

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**BALANCE HÍDRICO EN CULTIVO DE LECHUGA (*LACTUCA SATIVA L.*) CON
LISÍMETRO DE DRENAJE**

POR

GINNYER DENNISE CAMPOS SANHUEZA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMIA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN - CHILE
2026**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**BALANCE HÍDRICO EN CULTIVO DE LECHUGA (*LACTUCA SATIVA L.*) CON
LISÍMETRO DE DRENAJE**

POR

GINNYER DENNISE CAMPOS SANHUEZA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

CONCEPCIÓN – CHILE

2026

Aprobada por:

Profesor asistente, Walter Valdivia C.
Ing. Agrónomo, Mg, Dr.

Guía

Profesor asistente, Mathias Kuschel O.
Ing. Civil agrícola, Dr.

Asesor

Profesora asistente, Susana Fischer G.
Ing. Agrónoma, Mg, Dr.

Asesora

Profesor asociado, Manuel Faúndez S.
Ing. Agrónomo, Mg.

Decano

TABLA DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY	1
INTRODUCCIÓN	2
MATERIALES Y MÉTODOS	5
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
CONCLUSIONES	23
REFERENCIAS	24

INDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Ubicación del predio donde se realizaron los experimentos. (Estación experimental, Universidad de Concepción.)	6
Figura 2	Evolución de la temperatura máxima, mínima, humedad relativa entre septiembre y octubre del año 2024	7
Figura 3	Evolución de la evapotranspiración de referencia (ET _o) y radiación solar entre los periodos de septiembre y octubre de 2024	8
Figura 4	Distribución y repeticiones de los tratamientos	10
Figura 5	Esquema de corte del lisímetro de drenaje utilizado en el ensayo	12
Figura 6	Promedio de peso fresco (P _{Fr}) y peso seco (P _{Sc}) para T1 y T2	15
Figura 7	Evolución de la temperatura del aire y la humedad relativa durante el periodo de estudio	18
Figura 8	Evolución de la radiación solar y la evapotranspiración de referencia durante el periodo de estudio	19
Figura 9	Evapotranspiración de cultivo (ET _c) diaria de lechuga en invernadero	20

BALANCE HÍDRICO EN CULTIVO DE LECHUGA (*LACTUCA SATIVA L.*) CON LISÍMETRO DE DRENAJE.

WATER BALANCE IN LETTUCE (*LACTUCA SATIVA L.*) CULTIVATION WITH DRAINAGE LYSIMETER.

Palabras índices adicionales: Balance hídrico, evapotranspiración, *Lactuca sativa L.*, lisímetro de drenaje.

RESUMEN

El agua es un recurso esencial y limitado en la agricultura, especialmente frente al cambio climático. Este estudio evaluó el balance hídrico del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) mediante lisímetros de drenaje, bajo dos niveles de riego (50 % y 100 % de la evapotranspiración del cultivo, ETc) en condiciones controladas de invernadero. Los resultados mostraron diferencias significativas entre tratamientos, donde el riego completo (100 % ETc) generó mayor biomasa fresca y seca, mientras que el déficit del 50 % redujo el rendimiento en aproximadamente un 50 %. La evapotranspiración fue el principal componente del balance hídrico, aumentando a medida que avanzó el ciclo del cultivo. En promedio el tratamiento con deficiencia de agua tuvo un consumo medio de 0,116 L/planta, en cambio, el tratamiento con reposición total llegó a 0,196 L/planta, por lo que se concluye que la reposición completa de la lámina de riego es la estrategia más adecuada para optimizar el uso del agua y mantener la productividad de la lechuga en sistemas controlados.

SUMMARY

Water is an essential and limited resource in agriculture, particularly under climate change conditions. This study evaluated the water balance of lettuce (*Lactuca sativa L.*) using drainage lysimeters under two irrigation levels (50 % and 100 % of crop evapotranspiration, ETc) in a controlled greenhouse environment. Results showed significant differences between treatments: full irrigation (100 % ETc) produced higher fresh and dry biomass, while the 50% deficit reduced yield by about 50 %. Evapotranspiration was the main component of the water balance, increasing as the

crop developed. On average, the water-deficit treatment had a mean consumption of 0,116 L/plant, whereas the full-replacement treatment reached 0,196 L/plant. Therefore, it is concluded that full irrigation replenishment is the most suitable strategy to optimize water use and maintain lettuce productivity in controlled systems.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se presenta una problemática ambiental, la cual corresponde al uso inadecuado del agua (Cifuentes, 2019). Mejorar el manejo del agua en los cultivos, permite conservarla (Fernández *et al.*, 2019), de esta manera aseguramos un cultivo desarrollado correctamente y rendimientos acordes al mercado. El agua constituye uno de los recursos más limitantes para la producción agrícola, especialmente en un contexto de cambio climático, donde las sequías y la variabilidad en la disponibilidad hídrica afectan directamente el rendimiento de los cultivos (Toro, 2016). La gestión eficiente del recurso hídrico es clave para asegurar la sostenibilidad productiva, por lo que resulta necesario aplicar tecnologías de monitoreo y evaluación que permitan optimizar el uso del agua en los sistemas agrícolas (Allen *et al.*, 2006).

A nivel mundial la lechuga (*Lactuca sativa L.*) es una de las hortalizas más consumidas y comunes en el mundo (Saavedra *et al.*, 2017). En Chile la lechuga es una de las 3 hortalizas con mayor superficie nacional con aproximadamente 8.300 hectáreas (Villagrán, 2023). Es un cultivo anual de la familia Asteraceae, siendo una de las 300 especies del género *Lactuca* (Bilbao *et al.*, 2022), se considera un cultivo sensible al déficit hídrico, especialmente en sus fases iniciales de establecimiento y crecimiento foliar, lo que repercute en la formación de biomasa fresca y calidad comercial (Premuzic *et al.*, 2002). Asimismo, la reducción en la disponibilidad de agua puede disminuir el intercambio gaseoso y la producción de biomasa en el cultivo (Molina-Montenegro *et al.*, 2011).

Por otra parte, el requerimiento de agua de un cultivo se define como la cantidad de agua que se necesita reponer a lo largo del periodo de crecimiento, que corresponde a la pérdida por evaporación desde el suelo y la transpiración desde

las hojas. Estas variables pueden ser complejas de calcular por separado, en consecuencia, se consignó el término evapotranspiración, el cual es considerado como la pérdida de agua en forma de vapor en la superficie cubierta de vegetación (Allen *et al.*, 2006). La evapotranspiración diaria de lechuga varía según el ambiente de cultivo, la etapa fenológica y las condiciones climáticas. En campo abierto, se han reportado valores promedio de 3 a 4 mm día⁻¹, con una evapotranspiración estacional acumulada de aproximadamente 278 ± 24 mm (Zhou *et al.*, 2012). En climas templados de otoño-invierno se han reportado valores de evapotranspiración cercanos a 3 – 4 mm día⁻¹, con coeficientes de cultivo (Kc) alrededor de 0,8 para lechuga en etapas intermedias de desarrollo (Allen *et al.*, 2006). En ambientes protegidos, como invernaderos, los consumos son más variables. En etapas avanzadas del cultivo, el consumo hídrico puede alcanzar varios cientos de mililitros por planta al día dependiendo de las condiciones ambientales y del sistema de cultivo, pudiendo aproximarse a valores cercanos a 1 L planta⁻¹ día⁻¹ bajo alta demanda evaporativa (Al-Khader & Abu Rayyan, 2013). Otros reportes señalan que, en la fase de madurez, los valores más frecuentes se encuentran entre 0,3 y 0,6 L planta⁻¹ día⁻¹, pudiendo alcanzar aproximadamente 1 L planta⁻¹ día⁻¹ en condiciones de mayor demanda (Resh, 2013). En regiones tropicales, el consumo hídrico puede llegar a 208 mm en verano, mientras que en otoño e invierno la evapotranspiración disminuye cerca de un 66 %, con valores de Kc entre 0,71 y 1,04 (Nóbrega *et al.*, 2018). En ambientes semiáridos, se ha demostrado que es posible mantener rendimientos similares a los del riego saturado, aplicando solo una fracción del agua requerida, especialmente cuando se utiliza cobertura con mulch para reducir la evaporación (Michelon *et al.*, 2020). En condiciones de invernadero, se ha observado que un riego levemente deficitario (80 % de ETc) puede mejorar la eficiencia en el uso del agua, aunque el rendimiento máximo se conserva bajo riego completo (Win *et al.*, 2018). Las necesidades hídricas del cultivo están vinculadas al balance de agua dentro de un predio, que considera elementos como la capacidad del suelo para retener agua, la tasa de evapotranspiración del cultivo y la cantidad de precipitación (Saavedra *et al.*, 2017). Existe el parámetro de coeficiente de cultivo (Kc) el cual estima las necesidades hídricas de un cultivo en

particular, éste, entre sus funciones, permite la programación del riego y su posterior control, además está directamente relacionado con la evapotranspiración de referencia (ET_o) y la evapotranspiración de cultivo (ET_c) (Allen *et al.*, 2006).

