

Evaluación del estrés hídrico del cultivo de fresa bajo clima húmedo

Guillermo Jesuita Pérez-Marroquín¹

Edgar Platas-Galindo¹

José Clemente Cruz-Pérez^{2,§}

Raúl Berdeja-Arbeu¹

Fabián Enríquez-García¹

Pablo Zaldívar-Martínez¹

1 Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias-Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México.

2 Postgrado de Socioeconomía Estadística e Informática-Desarrollo Rural-Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco. Estado de México, México. CP. 56264.

Autor para correspondencia: cruz.clemente@colpos.mx.

Resumen

La fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) es un cultivo de alto valor comercial cuya productividad depende de un manejo eficiente del riego, dado su carácter sensible al déficit hídrico. En regiones húmedas, la elevada humedad relativa reduce la demanda evaporativa y limita la eficacia de indicadores basados en temperatura foliar, como el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI). El objetivo de esta investigación fue evaluar la utilidad del índice de estrés hídrico del cultivo, como criterio para el manejo del riego en fresa bajo condiciones de clima húmedo. El estudio se realizó en 2022 en un invernadero de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos de reposición de la evapotranspiración del cultivo (ETc): 70, 80, 90 y 100% ETc. Se monitoreó el potencial hídrico foliar (Ψ_h), el CWSI, el rendimiento y la calidad del fruto (sólidos solubles totales, SST). Los valores de CWSI se mantuvieron bajos y homogéneos (0.3-0.55), sin diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$). Los tratamientos de 80 y 90% ETc alcanzaron rendimientos similares al 100% ETc, aunque con menor contenido de SST. El CWSI mostró limitaciones como único indicador de riego bajo alta humedad, debido a la baja demanda evaporativa. Se concluye que el riego deficitario al 80-90% de la ETc es una estrategia viable para optimizar el agua sin comprometer significativamente el rendimiento, aunque se requiere complementar el CWSI con otros indicadores fisiológicos para mejorar la precisión del manejo hídrico.

Palabras clave:

calidad de fruto, eficiencia hídrica, *Fragaria x ananassa*, humedad relativa, índice de estrés hídrico, riego deficitario. *Rubus fruticosus* var. Tupi.

Introducción

La escasez de agua dulce para uso agrícola es uno de los desafíos ambientales, económicos y sociales más críticos del siglo XXI. Se estima que la agricultura consume aproximadamente el 70% del agua dulce disponible en el planeta, por lo que su uso racional y eficiente se ha vuelto prioritario ante el incremento de la demanda alimentaria y la creciente variabilidad climática (FAO, 2021). Este escenario exige la adopción de tecnologías y estrategias que mejoren la eficiencia en el uso del agua en cultivos de alta sensibilidad hídrica.

La fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) es un cultivo hortalfrutícola de alto valor comercial y nutricional ampliamente cultivado en regiones templadas y tropicales. Sin embargo, su sistema radical superficial y su alta demanda hídrica la hacen especialmente vulnerable a condiciones de estrés hídrico, lo que puede afectar negativamente su desarrollo fenológico, rendimiento y calidad del fruto (Pires *et al.*, 2006; Gutiérrez-Colín *et al.*, 2017). Diversos estudios han demostrado que el manejo inadecuado del riego en fresa puede conducir tanto a disminuir la productividad como a uso ineficiente del recurso hídrico (Baronti *et al.*, 2019).

En este contexto, el riego por goteo se ha posicionado como una de las técnicas más eficaces para optimizar el uso del agua en sistemas agrícolas, ya que permite mantener una humedad constante en la zona radicular, reducir pérdidas por evaporación y aplicar agua de forma precisa (Liotta *et al.*, 2015). No obstante, la limitación persistente es la determinación del momento oportuno para la aplicación del riego, especialmente en regiones húmedas donde la evapotranspiración potencial es baja y los indicadores tradicionales de estrés pueden resultar poco sensibles (Ferreira *et al.*, 2002).

Con la finalidad de resolver este problema, se han desarrollado herramientas de monitoreo del estado hídrico de las plantas. Una de las más reconocidas es el índice de estrés hídrico del cultivo (crop water stress index, CWSI), propuesto por Jackson *et al.* (1981). Este índice estima el grado de estrés hídrico mediante la comparación entre la temperatura del dosel del cultivo, la temperatura ambiental y el déficit de presión de vapor. Su principal ventaja es que integra información ambiental y fisiológica, permitiendo un diagnóstico dinámico del estado hídrico de la planta (Jones, 2004). El CWSI ha sido validado en distintos cultivos como vid (Ferreira *et al.*, 2002), manzano, durazno (Giuliani *et al.*, 2001) y recientemente en fresa bajo condiciones semiáridas (López *et al.*, 2009).

