



RESEARCH ARTICLE

Evaluation of the crop water stress index (CWSI) in chili pepper (*Capsicum*) under drip irrigation in the arid conditions of the north coast of Peru

Evaluación del índice de estrés hídrico de cultivos (IEHC) en ají (*Capsicum*) bajo riego por goteo en las condiciones áridas de la costa norte del Perú

M. Duran^{1*} ; F. L. Ramos² ; R. Alvarado¹ ; L. Altamirano^{2,*} 

¹ Instituto Nacional de Innovación Agraria. Lima. Peru.

² Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Peru.

* Corresponding author: liarf@lamolina.edu.pe (F. L. Ramos).

Received: 13 May 2021. Accepted: 27 August 2021. Published: 8 October 2021.

Abstract

As irrigation water decreases, crop transpiration also decreases, resulting in an increase in leaf temperature and an increase of the crop water stress index (CWSI). Therefore, in the study, the response of *Capsicum* to different irrigation regimes was evaluated with periodic measurements of leaf temperature, stomatal conductance and estimation of the CWSI. The treatments consisted of a complete drip irrigation (RO) and deficit irrigation (RD-78 and RD-58) that received 78% and 58% of the complete irrigation, applying a total volume of water of 3363, 2618 and 1956 m³ ha⁻¹ for RO, RD-78 and RD-58, respectively; and obtaining maximum yields of 30.2, 13.9 and 12.9 t ha⁻¹ with CWSI of 0.50, 0.62 and 0.54 in *C. baccatum*, *C. annumm* and *C. chinense*, respectively. The highest stomatal conductance values ranged from 724 to 887 mmol s⁻¹ m⁻², with CWSI from 0.1 to 0.3. The CWSI value of 0.3 (soil moisture from 25 to 33%) results in a good indicator of the time of irrigation, and it might be a criterion to be incorporated to save water and improve the management of *Capsicum* irrigation programs.

Keywords: CWSI; *Capsicum*; drip irrigation; water stress; leaf temperature.

Resumen

A medida que disminuye el agua de riego, la transpiración del cultivo disminuye, resultando en un incremento de la temperatura foliar y un aumento del índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC). Por ello, en el estudio, se evaluó la respuesta del *Capsicum* a diferentes regímenes de riego, con mediciones periódicas de la temperatura de la hoja, la conductancia estomática y la estimación del IEHC. Los tratamientos consistieron en un riego por goteo completo (RO) y riego con déficit (RD-78 y RD-58) que recibieron el 78% y 58% del riego completo, aplicándose un volumen total de agua de 3363, 2618 y 1956 m³ ha⁻¹ para RO, RD-78 y RD-58, respectivamente; and obteniéndose rendimientos máximos de 30,2, 13,9 y 12,9 t ha⁻¹ con IEHC de 0,50, 0,62 y 0,54 en *C. baccatum*, *C. annumm* y *C. chinense*, respectivamente. Los mayores valores de conductancia estomática variaron de 724 a 887 mmol s⁻¹ m⁻², con IEHC de 0,1 a 0,3. El valor IEHC de 0,3 (humedad del suelo del 25% al 33%), resulta en un buen indicador del momento del riego, criterio a incorporar con la finalidad de ahorrar agua y mejorar la gestión de programas de riego del *Capsicum*.

Palabras clave: IEHC; ají; riego por goteo; estrés hídrico; temperatura de la hoja.

DOI: <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.052>

Cite this article:

Duran, M., Ramos, F. L., Alvarado, R., & Altamirano, L. (2021). Evaluación del índice de estrés hídrico de cultivos (IEHC) en ají (*Capsicum*) bajo riego por goteo en las condiciones áridas de la costa norte del Perú. *Scientia Agropecuaria*, 12(4), 481-489.

1. Introducción

Para satisfacer la demanda creciente de producción de alimentos con recursos hídricos limitados, es necesario implementar técnicas de programación de riego adecuadas, particularmente en zonas irrigadas que experimentan estrés hídrico. Según Parkash & Singh (2020), el 40% del suministro total de alimentos del mundo es aporte de la producción de cultivos bajo riego; esto cubre el 20% del total de tierra cultivable, pero consume más de dos tercios del total de agua disponible.

Por otro lado, a fines del siglo XX, hubo incrementos de temperatura de hasta 0,4 °C/década (costa) (Vuille & Bradley, 2000) con aumento de la evapotranspiración, por lo tanto, aumento de la demanda de agua de los cultivos, afectando la producción de alimentos.

La optimización del uso del agua en la agricultura requiere innovaciones en la detección del estrés hídrico para minimizar el daño fisiológico y la reducción del rendimiento (Nhamo et al., 2020). Por ello, la determinación del estrés hídrico implica la medición

directa del estado hídrico o medición indirecta de los procesos sensibles al déficit de agua de la planta. Los indicadores de estrés hídrico basados en la temperatura de la hoja medida con sensores remotos, tiene la ventaja de una alta resolución espacial y espectral y un tiempo de respuesta rápida (Parkash & Singh, 2020; Messina & Modica, 2020). Mantener la temperatura óptima del dosel es crucial para las actividades metabólicas, la transpiración reduce el calor latente de vaporización, enfriando la superficie de la hoja (Parkash & Singh, 2020). Las mediciones de la temperatura de la superficie del dosel con sensores infrarrojos acopladas en un VANT proveen una importante herramienta para la detección del estrés hídrico en cultivos (Messina & Modica, 2020; Luan et al., 2021). El índice de estrés hídrico de cultivos (CWSI) representa la relación lineal entre la diferencia de la temperatura del dosel y del aire ($T_c - T_a$) y el déficit de presión de vapor (VPD) del aire para un cultivo que transpira a su tasa potencial (Parkash & Singh, 2020; Messina & Modica, 2020).

El ají (*Capsicum* spp.) pertenece a la familia de las solanáceas, y el género incluye más de 30 especies, cinco de las cuales (*C. annuum*, *C. chinense*, *C. baccatum*, *C. frutescens* y *C. pubescens*) son domesticadas y cultivadas para el consumo (Parisi, Alioto, & Tripodi, 2020); es el quinto vegetal más importante del mundo por su valor nutricional e importancia económica (Orarat, 2019). La producción mundial promedio del 2015 al 2019, de 36,1 millones de toneladas de ají fresco y 4,3 millones de toneladas de ají seco, siendo China y la India los mayores productores de ají fresco y seco respectivamente; y en el Perú se tiene más de 350 variedades de ajíes con una producción de 148 y 25 mil toneladas de ají fresco y seco respectivamente (FAO, 2021).