Diversos métodos han sido desarrollados para estimar los requerimientos de agua en los cultivos. Entre ellos destacan: los métodos empíricos basados en coeficientes de cultivo (K_c) y evapotranspiración de referencia (ET_o); los modelos de simulación agroclimática, que integran parámetros fisiológicos y meteorológicos (Santos *et al.*, 2010); y los lisímetros, considerados una de las herramientas más precisas para medir directamente la evapotranspiración (Lazarovitch *et al.*, 2006). Dentro de ellos, los lisímetros de drenaje se caracterizan por su simplicidad y bajo costo, siendo ampliamente utilizados en estudios exploratorios y comparativos de cultivos hortícolas.

Hoy en día, estos instrumentos permiten medir la demanda de agua en los cultivos con alta eficiencia facilitando así las investigaciones (Lazarovitch *et al.*, 2006), sin embargo, existe una limitada fuente de información respecto al requerimiento hídrico del cultivo de la lechuga y en general de cultivos hortícolas.

Aunque existen avances en cereales y frutales, la información en hortalizas, y particularmente en lechuga, es aún limitada. El uso de lisímetros de drenaje permite cuantificar el balance de agua de manera directa, aportando datos confiables para optimizar la programación de riegos en cultivos de corta duración.

El balance hídrico por su parte es una herramienta cuantitativa, de datos reales o simulados, con el fin de calcular el requerimiento hídrico de una zona en particular (Cleves *et al.*, 2016). En el caso de un suelo con vegetación el balance hídrico simplificado se calcula como se presenta en la siguiente ecuación:

$$P = ET + \Delta HS + D + E$$

Donde:

ET = Evapotranspiración (mm); P = Precipitación más riego si se suministra (mm); E = Escorrentía (mm); ΔHS = Cambios en la humedad del suelo: (humedad final – humedad inicial); D = Percolación (mm).

Este se fundamenta en el principio de conservación de la masa, el cual establece que el agua que ingresa al sistema debe ser igual a la que sale más cualquier variación en el almacenamiento (Wooyoung Na & Yoo, 2023). Sin embargo, su aplicación práctica presenta limitaciones asociadas a la dificultad de medir con precisión todas las entradas y salidas, especialmente pérdidas no perceptibles como la evaporación no medida o la transpiración subestimada (Allen *et al.*, 2011). Estas dificultades se agravan por la variabilidad espacial y temporal de los factores que afectan el balance, (Levin *et al.*, 2023) señala que dichas incertidumbres pueden oscilar entre un 5 % y un 35 % debido a errores de sensores y extrapolaciones.

Si bien existen estudios internacionales sobre el consumo de agua en lechuga, la información local en Chile es escasa, especialmente en condiciones de invernadero. Asimismo, son pocos los trabajos que comparan regímenes contrastantes de riego mediante lisímetros de drenaje. En este contexto, el presente estudio busca contribuir al conocimiento del balance hídrico en lechuga bajo dos niveles de disponibilidad de agua (50 % y 100 % de riego), generando información de utilidad para mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico en hortalizas.

El objetivo general del estudio fue determinar los requerimientos de agua del cultivo de lechuga a través de lisímetros de drenaje bajo dos regímenes de riego contrastantes. En cuanto a los objetivos específicos se busca:

1. Determinar la evapotranspiración a través de un balance de agua en el cultivo de lechuga.
2. Determinar componentes de rendimiento en el cultivo de lechuga.
3. Determinar diferencias de requerimiento de agua en el cultivo de lechuga.

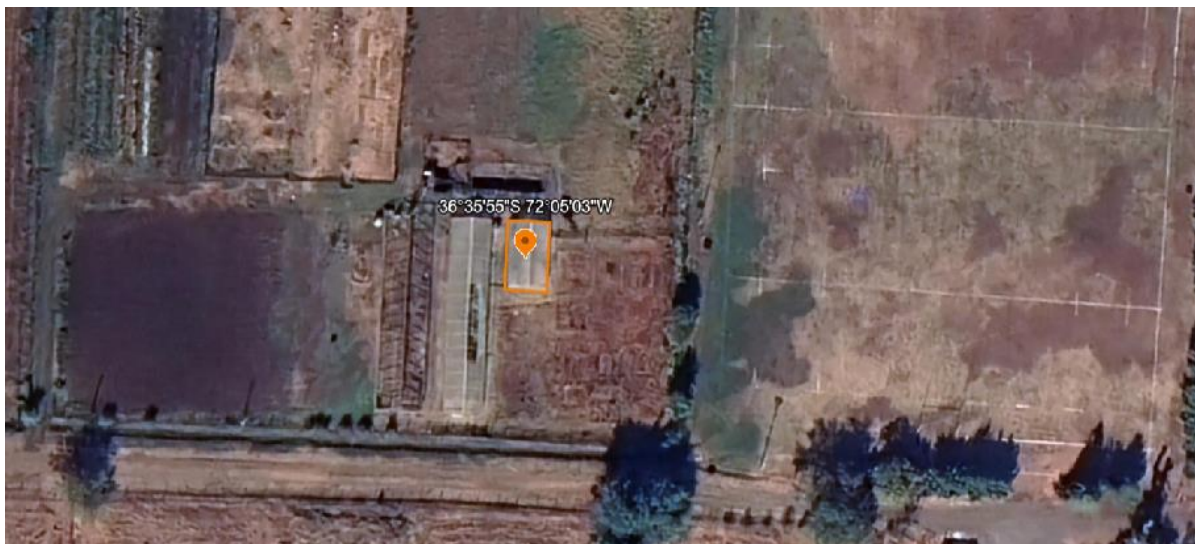
MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se realizó en la Estación Experimental El Nogal, específicamente en la Unidad de Horticultura, perteneciente a la Universidad de Concepción (36°35'55" S y 72°05'03" W), en la comuna de Chillán (Figura 1), durante la temporada de otoño-primavera del 2024. Las plantas fueron trasplantadas el día 18 de julio de 2024,

teniendo un periodo de crecimiento de 116 días hasta la cosecha el día 11 de noviembre del mismo año, y la aplicación de los tratamientos se dio entre el 9 de septiembre y el 18 de octubre.