Sin embargo, su aplicabilidad en climas húmedos sigue siendo limitada, ya que la humedad relativa alta del aire puede reducir la transpiración de la planta sin que exista una limitación real en la disponibilidad de agua en el suelo (Idso *et al.*, 1982). En consecuencia, los valores del CWSI podrían subestimar el estrés hídrico, afectando la precisión en la programación del riego. A partir de lo anterior, se plantea como hipótesis que, en condiciones de clima húmedo, el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) no refleja de forma precisa las diferencias entre tratamientos de riego y por lo tanto, su utilidad como indicador del momento de riego es limitada. Sin embargo, también se considera que un riego deficitario controlado podría mantener un rendimiento aceptable en el cultivo de fresa, con menor consumo de agua.

En este sentido, el objetivo general de este estudio fue evaluar el comportamiento del CWSI y su utilidad como criterio técnico para la toma de decisiones en el manejo del riego en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) bajo condiciones de clima húmedo en Teziutlán, Puebla. De manera específica se desarrolló un análisis de la respuesta fisiológica y productiva del cultivo bajo distintos niveles de riego y se determinó la sensibilidad del CWSI frente a variaciones en la lámina de riego con la finalidad de identificar las implicaciones agronómicas del uso del CWSI en regiones con alta humedad relativa.

Materiales y métodos

Descripción del sitio experimental

El estudio se llevó a cabo en un invernadero tipo túnel de 210 m², localizado en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

(BUAP), en San Juan Acateno, municipio de Teziutlán, Puebla, México. La ubicación geográfica corresponde a los 19° 52' 30" latitud norte y 97° 21' 34" longitud oeste, a una altitud de 1 938 m. El manejo agronómico (fertilización, control de plagas y enfermedades) se mantuvo conforme a las prácticas estándar del sistema de producción, evitando intervenciones diferenciales no asociadas a los tratamientos de riego. Todas las mediciones se efectuaron en condiciones ambientales habituales del sitio. La región se caracteriza por un clima templado húmedo con lluvias en verano, clasificación C(w2) según García (2004), con una temperatura media anual de 15 °C y precipitación promedio de 1 609 mm, condiciones que favorecen el desarrollo del cultivo de fresa, aunque también representan un desafío para el monitoreo del estrés hídrico debido a la alta humedad relativa.

Material vegetal y preparación del cultivo

Se utilizó como material vegetal el cv. de fresa Monterrey (*Fragaria x ananassa* Duch.), seleccionada por su adaptación a climas templados y su alto rendimiento comercial (Gutiérrez-Colín *et al.*, 2017). Las plantas fueron trasplantadas en camas de cultivo de 60 cm de ancho por 14 m de largo, cubiertas con acolchado plástico negro para conservar la humedad, reducir el crecimiento de malezas y mejorar la temperatura del suelo. El distanciamiento entre plantas fue de 30 cm y entre hileras de 40 cm.

Sistema de riego y tratamientos

El sistema de riego utilizado fue por goteo, con emisores autocompensados (Netafim™) instalados a razón de un gotero por planta, con un caudal de 2 L h⁻¹. El suministro de agua fue controlado manualmente mediante válvulas de paso, lo que permitió aplicar tratamientos diferenciados de riego. Este sistema se seleccionó por su eficiencia en el uso del agua y su capacidad para mantener un nivel de humedad constante en la zona radicular, aspecto fundamental para estudios de estrés hídrico (Liotto *et al.*, 2015). El diseño experimental fue completamente al azar con cuatro tratamientos de riego basados en la lámina de evapotranspiración de cultivo (ET_c), estimada mediante el coeficiente del cultivo y la evapotranspiración de referencia (ET_o) con base en datos meteorológicos locales. Los tratamientos cuatro niveles (T1-T4) y cuatro repeticiones (R1-R4) fueron: riego al 100% de la ET_c, riego al 90% de la ET_c, riego al 80% de la ET_c, y riego al 70% de la ET_c.

Cada repetición consistió en un conjunto homogéneo de plantas asignadas al mismo tratamiento, y en cada fecha se registraron las variables de temperatura del dosel (T_c, °C), temperatura del aire (T_a, °C) y humedad relativa (HR, %), además del déficit de presión de vapor (DPV, kPa) y derivados. El diseño permite contrastar el efecto del tratamiento sobre indicadores basados en la planta (Jones, 2004) con control por repetición y fecha. La temperatura del dosel (T_c) se obtuvo por termometría infrarroja puntual (banda térmica de onda larga), conforme a los principios de intercambio de energía y su relación con la transpiración (Jackson *et al.*, 1981; Monteith y Unsworth, 2013). La temperatura del aire (T_a) y la humedad relativa (HR) se registraron con sensores ambientales co-ubicados. A partir de T_a y HR se verificó/derivó el DPV (kPa) mediante la formulación psicrométrica estándar:

$$e_s(T_a) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_a}{T_a + 237.3}\right) \left(kPa\right), e_a = \frac{HR}{100} e_s, DPV = e_s - e_a$$

Donde: T_a = está en °C (Monteith y Unsworth, 2013). El diferencial térmico se calculó como ΔT = T_c - T_a. Se integró una base por registro con los campos: fecha, tratamiento, repetición (°C) y DPV (kPa). Se excluyeron registros sin alguno de los campos esenciales y se revisaron valores evidentemente espurios en T_c, T_a, HR y DPV. Para minimizar la influencia de atípicos en la calibración de líneas base, se adoptó una estrategia basada en cuantiles (Rousseeuw y Hubert, 2011; Wilcox, 2012).