La región de Lambayeque es líder en el Perú, en la producción de *Capsicum*, con más de 2200 hectáreas de cultivo y una producción anual superior a 61 mil toneladas. Sin embargo, el método más común de producción es mediante riego por surcos, por lo que, tienen bajas eficiencias de riego, que ocasionan problemas de drenaje y de salinidad (Sezen et al., 2014). A pesar de la importancia económica del *Capsicum*, el estudio de su

tolerancia al estrés hídrico es limitado. Olanike & Madramootoo (2014), Sezen et al. (2014) y Sezen, Yazara, & Tekin (2019), estudiaron la relación entre el rendimiento y el CWSI para cultivares de *Capsicum*, en Turquía y Canadá, información que requiere ser evaluada para condiciones locales.

Este estudio describe el monitoreo del estrés hídrico de tres variedades comerciales del *Capsicum*: *baccatum*, *chinense* y *annuum*, llamados también ají amarillo, ají panca y ají páprika, en la región Lambayeque, a través de la estimación del CWSI, su relación con la humedad del suelo y rendimiento del cultivo. Los resultados del estudio serán empleados como línea base y registros orientativos para agricultores, productores e investigadores en la región con la finalidad de ahorrar agua y mejorar la gestión de programas de riego del *Capsicum*.

2. Materiales y métodos

Lugar de estudio

El experimento fue conducido en la Estación Experimental Agraria (EEA) "Vista Florida" del Instituto Nacional de Innovación Agraria (06°44'S y 79°47'O, altitud de 35 m.s.n.m.), ubicado en el distrito de Pisci, provincia de Chiclayo, región de Lambayeque, en la costa norte del Perú. Predominando un clima desértico y oceánico, con precipitación acumulada anual de 29,6 mm, principalmente de enero a abril, con temperatura máxima y mínima anual de 25,0 °C y 17,4 °C, humedad relativa de 76,8% y evapotranspiración anual de 1403 mm. En la Figura 1 se muestra la variación mensual de la precipitación, temperatura del aire y temperatura óptima del cultivo.

Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental consistió en tres tratamientos de riego con tres variedades de *Capsicum* y 8 repeticiones (3 x 3 x 8) con un total de 72 parcelas de 10 m x 10 m distribuidas en subunidades randomizadas (Figura 2 y Figura 3) Los tratamientos consistieron en un riego completo (RO) y dos riegos por déficit, al 78% y 58% (RD-78 y RD-58) del volumen de agua aplicado con RO.

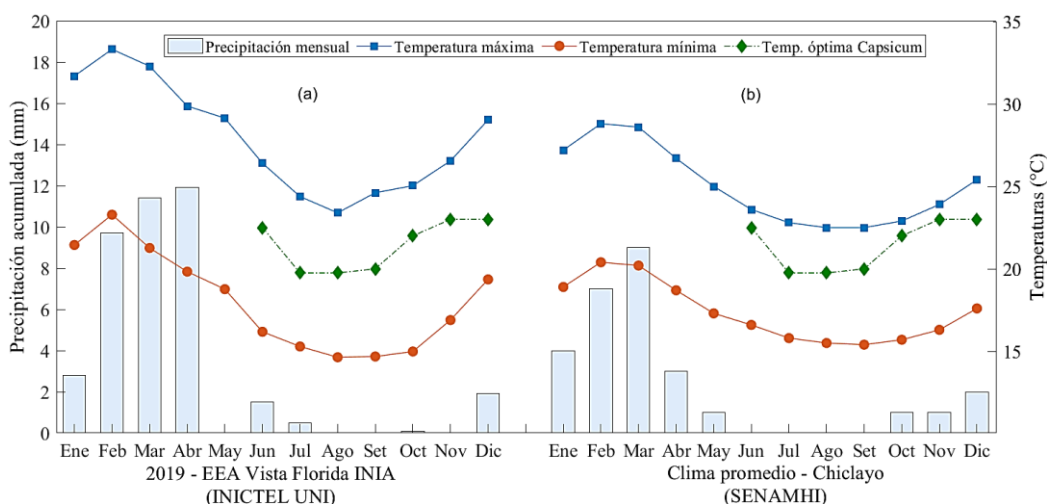


Figura 1. Variación mensual de la precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima del aire y temperatura óptima de crecimiento del cultivo de *Capsicum*: 2019 (a) y promedio de los últimos diez años (b).

El sistema del riego por goteo constaba de laterales de PE de 16 mm de diámetro. Cada parcela (subunidad de riego) tenía 10 laterales provenientes de una tubería colectora de PE de 2 pulgadas de diámetro conectada a un arco de riego. El agua de riego, que se bombeaba desde un reservorio, se conducía mediante tuberías de PE de 3 pulgadas de diámetro a los colectores. Se colocaron laterales en cada fila de plantas para tratamientos de RO, RD-78 y RD-58, con emisores de tasa de descarga de 1,5 L h⁻¹ y presión de operación de 0,5 – 1,0 bar. El distanciamiento entre goteros y entre líneas fue de 0,40 m y 1 m, respectivamente. Para diferenciar los tratamientos de riego, se operaban los arcos de riego. El sistema se hizo funcionar a 80 kPa durante toda la temporada de crecimiento. La unidad de control del sistema consistía en una bomba, filtros de grava y disco, un medidor de flujo, válvulas de control y manómetros.

Manejo del Cultivo

Se emplearon las variedades de *Capsicum baccatum*, *Capsicum chinense* y *Capsicum annum* (Tabla 1), el desarrollo del cultivo fue en temporada de invierno con fecha de trasplante el 26 de julio del 2019, duración de

temporada de 190 a 206 días, densidad de 52 mil plantines/ha, espaciamentos entre hileras de 1,0 m y 0,20 m entre plantines. Se aplicó una dosis de fertilización de 192–118–150 al inicio de la floración (60%) e inicio de llenado de frutos (40%), con 1,5% de compost durante la preparación del suelo.