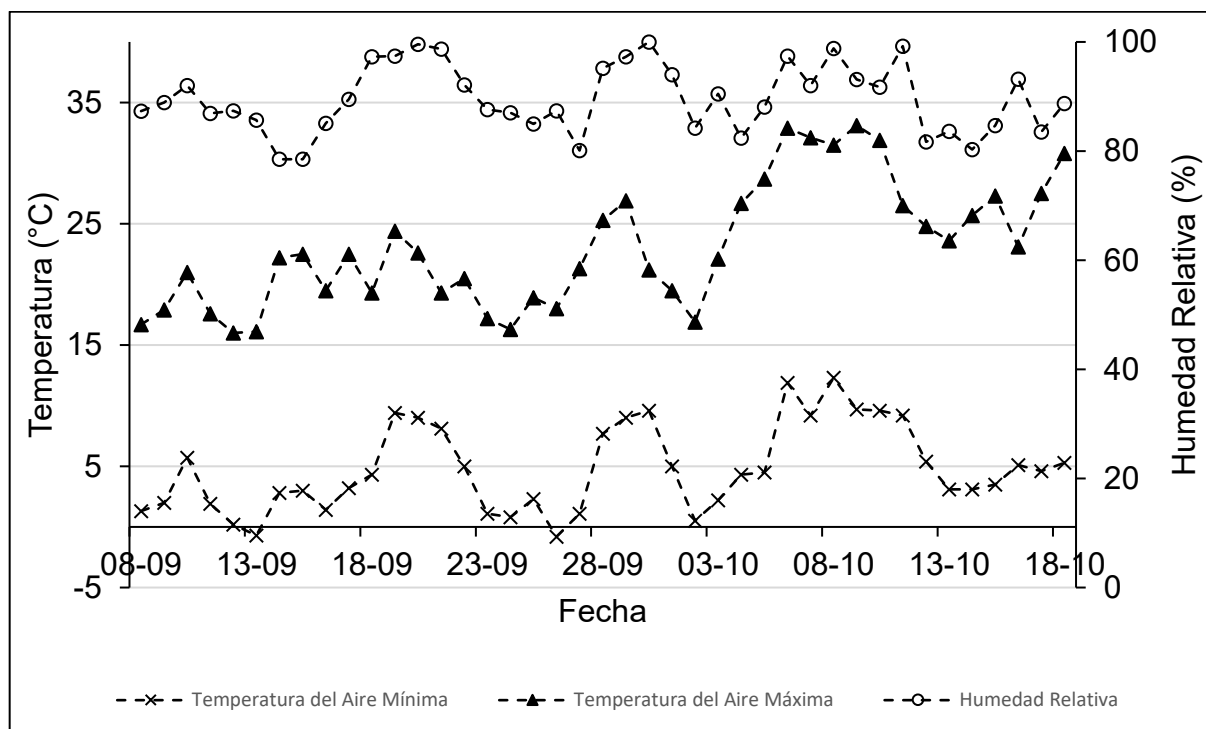
Figura 1. Ubicación del predio donde se realizaron los experimentos. (Estación experimental, Universidad de Concepción.)



El cuadrado de color naranja indica la ubicación y coordenadas del área donde se realizaron los estudios evaluados.

En cuanto a las características edafoclimáticas del lugar, durante la temporada de crecimiento entre septiembre y octubre de 2024 según INIA, estación meteorológica Santa Rosa, esta presentó temperaturas máximas de entre 15,4 °C y 25,5 °C manteniéndose ligeramente estable con algunas temperaturas máximas en la segunda semana de octubre, mientras que las temperaturas mínimas se encontraron en rangos cercanos a -1 °C y 12,3 °C que al igual que la temperatura máxima presenta alzas, mejorando el ambiente de crecimiento, la humedad relativa se observó en rangos de 84,2 % y 97,4 %, altos especialmente en septiembre y en octubre bajando levemente, y una radiación de entre 3,1 Mj/m² y 24,1 Mj/m² lo que podría indicar mayor energía disponible para la evapotranspiración (Figura 2).

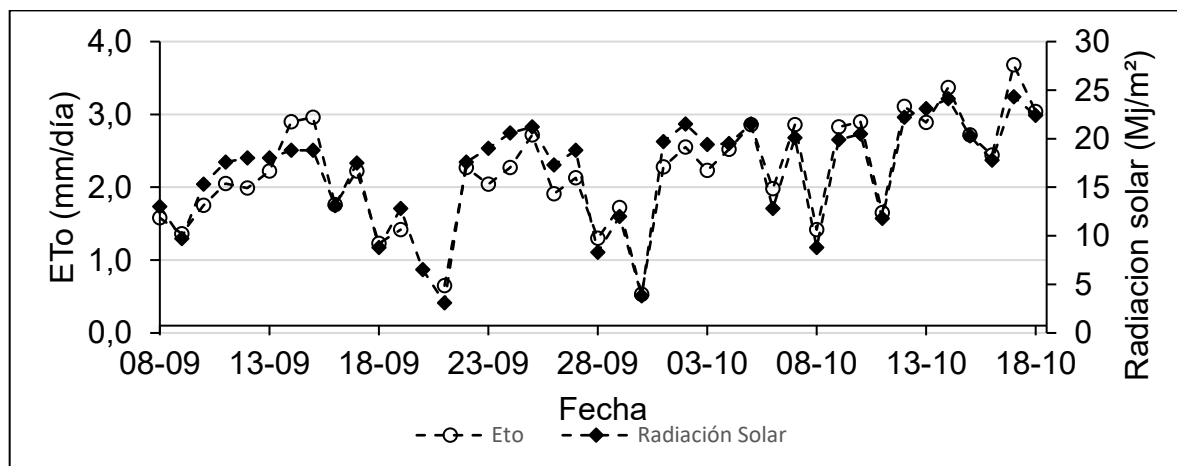
Figura 2. Evolución de la temperatura máxima, mínima, humedad relativa entre septiembre y octubre del año 2024.



Fuente. Estación agrometeorológica Santa Rosa del Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA).

En cuanto a la evapotranspiración de referencia (ETo), presentó valores de entre 0 y 3,68 mm/día durante el periodo del ensayo, manteniendo rangos moderados en el cual en octubre empieza un aumento progresivo alcanzando los valores más altos (Figura 3).

Figura 3. Evolución de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y radiación solar entre los periodos de septiembre y octubre de 2024.



Fuente. Estación agrometeorológica Santa Rosa del Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA).

Diseño experimental

El ensayo se llevó a cabo dentro de un invernadero, donde se establecieron siete hileras de lechugas cultivadas directamente en el suelo. Se aplicaron dos tratamientos de riego basados en el porcentaje de requerimiento hídrico del cultivo: 50 % T1 (riego deficitario) y 100 % T2 (riego completo). Los tratamientos se distribuyeron de la siguiente manera: las hileras H1, H2 y H3 recibieron el tratamiento de 50 % del requerimiento hídrico, mientras que las hileras H5, H6 y H7 recibieron el tratamiento del 100 %. La hilera H4 se consideró como borde y no fue utilizada para la toma de datos.

Para la evaluación de variables, se seleccionaron exclusivamente dos hileras: H2 (50 %) y H6 (100 %) que corresponde a las hileras centrales, en las cuales se establecieron 8 plantas cultivadas en macetas individuales con lisímetro de drenaje. A diferencia del resto del ensayo, donde las plantas se encontraban cultivadas en suelo, estas 16 plantas (8 por tratamiento) constituyeron las unidades experimentales del análisis, al permitir mediciones directas del balance hídrico (entrada por riego, y salida de drenaje, evapotranspiración y cambio en el contenido de humedad del suelo), el requerimiento hídrico acumulado y la biomasa fresca y seca al finalizar el ensayo.

El diseño se consideró como un experimento con un solo factor (riego) y dos niveles (50 % y 100 %), bajo un enfoque de comparación entre grupos independientes. Cada planta en maceta fue considerada una unidad experimental.

Sin embargo, dado que las mediciones se realizaron exclusivamente en una hilera por tratamiento, sin repetición espacial de hileras, este estudio se clasifica metodológicamente como ensayo exploratorio en el uso de lisímetros de drenaje.

Por lo tanto, las inferencias estadísticas se limitan a las unidades experimentales observadas, y los resultados deben interpretarse como indicativos de tendencias preliminares, útiles para orientar futuras investigaciones con mayor nivel de repetición y control espacial.

Los datos fueron analizados mediante la prueba t de Student para muestras independientes, previa verificación de los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene). En los casos en que dichos supuestos no se cumplieron, se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney, apropiada para la comparación entre dos grupos independientes cuando no se cumplen los requisitos del análisis paramétrico. Se utilizó un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ para todas las pruebas estadísticas.

Lisímetro de drenaje

Para la construcción del lisímetro de drenaje, se dispuso de 1 cajón de madera de 2 m de largo, con 8 subdivisiones 0,25 x 0,25 m cada una, macetas de 0,2 x 0,2 m, y en el fondo de cada una de las subdivisiones se instalaron recipientes para el agua de drenaje con una capacidad de 500 mL. Cada tratamiento contó con 8 unidades experimentales, donde en cada una se midió el balance hídrico (Figura 4).