Cálculo del CWSI y mediciones fisiológicas

El crop water stress index (CWSI) se definió en el marco Idso-Jackson como la normalización del diferencial térmico respecto a líneas base que representan los estados límite bien regado (lower limit, ll) y altamente estresado (upper limit, ul), dependientes del DPV (Jackson *et al.*, 1981; Jones, 2004):

$$CWSI = \frac{\Delta T - ll_{(DPV)}}{ul_{(DPV)} - ll_{(DPV)}}, 0 \leq CWSI \leq 1$$

Para estimar ll (DPV) y ul (DPV), se procedió así: el rango observado de DPV se particionó en 10 intervalos aproximadamente equidistantes; en cada bin, se seleccionaron los registros ubicados en el cuantil 0.2 de ΔT (proxy de 'bien regado') y en el cuantil 0.8 (proxy de 'estresado'), siguiendo la lógica de extremos fisiológicos (Katimbo *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022; Mertens *et al.*, 2023), con los puntos seleccionados se ajustaron rectas $\Delta T = a + b(DPV)$ para ll y ul (regresión ordinaria), lo que provee funciones lineales de DPV para cada límite (Jackson *et al.*, 1981; Jones, 2004). Para cada registro (ΔT , DPV), el CWSI se calculó con la expresión anterior y se acotó a [0,1] para preservar la interpretación física. Esto con la finalidad de mitigar el sesgo por mediciones atípicas y variaciones operativas, alineado con las recomendaciones recientes sobre sensibilidad del CWSI a los esquemas de cómputo (Katimbo *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022; Mertens *et al.*, 2023).

La calibración de las líneas base del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) se realizó a partir de la relación entre la diferencia de temperatura del dosel y el aire ($\Delta T = T_c - T_a$) con el déficit de presión de vapor (DPV). Para ello, la temperatura del follaje (T_c) se obtuvo mediante un termómetro infrarrojo portátil FLUKE 62 MAX+, dirigido a la superficie adaxial de las hojas completamente expandidas, evitando incidencia directa de radiación solar reflejada. La temperatura del aire (T_a) y la humedad relativa se registraron simultáneamente con sensores ambientales colocados a nivel del dosel, con lo cual se calculó el DPV. Con estos datos se construyeron las líneas base: la inferior (ΔT_{ll}), que representa el estado de plantas bien regadas, y la superior (ΔT_{ul}), correspondiente al estrés máximo. Estas referencias permitieron recalcular el CWSI para cada tratamiento y fecha de muestreo. Las mediciones se realizaron durante el mediodía solar entre las 12:00 y 14:00 h, cuando la radiación y la actividad estomática alcanzan sus niveles máximos (Jones, 2004).

Variables evaluadas

Se evaluaron variables morfológicas y de calidad del fruto a los 45 días después del trasplante, entre ellas: número de flores abiertas por planta, número de frutos amarrados y cosechados por planta, diámetro polar y ecuatorial de los frutos, medido con vernier digital (Truper™ de precisión 0.01 mm), y el contenido de sólidos solubles totales (SST) en grados Brix, medido con refractómetro digital (Atago PAL-1). Las evaluaciones se realizaron en tres momentos clave del ciclo productivo (inicio de floración, máxima fructificación y etapa final de cosecha), seleccionados para capturar la dinámica fisiológica bajo diferentes niveles de disponibilidad hídrica.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados mediante un análisis de varianza (Anova) de una vía bajo un diseño completamente al azar, con el fin de determinar diferencias significativas entre los cuatro tratamientos de riego (100, 90, 80 y 70% de la ETc). Para el procesamiento de la información se utilizó el programa estadístico Statistical Analysis System (SAS®), versión 9.4 para Windows. La significancia se evaluó con un nivel de confianza del 95% ($p \leq 0.05$), y cuando se detectaron diferencias se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey para identificar contrastes entre tratamientos.

Resultados y discusión

El conjunto experimental integró 752 registros de combinaciones fecha x tratamiento x repetición, con valores completos para las variables temperatura del aire (T_a), humedad relativa (HR), déficit de presión de vapor (DPV) y temperatura del dosel (T_c). A partir de estas mediciones se derivó el diferencial térmico $\Delta T = T_c - T_a$ y se recalculó el CWSI con las líneas base ajustadas. La ausencia de valores extremos fuera de los rangos fisiológicamente plausibles respalda la consistencia y calidad del muestreo, en concordancia con lo recomendado para estudios de monitoreo por temperatura de dosel (González-Dugo *et al.*, 2006; Jones, 2004).

Durante el ciclo de evaluación, la humedad relativa (HR) promedio fue del 78%, con valores mínimos de 65% y máximos de 92%, lo que confirma el carácter de clima húmedo del sitio experimental. Estas condiciones explican la baja expresión del estrés hídrico en las plantas, ya que una atmósfera saturada limita la demanda evaporativa, reduciendo el déficit de presión de vapor (DPV) y en consecuencia, la sensibilidad del CWSI para detectar diferencias entre tratamientos (Idso *et al.*, 1982; López *et al.*, 2009).

