

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**FENOTIPIFICACIÓN AÉREA DE LA CONTRIBUCIÓN DE DIFERENTES  
PORTAINJERTOS DE *Lagenaria siceraria* A LA TOLERANCIA AL DÉFICIT  
HÍDRICO EN PLANTAS INJERTADAS DE SANDÍA.**

**POR**

**JORGE ANTONIO PINO DÍAZ**

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

**CONCEPCIÓN, CHILE  
2025**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**FENOTIPIFICACIÓN AÉREA DE LA CONTRIBUCIÓN DE DIFERENTES  
PORTAINJERTOS DE *Lagenaria siceraria* A LA TOLERANCIA AL DÉFICIT  
HÍDRICO EN PLANTAS INJERTADAS DE SANDÍA.**

**POR**

**JORGE ANTONIO PINO DÍAZ**

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

**CONCEPCIÓN, CHILE  
2025**

Aprobada por:

Profesor Asociado, Susana Fischer G.  
Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

---

Guía

Guillermo Toro A.  
Ing. Agrónomo, Dr.

---

Guía externo

Profesor Asistente, Mathias Kuschel O.  
Ing. Civil Agrícola, Dr.

---

Asesor

Profesor Asistente, Paula Vásquez T.  
Ing. Agrónomo, Mg.

---

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.  
Ing. Agrónomo, Mg. Sc.

---

Decano

## **RECONOCIMIENTOS**

Esta tesis fue financiada con recursos del Centro de Estudios Avanzados en Fruticultura perteneciente al gobierno regional de O'Higgins y a la red de centros regionales ANID.

**TABLA DE CONTENIDOS**

	<b>Páginas</b>
RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
CONCLUSIONES.....	25
REFERENCIAS.....	26
ANEXOS.....	31

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		<b>Páginas</b>
Figura 1	Planta de sandía injertada, bajo sistema de luz led y en cámara de crecimiento.....	8
Figura 2	Imagen desde el campo con la instalación del mulch bicapa sobre las hileras y dron multiespectral usado en el experimento.....	9
Figura 3	Diseño de bloques completamente al azar.....	10
Figura 4	Muestreo de puntos de imágenes multiespectrales y muestreo de puntos de imágenes termales.....	13
Figura 5	Comparación de cuatro índices multiespectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de <i>Lagenaria siceraria</i> (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 41 días después de la plantación (DDP).....	14
Figura 6	Comparación de cuatro índices multiespectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de <i>Lagenaria siceraria</i> (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 41 días después de la plantación (DDP).....	15
Figura 7	Comparación de cuatro índices multiespectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de <i>Lagenaria siceraria</i> (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 48 días después de la plantación (DDP).....	16

Figura 8	Comparación de cuatro índices multiespectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de <i>Lagenaria siceraria</i> (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 60 días después de la plantación (DDP).....	18
Figura 9	Comparación de cuatro índices multiespectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de <i>Lagenaria siceraria</i> (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 76 días después de la plantación (DDP).....	19
Figura 10	Comparación de cuatro índices multiespectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de <i>Lagenaria siceraria</i> (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 83 días después de la plantación (DDP).....	20
Figura 11	Comparación de cuatro índices multiespectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de <i>Lagenaria siceraria</i> (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 90 días después de la plantación (DDP).....	21
Figura 12	Mapa de calor de las temperaturas promedio por portainjerto, tratamiento hídrico y días después de plantación.....	24
Tabla 1	Índices Multiespectrales y RGB .....	12

## FENOTIPIFICACIÓN AÉREA DE LA CONTRIBUCIÓN DE DIFERENTES PORTAINJERTOS DE *Lagenaria siceraria* A LA TOLERANCIA AL DÉFICIT HÍDRICO EN PLANTAS INJERTADAS DE SANDÍA

AERIAL PHENOTYPIFICATION OF THE CONTRIBUTION OF DIFFERENT *Lagenaria siceraria* ROOTSTOCKS TO WATER DEFICIT TOLERANCE IN GRAFTED WATERMELON PLANTS

**Palabras índices adicionales:** Estrés hídrico, Portainjerto, Dron termal, Dron multiespectral, Temperatura, Índice multiespectral

### RESUMEN

La falta de agua es un problema que afecta a diversos cultivos, entre ellos la sandía. Una opción para mitigar el efecto del estrés hídrico es el uso de portainjertos. El uso de imágenes multiespectrales y termales ha dado resultados en identificar estrés hídrico en cultivos agrícola. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de distintos portainjertos de *Lagenaria siceraria* sobre los índices multiespectrales y la temperatura foliar de plantas injertadas de sandía para identificar que portainjertos generan tolerancia al déficit hídrico. En el caso de los índices multiespectrales, Illapel obtuvo valores significativamente mayores para los días 41, 48, 76, 83 y 90 en al menos uno de los índices medidos (NDVI, MCARI, VARI, LCI). En el caso de Osorno, este portainjerto obtuvo los valores más bajos para los días 76 y 90 para al menos un índice multiespectral. En el caso de la temperatura foliar, el tratamiento de déficit hídrico (WD) obtuvo temperaturas más bajas que el tratamiento bien regado (WW) para los días 60, 83 y 90. El portainjerto Illapel presentó en WW presentó las temperaturas más altas y Osorno WD las más bajas. Pelops, Philippines y BG48 mostraron temperaturas intermedias. El hecho de que Illapel obtuvo valores más altos de índices multiespectrales y también de temperatura podría indicar que es más eficiente en la producción de biomasa que los demás portainjertos.

### SUMMARY

Water scarcity is a problem that affects various crops, including watermelon. One strategy to mitigate the effects of water stress is the use of rootstocks. The use of

multispectral and thermal imaging has proven effective in identifying water stress in agricultural crops. The objective of this study was to evaluate the effect of different *Lagenaria siceraria* rootstocks on multispectral indices and leaf temperature of grafted watermelon plants to identify which rootstocks confer tolerance to water deficit. For the multispectral indices, the Illapel rootstock showed significantly higher values on days 41, 48, 76, 83, and 90 for at least one of the measured indices (NDVI, MCARI, VARI, LCI). In contrast, the Osorno rootstock recorded the lowest values on days 76 and 90 for at least one multispectral index. Regarding leaf temperature, the water deficit treatment (WD) showed lower temperatures than the well-watered treatment (WW) on days 60, 83, and 90. The Illapel rootstock under WW presented the highest temperatures, while Osorno under WD showed the lowest. Pelops, Philippines, and BG48 exhibited intermediate temperatures. The fact that Illapel showed both higher multispectral index values and higher leaf temperatures may suggest that it is more efficient in biomass production than the other rootstocks.

## **INTRODUCCIÓN**

Entre los distintos tipos estrés a los que las plantas se encuentran sometidas, la falta de agua es uno de los más importantes, debido a que un gran porcentaje de la biomasa está compuesta por agua, y además diversas funciones dependen de esta molécula (Seleiman et al., 2021). El estrés hídrico ocasiona problemas de crecimiento y desarrollo en las plantas, tales como retraso en la germinación, menor desarrollo de raíces, reducción del área foliar, senescencia temprana, menor número de frutos y deficiente llenado de estos, lo que finalmente afecta el rendimiento de los cultivos (Dietz et al., 2021).

La sequía es un fenómeno que se produce por una disminución prolongada en las precipitaciones, generando alteraciones en la cantidad de lluvia durante la temporada, en su distribución temporal y en la frecuencia de las precipitaciones (Wilhite et al., 2000). Este fenómeno se presenta en diferentes regiones del mundo, con impactos negativos en ámbitos social, económico y ambiental (Mishra & Singh, 2010). Se espera que los eventos de sequía aumenten en duración y frecuencia en Sudamérica (IPCC, 2022). En Chile, entre 1961 y 2021 se ha registrado una

reducción de un 4% en las precipitaciones por década (DGAC, 2023) y se proyecta que el promedio anual podría disminuir hasta un 40% hacia el final de este siglo (Garreaud et al., 2019), lo cual representa un escenario desfavorable para la agricultura.

Frente al escenario creciente de escasez hídrica, resulta esencial considerar el comportamiento de los cultivos más relevantes para la agricultura nacional. Entre estas, se encuentra la sandía (*Citrullus lanatus* (thunb.) matsum. & nakai). Esta es una especie que pertenece a la familia de las cucurbitáceas. Su origen y domesticación tuvieron lugar en África subsahariana, y su cultivo se realiza generalmente en zonas templadas y tropicales (Levi et al., 2017; Maynard & Maynard, 2000). En el año 2022, la producción mundial de sandía fue liderada por China con 60,5 millones de toneladas, seguida por Turquía con 3,4 millones e India con 3,3 millones (FAO, 2025). A nivel nacional, el cultivo de sandía registró una producción de 55.908 toneladas (FAO, 2025) distribuidas en 2.939 hectáreas, de las cuales cerca de un 46% se encuentran en la región de O'Higgins, seguida por la región del Maule con 37% y la región Metropolitana con cerca de un 10% (INE, 2023), por lo que casi la totalidad de la producción se concentra en la zona central del país.