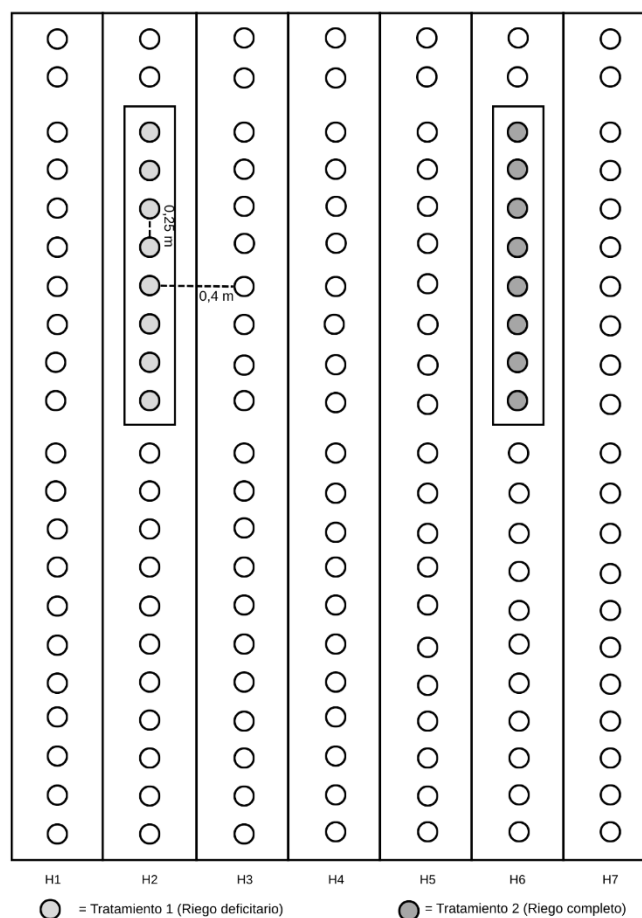
La distancia sobre hilera (SH) fue de 0,25 m y la distancia entre hileras (EH) de 0,4 m. Los lisímetros, con una profundidad de 0,3 m, fueron instalados a ras de suelo para mantener una cobertura continua de vegetación, lo que contribuyó a reducir la evaporación superficial y el flujo desuniforme de aire entre el cultivo.

Tratamiento 1 (Déficit hídrico – 50 %). Se establecieron 8 plantas de lechuga en cada lisímetro de drenaje ubicado en la hilera 2. Durante la primera etapa se aplicaron riegos cada dos días con el objetivo de observar el comportamiento del

agua y las plantas. A partir del tercer riego, se estableció una frecuencia de una vez por semana, completando un total de 7 riego durante la temporada con un tiempo de 22 minutos y un caudal nominal de 0,92 L/h. Se utilizó fertilización estándar en todo el ciclo del cultivo.

Tratamiento 2 (Capacidad de campo – 100 %). Se establecieron 8 plantas de lechuga en cada lisímetro de drenaje ubicado en la hilera 6. Al igual que en el tratamiento anterior, la frecuencia de riego fue la misma, totalizando 7 riegos en toda la temporada. En este caso se aplicó riego hasta capacidad de campo con un tiempo de 45 minutos y un caudal nominal de 1,84 L/h, empleando también una fertilización estándar.

Figura 4. Distribución y repeticiones de los tratamientos.



Sistema de lisímetro compuesto de 8 plantas por tratamiento. Hilera 2 indica tratamiento con déficit hídrico e hilera 6 el tratamiento con riego completo.

Establecimiento del cultivo

Se preparó el suelo del invernadero para la instalación de los lisímetros de drenaje y posteriormente se realizó el trasplante del cultivo el día 18 de Julio del 2024.

En cuanto al manejo agronómico, se procedió a labores tales como la eliminación de cualquier tipo de maleza en el área del ensayo con una pala antes del trasplante, de esta manera se disminuyó su incidencia en el cultivo.

Las plántulas de lechuga fueron facilitadas por la Unidad de Horticultura del Departamento de Producción Vegetal de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción, estas fueron 2 bandejas con 200 unidades de la variedad (*Lactuca sativa* L.) tipo acephala Dill, la cual se caracteriza por tener hojas sueltas y dispersas no envolventes, estas plantas forman una roseta muy plana, además los bordes de las hojas son muy variados en formas (Saavedra *et al.*, 2017), estas contaban con 3 hojas verdaderas al momento del trasplante.

Se realizó un balance de nitrógeno para estimar la dosis de fertilización a aplicar por unidad experimental (maceta). Para tener un balance equilibrado en lechugas se consideró una dosis de 0,543 g de urea/planta. Esto se calculó aplicando el balance de masa, con una dosis neta de 137,44 kg N/ha que se ajustó a la escala de maceta (4 kg de suelo por unidad), resultando en 0,2498 g de N por maceta, equivalentes a 0,5432 g de urea por planta.

Sistema de riego

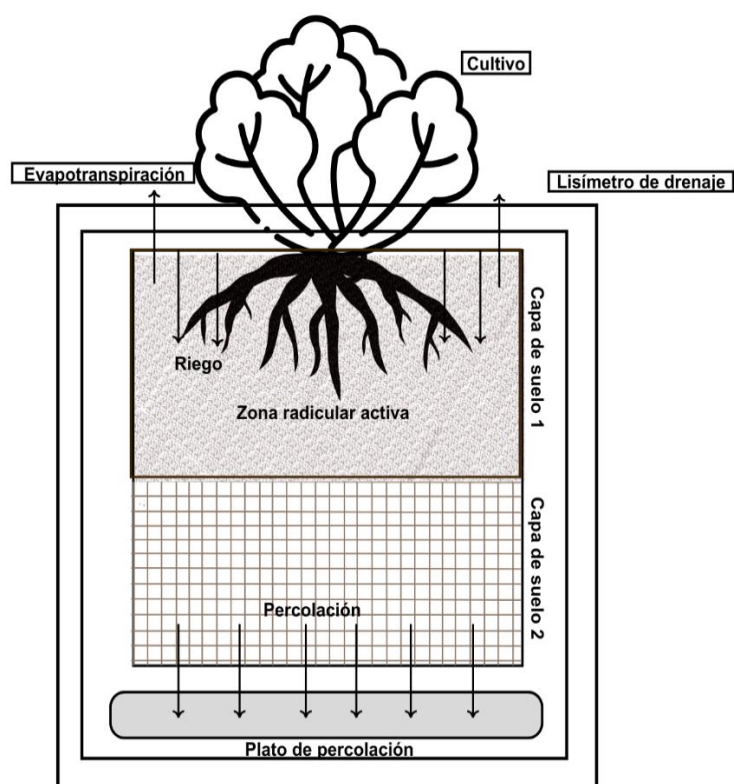
El sistema contó con una fuente de agua que aseguró el abastecimiento durante todo el ensayo. El riego se estableció por líneas con gotero botón con los emisores a una distancia de 0,25 m. Una vez instalados los goteros en la línea de riego, se aforaron de manera aleatoria para calcular el caudal nominal, este se realizó recolectando la cantidad de agua que alcanzaba a llenar un recipiente con volumen conocido en un tiempo de 30 s, haciendo 3 repeticiones de cada gotero seleccionado, de esta manera se calculó un promedio y se determinó un caudal nominal de 1,84 L/h. Para controlar el sistema de riego se utilizó un manómetro manteniendo la presión de operación del sistema de riego a 1,5 bar.

Balance de agua en el lisímetro de drenaje

El balance de agua permite estimar con precisión la evapotranspiración del cultivo mediante la cuantificación de los flujos del agua que ingresan y salen del sistema.

En este estudio, se removió el suelo del invernadero y se separaron sus perfiles con el objetivo de favorecer un adecuado desarrollo radicular de las plántulas al momento del trasplante (Figura 5). Esta preparación también permitió mantener las mismas condiciones de las plantas cultivadas directamente en el suelo alrededor del lisímetro y uniformar sus condiciones respecto del área considerada como borde

Figura 5. Esquema en corte del lisímetro de drenaje utilizado en el ensayo.



Esquema en corte de lisímetro de drenaje, compuesto por dos capas de suelo. El sistema considera drenaje por gravedad mediante un plato de percolación ubicado en la base del lisímetro para la recolección del agua percolada. Elaboración propia.

El cálculo se realizó a partir de datos medidos directamente en las unidades experimentales, considerando el riego aplicado, el agua drenada, el cambio en la humedad del suelo y, eventualmente, la escorrentía superficial. Dado que el experimento se realizó bajo invernadero y sin aportes de precipitación, este

componente se consideró cero. El mulch utilizado sobre la superficie del suelo también permitió minimizar las pérdidas por evaporación no asociadas al cultivo por lo que también se despreciaron dentro del balance.