En cuanto al número de flores por planta, se observaron diferencias estadísticamente significativas con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) únicamente en la primera fecha de evaluación (02/05/2022, equivalente a 45 días después del trasplante), donde el tratamiento al 100% de la ETc alcanzó el mayor promedio (2.75 flores por planta). En las fechas posteriores, las diferencias dejaron de ser significativas, con valores convergentes entre tratamientos (Cuadro 1). Esto sugiere que, bajo condiciones húmedas, la respuesta floral temprana puede verse influida por la disponibilidad plena de agua, pero conforme avanza el ciclo, la HR elevada atenúa los contrastes en el estado hídrico entre plantas.

Cuadro 1. Comparación de medias del número de flores en distintas fechas.

Porcentaje de la ETc	02/05/22	09/05/22	16/05/22	23/05/22	30/05/22
100	2.75 a	1.25 a	1.25 a	0.75 a	0 a
90	2 ab	2 a	1.75 a	1.25 a	0 a
80	2.25 ab	3 a	2 a	0.5 a	0.75 a
70	1 b	1.75 a	0 a	0.5 a	0 a
CV (%)	38.52	53.03	96.60	90.26	235.31

Valores con la misma letra dentro columnas, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $p \leq 0.05$.

Respecto al número de frutos por planta (Cuadro 2), se registraron diferencias estadísticas en la tercera fecha (16/05/22, 59 días después del trasplante). El tratamiento al 80% presentó el mayor promedio (8.25 frutos por planta), sin diferenciarse del 100%. Este hallazgo confirma que un riego deficitario controlado no reduce el rendimiento inmediato e incluso puede favorecer la productividad bajo condiciones específicas, como lo reportan Ferreyra *et al.* (2002); Pires *et al.* (2006).

Cuadro 2. Número de frutos de fresa por planta, en diferentes fechas.

Porcentaje de la ETc	02/05/22	09/05/22	16/05/22	23/05/22	30/05/22
100	6 a	8.25 a	7.25 ab	6.5 a	2.5 a
90	3.25 a	5.5 a	5.25 ab	5.25 a	5.25 a
80	7 a	9.75 a	8.25 a	8.5 a	7 a
70	4.75 a	4.75 a	3.25 b	3.25 a	2.25 a
CV (%)	63.53	51.9	32.98	51.88	60.94

Valores con la misma letra dentro columnas, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $p \leq 0.05$.

En cuanto a la calidad del fruto, el diámetro polar (DP) no mostró diferencias significativas entre tratamientos, con valores de 26.25 a 29.9 mm. Sin embargo, el diámetro ecuatorial (DE) sí presentó diferencias, siendo mayor en el 90% de la ETc (27.66 mm) respecto al 100% (21.62 mm). Esto

indica que el déficit hídrico moderado no redujo el crecimiento lateral y en ciertos casos, pudo favorecer la partición de carbohidratos hacia el fruto. Es importante precisar, que la herramienta estadística únicamente demuestra diferencias entre tratamientos y no señala una relación causal (Cuadro 3).

Cuadro 3. Calidad del fruto al tercer corte.

Porcentaje de la ETc	Diámetro polar (mm)	Diámetro ecuatorial (mm)	SST (°Brix)
100	28 a	21.62 b	15.43 a
90	29.83 a	27.66 a	8.55 b
80	29.9 a	23.9 ab	10.13 b
70	26.25 a	25.62 ab	9.18 b
CV (%)	13.14	5.46	4.85

Valores con la misma letra dentro columnas, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $p \leq 0.05$. SST= sólidos solubles totales.

Además, podemos observar que existen diferencias significativas entre el tratamiento al 90% y el tratamiento al 100%, mientras que el 80% y 70% son intermedios (ab). Esto indica que el tratamiento al 90% permitió un mayor engrosamiento lateral del fruto, posiblemente porque la planta no estuvo en estrés severo y asignó eficientemente carbohidratos al fruto. Los frutos de plantas con 100% de la ETc mostraron el mayor contenido de azúcares (15.43 °Brix). Este resultado coincide con lo reportado por Baronti *et al.* (2019), quienes destacaron que el riego pleno mejora la calidad sensorial del fruto, aunque a expensas de una menor eficiencia hídrica.