Además de los desafíos relacionados con el estrés hídrico, el cultivo de sandía también enfrenta importantes amenazas fitosanitarias que afectan su rendimiento. Uno de los patógenos con mayor impacto en el rendimiento de la sandía es *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* (Ling et al., 2015), que afecta el sistema vascular, pudiendo causar la muerte de plantas o atrofiar su crecimiento, dependiendo del nivel de infestación (Everts et al., 2014). Una de las estrategias de manejo para enfrentar el problema causado por *F. oxysporum* es el uso de plantas injertadas. La especificidad de este patógeno para atacar únicamente a la sandía permite que el uso de portainjertos pertenecientes a otras cucurbitáceas evite la manifestación de la enfermedad (Martyn, 2014).

El uso de injertos, inicialmente concebido como una estrategia para combatir enfermedades del suelo, ha evolucionado hasta convertirse en una práctica agrícola ampliamente adoptada por sus múltiples beneficios. El uso de injertos en hortalizas

es una práctica común y se ha orientado en controlar el daño ocasionado por patógenos del suelo en cultivos de sandía en Corea y Japón en 1920 (Rivero et al., 2003). En la actualidad, esta técnica se utiliza en distintas partes del mundo con el objetivo de aumentar el rendimiento, mejorar la calidad de fruta y enfrentar el estrés biótico y abiótico de distintos cultivos hortícolas (Lee et al., 2010). Entre los beneficios de usar portainjertos están: una mayor tolerancia a la salinidad (Böhm et al., 2017), tolerancia a temperaturas por sobre y por debajo del óptimo del cultivo (Schwarz et al., 2010), resistencia patógenos del suelo (King et al., 2008) y tolerancia tanto al exceso de humedad como a la escasez de agua (Schwarz et al., 2010). En sandía, los portainjertos comerciales comúnmente utilizados corresponden a las especies *Lagenaria siceraria* y el híbrido *Cucurbita maxima* x *Cucurbita moschata*. Ambos tienden a conferir mayor vigor a la variedad injertada y a incrementar el rendimiento (Yetisir & Sari, 2003), lo que los convierte en una opción económicamente viable, a pesar de que el costo de las plantas injertadas es superior al de las plantas no injertadas (Galinato et al., 2016).

Además de los beneficios agronómicos generales, los portainjertos también pueden mejorar la tolerancia al estrés hídrico mediante mecanismos fisiológicos específicos (Kumar et al., 2017). A nivel fisiológico, la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> es un parámetro clave para identificar genotipos tolerantes al déficit hídrico, ya que depende de la conductancia estomática y/o la conductancia del mesófilo. Ambos parámetros disminuyen frente al estrés hídrico, por lo que aquellas plantas capaces de evitar o atenuar este descenso presentan mayor capacidad de soportar condiciones adversas (Penella et al., 2014). Padilla et al. (2023) observaron que, en cultivo de pimiento, los portainjertos tolerantes al ser sometidos a déficit hídrico regulan de mejor forma la apertura estomática en comparación con las plantas injertadas sobre la misma variedad. Esto provoca una menor pérdida de agua a través de las hojas y valores más alto de eficiencia en el uso del agua intrínseca.

A nivel anatómico y funcional, las raíces también cumplen un rol crucial en la respuesta de las plantas al estrés hídrico, especialmente en sistemas injertados. El uso de portainjertos vigoroso se puede traducir en sistemas radicales capaces de explorar estratos más profundos del suelo, accediendo a agua y nutrientes en zonas

donde las plantas no injertadas no logran llegar (Rouphael et al., 2008). Además, se ha observado que plantas de pepino injertadas sobre portainjertos de lufa pueden mostrar una mayor tolerancia al déficit hídrico, ya que se son más sensibles a las señales de estrés y son capaces de producir y movilizar ácido abscísico (ABA) desde las raíces hacia los brotes de forma más rápida. Esto permite una regulación estomática más temprana y eficiente (Liu et al., 2016).

A partir del reconocimiento del papel fundamental que juegan las raíces en la tolerancia al déficit hídrico, diversos estudios han enfocado su atención en caracterizar genotipos específicos de portainjertos. En el caso de *Lagenaria siceraria*, se han realizado investigaciones para identificar genotipos con mayor tolerancia al déficit hídrico. Mashilo and Shimelis (2018) mostraron que el contenido de cucurbitacinas I y E podría estar directamente relacionado con la capacidad de regular la apertura y cierre estomático, lo que incrementa la eficiencia en el uso del agua de la planta, además de ejercer un efecto protector frente al estrés oxidativo. Otro indicador de tolerancia a la baja disponibilidad hídrica es la mantención de elevada conductancia estomática y también de asimilación de CO<sub>2</sub>, ya que ambos parámetros disminuyen críticamente en déficit hídrico, afectando finalmente la productividad (Mashilo et al., 2017). Mkhize and Mangena (2024) observaron que, bajo condición de déficit hídrico, los genotipos que presentaban mayor concentración de proteínas en las hojas eran los que tenían mejor rendimiento bajo este régimen de agua.

Además de los indicadores fisiológicos y bioquímicos mencionados, el monitoreo del estado hídrico de las plantas puede complementarse con herramientas no destructivas como los índices multiespectrales. Estos índices permiten estimar de manera indirecta el estado hídrico de las plantas (Govender et al., 2009). Zhang and Zhou (2019) encontraron que índices como el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Tasa normalizada de borde rojo (NR) e índice de clorofila (CI) están relacionados con el contenido de agua de la canopia en maíz. No obstante, la correlación entre estos índices y otras mediciones del estado hídrico o vegetativo de la planta pueden variar según el tipo de cultivo analizado (Gago et al., 2015). Por ejemplo, Ballester et al. (2018) encontraron relaciones significativas entre NDVI y el

Índice de reflectancia fotoquímica (PRI) con la conductancia estomática y el potencial hídrico del tallo en almendros; sin embargo, estas relaciones no fueron significativas en cítrico. En el caso de las sandías, Genc et al. (2011) reportaron diferencias significativas en varios índices multiespectrales al someter el cultivo a 100 %, 80 %, 60 %, 40 %, 20 % y 0 % de la capacidad de campo.

Junto con el uso de los índices multiespectrales, las imágenes térmicas representan otra herramienta valiosa para el monitoreo del estado hídrico en los cultivos. Estas imágenes tienen múltiples aplicaciones en la agricultura, tales como la cuantificación del rendimiento, evaluación de las plantas frente a eventos de déficit hídrico, programación del riego, estimación de madurez de frutos y la detección de patógenos. Esto se debe a que la temperatura de las plantas se correlaciona con diversos procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la transpiración y el potencial hídrico de las hojas (Ishimwe et al., 2014; Messina & Modica, 2020). La detección del estrés hídrico mediante imágenes térmicas se basa en el supuesto que las plantas estresadas cierran sus estomas tempranamente, lo que reduce el flujo de vapor de agua desde la hoja hacia la atmósfera (principal sistema de enfriamiento de la planta), y en consecuencia, incrementa la temperatura de la canopia (Nemeskéri & Helyes, 2019; Zhou et al., 2021).

Considerando el impacto del déficit hídrico en la agricultura y la creciente necesidad de implementar estrategias sostenibles de manejo, el uso de portainjertos tolerantes y tecnologías de monitoreo remoto se presenta como una alternativa prometedora. En particular, las plantas injertadas de sandía podrían beneficiarse del vigor radicular y la eficiencia hídrica conferida por ciertos genotipos de *Lagenaria siceraria*, especialmente bajo condiciones de déficit hídrico. Sin embargo, aún se requiere profundizar en cómo estos portainjertos influyen en parámetros fisiológicos detectables mediante sensores remotos, como la reflectancia espectral y la temperatura foliar. La integración de imágenes multiespectrales y térmicas ofrece una herramienta no invasiva para monitorear en tiempo real el estado de los cultivos. De este modo, se puede identificar de manera más precisa la respuesta diferencial de las plantas injertadas frente a distintas condiciones de disponibilidad hídrica, lo que permitiría optimizar las decisiones

agronómicas en campo. Bajo este contexto, se plantea como hipótesis que los índices multiespectrales y termales varían significativamente en función del estado hídrico del suelo en plantas de sandía injertadas sobre diferentes portainjertos de *Lagenaria siceraria*. De acuerdo con los antecedentes entregados, el objetivo general de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes portainjertos de *Lagenaria siceraria* sobre los índices multiespectrales y temperatura foliar de plantas de sandía injertadas bajo dos condiciones de disponibilidad hídrica. Para ello se trabajó en producir plantas injertadas de sandía utilizando diferentes genotipos locales de *Lagenaria siceraria* como portainjertos, y establecerlas en condiciones de campo bajo distintos regímenes hídricos evaluar la respuesta a las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica de las plantas de sandía a través de la captura de imágenes multiespectrales y termales durante el desarrollo del cultivo y determinar las diferencias de índices multiespectrales y temperatura entre los distintos portainjertos y regímenes de agua.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Material vegetal y condiciones ambientales de injertación**

Se utilizaron cuatro genotipos locales de *Lagenaria siceraria*, dos chilenos “Illapel” y “Osorno”, un Sudafricano “BG-48”, un Filipino “Philippines”; y el genotipo comercial “Pelops”. Todos estos portainjertos fueron injertados con la variedad de sandía “Santa Amelia”. Las plantas injertadas se produjeron en su totalidad en el Centro de Estudios Avanzados en Fruticultura (CEAF). En primer lugar, las semillas de todos los genotipos se germinaron en almácigueros de 73 cc de volumen alveolar, con una mezcla de sustrato 1:1 de turba y perlita. Para la germinación, las bandejas se dejaron en una cámara de crecimiento con control de clima, manteniendo una radiación bajo luces LED de espectro completo Valoya B200 (Valoya Oy, Helsinki, Finland), con temperatura del aire de 25 °C y una humedad relativa de 60%, hasta que las plántulas tuvieron una hoja verdadera. Posteriormente, las plantas se injertaron con el método de un cotiledón (Devi et al., 2020). Luego de la injertación,

las plantas se mantuvieron durante 7 días sobre un mesón en la cámara de crecimiento y al interior de cajas de plástico para asegurar una alta humedad relativa en el ambiente (95%) y asegurar una buena cicatrización entre el portainjerto y la variedad (Figura 1). Al finalizar este periodo, las plantas se llevaron a un invernadero con control de temperatura y humedad relativa para aclimatarlas al ambiente.