Se trasplantaron a los 49 DDS, con mayor crecimiento en la fase vegetativa con ají páprika (12 cm de altura), fase que culminó a los 71 DDS, y de 76 a 81 DDS en el resto de las variedades. La fase reproductiva se inició con los primeros brotes florales, fase sensible a la sequía y al fro; y con primeros brotes frutales a los 117 DDS en aj páprika, una semana despues en ají amarillo y dos semanas y media despues en aj panca; con cosecha a los 190 DDS (páprika) y 206 DDS (ají amarillo y panca) (Ver Tabla 2). Durante la emergencia de brotes frutales, el campo fue afectado por el hongo *Uncinula necator* que limitó el potencial de rendimiento del ají páprika. Es de mencionar que, al inicio del llenado de fruto, se tuvo dos semanas de corte de agua de riego debido al mantenimiento de la infraestructura de riego en epoca de estiaje del rio Chancay-Lambayeque.

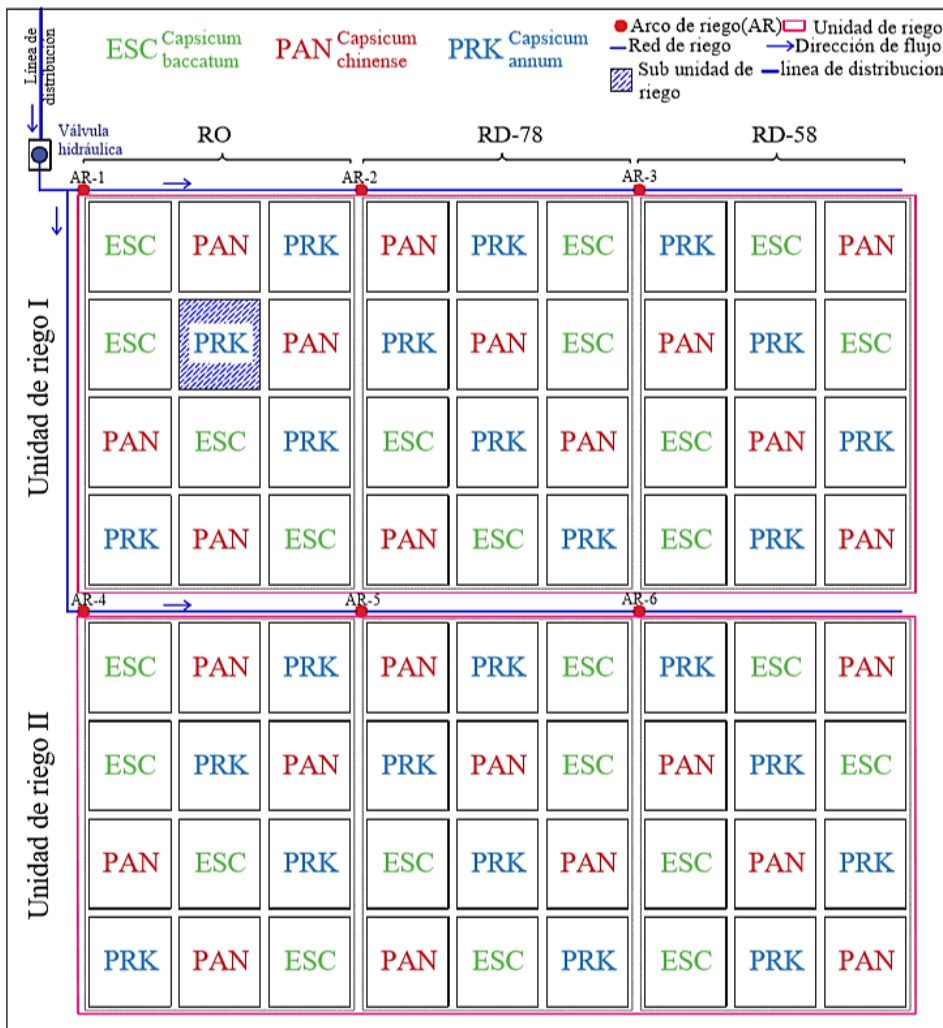


Figura 2. Distribución de subunidades de riego randomizadas ubicados en el Lote 3-1 de la EEA Vista Florida INIA, región Lambayeque.

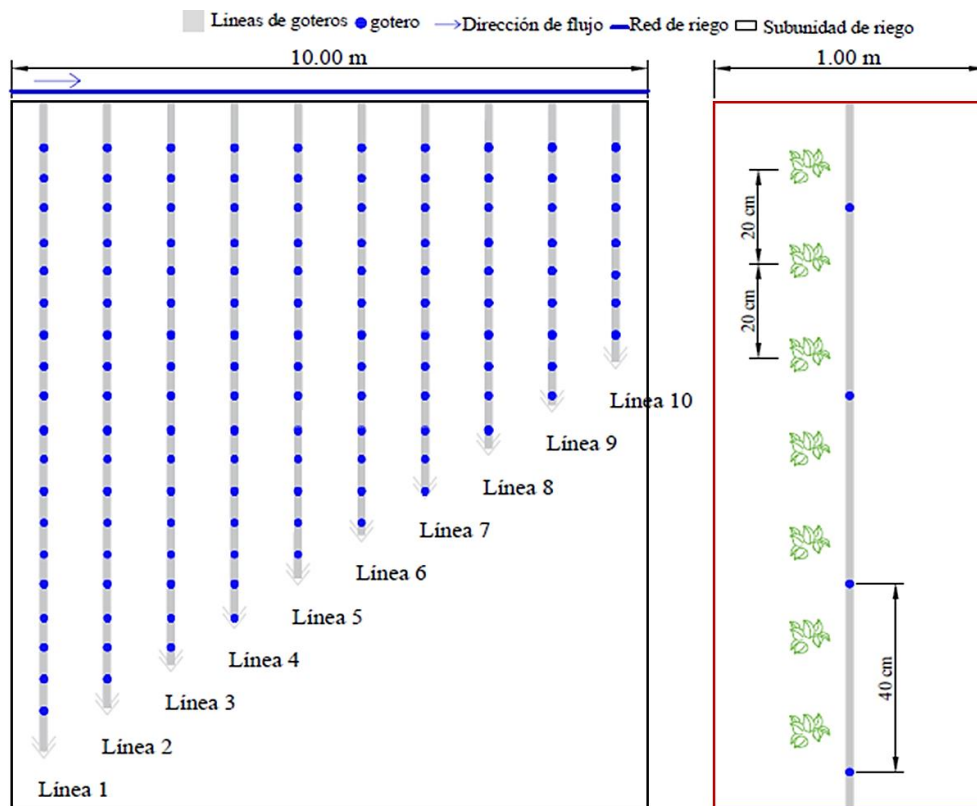
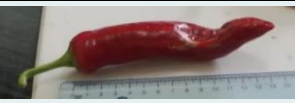




Figura 3. Subunidad de riego de 10m x 10m, con 10 líneas de gotero (izquierda), y detalle de líneas de goteros con espaciamento de 40 cm entre goteros y 20 cm entre plantines (derecha).