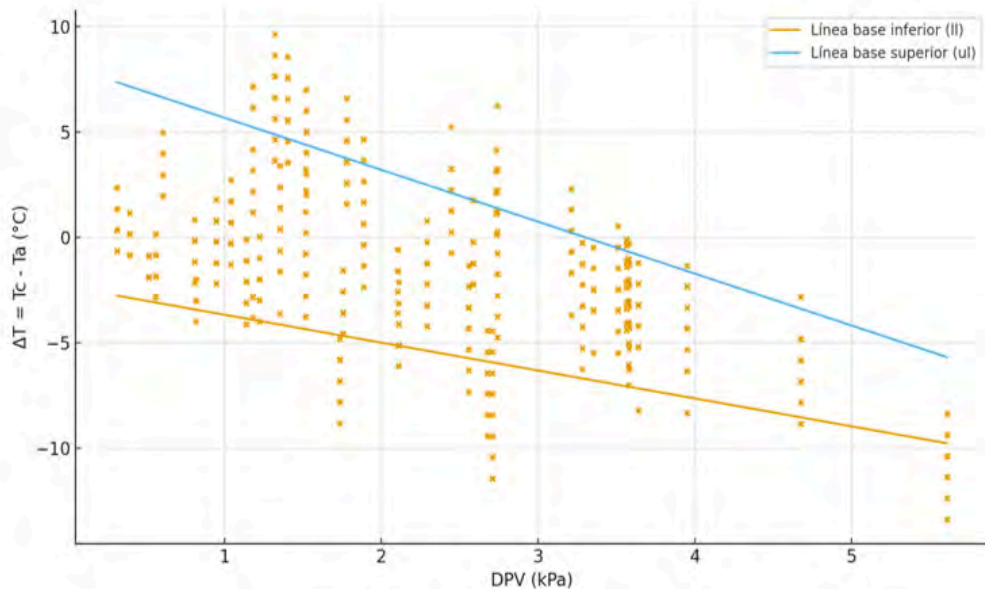
Para los tratamientos al 80 y 90% se registraron los valores más altos de DP y DE, pero con registros bajos de SST, por lo que se considera que en estas condiciones la planta favorezca el crecimiento volumétrico del fruto, pero al estar cerca de su umbral de estrés leve, haya una menor acumulación de azúcares. En general, los SST en los tratamientos menores al 100% de la ETc presentan menor contenido de azúcares, lo que se atribuye al estrés hídrico moderado que repercute en el metabolismo de producción y transporte de azúcares. El riego al 80-90% de la ETc permite mantener el tamaño del fruto sin afectar severamente su forma. Sin embargo, solo el riego al 100% garantiza una calidad óptima en términos de dulzor. El observar los coeficientes de variación (CV) más bajo en las variables SST (4.85%) indica una alta consistencia en esta variable, lo que evidencia la relación de a mayor uso de agua mayor dulzor del fruto.

Análisis del CWSI

El análisis de dispersión evidenció la relación inversa entre ΔT y DPV (Figura 1), coherente con la teoría del balance de energía: a mayor demanda evaporativa, el dosel transpira más y modera el aumento térmico, generando diferenciales reducidos (Jackson *et al.*, 1981). La calibración robusta de líneas base mediante cuantiles confirmó esta tendencia: línea base inferior (li): intercepto= -2.35, pendiente= -1.33. Línea base superior (ul): intercepto= 8.14, pendiente= -2.47.



Figura 1. Análisis de dispersión del diferencial térmico (ΔT) y déficit de presión de vapor DPV.



Estas rectas delimitan adecuadamente la nube de puntos y coinciden con valores reportados en otros cultivos de alto valor comercial bajo riego deficitario controlado (Katimbo *et al.*, 2022; Mertens *et al.*, 2023). El procedimiento adoptado reduce la sensibilidad del CWSI a valores atípicos y constituye una mejora metodológica frente a la estimación tradicional basada en mínimos y máximos absolutos.

La serie temporal del CWSI promedio por tratamiento mostró estabilidad a lo largo del periodo de muestreo. Los valores oscilaron entre 0.3 y 0.55, lo que indica un rango de estrés hídrico leve a moderado. Ningún tratamiento se posicionó de manera sistemática en los extremos de la escala (cercano a 0 o a 1), lo que sugiere que, bajo las condiciones de manejo, los niveles de riego no generaron contrastes marcados en el estado hídrico de las plantas. Esta convergencia puede atribuirse a la capacidad amortiguadora del sistema radicular de la fresa y a la duración corta del periodo de observación.

El análisis estadístico (Anova de una vía) no detectó diferencias significativas entre tratamientos ($F=0.8$; gl entre= 3; gl dentro= 700; $p=0.497$). La interpretación en términos agronómicos, el rango de láminas o estrategias de riego aplicadas no fue suficiente para inducir contrastes detectables en el índice. En términos metodológicos, el CWSI recalculado exhibe consistencia interna, pero su poder discriminativo depende críticamente de la magnitud del gradiente de disponibilidad hídrica generado experimentalmente (Liu *et al.*, 2022). Aunque este resultado puede parecer limitante, en realidad refuerza la recomendación de que el CWSI debe utilizarse en conjunción con un diseño experimental que garantice diferencias hídricas contrastantes y preferentemente, incluir análisis por bloques o modelos mixtos que integren variabilidad temporal.

Los valores intermedios del CWSI (0.3-0.55) reflejan una condición de estrés hídrico parcial compatible con la estrategia de riego deficitario moderado, aplicada comúnmente para mejorar la eficiencia en el uso del agua sin comprometer de manera crítica la producción (Jones, 2004). En fresa, este nivel de estrés puede inducir respuestas compensatorias a nivel estomático y osmótico, modulando la eficiencia fotosintética sin deteriorar el crecimiento vegetativo. No obstante, se recomienda profundizar en la asociación entre CWSI y variables productivas (rendimiento, biomasa, calidad de fruto), lo que fortalecería la validación práctica del índice en este cultivo.