Figura 1. Planta de sandía injertada, bajo sistema de luz led y en cámara de crecimiento.



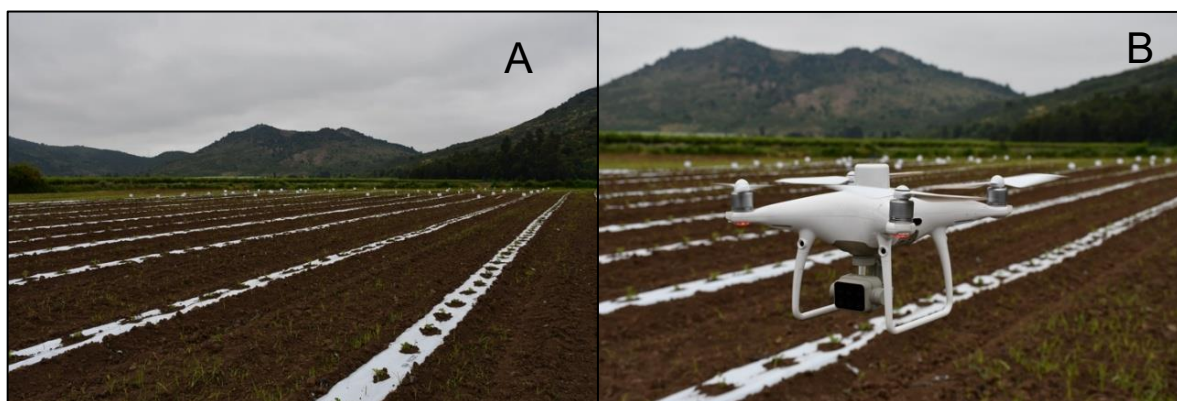
### **Experimento en campo, condición ambiental y tratamientos**

El experimento se realizó en el sector de Tierra Chilena ( $34^{\circ}44'38,65''$  S y  $71^{\circ}09'51,6''$  O) comuna de Nancagua, Región de O'Higgins. El manejo del cultivo a nivel de control de malezas y aplicaciones fitosanitarias se dejó a cargo del agricultor bajo las mismas prácticas que para un cultivo productivo.

El experimento se realizó en  $540\text{ m}^2$  de superficie, y se estableció en marco de plantación de 0,6 m de distancia sobre la hilera y a 1,5 m de distancia entre las hileras. A lo largo de cada hilera se instaló un mulch bicapa blanco/negro (color

blanco hacía el cultivo, color negro hacia el suelo) (Figura 2A). Todas las plantas se sometieron a dos tratamientos de disponibilidad hídrica; condición bien regada (WW) y en déficit hídrico (WD). La condición de bien regada se dejó con dos cintas de riego por cada hilera, mientras que las plantas en condición de déficit hídrico se dejaron con solo una cinta de riego. El contenido volumétrico de agua en el suelo se monitoreó con sonda TDR-310W (Acclima Inc., Meridian, USA) de 20 cm de largo. Se hicieron 6 visitas al campo para los siguientes días después de la plantación: 04/12/24 (41 días DDP), 11/12/24 (48 DDP), 23/12/24 (60 DDP), 08/01/25 (76 DDP), 15/01/25 (83 DDP) y 22/01/25 (90 DDP) donde se realizaron las mediciones con las cámara multiespectral y termal.

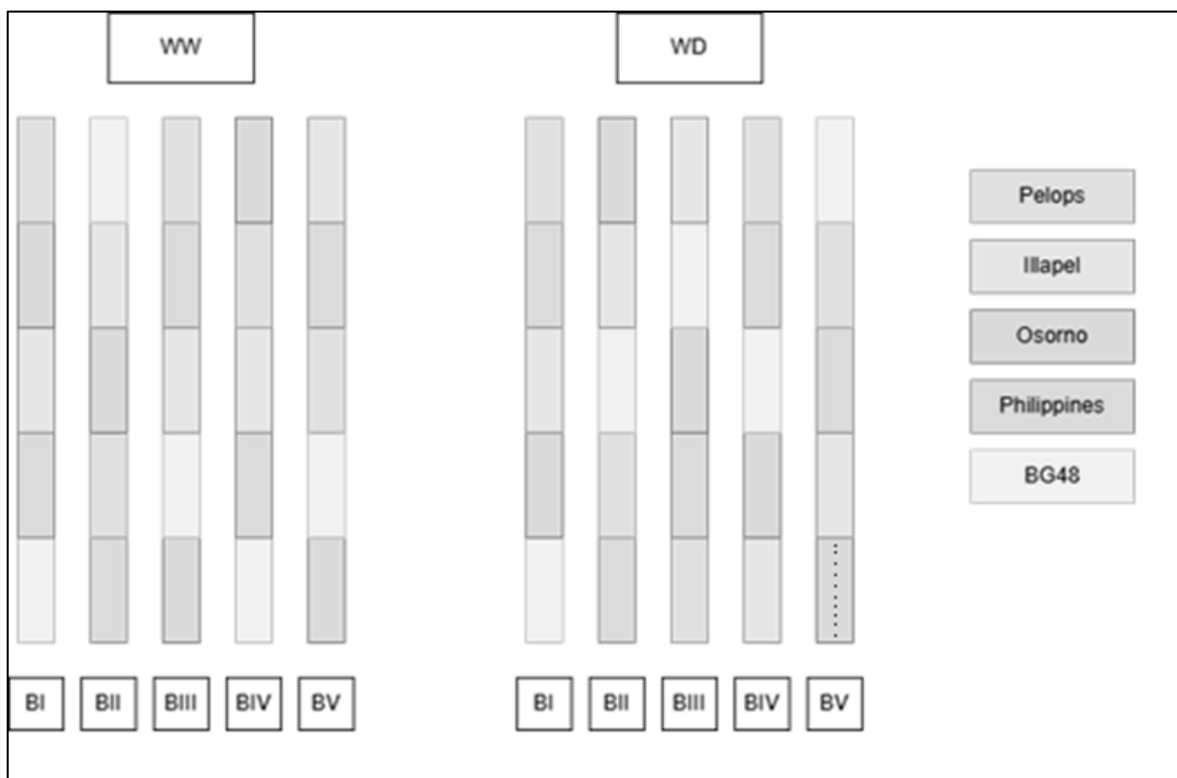
Figura 2. A) Imagen desde el campo con la instalación del mulch bicapa sobre las hileras. B) Dron multiespectral usado en el experimento.



### Diseño de experimento

El estudio se realizó en un diseño en bloques completos al azar con un arreglo factorial 2x5; disponibilidad hídrica (bien regado y déficit hídrico); (portainjerto, (cinco genotipos locales) (Figura 3). Debido a la disponibilidad de suelo y opciones de riego, los tratamientos de disponibilidad hídrica fueron separados en dos parcelas. En ambas parcelas, se trabajó con 5 bloques, y cada bloque tuvo 5 repeticiones de cada portainjerto. Para facilitar el análisis desde el dron, se plantaron 10 plantas por cada bloque (Figura 3). Entonces, se usaron un total de 50 plantas por cada genotipo y en cada tratamiento. En total se utilizaron 500 plantas de sandía.

Figura 3. Diseño de bloques completamente al azar.



### Evaluaciones y adquisición de índices multiespectrales y termales y procesamiento de las imágenes

Las evaluaciones correspondieron a:

**Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).** Es uno de los índices más usados, está correlacionado con la condición de la vegetación y el índice de área foliar, se calcula usando el espectro rojo visible y el infrarrojo cercano (Liu et al., 2023).