Tabla 1 Presentación del fruto: *Capsicum baccatum*, *Capsicum chinense* y *Capsicum annuum*

Frutos del experimento	<i>Capsicum</i>
	<i>Capsicum annuum</i> (ají páprika) Fruto ligeramente picante, largo y delgado; fruto maduro en rojo intenso. Usos: seco para hacer salsa.
	<i>Capsicum chinense</i> (ají panca) Fruto ligeramente picante, fruto maduro en marrón rojizo. Usos: fresco y seco.
	<i>Capsicum baccatum</i> (ají amarillo) Fruto moderadamente picante, fruto maduro de color naranja intenso. Uso: fresco y seco.

El rendimiento se determinó recolectando a mano en un área central de 12 m² de cada subunidad de riego, dependiendo de la madurez fisiológica de las plantas; el área correspondía a dos hileras de 6 m de longitud. Los parámetros de calidad del fruto (peso fresco de frutos, peso seco, número de frutos, peso medio del fruto, longitud y ancho de frutos), se estimaron con secado expuestos al sol durante diez días. Se realizó el análisis estadístico con la prueba de Tukey para comparar las medias de tratamiento y variedad.

Agua de riego y suelo

El agua de riego tuvo un pH y conductividad eléctrica que varió de (7,8 – 8,2) y (0,80 – 0,5) dS m⁻¹, respectivamente.

La textura del suelo fue franca (60% arena, 30% arcilla, 20% limo), la humedad gravimétrica a capacidad de campo y punto de marchitez fue de 27,3 y 12,8 g g⁻¹ y densidad aparente de 1,31 g cm⁻³.

Mediciones

La temperatura del dosel (Tc) se midió con un termómetro infrarrojo manual (Dual-Laser tipo K, Traceable, Texas, EEUU), con un ancho de visión de 12:1; con lecturas a un ángulo de inclinación entre 30 a 40 respecto al cenital, a una distancia promedio de 0,5 m de la hoja (dosel) y mediciones ajustadas a una emisividad de 0,98. Se tomaron 4 mediciones en 4 plantas de forma aleatoria en cada parcela y se calculó la temperatura promedio del dosel.

Tabla 2

Duración de las fases fenológicas de las variedades de *Capsicum (baccatum, chinense y annum)* en días después de la siembra

Fases de crecimiento	Fecha (2019) / DDS					
	<i>Capsicum baccatum</i>		<i>Capsicum chinense</i>		<i>Capsicum annum</i>	
Siembra en vivero	06 jun	0	06 jun	0	06 jun	0
Trasplante	26 jul	50	08 jul	50	08 jul	50
Fase vegetativa	04 ago	60	04 ago	60	04 ago	60
Primera floración	20 ago	76	25 ago	81	15 ago	71
Brotos frutales	07 oct	124	20 oct	137	30 sep	117
Cosecha	28 dic	206	28 dic	206	13 dic	190

En simultaneo, se midió la conductancia estomática en las hojas superiores más expandidas, utilizando un porómetro portátil (Decagon Devices, INC). El dispositivo se calibro antes de su uso utilizando una placa de calibración de fábrica. La colecta de datos se realizó desde el inicio de la floración hasta antes de la cosecha, en intervalos de 10 días en el horario de 11:00 a 13:00 (hora estándar local) a cielo descubierto y brillo solar para asegurar la máxima intensidad solar cuando el sol brillaba directamente sobre las plantas.

La humedad volumétrica del suelo se midió a una profundidad de 0,25 m, empleando un sensor portátil TDR 350 (FieldScout, Spectrum Techonologies Inc., Illinois, EEUU), previamente calibrado con mediciones de humedad gravimétrica.

Índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)

El Déficit de Presión de Vapor (VPD) se obtuvo a partir de la temperatura y humedad relativa del aire, disponible en la estación meteorológica de la EEA Vista Florida. Al graficar (Tc-Ta) versus VPD, se obtuvo la línea base inferior (LI) que representaba las condiciones sin estrés. La línea de base superior (LS) es una línea horizontal que representa la ausencia de transpiración. La relación de la diferencia de temperatura dosel-aire (Tc-Ta) versus el VPD para la línea base del LI se determinó con la información colectada en el tratamiento de RO; y para la línea base del LS se usó la información de los tratamientos de reducción de riego (RD-58 y RD-78) que representan las condiciones críticas (un día antes del riego).

El índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) fue calculado en base a la ecuación propuesta por Idso et al. (1981) (Sezen et al., 2019; Bozkurt et al., 2021) (Ec. 1), donde Tc es la temperatura del dosel (°C) y Ta la temperatura del aire (°C).

$$CWSI = \frac{(Tc-Ta) - (Tc-Ta)_{LS}}{(Tc-Ta)_{LS} - (Tc-Ta)_{LI}} \dots \text{(Ec. 1)}$$

Finalmente, se relacionó el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), la conductancia estomática, la humedad de suelo y el rendimiento del cultivo, obteniéndose el coeficiente de correlación de Pearson (R) y prueba T de Student.

3. Resultados y discusión

Riego aplicado

Los volúmenes de agua aplicada fueron de 3363, 2618, 1956 m³ ha⁻¹ para los tratamientos RO, RD-78 y RD-58, respectivamente, bajo riego por goteo en estación de invierno; volumen no habitual en pequeños y medianos agricultores de la región, con limitada tecnificación y capacitación en sistemas de riego presurizado. Al

respecto, Sezen et al. (2019) aplicó volúmenes de agua entre 3850 m³ ha⁻¹ y 3950 m³ ha⁻¹ con riego por goteo bajo condiciones del mediterráneo (Turquía).

Debido a que la floración es una fase sensible en el ají (Álvarez & Pino, 2018), los tratamientos con reducción del volumen de agua de riego se realizaron después de la floración para asegurar una óptima polinización. Sin embargo, a los 115 DDS hubo un corte de agua de 15 días debido a limitaciones en la disponibilidad de agua, que ocasiono un incremento de la temperatura foliar, escaldamiento, retraso de la floración y por consiguiente reducción del rendimiento con caída de frutos (Costa, Ortega, & Nuñez. 2003). En la Figura 4 se presenta el volumen de agua aplicado por tratamiento durante el desarrollo del cultivo.