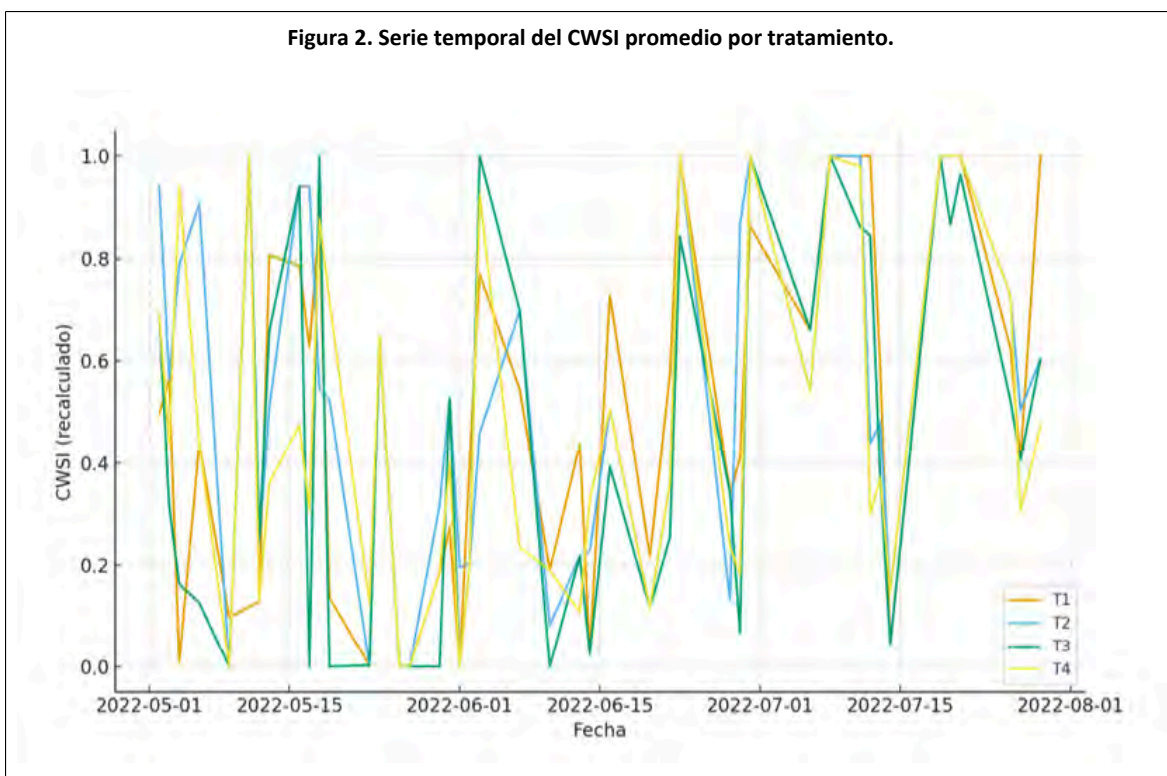
Los resultados concuerdan con los hallazgos de López *et al.* (2009), quienes reportaron que el CWSI tiende a subestimar el estrés hídrico en ambientes húmedos debido a la reducción en el déficit de presión de vapor, lo que disminuye la sensibilidad del indicador. Asimismo, Giuliani *et al.* (2001) observaron que el uso de termometría infrarroja como herramienta para detectar déficit hídrico puede no ser eficaz en condiciones templadas o húmedas, donde la evaporación es limitada.

En términos de causa-efecto, los datos obtenidos muestran que la alta humedad relativa ambiental actúa como un factor modulador que disminuye la expresión fisiológica del estrés hídrico en la planta, incluso cuando existe reducción en la lámina de riego. Esto explica por qué variables como el número de flores o el CWSI no mostraron una respuesta clara a los tratamientos aplicados. Sin embargo, el número de frutos y el SST sí evidenciaron diferencias, lo que indica que estas variables son más sensibles a cambios en la disponibilidad hídrica, incluso bajo condiciones climáticas húmedas. La coincidencia entre el tratamiento al 80% y un rendimiento igual o superior al tratamiento al 100% también fue reportada por Ferreyra *et al.* (2002), quienes destacaron que un riego deficitario controlado puede inducir respuestas adaptativas favorables, como una mayor eficiencia en el uso del agua. No obstante, la disminución en SST observada en tratamientos deficitarios indica que existe un compromiso entre rendimiento y calidad que debe ser considerado al diseñar estrategias de riego.