**Índice de absorción de clorofila modificada en reflectancia (MCARI).** Es un índice más sensible a los cambios de clorofila, ya que incorpora la banda de borde rojo, la cual es más efectiva en detectar cambios en la concentración de clorofila que la banda roja visible. Se calcula usando la banda de borde rojo, el rojo y el verde. (Sharifi, 2020)

**Índice de clorofila foliar (LCI).** Es un índice capaz de identificar el vigor de las plantas y su contenido de clorofila, incorpora la banda roja, el infrarrojo cercano y el borde rojo para detectar estrés en las plantas (Gallardo-Salazar et al., 2023)

**Índice de resistencia atmosférica visible (VARI).** Es un índice que utiliza solo bandas del espectro visible. Se desarrolló para impedir el efecto de la atmosfera sobre el índice. Se calcula con la banda roja, verde y azul. (Costa et al., 2020)

**Temperatura de la canopia.** Las plantas bajo estrés hídrico tienden a cerrar sus estomas, disminuyendo la transpiración y aumentando así la temperatura de la hoja (Hoffmann et al., 2016).

Para la captura de las imágenes multiespectrales y termales se usaron drones Phantom 4 Multispectral y DJI Mavic 3 Thermal (Dajiang Innovation Technology Co. Ltd., China), respectivamente (Figura 2B). La cámara multiespectral opera con longitudes de onda desde los 450 nm a los 840 nm. El plan de vuelo se realizó usando la aplicación DJI GS Pro en iPad mini 5, en donde para cada vuelo se usó la siguiente configuración: 30 m de altura de vuelo, 15 Km h<sup>-1</sup> de velocidad y resolución de 1,6 cm por píxel. Los vuelos se realizaron cada siete días entre 1 y 2 pm. Las campañas de vuelo se realizaron el 04/12/24, 11/12/24, 23/12/24, 08/01/25, 15/01/25 y el 22/01/25 tratando de cubrir el periodo completo de crecimiento del cultivo.

Para el procesamiento de las imágenes multiespectrales se utilizó el software Pix4Dfields (Pix4D, Suiza), el cual realiza diferentes tipos de corrección radiométrica, en función de la disponibilidad de sensores de luz solar y condiciones meteorológicas. Para crear el ortomosaico, las imágenes obtenidas del área de estudio se procesaron mediante el software Pix4Dfields, que utiliza un canal de fotogrametría directo a ortomosaico optimizado para el procesamiento rápido de terrenos lisos a partir de imágenes de drones.

El cálculo de los valores de cada índice vegetal se realizó usando la función automatizada provista por el software Pix4Dfields, usando las ecuaciones que se muestran en la Tabla 1.

Con respecto a las imágenes termales, los datos (termales y RGB) se grabaron con una distancia de muestreo de terreno (del inglés Ground Sample Distance: GSD) de 1,98 cm pixel<sup>-1</sup>

Tabla 1. Índices Multiespectrales y RGB.

Tipo de Índice	Índice	Nombre	Fórmula
Multiespectral	NDVI	Normalized difference vegetation index	$(\text{NIR} - \text{Rojo}) / (\text{NIR} + \text{Rojo})$
	MCARI	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index	$((\text{NIR} - \text{Rojo}) - 0,2 * (\text{NIR} - \text{Verde})) * (\text{NIR} / \text{Rojo})$
	LCI	Leaf Chlorophyll Index	$(\text{NIR} - \text{RedEdge}) / (\text{NIR} + \text{RedEdge})$
RGB	VARI	Visual Atmospheric Resistance Index	$(\text{Verde} - \text{Rojo}) / (\text{Verde} + \text{Rojo} - \text{Azul})$

Las capturas se realizaron en días despejados y soleados cercanos al medio día solar. Para la obtención de los valores de temperatura, primero, las imágenes individuales se procesaron con el software ImageJ para cambiar el formato a TIFF, y así luego se usaron con este formato para generar el ortomosaico usando el software Agisoft Metashape.

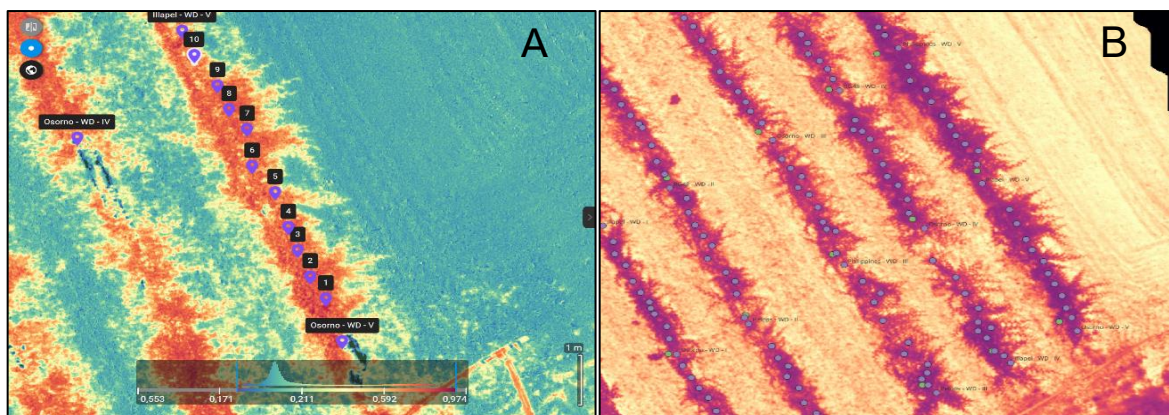
Posteriormente, para obtener los valores de temperatura, desde el software QGIS, se muestrearon puntos para extraer las temperaturas de cada bloque como se muestra en la Figura 4.

### **Análisis estadístico**

La comparación de las medias de los datos se realizó a través de un ANOVA de dos vías. En el caso de obtener diferencias significativas, se realizará una prueba de

comparaciones múltiples. Para el análisis estadístico y para las gráficas se utilizó software R (R, 2023)

Figura 4. A) Muestreo de puntos de imágenes multiespectrales. B) Muestreo de puntos de imágenes termales.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Índices multiespectrales

Se obtuvieron valores de NDVI, MCARI, LCI y VARI a partir de los vuelos multiespectrales realizados en las distintas fechas desde los 41 hasta los 90 días después de plantación (DDP) como se muestra en la Figura 5.

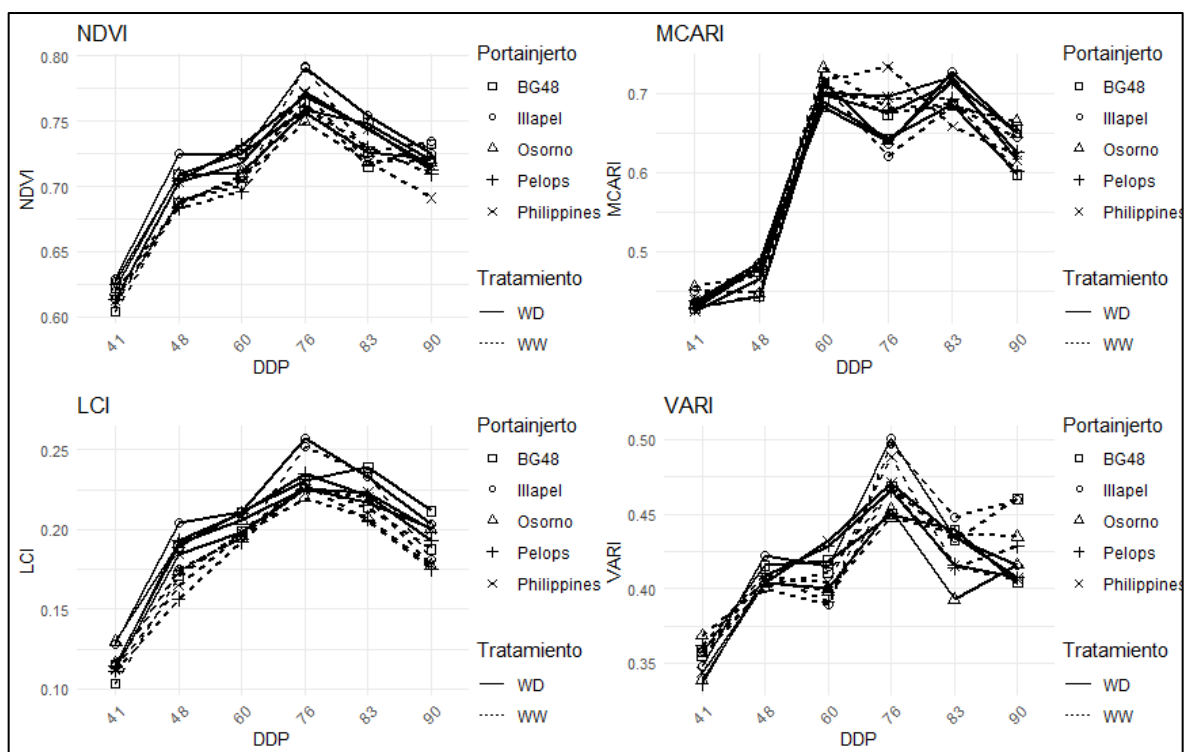
El portainjerto Illapel presentó valores más altos de NDVI, LCI y VARI, lo que sugiere un mejor desempeño en comparación con los otros portainjertos. Osorno mostró valores bajos a medios en estos índices, mientras que Philippines, Pelops y BG48 se ubicaron en rangos intermedios.

A los 41 DDP solo en LCI se observaron diferencias significativas (Figura 6). Illapel bajo condición de WD presentó una media de 0,128 y Osorno de 0,130, siendo ambos significativamente más alto ( $p \leq 0,05$ ) que BG48 en condición de WW con 0,103 (Figura 6).

