutzato a pesar de ser más cálido, se obtuvo 0.72 y en Tiamba 0.78, esta diferencia pudo ser debida a que Tiamba tuvo un 12% de mayor productividad y por tanto mayor demanda de agua y mayor consumo.

Cuadro 3. Variables relacionadas con la eficiencia de uso de agua en el cultivo de aguacate en dos localidades del estado de Michoacán.

Sitio	ETo (mm año ⁻¹)	ETr (mm año ⁻¹)	Kc	VAN (m ³ ha ⁻¹)	Lr (mm)	Rendimiento (kg árbol ⁻¹)	EUA (kg m ⁻³)	IUA (ETr Lr ⁻¹)
Cutzato	1,341.5	965.3	0.72	4,426.9	1,490.0	54.6	4.4	0.65
Tiamba	1,180.7	921.0	0.78	3,896.3	1,311.9	61.2	5.6	0.70

Nota: ETo: evapotranspiración de referencia; ETr: Evapotranspiración real; Kc: coeficiente de cultivo; VAN: Volumen de agua neto; Lr: lámina de riego anual; EUA: eficiencia de uso de agua; IUA: índice de uso de agua

En ambas localidades, se aprecia menor consumo de agua del cultivo que la demanda evapotranspirativa del medio, con 60% en Cutzato y de 64% en Tiamba. Alder (2019), menciona que el aguacate en California consume 86% de la ETo, este valor está por encima de las dos localidades estudiadas, el mayor consumo de Tiamba puede ser debido a que el suelo es más arenoso por lo que existe una mayor distribución de humedad en el perfil del suelo y por tanto puede haber mayor densidad radicular, en este sentido Michelakis *et al.*, (1993), reporta una relación directa de disponibilidad de agua y crecimiento radicular en aguacate, Con respecto al Kc obtenido en las dos localidades de 0.72 y 0.78, son semejantes al obtenido por Grismer (2000), con un valor de 0.73 en árboles adultos; sin embargo, son un poco más altos a los obtenidos por Carr (2013), quien reporta un valor de 0.4 a 0.6. Con respecto a la eficiencia de uso de agua, en Tiamba se obtuvo un valor 27.3% superior al de Cutzato, lo que se traduce en que con menor cantidad de agua (12.1 %) el aguacate produce más en Tiamba. Cabe notar que ambos valores de EUA son superiores al reportado por Carr (2013), de sólo 2 Kg/m³.

Conclusiones

La mayor cantidad de agua absorbida por el cultivo ocurre en la capa superior del suelo, por lo que agua y los nutrientes deben estar presentes en el estrato de 00-15 cm del perfil del suelo. La evapotranspiración real del cultivo es similar en climas templados C(w) y climas semicálidos (A)C(w), aunque ligeramente superior en éstos últimos. La eficiencia en el uso de agua, es decir la productividad del aguacate por unidad de agua aplicada, es mayor en climas templados que en climas semicálidos. La dosificación de fertilizantes en bajas dosis y alta frecuencia no produce exceso de lixiviados y por tanto no es causa de contaminación de agua. En general, el aguacate puede considerarse como un cultivo de bajo requerimiento de agua. Los valores obtenidos en la presente investigación para los índices relacionados con el uso eficiente del agua EUA, IUA y Kc, representan información de valor referencial para futuros trabajos de investigación y/o planeación regional en pro de una mayor producción de aguacate con menor consumo de agua.

Agradecimientos. A la compañía Agrotecnología de América S.A. por la cesión de sus estaciones climáticas en línea y tiempo real al INIFAP. A APEAM y Yara de México por su apoyo económico al presente proyecto de investigación

Referencias Bibliográficas

- Alder, G. (2019). Using the evapotranspiration rate to water your garden better. The Yard Posts. <https://gregalder.com/yardposts/using-the-evapotranspiration-rate-to-water-your-garden-better/> consultado (02/may/2022)
- Ayala, R.S.M. (2018). El aguacate: el gran oro verde. Contaduría Pública. Universidad del Valle de Atemajac, Campus Zamora. <https://www.univa.mx/zamora/wp-content/uploads/sites/3/2019/07/articulo-el-aguacate.pdf>
- Beyer-Clemens,. P., Cuneo-Italo, I.F., Alvaro-Juan, E., Pedreschi-Romina R. (2021). Evaluation of aerial and root plant growth behavior, water and nutrient use efficiency and carbohydrate dynamics for Hass avocado grown in a soilless and protected growing system. *Sci. Hortic.*, 277 (2021), p. 109830
- Cao-Xinchum., Li-Yueyao, Y., Wu-Mengyang, M. (2022). Irrigation water use and efficiency assessment coupling crop cultivation, commutation, and consumption processes. *Agricultural Water Mangement*. 261(3):365-374
- Cao-Xinchum., Zeng-Wen., Wua-Mengyang., Xiangping-Guo., Weiguang-Wang. (2020). Hybrid analytical framework for regional agricultural water resource utilization and efficiency evaluation. *Agricultural Water Management*. 231(3):647-655
- Caro-Dario., Alessandrini-Arianna., Sporchia-Fabio., Borghesi-Simone. (2021). Global virtual water trade of avocado. *Journal of Cleaner Production* 285:155-164