De este modo, se aplicó la siguiente ecuación para estimar la evapotranspiración real (ET):

$$ET = R \pm \Delta HS - D$$

Donde:

R = Riego; ET = Evapotranspiración; ΔHS = Cambios de la humedad del suelo: (humedad final – humedad inicial); D = Percolación.

La evapotranspiración (ET) representa la pérdida de agua por evaporación localizada en el suelo y la transpiración de las plantas, la cuál es expresada en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Dentro de este estudio, los componentes fueron medidos directamente y tanto la esorrentía como las precipitaciones fueron consideradas nulas debido a que las unidades experimentales se encontraban bajo invernadero y se cubrió el suelo en la maceta con mulch de paja de trigo, de esta manera se evitó la evaporación del suelo descubierto, por otro lado el agua percolada se recolectó de los recipientes ubicados bajo cada maceta y se midió con una balanza de precisión y vasos precipitados pesando los gramos de agua contenida en ellos, también se midió el peso de las macetas en la balanza para calcular la diferencia de peso antes y después de aplicar los riegos y junto con las mediciones de humedad de suelo, se obtuvieron los datos necesarios para el análisis del balance hídrico.

Determinación de humedad del suelo

El contenido de humedad del suelo se determinó a través de 8 sensores GS1 ubicados de manera aleatoria en las macetas de cada tratamiento, de esta manera se distribuyeron 4 sensores por tratamientos, los cuales fueron puestos a 10 cm de profundidad tomando datos cada 15 minutos, los datos se almacenaron en 2 datalogger Em50 y ECH2O marca Decagon Devices y estos fueron recuperados

como archivo en formato Excel a través de la aplicación ECH2O Utility. El contenido de humedad fue medido y registrado en todo el periodo de crecimiento del cultivo.

Mediciones

Se cosecharon las lechugas con el objetivo de hacer mediciones en la biomasa aérea, tales como el peso seco y fresco. Para peso fresco se cosecharon las 16 muestras correspondientes a los 2 tratamientos en bolsas de papel rotuladas para su identificación y se pesaron en una balanza analítica de precisión, posteriormente las plantas se secaron en un horno a una temperatura de 70 – 80 °C, durante 12 a 24 horas aproximadamente, hasta alcanzar peso constante (Sadzawka R *et al.*, 2020), donde se volvieron a pesar las muestras para obtener el peso seco de las muestras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Peso fresco

Se evaluó el peso fresco de las plantas de lechuga al momento de la cosecha para ambos tratamientos de riego. T2 presentó un peso fresco promedio de 94,8 g/planta, mientras que T1 alcanzó un promedio de 47,1 g/planta (Figura 6).

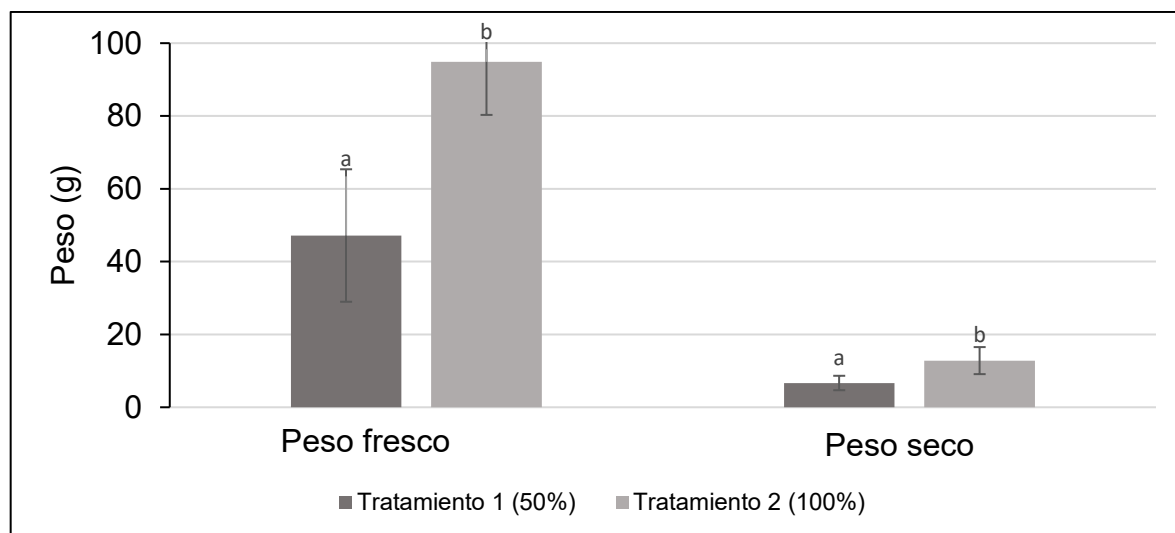
La Prueba t-Student para muestras independientes presentó diferencias estadísticamente significativas entre ambos tratamientos ($P = < 0,0001$) lo que indicó que el riego influyó directamente en la acumulación de biomasa fresca, alcanzando valores máximos y mínimos de 116,9 - 68,5 g/planta para T2, mientras que para T1 se alcanzaron valores de 68,4 - 12,5 g/planta respectivamente.

Peso seco

Los resultados obtenidos relacionadas al peso seco, evidenciaron que T2 presenta nuevamente valores superiores, con un promedio de 12,8 g, frente a los 6,6 g/planta obtenidos en T1 de materia vegetal seca (Figura 6). Esta variable reflejó el crecimiento estructural y la acumulación de la materia seca del cultivo sin considerar el contenido de agua.

La Prueba t-Student para muestras independientes para este análisis también evidenció un efecto significativo ($P = <0,001$), lo que muestra que el manejo del riego tuvo un efecto consistente en la acumulación de materia seca, alcanzando valores máximos y mínimos de 20,66 - 9,29 g/planta para T2, mientras que T1 registró valores más bajos, tales como 9,59 - 3,18 g/planta. Estos resultados evidenciaron que el tratamiento con mayor disponibilidad de agua favoreció el desarrollo fenológico del cultivo (Figura 6).

Figura 6. Promedio de peso fresco (PFR) y peso seco (Psc) para T1 y T2.



Las barras indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

Asimismo, los resultados muestran que la reducción del riego al 50 % produjo una caída significativa en el peso aéreo de la de lechuga, significando una disminución del peso fresco de 94,8 g a 47,1 g/planta y del peso seco de 12,8 g a 6,6 g/planta. Estos resultados representan pérdidas relativas cercanas al 50 %, los cuales son coherentes con lo reportado en la literatura donde según Molina – Montenegro *et al.* (2011) el estrés hídrico limita la expansión celular, reduce la fotosíntesis y provoca una menor acumulación de materia seca, efectos que se reflejan tanto en peso fresco como en el seco.

Trabajos recientes confirman esta tendencia, Buenrostro-Curiel *et al.* (2025) relata que en México encontraron que las láminas de riego reducidas afectaron negativamente el rendimiento, siendo más pronunciado en tratamientos con baja

disponibilidad hídrica, lo que coincide con la magnitud de pérdida observada en este trabajo.

Por otro lado, diversos estudios que incorporaron estrategias de mitigación mostraron que es posible reducir parcialmente el impacto del déficit hídrico. Según Villa e Vila *et al.* (2024) se logró demostrar que la aplicación de silicio en condiciones de déficit mejora la fotosíntesis y la productividad hídrica en lechuga. Estos resultados sugirieron que la integración de bioestimulantes o elementos benéficos pueden ser una estrategia prometedora para mitigar las pérdidas de biomasa.

Si nos enfocamos en la relación entre peso fresco y seco, se demostró que ambas variables disminuyeron de manera similar, lo que indica que no solo se afectó el contenido hídrico, sino que también la acumulación estructural de materia seca. Por su parte, Sesveren & Taş (2022) enfatizan que déficits leves o moderados (20 – 30 %) pueden mantener niveles aceptables de biomasa y mejorar la eficiencia en el uso del agua, mientras que déficits severos, tal como del 50 % aplicado en este trabajo, conducen a pérdidas de rendimiento demasiado elevadas.