Kaur et al. (2015) indicaron que este índice puede ser más sensible al contenido de clorofila por el hecho de incorporar la banda del borde rojo, además de tener buena correlación con el contenido total de clorofila. Es notable que MCARI también

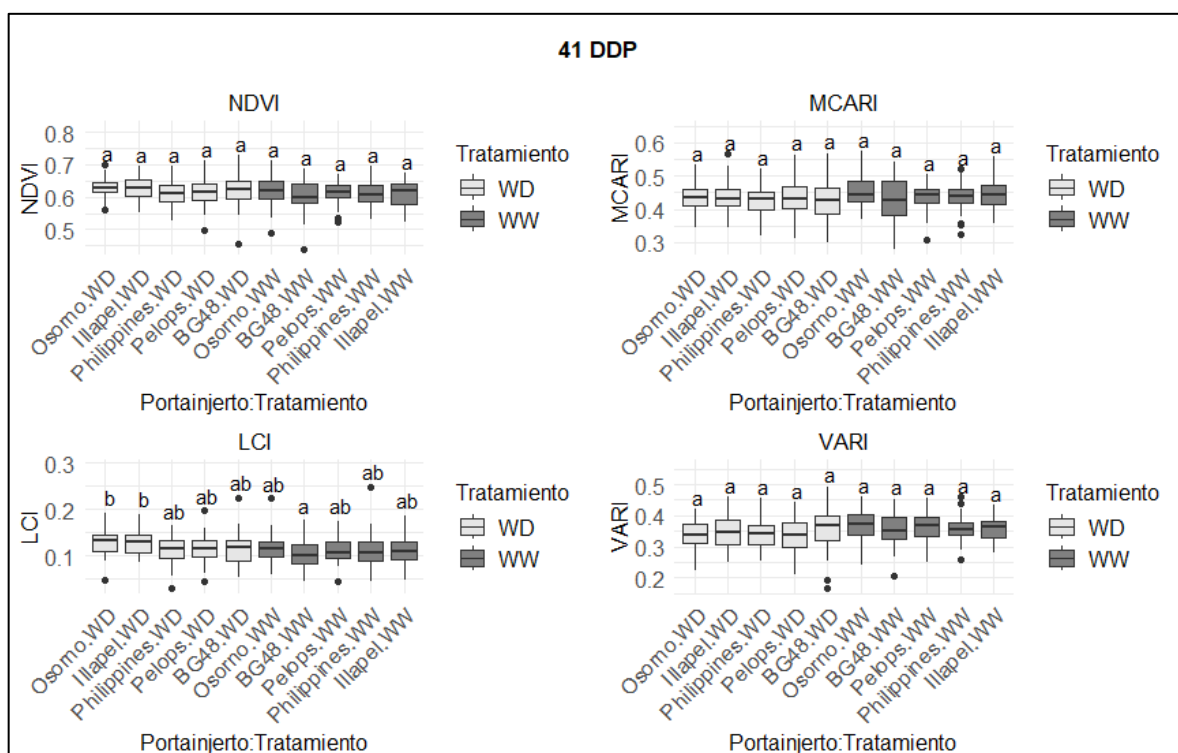
incorpora el borde rojo, pero no fue capaz de detectar diferencias para este día. Los demás índices multispectrales no detectaron diferencias para esta fecha.

Figura 5. Dinámica temporal de cuatro índices multispectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de *Lagenaria siceraria* (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), evaluadas bajo dos tratamientos de disponibilidad hídrica: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a lo largo del ciclo del cultivo (41 a 90 días después de la plantación, DDP).



A los 48 DDP, la interacción entre el régimen hídrico y el portainjerto mostró diferencias significativas para los NDVI y LCI. Illapel bajo condición de WD obtuvo el valor promedio más alto de NDVI (0,725;  $p \leq 0,05$ ) entre todas las combinaciones de portainjerto y tratamiento de disponibilidad hídrica. En el caso de LCI, Pelops bajo condición WW presentó los valores más bajos con una media de 0,156, mientras que Illapel bajo condición de WD registró los valores más altos (0,204;  $p \leq 0,05$ ).

Figura 6. Comparación de cuatro índices multispectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de *Lagenaria siceraria* (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 41 días después de la plantación (DDP).

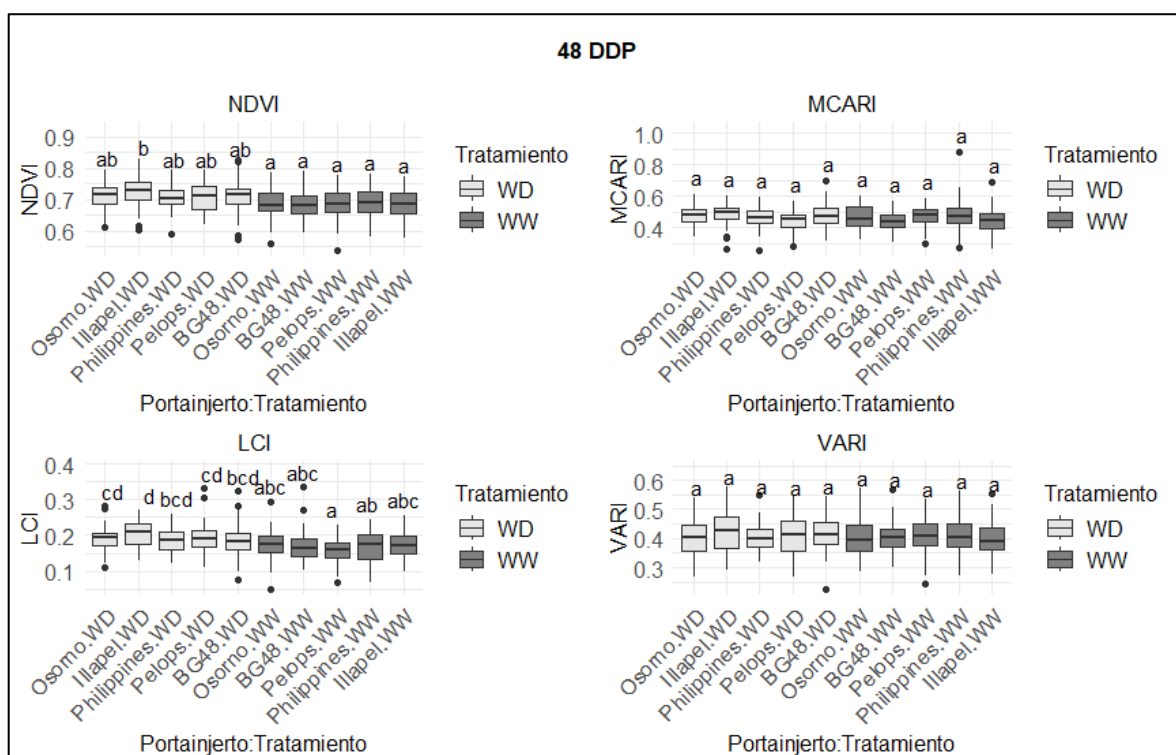


Las letras sobre las cajas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) según la prueba de Tukey.

A los 60 DDP, la interacción entre el régimen hídrico y el portainjerto evidenció diferencias significativas los índices NDVI y VARI. En NDVI, el portainjerto Pelops bajo condición de WD presentó el valor promedio más alto (0,732) y mientras que el mismo portainjerto en condición WW mostró el valor más bajo (0,695). Esta diferencia podría indicar una alta sensibilidad de Pelops a las condiciones limitantes de agua. En cuanto al índice VARI, el genotipo Philippines en condición de WD alcanzó el valor más alto con un promedio de 0,432. En contraste, Pelops e Illapel en condición de WW obtuvieron los valores más bajos, con 0,391 y 0,389, respectivamente.

A los 76 DDP, todos los índices multispectrales presentaron diferencias significativas.

Figura 7. Comparación de cuatro índices multispectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de *Lagenaria siceraria* (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 48 días después de la plantación (DDP).