Rendimiento y eficiencia de uso de agua aplicada (EUA)

Los datos sobre el rendimiento y parámetros de calidad del Capsicum, se presentan en la Figura 5. Los tratamientos de riego dieron como resultado rendimientos en fresco de [36,0, 25,4, 20,9] *baccatum*; [9,7, 13,4, 9,1] *chinense*; y [13,6, 13,6, 10,2] *annum* t ha⁻¹ para RO, RD-78 y RD-58 respectivamente, en el que, *C. baccatum*, tuvo una reducción del 30% (RD-78) y 42% (RD-58) respecto a RO; y reducción hasta de un 21% y 25% (RD-78 y RD-58) en el número de frutos. Al respecto, Kumar, Kumari, & Kumar (2016), atribuyen esta reducción, al estrés hídrico en el desarrollo y maduración de los frutos. En el caso del *C. annun*, se obtuvo un mejor rendimiento en seco con RD-78, lo que indica un ahorro de agua, mientras que a mayores dosis de agua resultarían en mayor presencia de brotes vegetativos (Valiente & Gutierrez, 2016).

El *C. baccatum* presenta mayor rendimiento en fresco y número de frutos, mientras que el *C. annun* tiene un mayor rendimiento en seco, hasta un 48% más del *C. baccatum*, por lo cual su demanda industrial podría ser mayor. En cambio, el *C. chinense* obtuvo un menor rendimiento, debido a que es una planta más arbustiva (Ávila et al., 2019). Es de mencionar que el corte de agua durante 15 días en la fase de maduración posiblemente haya afectado al rendimiento de las tres variedades de ají. Sezen, Yazar, & Eker, (2006) obtuvieron un rendimiento del pimiento morrón regado por goteo de 21 010 a 35 298 kg ha⁻¹, y para pimiento rojo, Koksai et al. (2017) obtuvieron un rendimiento medio máximo de 42,4 t ha⁻¹. Al respecto, hay una relación directa entre el rendimiento y la presencia de brotes frutales, atribuible a factores climáticos como la temperatura del aire (Kirnak et al., 2016). Se obtuvo una mejor calidad de frutos con RO y RD-78, sin diferencias significativas en la mayoría de los criterios de longitud, ancho y peso seco de frutos.

Los valores de EUA se vieron influenciados por los tratamientos de riego (Tabla 3). Los valores más altos se obtuvieron con RD-78 y RD-58 (10,20 y 4,81 kg m⁻³) para *C. baccatum* y *C. chinense* y con RO (6,36 kg m⁻³) para *C. annun*. Estos resultados indican que la EUA aumenta con

menores volúmenes de riego, sin embargo, estos bajos niveles de agua pueden afectar a la calidad de los frutos. Al respecto, Dağdelen et al. (2004) obtuvieron valores de EUA de 3,3 a 5,1 kg m⁻³ con pimiento y Dukes et al. (2003) reportaron valores de 16,0 a 52,6 kg m⁻³.

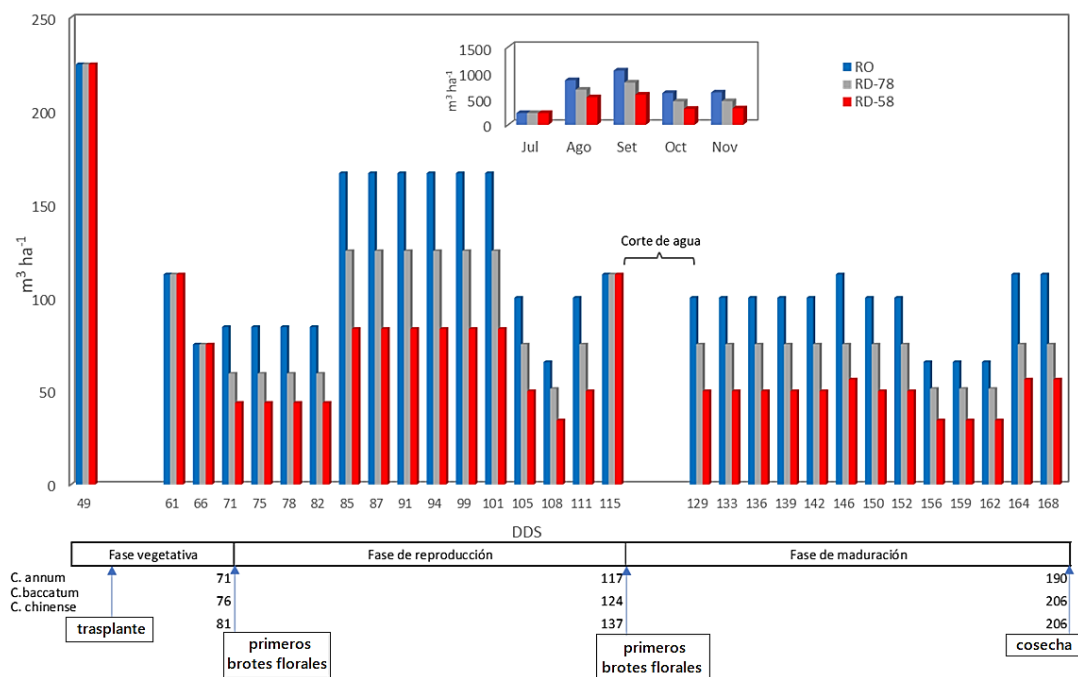


Figura 4. Volumen de agua aplicado mensual según tratamientos.