Desde el punto de vista fisiológico, el déficit hídrico provoca cierre estomático y reducción en la asimilación de CO₂, lo que se traduce en una disminución de la tasa fotosintética y de la acumulación de carbono disponible para el crecimiento de la planta (Villa e Vila *et al.*, 2024). Asimismo, la menor turgencia limita la expansión celular y por ende el peso fresco, mientras que la reducción en asimilados disminuye la síntesis de materia seca. Esta doble limitación explica la reducción observada en ambos parámetros en este estudio.

En consecuencia, a través de los resultados se confirmó que un régimen de riego al 50 % no es recomendable para la producción comercial de lechuga, debido a las pérdidas significativas en biomasa aérea fresca y seca. Sin embargo, en escenarios de escasez hídrica, la implementación de déficits moderados (≥ 80 % ETc) junto con estrategias de mitigación como biofertilizantes o aplicaciones de silicio podrían representar alternativas viables para equilibrar ahorro de agua y productividad.

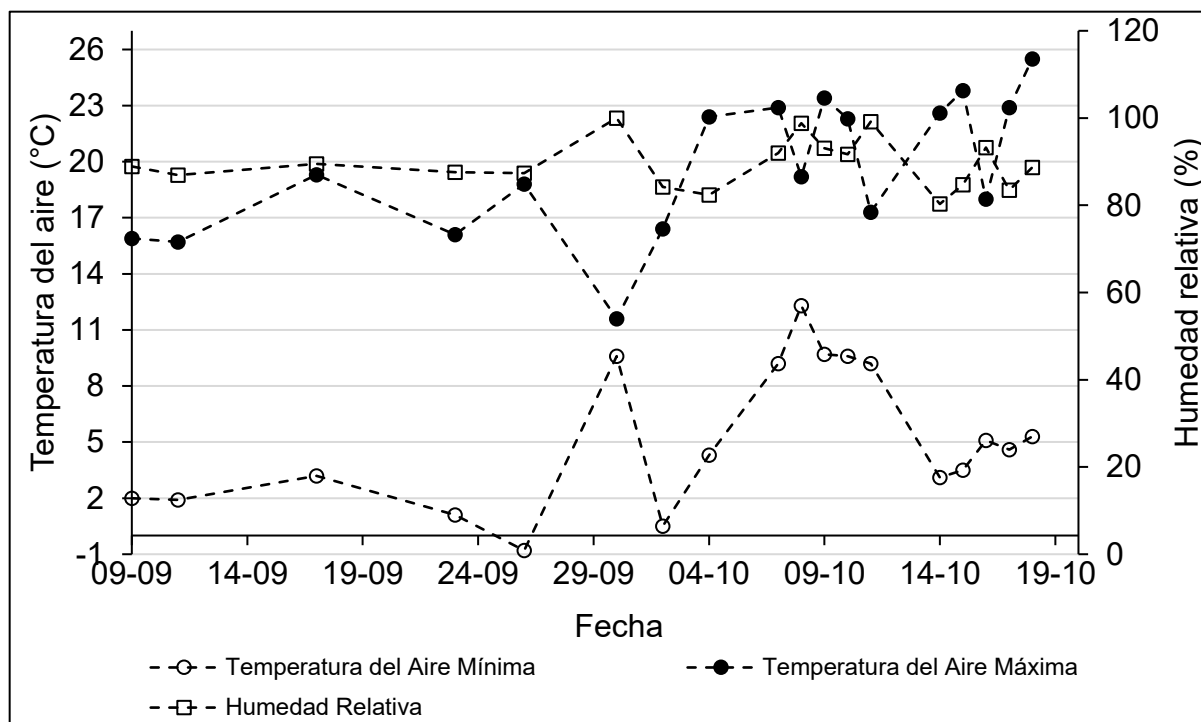
Balance hídrico y estimación de evapotranspiración

Durante el periodo comprendido entre el 9 de septiembre y el 18 de octubre de 2024, las condiciones climáticas registradas por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) evidenciaron una transición desde el final del invierno hacia el inicio de la primavera, caracterizada por un aumento progresivo de la temperatura y la radiación solar, junto con una disminución gradual de la humedad relativa.

La Figura 8 presenta la evolución de la radiación solar y de la evapotranspiración de referencia (ET_o) a lo largo del mismo periodo. Ambas variables exhibieron un patrón paralelo y fuertemente correlacionado, donde los aumentos de radiación solar se acompañan de incrementos en la ET_o. Las caídas simultáneas de ambas variables a fines de septiembre y comienzos de octubre sugirieron la presencia de días nublados o lluviosos, con menor demanda evaporativa. Posteriormente, se observó un aumento sostenido hacia mediados de octubre, alcanzando los valores máximos de radiación y ET_o, lo que coincidió con un incremento de las temperaturas y una disminución de la humedad relativa. Este comportamiento refleja condiciones atmosféricas propias de la primavera temprana en la zona, con amplitudes térmicas diarias significativas que favorecen la transpiración del cultivo, pero que también incrementan la demanda hídrica y el potencial de pérdida de agua por evapotranspiración.

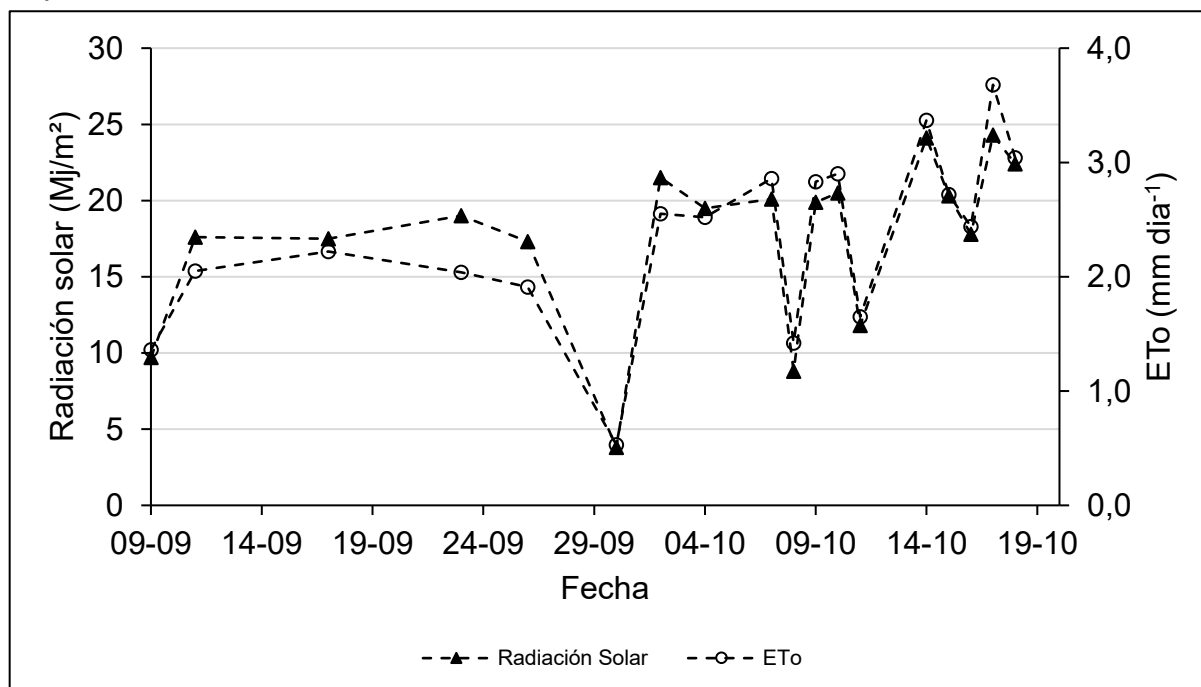
En conjunto, los datos climáticos reportados por INIA evidenciaron un aumento progresivo de la demanda evaporativa de la atmósfera durante el desarrollo del experimento, lo que habría influido directamente en la dinámica de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) medida en los lisímetros. Las condiciones de mayor radiación y temperatura, junto con una humedad relativa más baja (Figura 7), habrían favorecido un aumento de la ET_c, especialmente en los tratamientos con riego completo. En cambio, durante los periodos con menor radiación y temperaturas más bajas, la ET_c disminuyó, reflejando una reducción temporal de la demanda atmosférica. Estos resultados confirman la estrecha relación entre las condiciones meteorológicas y el comportamiento hídrico del cultivo, aspecto fundamental para la interpretación del balance hídrico y la eficiencia del uso del agua en los tratamientos evaluados.