- Carr, M.K.V. (2013). The water relations and irrigation requirements of avocado (*Persea americana*) a review. 49(2):256-278
- Deanroy-Mbabazi., Migliaccio-Kati. W., Crane-Jonathan. H., Fraissea-Clyde., Zotarelli-Lincoln., Morgand-Kelly.T., & Kiggundue-Nicholas. (2017). An irrigation schedule testing model for optimization of the Smartirrigation avocado app. Agricultural Water Management. 179(1):390-400
- FAO (Food and Agriculture Organization). (1979). Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, Italy
- Ferré, P.A., Topp, G.C. (2002). "Time domain reflectometry." In: Dana, J.H. & Topp, G. C. (Eds), Methods of soil Analysis, Part 4-Physical Methods, p. 434-446. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Franco-Sánchez, M.A., Leos-Rodríguez, J.A., Salas-González, J.M., Acosta-Ramos, F., & García-Munguía A. (2018). Análisis de costos y competitividad en la producción de aguacate en Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 9(2): 391-404.
- García-Petillo. M., & Castel J.R. (2007). Water balance and crop coefficient estimation of citrus orchard in Uruguay. Spanish Journal of Agricultural Research. 5(2):1-12.
- Gil, P.M., Bonomelli, C., Schaffer, B., Ferreyra, R., & Gentina, C. (2012). Effect of soil water-to-air ratio on biomass and mineral nutrition of avocado trees. Journal of soil Science Plant Nutrition. 12(3):609-630.
- Grismer-Mark. E. (2000). Long-term evapotranspiration from coastal avocado/citrus orchard. Journal of irrigation and drainage engineering :1-7
- Hagin, J., & Lowengart, A. (1996). Fertigation for minimizing environmental pollution by fertilizers. In: Rodriguez-Barrueco, C. (eds) Fertilizers and Environment. Developments in Plant and Soil Sciences, vol 66:23-25. Springer, Dordrecht, Holland.
- Holzapfel, E., Alves, S. J., Jara, J., & Carvalho, G.H. (2017). Responses of avocado production to variation in irrigation levels. Irrigation Science 35:205-215
- Lichang, Y., Tao, F., Chen, Y., & Wang, Y. (2022). Reducing agriculture irrigation water consumption through reshaping cropping systems across China. Agricultural and Fores Metereology. 312:515-525
- López, R. (2017). México experimenta escasez de agua y falta equidad en su distribución. Gaceta UNAM. Dirección General de Comunicación Social. UNAM. Núm. 4876:14-16

- Michelakis, N., E. Vougioucalou, and G. Clapaki. (1993). Water use, wetted soil volume, root distribution and yield of avocado under drip irrigation. *Agric. Water Managem.* 24:119-131.
- Moreno-Ocampo, A. A., Leos-Rodríguez. J. A., Contreras-Castillo. J. M. & Cruz- Delgado. D. (2015). Análisis comparativo del comercio agropecuario de tres países (México, China y Canadá) con Estados Unidos de América (1990-2011). *Agric. Soc. Des.* 12(2):131-146.
- Mounzer-Oussams, H., Vera-Juan., Tapia-Vargas, L.M., Garcia-Orellana, Wenceslao-Conejero., Abrisqueta-Isabel., Ruiz-Sanchez, Ma. C., & Abrisqueta-Garcia, J.Ma. (2008). Irrigacion Scheduling of peach trees (*Prunus persica* L.) by contunuous measurement of soil water status. *Agrociencia* 42 (8): 857-868p.
- Pizarro, C.F. (1996). Riegos localizados de alta frecuencia. Ed. Mundiprensa. 3ª Edición. Barcelona, España. 513 p.
- Purbopuspito, J., Van-Rees., & K.C.J. (2002). Root distribution at various distances from clove trees growing in Indonesia. *Plant and Soil* 239: 313-320
- Rosa-Rodríguez, R., Lara-Herrera, A., Trejo-Téllez, L.I., Padilla- Bernal, L.E., Solis-Sánchez, L.O., & Ortiz-Rodríguez, J.M., (2020). Water and fertilizers use efficiency in two hydroponic systems for tomato production. *Horticultura Brasileira.* 38:47-52
- Salgado, E., & R. Cautin. (2008). Avocado root distribution in fine and coarse-textured soils under drip and microsprinkler irrigation. *Agricultural Water Management.* 95(7):817-824
- Shereif, H. M., & Thian, Y. G. (2019). Irrigation water management in arid regions of Middle East: Assessing spatio-temporal variation of actual evapotranspiration through remote sensing techniques and meteorological data. *Agricultural Water Management* 212:35-47
- SIAP. (Sistema de Información Agrícola y Pecuaria). (2020). Secretaría de Agricultura. Información Agrícola por Cultivo. www.siap.gob.mx (consultado el 12/junio de 2022)
- Silber, A., Naor, A., Cohen, H., Bar-Noy, Y., Yechieli, N., Levi, M., Noy, M., Peres, M., Duari, M., Narkis, K., & Assouline, S. (2018). Avocado fertilization: *Scientia Horticulturae* 241:231-240
- Tapia-Vargas, L.M., A. Larios-Guzmán., A. Hernández-Pérez., & I. Vidales-Fernández. (2016). Control del riego en línea y tiempo real del aguacatero y eficiencia del uso del agua. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias* 3(6):11-18

Tapia-Vargas, L. M., Larios-Guzmán, A., Vidales-Fernández, I., Pedraza-Santos M.E., & Barradas-Vásquez, V. (2011). El cambio climático en la zona aguacatera de Michoacán: análisis de la precipitación y la temperatura a largo plazo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. Esp. (2):325-335

Zamora-Salgado, S., Ruiz-Espinoza, F.H., Beltrán-Morales, F.A., Fenech-Larios, L., Murillo-Amador, B., Loya-Ramírez, J., & Troyo-Diéguez, E. (2011). Régimen hídrico del maíz en una zona árida, determinado en porcentajes de evaporación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13:181-186