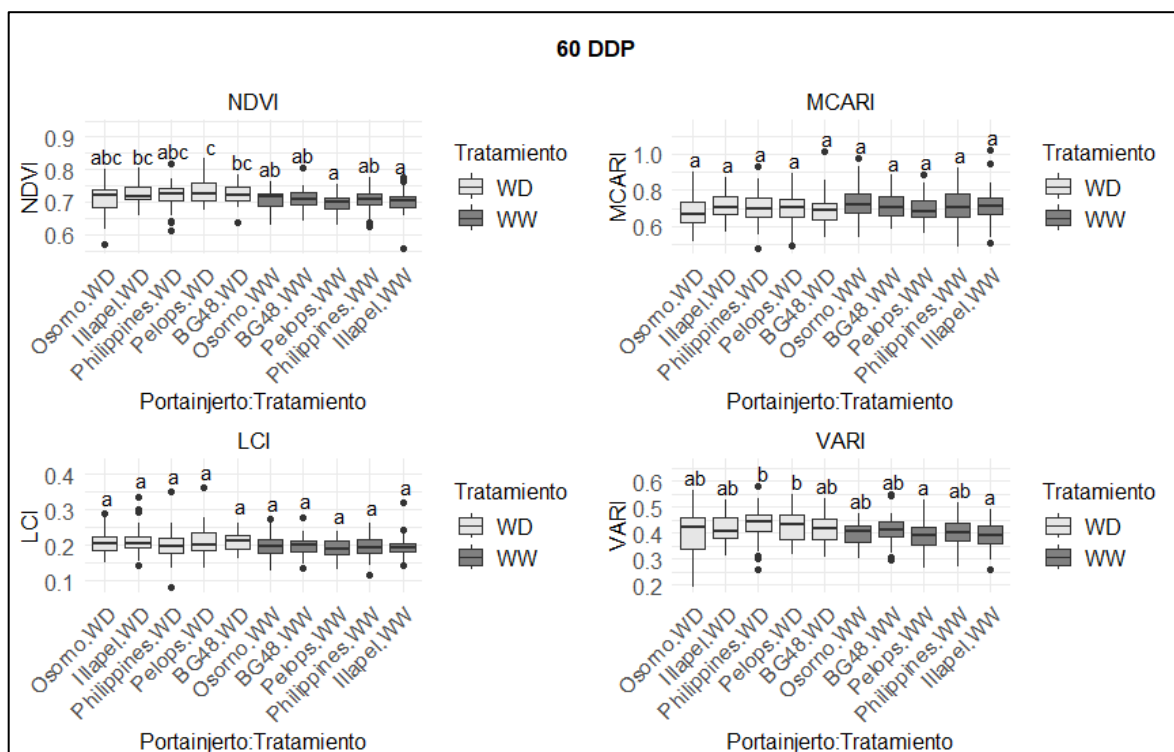


Las letras sobre las cajas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) según la prueba de Tukey.

Para NDVI, Illapel en ambas condiciones hídricas presentó los valores promedio más altos, alcanzando 0,791 en ambos casos, mientras que Osorno en condición WW el valor significativamente más bajo con 0,749. Para MCARI, los valores más bajos correspondieron a Illapel y Osorno en WD (0,636 y 0,640, respectivamente), en contraste con Philippines en WW, que obtuvo el valor más alto con 0,733. Para el LCI, Illapel en WD presentó el valor más alto (0,257), y Osorno en WW el más bajo (0,22;  $p \leq 0,05$ ). En cuanto a VARI, Illapel WD e Illapel WW alcanzaron los valores más altos con promedios de 0,500 y 0,497, respectivamente.

Por otro lado, BG48 WD y Osorno WW obtuvieron los valores más bajos, con 0,450 y 0,448, respectivamente ( $p \leq 0,05$ ). Es destacable que para este día los valores de MCARI hayan disminuido respecto a los días anteriores. Esto se puede explicar por una saturación del índice, ya que a concentraciones superiores a  $30 \mu\text{g cm}^{-2}$ , el valor de MCARI tiende a disminuir (Haboudane et al., 2002). Además, a los 76 DDP el cultivo se encontraba en la etapa de formación de frutos, la cual, es una de las etapas más sensibles para detectar diferencias mediante NDVI (Bernabé, 2023)

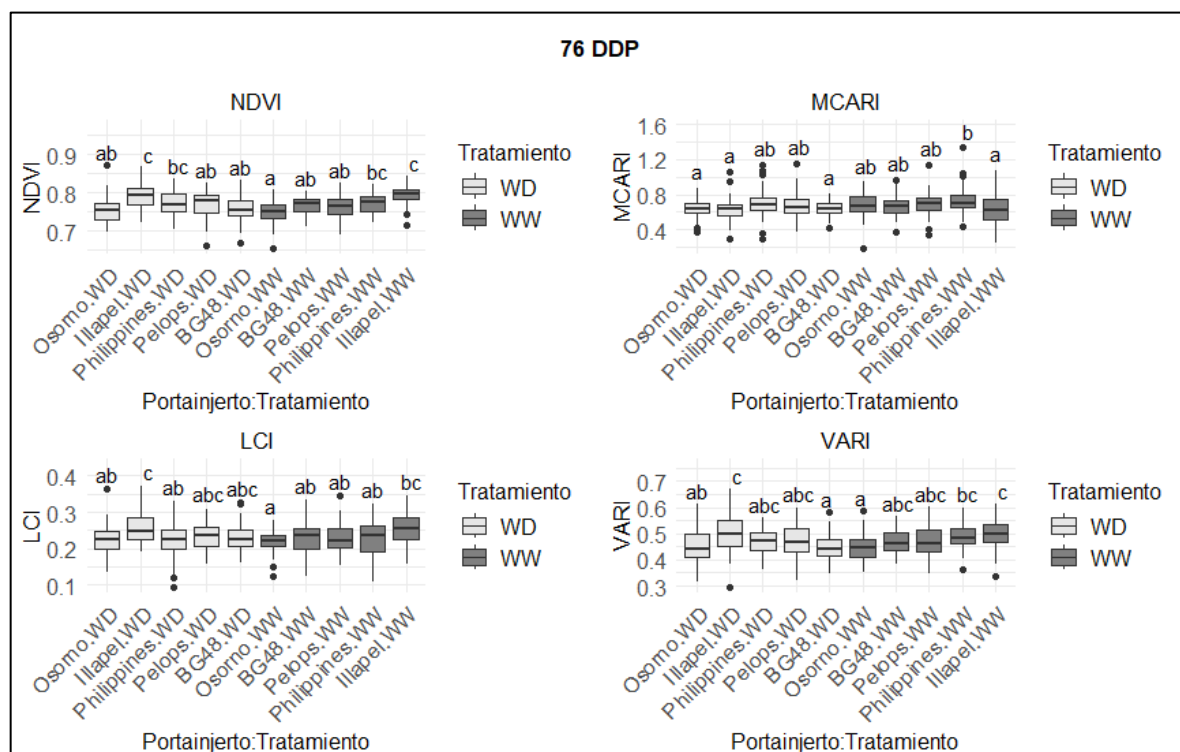
Figura 8. Comparación de cuatro índices multiespectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de *Lagenaria siceraria* (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 60 días después de la plantación (DDP).



Las letras sobre las cajas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) según la prueba de Tukey.

A los 83 DDP se observó una disminución general en los valores de todos los índices multispectrales, tendencia que continuó hasta los 90 DDP. Esta baja se puede atribuir al avance del cultivo hacia la maduración de frutos y el inicio de la senescencia, etapas en las que es común una reducción en los índices multispectrales (Kurbanov & Zakharova, 2021) En cuanto al NDVI, Illapel en condición de WD alcanzó el valor más alto con un promedio de 0,755, mientras que BG48 en WW registró el valor más bajo, con 0,715 ( $p \leq 0.05$ ). Para MCARI, Illapel en WD nuevamente presentó el valor más alto (0,728) y Philippines en WW el más bajo (0,658). En los índices LCI y VARI no se observaron diferencias significativas en la interacción para esta fecha.

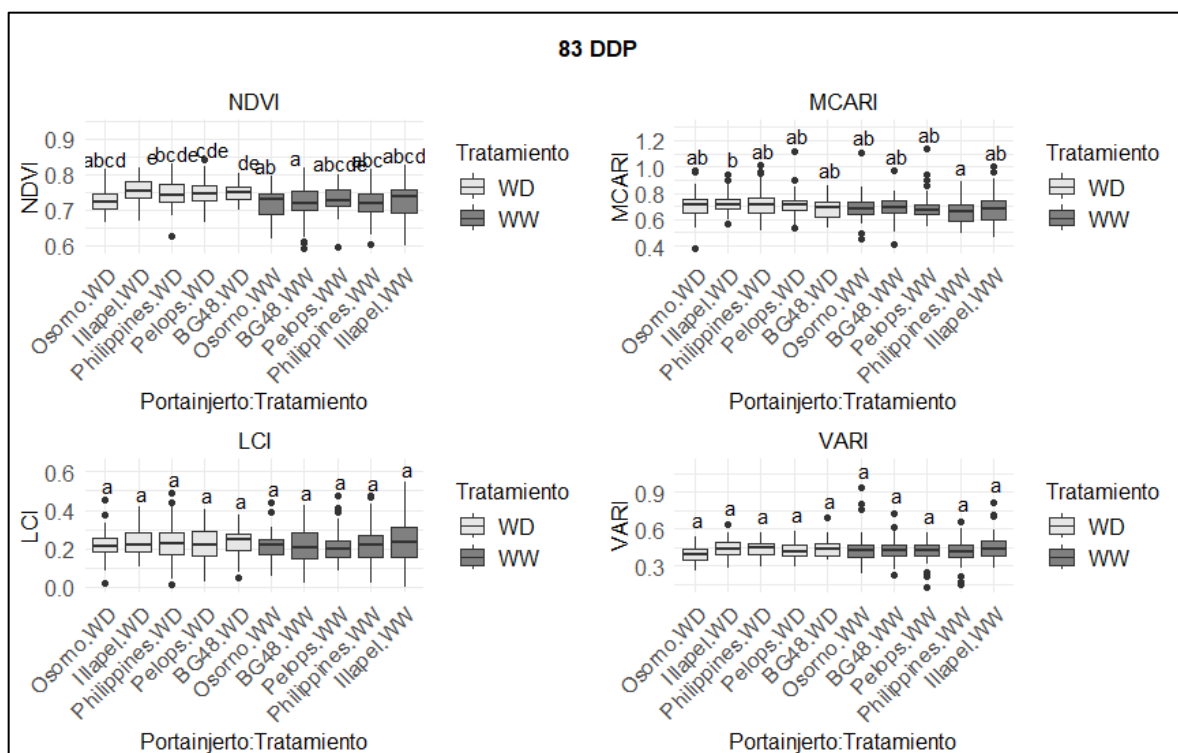
Figura 9. Comparación de cuatro índices multispectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de *Lagenaria siceraria* (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 76 días después de la plantación (DDP).