Figura 7. Evolución de la temperatura del aire y humedad relativa durante el periodo de estudio.



Fuente. Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA).

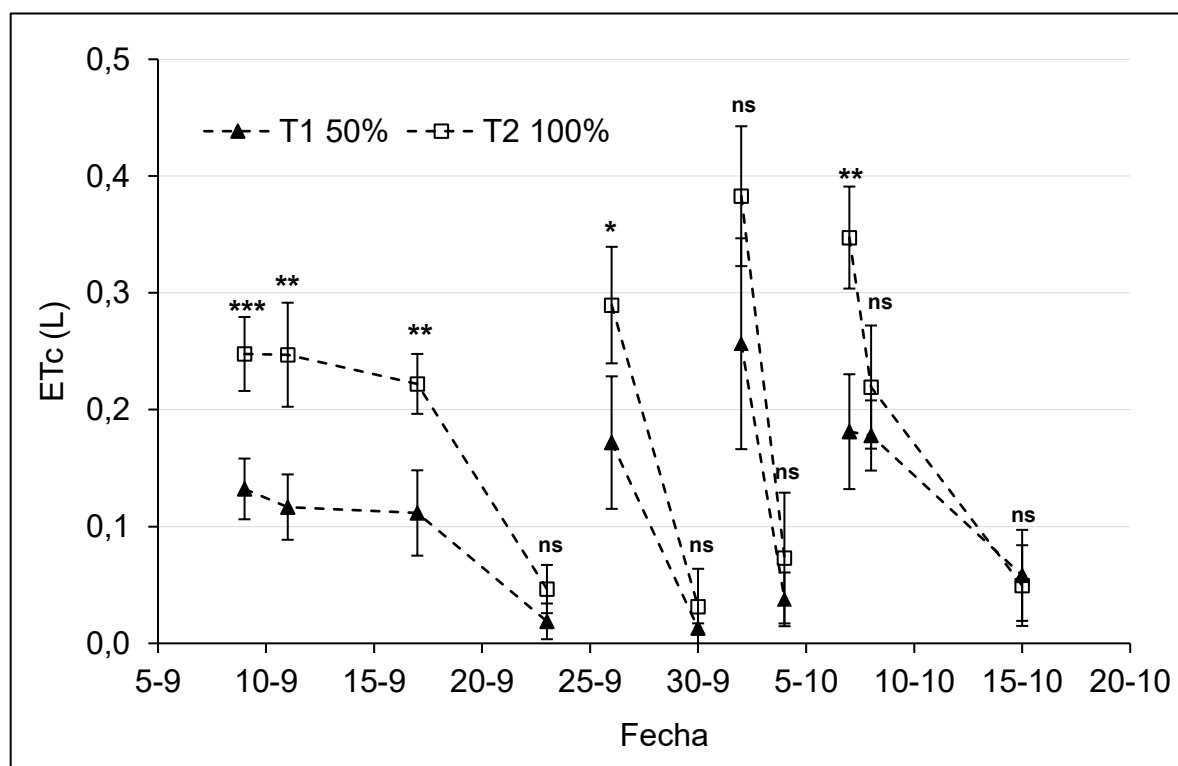
Figura 8. Evolución de la radiación solar y evapotranspiración de referencia durante el periodo de estudio.



Fuente. Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA).

La evapotranspiración del cultivo (ETc) representa un indicador clave del balance hídrico, ya que integra la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo, reflejando la interacción entre el estado hídrico del sistema y las condiciones atmosféricas. Mediante el uso de lisímetros de drenaje, se estimó la evapotranspiración real del cultivo bajo condiciones de invernadero para ambos tratamientos de riego. Se evaluó la normalidad de las variables mediante la prueba de Shapiro-Wilk en los cuales los resultados indicaron que tanto T1 como T2 no presentaron desviaciones significativas de una distribución normal. Por lo tanto, se asumió normalidad y se procedió a aplicar la prueba *t*-Student para muestras independientes con un nivel de significancia de $P < 0,05$, con el fin de comparar los valores medios de ETc entre los tratamientos.

Figura 9. Evapotranspiración de cultivo (ETc) diaria de lechuga en invernadero.



Los resultados se expresaron como media \pm error estándar y se consideraron diferencias estadísticamente significativas cuando $P < 0,05$. Además, en el gráfico comparativo de ETc se incorporaron marcadores de triángulo negro, indicando el T1 y cuadrados blancos para el T2, asimismo, asteriscos para indicar las diferencias significativas entre tratamientos, de acuerdo con el valor de P obtenido en cada fecha de medición, los símbolos sobre las fechas del eje X indican el nivel de significancia estadística: * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$; ns = no significativo. Elaboración propia.

El análisis estadístico mediante la prueba t para muestras independientes reveló diferencias significativas ($P < 0,05$) entre tratamientos en la mayoría de las fechas evaluadas (Figura 9), específicamente los días 09-09, 11-09, 17-09, 26-09 y 07-10 de 2024, indicando que el déficit hídrico aplicado en T1 redujo significativamente la ETc en comparación con el riego completo (T2). En contraste, durante las fechas 23-09, 30-09, 02-10, 04-10, 08-10 y 15-10, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($P > 0,05$), lo que sugiere que en esos momentos el cultivo pudo mantener una tasa de transpiración similar entre tratamientos, probablemente debido a la disminución excesiva del contenido de agua en el suelo. Pessaraki (2014) indica que el cultivo de lechuga es una de las más sensibles al déficit de agua en el suelo (una disminución del 20 % del agua disponible ya afecta al cultivo) debido a su sistema radicular superficial, lo que se ve reflejado en el crecimiento de los tejidos y acumulación de materia seca, y por lo tanto el cultivo requiere que el contenido de agua sea cercano a capacidad de campo.

Los valores máximos de ETc observados inmediatamente después de los eventos de riego (por ejemplo, los días 26-09 y 07-10) coincidieron con valores más altos en T2, lo que evidencia un aprovechamiento óptimo del agua disponible. En cambio, T1 mostró una respuesta más variable y restringida, particularmente en los primeros días de estrés, cuando la humedad del suelo disminuyó rápidamente tras los riegos aplicados.

Estos valores también presentaron variaciones temporales asociadas a la fenología del cultivo y a las condiciones climáticas durante el periodo de evaluación. En general, T2 registró valores de ETc superiores en comparación con T1, reflejando una mayor disponibilidad de agua en el suelo y, por consiguiente, una respuesta fisiológica más favorable del cultivo.

Estos resultados son coherentes con lo reportado por el INIA (2017) en donde se indica que el cultivo de lechuga requiere de riego frecuente para reponer la humedad perdida por evapotranspiración. Además, estudios evidenciaron que los coeficientes de cultivo (Kc) para lechuga en invernadero eran menores a los estimados en condiciones de campo, lo cual muestra la importancia de ajustar los

requerimientos hídricos conforme al microclima específico (Casanova M *et al.*, 2009).

En conjunto, los resultados obtenidos reafirman la relación directa entre la disponibilidad hídrica y la respuesta fisiológica del cultivo. T2 permitió mantener un balance hídrico más estable y una mayor tasa de evapotranspiración, por lo tanto, la reposición completa de la lámina de riego se presenta como la estrategia más adecuada para maximizar el uso eficiente del agua y sostener la productividad del cultivo de lechuga en sistemas controlados.

Por último, los hallazgos de esta investigación hacen posible sugerir valores numéricos que se puedan usar para gestionar el riego en cultivos de lechuga bajo invernadero. En el tratamiento con déficit (50 % ETc), la evapotranspiración real, medida a través de lisímetros de drenaje, presentó un promedio de 0,116 L/planta/día, mientras que en el tratamiento con reposición completa (100 % ETc) fue de 0,196 L/planta/día. Para la planificación del riego en sistemas de producción similares, estos valores constituyen una referencia, ya que representan las tasas máximas de demanda hídrica observadas bajo los requerimientos particulares de este estudio que son: en invernadero, tipo acephala Dill, manejo estandarizado y condiciones ambientales entre septiembre y octubre.

Bajo este contexto, se aconseja a los productores de lechuga en invernaderos que tengan en cuenta el valor de 0,196 L/planta/día como límite para la gestión del riego cuando la demanda es máxima, particularmente durante las fases más avanzadas del cultivo, cuando es mayor la superficie foliar. Este valor puede ser utilizado para diseñar y dimensionar sistemas de riego presurizado, así como para programar diariamente el riego.