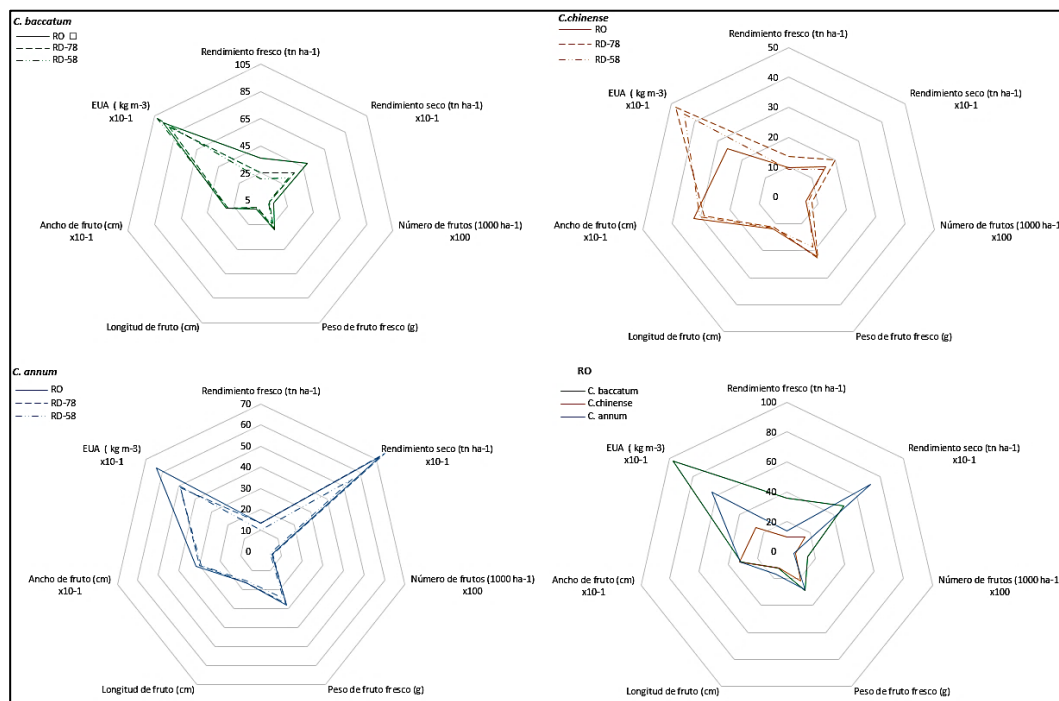


Figura 5. Rendimiento y parámetros de calidad del *Capsicum*.

Según la prueba de Tukey con alfa al 5%, los tratamientos con ahorro de agua tienen diferencia significativa para los parámetros de rendimiento y calidad del fruto en *C. baccatum* y *C. chinense* a excepción de peso de fruto fresco (g) y ancho de fruto (cm).

Tabla 3
Eficiencia de uso del agua en los tratamientos de riego

Tratamientos	Lamina (mm)	Rendimiento fresco (t ha ⁻¹)	Rendimiento seco (t ha ⁻¹)	EUA (kg m ⁻³)
<i>C. baccatum</i>				
RO	372	36,0	4,9	9,69
RD-78	279	25,4	3,7	9,11
RD-58	204	20,9	3,1	10,2
<i>C. chinense</i>				
RO	372	9,7	1,6	2,61
RD-78	279	13,4	2,0	4,81
RD-58	204	9,1	1,5	4,44
<i>C. annum</i>				
RO	372	13,6	7,2	6,36
RD-78	279	13,6	7,5	4,88
RD-58	204	10,2	5,5	4,96

Línea base con estrés y sin estrés

La línea base del cultivo con estrés y sin estrés (Tc-Ta) versus el déficit de presión de vapor (DPV) se presentan

en la **Figura 6**. Las ecuaciones del límite inferior (LI) y superior (LS), son [LI=0,0518*DPV+1,8023 y LS=0,2835*DPV+3,9903] para *C. baccatum*; [LI=-0,0775*DPV+2,3936 y LS=0,2087*DPV+4,2124] para *C. chinense*, y [LI=-0,1344*DPV+2,9381 y LS=-0,0686*DPV+6,5909] para *C. annum*; con déficit depresión de vapor en el rango de 4,0 a 6,0 kPa.

CWSI y conductancia estomática

En la **Figura 7** se muestra la relación entre la conductancia estomática y el CWSI que corresponden a mediciones en los diferentes tratamientos. Los resultados muestran que el CWSI y la conductancia estomática reflejan adecuadamente la variabilidad en el estado del agua a diferentes niveles de riego. Esto permite comprender mejor la sensibilidad del *Capsicum* al estrés hídrico. La fuerte correlación entre el CWSI y la conductancia estomática es una indicación de su potencial para determinar el momento del riego. Así, los mayores valores de conductancia estomática varían en un rango de 724 a 887 mmol s⁻¹ m⁻², que se corresponden a un rango de CWSI de 0,1 a 0,3, resultando que estos valores pueden ser indicador del inicio del riego y la optimización de la programación de riego en *Capsicum*.

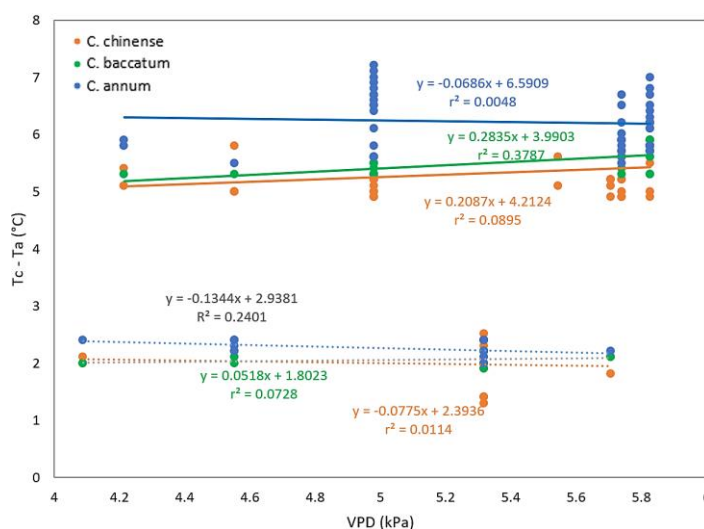


Figura 6. La línea base del cultivo con estrés y sin estrés Tcultivo-Taire respecto del Déficit de presión de vapor (DPV) para *C. baccatum*, *C. chinense* y *C. annum*.

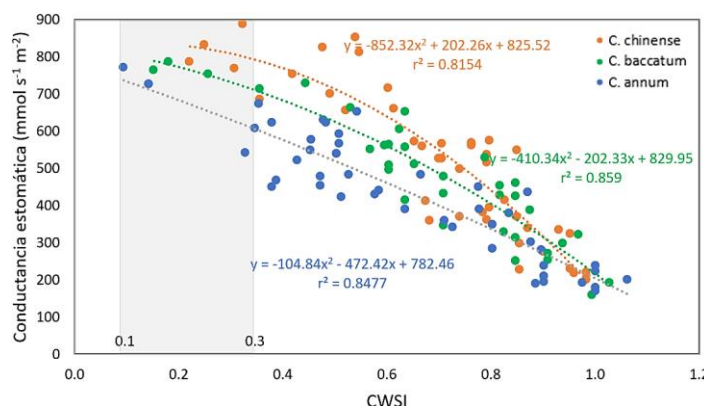


Figura 7. Relación cuadrática entre el CWSI y la conductancia estomática para *C. baccatum*, *C. chinense* y *C. annum*.