Dado que el CWSI no reflejó de manera consistente las diferencias en disponibilidad hídrica entre tratamientos, se concluye que su aplicación en climas húmedos debe estar acompañada de otros métodos complementarios, como sensores de humedad del suelo o medición del potencial hídrico foliar, tal como recomiendan Parkash y Singh (2020). En resumen, el análisis estadístico reveló que no hubo diferencias significativas en la mayoría de las variables entre tratamientos, lo cual se atribuye a la alta humedad relativa del ambiente que evitó condiciones de estrés hídrico. El comportamiento del CWSI se mantuvo cercano a cero durante la mayor parte del ciclo, indicando ausencia de estrés. Solo en dos fechas se observaron valores que indicaban moderado estrés. Esto contrasta con estudios realizados en climas semiáridos donde el CWSI ha mostrado mayor sensibilidad. Los resultados sugieren que, en ambientes húmedos, el uso del CWSI como herramienta de manejo del riego debe ser complementado con otros indicadores. La temperatura del dosel se mantuvo cercana a la temperatura ambiental durante la mayor parte del ciclo, lo que resultó en valores bajos de CWSI (0.3-0.55) sin diferencias significativas entre tratamientos (Figura 2).



Figura 2. Serie temporal del CWSI promedio por tratamiento.



Solo en dos fechas 16 05 22 y 23 05 22, se observaron incrementos moderados en el índice, que coincidieron con mediciones realizadas al mediodía, cuando la radiación y la temperatura alcanzaron sus picos. La posterior disminución se atribuye a la elevada humedad relativa, que redujo la demanda evaporativa del ambiente. Este comportamiento es consistente con lo documentado por Giuliani *et al.* (2001) y Jones (2004), quienes destacan la limitada utilidad del CWSI en climas húmedos debido a su dependencia del DPV.

El análisis de varianza confirmó la ausencia de diferencias significativas en el CWSI recalculado entre tratamientos ($F=0.8$; $p=0.497$), lo que refuerza la conclusión de que el índice no discriminó entre los niveles de riego bajo las condiciones experimentales. Estos resultados contrastan con estudios en ambientes semiáridos, donde el CWSI ha mostrado alta sensibilidad (Katimbo *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022). En conjunto, los resultados evidencian que la elevada HR del sitio experimental actuó como un modulador que redujo la expresión fisiológica del estrés hídrico, incluso en plantas con riego deficitario. Variables como el número de frutos y los SST fueron más sensibles a cambios en la disponibilidad de agua que el propio CWSI, lo cual coincide con la revisión de Parkash y Singh (2020) sobre indicadores de estrés hídrico en cultivos hortícolas.

El rendimiento comparable entre el 80% y el 100% de la ETc sugiere que es posible optimizar el uso de agua mediante riego deficitario controlado, aunque con un sacrificio parcial de la calidad en términos de dulzor. Desde la perspectiva metodológica, se confirma que el CWSI debe ser complementado con otros indicadores fisiológicos o de humedad del suelo cuando se aplica en climas húmedos (González-Dugo *et al.*, 2006; Rousseeuw y Hubert, 2011).

Conclusiones

El índice de estrés hídrico (CWSI) recalculado presentó valores bajos y homogéneos entre tratamientos (0.3-0.55), lo que se explica por la elevada humedad relativa del ambiente, que redujo la demanda evaporativa y limitó la capacidad del índice para discriminar diferencias de riego. Bajo estas condiciones, el CWSI se confirma como un indicador coherente con la teoría, pero de sensibilidad restringida en climas húmedos, por lo que su aplicación práctica debe considerarse complementaria a otras variables fisiológicas y productivas.

En términos productivos, los tratamientos con 80 y 90% de la ETc mantuvieron un rendimiento comparable al 100%, evidenciando que el riego deficitario moderado es viable para optimizar el uso del agua en fresa. No obstante, se observó un compromiso entre productividad y calidad: mientras que los frutos de riego pleno presentaron mayor dulzor (SST), los tratamientos deficitarios produjeron frutos de mayor tamaño con menor concentración de azúcares. En conjunto, se recomienda la aplicación de riegos entre 80 y 90% de la ETc como estrategia de manejo eficiente en ambientes húmedos, con la consideración de ajustar la decisión final según los objetivos de mercado (rendimiento vs calidad).