Los valores presentados aquí son instrumentos útiles para la agricultura protegida, ya que proporcionan datos reales y cuantificables que permiten un uso más eficaz del agua sin perjudicar la productividad. Así, el presente estudio no solo ayuda a comprender el balance hídrico del cultivo de lechuga, sino que además proporciona parámetros técnicos que se pueden utilizar para diseñar y manejar el riego en invernaderos.

CONCLUSIONES

Este estudio permitió comprender el comportamiento hídrico del cultivo de lechuga considerando todos los componentes y la relación con su desarrollo, bajo condiciones controladas con el uso de lisímetros de drenaje.

El balance hídrico reveló que el riego completo (100 % ETc) correspondió a una evapotranspiración continuamente más alta, lo que indica una mayor disponibilidad de agua y permite el desarrollo del potencial fisiológico del cultivo. En cambio, el tratamiento con déficit (50 % ETc) mostró valores de ETc más bajos, lo que indica limitaciones en el proceso de transpiración y, por lo tanto, una disminución en la demanda evaporativa real del cultivo. Estos resultados validan que la reposición total de la lámina de riego asegura un funcionamiento hídrico adecuado.

Se notaron también diferencias importantes entre los componentes de rendimiento en los diferentes tratamientos. El riego completo favoreció que las plantas alcanzaran un mayor peso fresco, una superficie foliar más amplia y un desarrollo más homogéneo, en cambio, el déficit hídrico disminuyó el rendimiento, evidenciando signos moderados de estrés por falta de agua. Esto indica que la disponibilidad de agua es fundamental para el desarrollo de las plantas y para maximizar el rendimiento comercial de la lechuga.

Finalmente, a lo largo del ciclo, los tratamientos mostraron diferentes necesidades de agua. El tratamiento con riego completo requirió volúmenes acumulados más altos para mantener la evapotranspiración y el desarrollo, mientras que el tratamiento con déficit disminuyó significativamente el consumo de agua total, aunque a expensas de un rendimiento reducido. Así, se evidencia que, aunque es factible reducir la cantidad de agua utilizada, este enfoque supone un compromiso directo con la productividad del cultivo.

En resumen, los resultados muestran que la mejor estrategia para maximizar el balance hídrico y la productividad de lechuga en condiciones controladas es regar al 100 % de ETc. Sin embargo, el riego deficitario podría ser visto como una opción en situaciones donde la eficiencia hídrica sea más importante que la producción máxima, siempre y cuando se consientan disminuciones en los niveles de biomasa

y calidad comercial. Estos descubrimientos ayudan a tomar decisiones más informadas para gestionar el agua de manera racional en cultivos hortícolas bajo invernadero.

REFERENCIAS

1. AlKhader, A. M., & Abu Rayyan, A. M. (2013). Improving water use efficiency of lettuce (*Lactuca sativa* L.) using phosphorous fertilizers. *SpringerPlus*, 2(1), 563.
2. Allen, R. G. (2000). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: F.A.O.
3. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO.
4. Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A., & Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899–920.
5. Bilbao, M. L., & Frezza, D. (2022). *Lechuga*. Buenos Aires: Ediciones INTA.
6. Borrero Tamayo, G. A., Jiménez, J., Ricaurte, J. J., Rivera, M., Polanía, J. A., Núñez, J., Barbosa, N., Arango, J., Cardoso, J. A., Rao, I. M. (2017). *Manual de protocolos. Nutrición y fisiología de plantas - Forrajes y fríjol*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
7. Buenrostro-Curiel, J., Montazar, A., Avilés-Marín, S. M., Escobosa-García, M. I., Brígido-Morales, J. G., & Soto-Ortiz, R. (2025). Rendimiento de Lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo diferentes láminas de riego y dosis de nitrógeno en el Valle Imperial, California. *Terra Latinoamericana*, 43.
8. Casanova M., Messing, I., Joel, A., & Cañete, A. (2009). Methods to estimate lettuce evapotranspiration in greenhouse conditions in the central zone of Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69, 60 – 70.
9. Cifuentes Quintero, O. (2019). *Estrategias pedagógicas para el uso eficiente del agua a través de la resolución de problemas*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
10. Cleves Leguizamón, J. A., Martínez Bernal, L. F., & Toro C., J. (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1).

11. Fernández López, A., Soler-Méndez, M., Ojates, M. J., Molina-Martínez, J. M., & Ruiz-Canales, A. (2019). Determinación del consumo de agua en lechuga (*Lactuca Sativa* L. cv. Neruda) mediante lisimetría de pesada compacta y sondas de humedad. *Congreso Ibérico de Agroingeniería*, 680–685.
12. Lazarovitch, N., Ben-Gal, A., & Shani, U. (2006). An Automated Rotating Lysimeter System for Greenhouse Evapotranspiration Studies. *Vadose Zone Journal*, 5(2), 801–804.
13. Levin, S. B., Briggs, M. A., Foks, S. S., Goodling, P. J., Raffensperger, J. P., Rosenberry, D. O., Scholl, M. A., Tiedeman, C. R., & Webb, R. M. (2023). Uncertainties in measuring and estimating water-budget components: Current state of the science. *WIREs Water*, 10(4).
14. Michelon, N., Pennisi, G., Ohn Myint, N., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2020). Strategies for Improved Water Use Efficiency (WUE) of Field-Grown Lettuce (*Lactuca sativa* L.) under a Semi-Arid Climate. *Agronomy*, 10(5), 668.
15. Molina-Montenegro, M. A., Zurita-Silva, A., & Oses, R. (2011). Effect of water availability on physiological performance and lettuce crop yield (*Lactuca sativa*). *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 38(1), 65 - 74.
16. Na, W., & Yoo, C. (2023). Real-time bias correction of rainfall nowcasts using biward tracking method. *Journal of Hydrology*, 622, 129642.
17. Nóbrega, J. S., Figueiredo, F. R. A., Nascimento, R. G. S., Bruno, R. D. L. A., Alves, E. U., & Cavalcante, L. F. (2018). Qualidade fisiológica de sementes de melão pepino sob salinidade crescente da água de irrigação. *Revista de Ciências Agrárias*, 41(4), 1011-1018.
18. Pessarakli, M. (Ed.). (2014). *Handbook of plant and crop physiology*. Boca Raton, FL: CRC press.
19. Premuzic, Z., Gárate, A., & Bonilla, I. (2002). Production of lettuce under different fertilisation treatments, yield and quality. *Acta Horticulturae*, (571), 65 – 72.
20. Resh, H. M. (2013). *Hydroponic food production : A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. Boca Raton, FL: CRC Press.
21. Sadzawka, A., Carrasco, M., Demanet R., Flores, H., Grez, R., Mora, M. L., & Nearnan, A., (2007). *Métodos de análisis de tejidos vegetales*. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
22. Saavedra del Real, G., Corradini, F., Antúnez, A., Felmer, S., Estay, P., & Sepúlveda, P. (2017). *Manual de producción de lechuga*. Santiago, Chile: INIA.

23. Sepaskhah, A. R., & Taftah, A. (2012). Yield and nitrogen leaching in rapeseed field under different nitrogen rates and water saving irrigation. *Agricultural Water Management*, 112, 55 – 62.
24. Sesveren, S., & Taş, B. (2022). Response of *Lactuca Sativa* var. *crispa* to deficit irrigation and leonardite treatments. *All Life*, 15(1), 105 – 117.
25. Villa e Vila, V., Marques, P. A. A., Gomes, T. M., Nunes, A. F., Montenegro, V. G., Wenneck, G. S., & Franco, L. B. (2024). Deficit Irrigation with Silicon Application as Strategy to Increase Yield, Photosynthesis and Water Productivity in Lettuce Crops. *Plants*, 13(7), 1029.
26. Villagrán, M. M. (2023). *Boletín de hortalizas*, Santiago, Chile: ODEPA.
27. Win, K. T., Oo, A. Z., Ohkama-Ohtsu, N., & Yokoyama, T. (2018). *Bacillus pumilus* strain TUAT-1 and nitrogen application in nursery phase promote growth of rice plants under field conditions. *Agronomy*, 8(10), 216.