De este modo, la ecuación determinada puede integrarse en un modelo de demanda de agua, y podría usarse como un complemento de los sensores de humedad del suelo y/o métodos de evapotranspiración para la programación del riego, para mejorar la eficiencia del uso del agua de riego y, por consiguiente, ahorro de agua.

CWSI y humedad de suelo

Se obtuvieron ecuaciones lineales para relacionar el CWSI y la humedad de suelo que se observan en la **Figura 8**, en el que, para un CWSI de 0,3, le corresponde una humedad del suelo que varía en un rango del 25 al 33 %, resultan un buen indicador del momento del riego y podría emplearse para optimizar el riego y lograr un mayor ahorro de agua. Al respecto **Sezen et al. (2014)** y **Olanike & Madramootoo (2014)** indican que a medida que disminuye el agua de riego, la transpiración del cultivo disminuye, resultando en un incremento de la temperatura del cultivo y aumento del CWSI y subsecuentemente una reducción del rendimiento del cultivo como se verifica en la **Figura 9**, en que se relaciona

el rendimiento y el CWSI; obteniéndose rendimientos máximos de 30,2, 13,9 y 12,9 t ha⁻¹ con CWSI de 0,50, 0,62 y 0,54 en *C. baccatum*, *C. annum* y *C. chinense* respectivamente.

Es de mencionar que el CWSI se relacionó con la conductancia estomatica y el rendimiento de grano que se describen mejor mediante ecuaciones polinómicas de segundo orden (**Figura 7 y 9**), acorde con lo obtenido por **Bozkurt et al. (2021)**.

Entonces, el valor de CWSI sugerido para el riego óptimo en Capsicum en condiciones de clima árido es 0,30, valor cercano a lo obtenido por **Sezen et al. (2014)** con valor de 0,26 bajo riego por goteo, y 0,38 bajo riego por surco, 0,3 a 0,4 en suelo franco arenoso y arcilloso (**Olanike & Madramootoo, 2014**), y CWSI obtenidos para otros cultivos como: 0,35 en quinua (**Bozkurt et al. 2021**), 0,48 a 0,64 según fase fenológica en arroz (**Luan et al., 2021**). Es de mencionar que los valores umbrales de CWSI a usar en la programación del riego, dependen de las especies y genotipos del cultivo, así como de los métodos de riego y las condiciones ambientales.

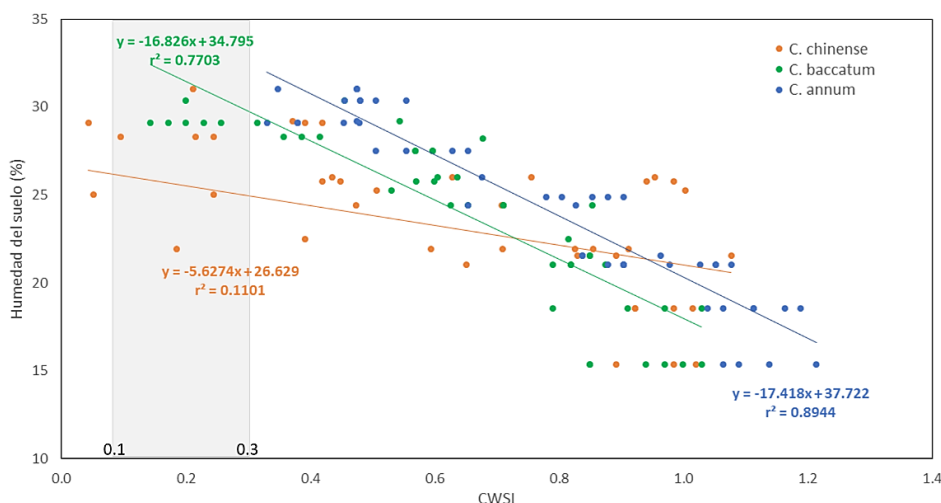


Figura 8. relación lineal entre el CWSI y la humedad del suelo para *C. baccatum*, *C. chinense* y *C. annum*.

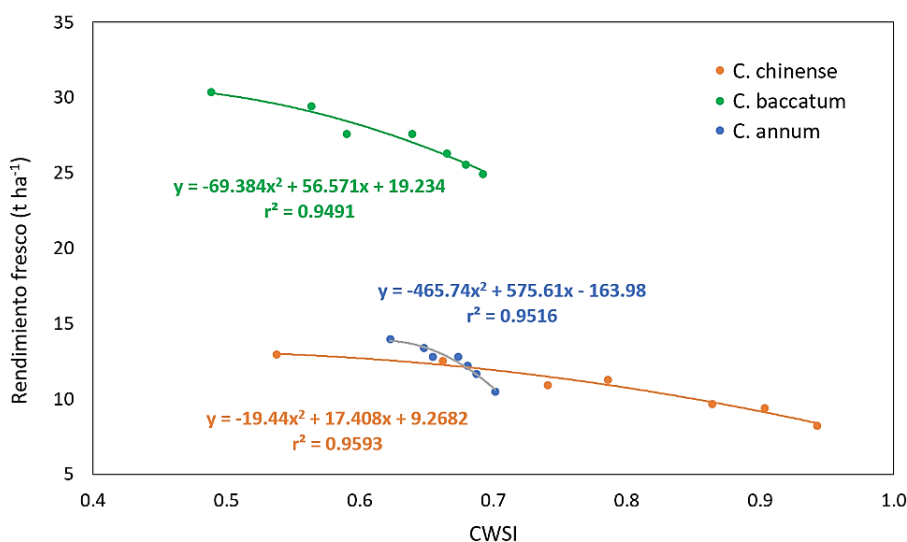


Figura 9. Relación entre el rendimiento del cultivo y el CWSI en *C. baccatum*, *C. chinense* y *C. annum*.

4. Conclusiones

A medida que disminuye el agua de riego, la transpiración del cultivo disminuye, resultando en un incremento de la temperatura foliar y aumento del CWSI, y, en consecuencia, una reducción del rendimiento del cultivo; obteniéndose rendimientos máximos de 30,2, 13,9 y 12,9 t ha⁻¹ con CWSI de 0,50, 0,62 y 0,54 en *C. bacatum* *C. annum* y *C. chinense* respectivamente. Los mayores valores de conductancia estomática varían en un rango de 724 a 887 mmol s⁻¹ m⁻², que se corresponden con un rango de CWSI de 0,1 a 0,3.