Las letras sobre las cajas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) según la prueba de Tukey.

A los 90 DDP se obtuvieron diferencias para NDVI, LCI y VARI. En NDVI, BG48 WW e Illapel WW obtuvieron los valores más altos con un promedio de 0,732 y 0,734 respectivamente y Philippines WW los valores más bajos con 0,691. Para LCI BG48 WD obtuvo los valores más altos con 0,212 y Osorno WW, Illapel WW, Philippines WW y Pelops WW los valores significativamente más bajos con 0,177, 0,181, 0,178 y 0,175 respectivamente. Para el caso de VARI, BG48 WW obtuvo los valores más altos junto con Illapel WW con 0,46 para ambos casos, contra Philippines WD, Pelops WD, BG48 WD y Philippines WW con 0,408, 0,407, 0,404 y 0,406 respectivamente.

Figura 10. Comparación de cuatro índices multispectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de *Lagenaria siceraria* (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 83 días después de la plantación (DDP).



Las letras sobre las cajas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) según la prueba de Tukey.

De los dos tratamientos de riego, a pesar de existir diferencias significativas entre ellos para distintos días, es probable que ninguno de los dos haya llegado a estrés hídrico. Un estudio realizado por Mndela et al. (2023) indica que valores de NDVI cercanos a 0,6 o 0,65 están relacionados con entre un 85 % a 90 % de contenido de agua relativo (RWC) y que valores de NDVI cercanos a 0,45 estarían en el punto de marchitez con un 60 % de RWC, lo que está lejos de los valores de 0,6 a 0,8 de NDVI alcanzados en diferentes días por distintos portainjertos.

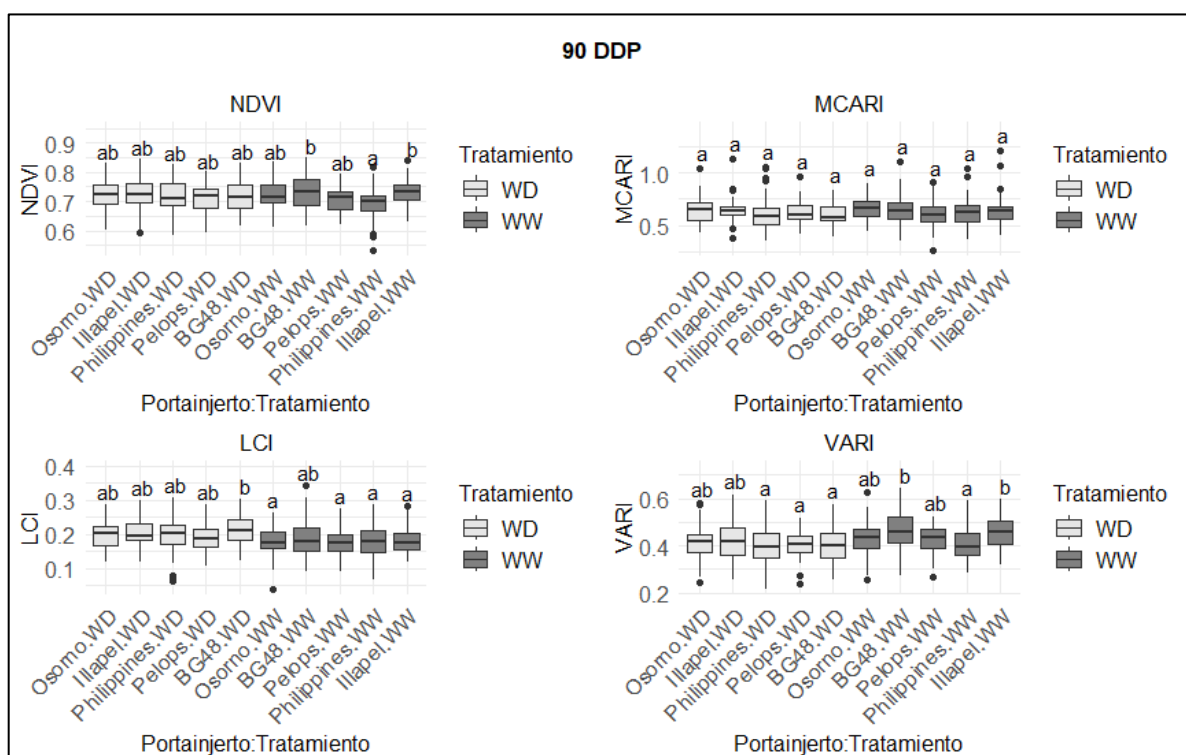
De todos los portainjertos, Illapel destaca ya que logró tener los valores más altos para los 41, 48, 76, 83 y 90 días después de plantación en al menos un índice y/o tratamiento. Osorno obtuvo valores más bajos en general a los 76 y 90 DDP para NDVI y LCI respectivamente. Los demás portainjertos obtuvieron valores medios para distintos índices. El hecho de que Illapel haya tenido un mejor desempeño que Osorno podría deberse a las zonas climáticas de donde provienen; Illapel proviene de clima caluroso y seco que es más parecido al panorama de nuestra región durante primavera y verano versus el clima frío y húmedo del que proviene el portainjerto Osorno.

### **Mapeo térmico del cultivo de sandía**

Se construyó un mapa de calor para visualizar la temperatura promedio registrada en cinco genotipos locales de *Lagenaria siceraria* a lo largo de distintos días desde la plantación (DDP), bajo condiciones de riego (WW) y déficit hídrico (WD). En general, se observaron temperaturas más altas bajo la condición WW, especialmente entre los 60 y 83 DDP, donde la mayoría de los portainjertos alcanzaron valores cercanos o superiores a 35 °C. En contraste, bajo WD, las temperaturas fueron más bajas en las primeras fechas, con un aumento progresivo hacia los 83 y 90 DDP, sugiriendo una respuesta fisiológica asociada al cierre estomático y menor enfriamiento por transpiración en el caso de WW (De Boeck et al., 2016). Illapel y Philippines presentaron los valores más altos bajo WW, superando los 36 °C a los 60 DDP, mientras que Osorno mostró un incremento sostenido bajo WD, alcanzando los 33,6 °C a los 83 DDP. Estos resultados indican diferencias en la dinámica térmica de los portainjertos frente al estrés hídrico, lo cual

podría reflejar variaciones en su comportamiento estomático y eficiencia en el uso del agua (Yang et al., 2021).

Figura 11. Comparación de cuatro índices multispectrales (NDVI, MCARI, LCI y VARI) en plantas de sandía injertadas sobre cinco genotipos locales de *Lagenaria siceraria* (Illapel, Osorno, BG-48, Philippines y Pelops), sometidas a dos condiciones hídricas: déficit hídrico (WD) y bien regado (WW), a los 90 días después de la plantación (DDP).



Las letras sobre las cajas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) según la prueba de Tukey.

En los datos termales, las plantas con el tratamiento WD tuvieron valores más bajos de temperatura. Si bien esto es contrario a lo esperable, se puede explicar desde un problema experimental en que la napa freática estaba a una profundidad de 0,6 m por lo que las plantas bajo déficit hídrico desarrollaron un sistema radicular más profundo que las plantas bien regadas, lo que les permitió obtener más agua.

A pesar del problema, tanto las mediciones termales como las multispectrales fueron capaces de detectar estas diferencias entre ambos tratamientos hídricos, lo que lo hacen instrumentos sensibles para detectar el estado hídrico de las plantas de sandías injertadas. Si bien las temperaturas mayores de la canopia pueden significar una menor conductancia estomática (Gago et al., 2013) y también como reportan (Sapkota et al., 2023) el NDVI tiene una correlación negativa con la temperatura, el hecho de que Illapel haya tenido mayores índices de vegetación cercano a esos días y temperaturas más altas, sugiere que este portainjerto podría ser más eficiente en su uso del agua al tener un mecanismo más conservador. Mas mediciones in situ son necesarias para comprobar este supuesto.

Para los 48 DDP no se detectaron diferencias en los portainjertos, pero si en el tratamiento y la interacción. Las plantas bajo WD mostraron una menor temperatura que las WW. En cuanto a la interacción, Illapel y Osorno mostraron temperaturas más bajas, mientras que Illapel WW alcanzo las temperaturas más altas.

En los 60 DDP Illapel WW obtuvo la temperatura más alta y Osorno WD la más baja. Agrupados por portainjertos, Osorno obtuvo la temperatura más baja y BG48 la más alta. WD tuvo temperaturas significativamente más bajas que WW.