Bibliografía

- 1 Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. and Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma. FAO. Estudio FAO Riego y Drenaje. 56(1):298. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>.
- 2 Ballester, C.; Castel, J.; Intrigliolo, D. S. and Castel, J. R. 2013. Response of navalina citrus trees to deficit irrigation during pit hardening: yield components, fruit quality, and economic returns. *Agricultural Water Management*. 126(1):60-69.
- 3 Bernal-Cabrera, A.; Hernández-Acosta, E.; Niño-Medina, G.; Tivo-Fernández, Y. y Salas-Pérez, L. 2024. Caracterización morfológica y fisicoquímica de la pitaya (*Stenocereus pruinosus* (Otto) Buxb.) en la mixteca baja oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 15(1):1-12. Doi: 10.29312/remexca.v15i1.3533.
- 4 Berni, J. A. J.; Zarco-Tejada, P. J.; Sepulcre-Cantó, G.; Fereres, E. and Villalobos, F. J. 2009. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*. 113(11):2380-2388.
- 5 Cohen, Y.; Alchanatis, V.; Meron, M.; Saranga, Y. and Tsipris, J. 2005. Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *Journal of Experimental Botany*. 56(417):1843-1852.
- 6 Costa, J. M.; Ortuño, M. F. and Chaves, M. M. 2007. Deficit irrigation as a strategy to save water: physiology and potential application to horticulture. *Journal of Integrative Plant Biology*. 49(10):1421-1434.
- 7 Fereres, E. and Soriano, M. A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*. 58(2):147-159.
- 8 García-Tejero, I.; Jiménez-Bocanegra, J. A.; Martínez, G.; Romero, R.; Durán-Zuazo, V. H. and Muriel-Fernández, J. L. 2010. Positive impact of regulated deficit irrigation on yield and fruit quality in a commercial citrus orchard. *Agricultural Water Management*. 97(5):614-622.
- 9 García, Y.; Ramos, R. A.; Machuca, O. y Sánchez, A. L. 2015. El índice de estrés hídrico del cultivo como indicador del momento de riego en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 24(4):60-69.
- 10 Geerts, S. and Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*. 96(9):1275-1284.
- 11 González-Dugo, V.; Moran, P. P. and Mateos, L. 2006. Yield mapping for precision agriculture: monitoring water stress and nutrient deficiency. *Precision Agriculture*. 7(4):243-255.
- 12 Grant, O. M.; Tronina, L.; Jones, H. G. and Chaves, M. M. 2010. Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. *Journal of Experimental Botany*. 61(3):871-881.
- 13 Idso, S. B.; Jackson, R. D.; Pinter Jr., P. J.; Reginato, R. J. and Hatfield, J. L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*. 24:45-55.

- 14 Jackson, R. D.; Idso, S. B.; Reginato, R. J. and Pinter Jr, P. J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*. 17(4):1133-1138.
- 15 Jones, H. G. 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*. 95(3):139-149.
- 16 Klamkowski, K. and Treder, W. 2008. Response to drought stress of three strawberry cultivars grown under greenhouse conditions. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*. 16:179-188.
- 17 Liu, F.; Shahnazari, A.; Andersen, M. N.; Jacobsen, S. E. and Jensen, C. R. 2006. Physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to partial root-zone drying: ABA signalling, leaf gas exchange, and water use efficiency. *Journal of Experimental Botany*. 57(14):3727-3735.
- 18 Maes, W. H. and Steppe, K. 2012. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*. 63(13):4671-4712.
- 19 Mata-González, R.; Martin, D. W.; McLendon, T.; Trlica, M. J. and Pearce, R. A. 2002. Evaluation of soil water relations and physiological responses of tall wheatgrass on a strip mine in northwestern Colorado. *Agronomy Journal*. 94(4):874-883.
- 20 Möller, M.; Alchanatis, V.; Cohen, Y.; Meron, M.; Tsipris, J.; Naor, A. and Dadon, I. 2007. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*. 58(4):827-838.
- 21 Moreno, S.; Berdeja, R. and Platas, E. 2024. Effect of deficit irrigation on fruit quality parameters in strawberry. *Journal of Agricultural Science*. 16(2):123-135.
- 22 Ojeda, M. G.; Sifers, A. and Richards, L. 2023. Strawberry crop physiology under variable water conditions. *Plant Physiology Reports*. 8(3):210-222.
- 23 Osaku, S. K.; De Almeida, E. and De Souza, S. R. 2005. Water potential and stomatal conductance of coffee plants in response to water deficit. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*. 17(3):281-289.
- 24 Romero, P.; García-García, J. and Botía, P. 2006. Cost-benefit analysis of a regulated deficit-irrigated almond orchard under subsurface drip irrigation conditions in SE Spain. *Irrigation Science*. 24(2):175-184.
- 25 Rousseeuw, P. J. and Hubert, M. 2011. Robust statistics for outlier detection. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*. 1(1):73-79.
- 26 Ruiz-Nogueira, B.; Saavedra-del-Río, A.; Tarango-Rivero, S. H. y González-Hernández, V. A. 2001. Efecto del déficit de agua en el desarrollo y rendimiento de fresa. *Terra Latinoamericana*. 19(2):135-143.
- 27 Sadras, V. O. and Milroy, S. P. 1996. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *Field Crops Research*. 47(2-3):253-266.
- 28 Sezen, S. M.; Yazar, A.; Eker, S. and Gençel, B. 2019. Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper. *Agricultural Water Management*. 221:8-15.
- 29 Yuan, B. Z.; Sun, J. and Nishiyama, S. 2004. Effect of drip irrigation on strawberry growth and yield inside a plastic greenhouse. *Biosystems Engineering*. 87(2):237-245.



Evaluación del estrés hídrico del cultivo de fresa bajo clima húmedo

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
ISSN (electronic): 2007-9934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 November 2025
Date accepted: 01 February 2026
Publication date: 01 January 2026
Publication date: Jan-Feb 2026
Volume: 17
Issue: 1
Electronic Location Identifier: e3971
DOI: 10.29312/remexca.v17i1.3971
Publisher ID: 00005

Categories

Subject: Artículos

Palabras clave:

Palabras clave:

calidad de fruto

eficiencia hídrica

Fragaria x ananassa

humedad relativa

índice de estrés hídrico

riego deficitario

Counts

Figures: 2

Tables: 3

Equations: 2

References: 29