Un valor de CWSI de 0,3, que se corresponde con una humedad del suelo que varía del 25 al 33 %, resulta en un buen indicador del momento del riego que podría emplearse para optimizar la programación del riego en tres variedades de *Capsicum*, bajo las condiciones áridas de la costa norte del Perú.

Validar los resultados en campos comerciales a fin de que la predicción del rendimiento al estrés hídrico del cultivo permita desarrollar estrategias de riego para un mayor ahorro de agua, que apoyen a la toma de decisiones de los agricultores y personal de campo.

Agradecimientos

Al proyecto "Evaluación cuantitativa y cualitativa de la eficiencia de las láminas de riego en el cultivo de *Capsicum* sp. bajo riego por goteo" financiado con Convenio 195-PI-INIA-PNIA y a la estación experimental Vista Florida en Chiclayo – Perú.

ORCID

M. Duran  <https://orcid.org/0000-0001-5077-7350>
 F. L. Ramos  <https://orcid.org/0000-0003-3946-7188>
 R. Alvarado  <https://orcid.org/0000-0001-8726-5877>
 L. Altamirano  <https://orcid.org/0000-0002-7688-598X>

Referencias bibliográficas

- Álvarez, F., & Pino, M. T. (2018). Cap 3 Aspectos generales del manejo agronómico del pimiento en Chile del cultivo de pimiento. *Pimientos para la industria de alimentos e ingredientes* (pp. 41–57), Boletín INIA Chile: Editora Pino.
- Ávila, L., Condori, C., Marques, M., Azevedo, A., Sábata, J., et al. (2019). Nitrogen differentially modulates photosynthesis, carbon allocation and yield related traits in two contrasting *Capsicum chinense* cultivars. *Plant Science*, 283, 224–237.
- Bozkurt, Y., Yazar, A., Alghory, A., & Tekin, S. (2021). Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for differentially irrigated quinoa with surface and subsurface drip systems. *Irrigation Science*, 39(1), 81–100.
- Costa, J., Ortega, R., & Nuñez, F. (2003). El Cultivo de pimientos, chiles y ajíes. Ediciones Mundi-Prensa.
- Dağdelen, N., Yılmaz, E., Sezgin, F., & Gurbuz, T. (2004). Effects of water stress at different growth stages on processing pepper (*Capsicum Annum* Cv. Kapija) yield water use and quality characteristics. *Pak. J. Biol. Sci.* 7, 2167–2172.
- Dukes, M. D., Simonne, E. H., Davis, W. E., Studstill, D. W., & Hochmuth, R. (2003). Effect of sensor-based high frequency irrigation on bell pepper yield and water use. Water for sustainable world-limited supplies and expanding demand.

Proceedings of the Second International Conference on Irrigation and Drainage, Phoenix, 665–675.

- FAO. (2021). Crops. www.fao.org/faostat/en/#data/QC (Fecha de acceso: 29 de marzo del 2021).
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the Stress-Degree-Day Parameter for Environmental Variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45–55.
- Kirnak, H., Zeki, G., Hüseyin, D., Süleyman, K., & Ersoy, Y. (2016). Paprika Pepper Yield and Quality as affected by different irrigation levels. *Journal of Agricultural Sciences*, 22(1), 77–88.
- Koksal, E. S., Tasan, M., Artik, C., & Gowda, P. (2017). Evaluation of financial efficiency of drip-irrigation of red pepper based on evapotranspiration calculated using an iterative soil water-budget approach. *Sci. Hortic.* 226, 398–405.
- Kumar, R., Kumari, P., & Kumar, S. (2016). Effect of irrigation levels and frequencies on yield, quality and water use efficiency of capsicum grown under protected conditions. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, 7(6), 1290–1296.
- Luan, Y., Xu, H., Lv, Y., Liu, X., Wang, H., & Liu, S. (2021). Improving the performance in crop water deficit diagnosis with canopy temperature spatial distribution information measured by thermal imaging. *Agricultural Water Management*, 246, 106699.
- Messina, G., & Modica, G. (2020). Applications of UAV Thermal Imagery in Precision Agriculture: State of the Art and Future Research Outlook. *Remote Sens*, 12, 1–26.
- Nhamo, L., Magidi, J., Nyamugama, A., Clulow, A., Sibanda, et al. (2020). Prospects of Improving Agricultural and Water Productivity through Unmanned Aerial Vehicles. *Agriculture*, 10(256), 2–18.
- Olanike, A., & Madramootoo, Ch. (2014). Response of Greenhouse-Grown Bell Pepper (*Capsicum Annum* L.) to Variable Irrigation. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(2), 303–10.
- Orarat, M. (2019). *Capsicum: Breeding Strategies for Anthracnose Resistance*. by Taylor & Francis Group, LLC. ISBN 9781138589230.
- Parisi, M., Alioto, D., & Tripodi, P. (2020). Overview of Biotic Stresses in Pepper (*Capsicum* spp.): Sources of Genetic Resistance, Molecular Breeding and Genomics. *Int. J. Mol. Sci.*, 21, 2587.
- Parkash, V., & Singh, S. (2020). A Review on Potential Plant-Based Water Stress Indicators for Vegetable Crops. *Sustainability*, 12(10), 3945.
- Sezen, M., Yazar, A., Daşgan, Y., Yucel, S., Akyildiz, A., et al. (2014). Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for Red Pepper with Drip and Furrow Irrigation under Varying Irrigation Regimes. *Agricultural Water Management*, 143, 59–70.
- Sezen, S., Yazara, A., & Tekin, S. (2019). Physiological response of red pepper to different irrigation regimes under drip irrigation in the Mediterranean region of Turkey. *Scientia Horticulturae*, 245, 280–288.
- Sezen, S. M., Yazar, A., & Eker, S. (2006). Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper. *Agric. Water Manage.* 81(1–2), 115–131.
- Valiente, B. J., & Gutierrez, O. A. (2016). Effect of irrigation frequency and shade levels on vegetative growth, yield, and fruit quality of piquin pepper (*Capsicum annum* L. var. glabriusculum). *Hort Science*, 51(5), 573–79.
- Vuille, M., & Bradley, R. S. (2000). Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters*, 27(23), 3885–3888.