A los 76 DDP, no se encontraron diferencias entre el tratamiento hídrico y al ser agrupados por portainjertos, Osorno mostró temperaturas significativamente más bajas que Illapel. En cuanto a la interacción, Osorno WD obtuvo temperaturas significativamente más bajas versus Illapel WW.

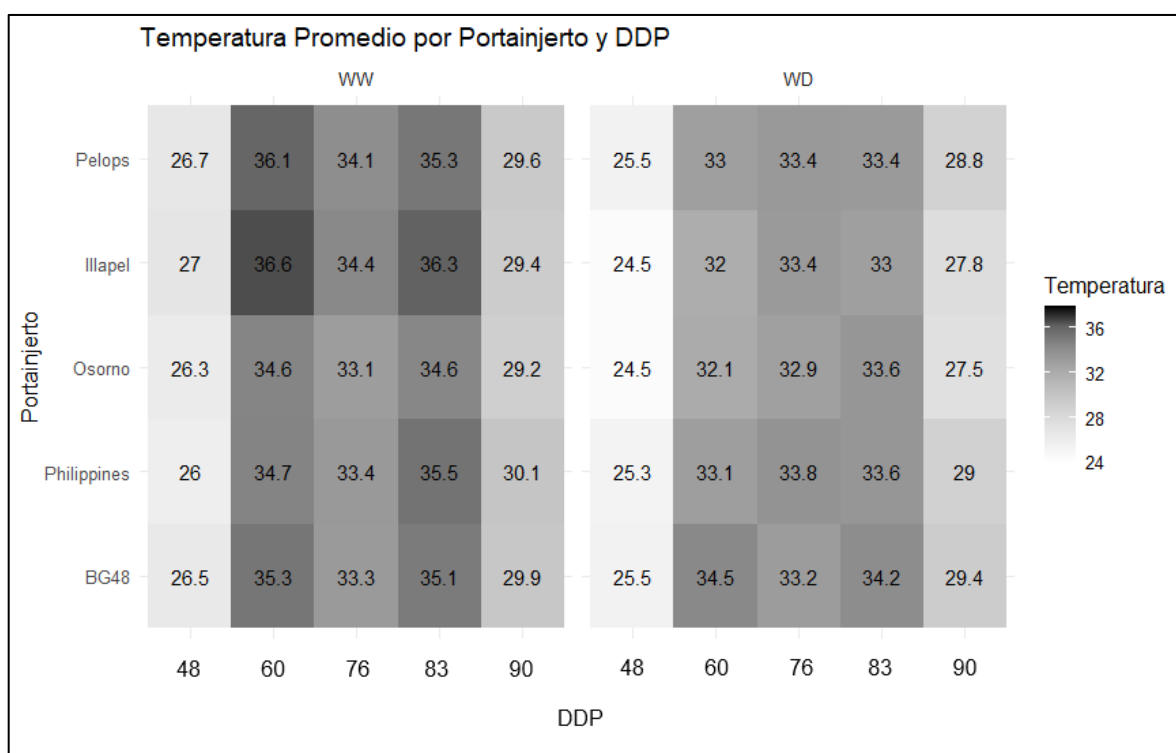
A los 83 DDP se encontraron diferencias significativas en el tratamiento hídrico siendo WW significativamente mayor que WD. Los portainjertos no mostraron diferencias para esta fecha. La interacción presentó a Illapel WD como la temperatura más baja versus Illapel WW como la temperatura más alta.

Para los 90 DDP, se obtuvieron diferencias significativas en el tratamiento hídrico, siendo WW mayor en temperatura en comparación con WD. Para los portainjertos Osorno obtuvo la temperatura más baja y BG48 junto con Philippines la temperatura más alta. En cuanto a la interacción, BG48, Illapel, Pelops y Phillipines del tratamiento WW junto con BG48 de WD, obtuvieron las temperaturas más altas.

Osorno tuvo las temperaturas más bajas para distintos días independiente del tratamiento hídrico. Este genotipo proviene de una región con temperaturas más bajas que la región donde se cultivó en este experimento, esto sugiere que tiene un mecanismo más productivo de toma de CO<sub>2</sub> junto con un cierre estomático más tardío debido a que en su clima húmedo no estaría expuesta a la cavitación.

Los portainjertos Pelops, Philippines y BG48, al igual que en los datos multiespectrales, tuvieron temperaturas intermedias.

Figura 12. Mapa de calor de las temperaturas promedio por portainjerto, tratamiento hídrico y días después de plantación.



## CONCLUSIONES

1. Illapel obtuvo valores multiespectrales más altos para los 41, 48, 76, 83 y 90 días después de plantación, lo que lo hace un portainjerto con mejor desempeño.

2. Osorno obtuvo los valores multiespectrales más bajos para 76 y 90 días después de plantación, probablemente al ser de una región de clima más frío, no esté adaptada al calor de la región de O'higgins
3. El tratamiento de estrés hídrico en general tuvo mayores valores multiespectrales y temperaturas más bajas que el tratamiento bien regado.
4. Illapel obtuvo las temperaturas más altas para diferentes días, lo que puede significar un cierre estomático más temprano que los demás portainjertos lo que se traduce en un mecanismo más conservador del uso del agua. Osorno obtuvo las temperaturas más bajas lo que puede significar que tiene un mecanismo más productivo del uso del agua.
5. Tanto las imágenes multiespectrales como las termales son herramientas útiles para diferenciar el estado hídrico de plantas de sandía injertadas.

## REFERENCIAS

- Ballester, C., Zarco-Tejada, P., Nicolás, E., Alarcón, J. J., Fereres, E., Intrigliolo, D., & Gonzalez-dugo, V. (2018). Evaluating the performance of xanthophyll, chlorophyll and structure-sensitive spectral indices to detect water stress in five fruit tree species. *Precision Agriculture*, 19. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9512-y>
- Bernabé, F. (2023). Estrategia de monitoreo de cultivos de sandía y melón en secano basada en datos de teledetección (Sentinel-2), con distinto ciclo de cultivo y sistema de producción, en Toledo. *Universitat Politècnica de València*.
- Böhm, V., Fekete, D., Balázs, G., Gáspár, L., & Kappel, N. (2017). Salinity tolerance of grafted watermelon seedlings. *Acta Biologica Hungarica*, 68, 412-427. <https://doi.org/10.1556/018.68.2017.4.7>
- Costa, L., Nunes, L., & Ampatzidis, Y. (2020). A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172, 105334. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105334>
- De Boeck, H. J., Van De Velde, H., De Groote, T., & Nijs, I. (2016). Ideas and perspectives: Heat stress: more than hot air. *Biogeosciences*, 13(20), 5821-5825. <https://doi.org/10.5194/bg-13-5821-2016>

- Devi, P., Scott, L., & Miles, C. (2020). Advances in Watermelon Grafting to Increase Efficiency and Automation. *Horticulturae*, 6, 88. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6040088>
- DGAC. (2023). *Reporte anual de la evolución del clima en Chile*.
- Dietz, K.-J., Zörb, C., & Geilfus, C.-M. (2021). Drought and crop yield. *Plant Biology*, 23. <https://doi.org/10.1111/plb.13304>
- Everts, K., Egel, D., Langston, D., & Zhou, X. G. (2014). Chemical management of Fusarium wilt of watermelon. *Crop Protection*, 66, 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.09.003>
- FAO. (2025). *FAOSTAT: Producción de cultivos y ganado*.
- Gago, J., Douthe, C., Coopman, R., Gallego, P., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., Escalona, J., & Medrano, H. (2015). UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.020>
- Gago, J., Martorell, S., Tomàs, M., Millan, B., Ramon, J., Ruiz, M., R, S., Tardaguila, J., Galmés, J., Conesa, M., P, E., Cuxart, J., Ribas-Carbo, M., & Flexas, J. (2013). *High-resolution aerial thermal imagery for plant water status assessment in vineyards using a multicopter-RPAS*.
- Galinato, S., Wimer, J. A., & Miles, C. (2016). Non-grafted and grafted seedless watermelon transplants: comparative economic feasibility analysis. *Acta Horticulturae*, 311-312. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1140.69>
- Gallardo-Salazar, J. L., Lindig-Cisneros, R. A., Lopez-Toledo, L., Endara-Agramont, A. R., Blanco-García, A., & Sáenz-Romero, C. (2023). Analysis of the Vigor of *Pinus hartwegii* Lindl. along an Altitudinal Gradient Using UAV Multispectral Images: Evidence of Forest Decline Possibly Associated with Climatic Change. *Forests*, 14(6).
- Garreaud, R., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., & Veloso, D. (2019). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Genc, L., Demirel, K., Camoglu, G., Asik, S., & Smith, S. (2011). Determination of Plant Water Stress Using Spectral Reflectance Measurements in Watermelon (*Citrullus vulgaris*). *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 11, 296-304.
- Govender, M., Dye, P., Weiersbye, I., Witkowski, E., & Ahmed, F. (2009). Review of commonly used remote sensing and ground-based technologies to measure plant water stress. *Water SA*, 35, 741-752. <https://doi.org/10.4314/wsa.v35i5.49201>

- Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81(2), 416-426. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4)
- Hoffmann, H., Jensen, R., Thomsen, A., Nieto, H., Rasmussen, J., & Friberg, T. (2016). Crop water stress maps for an entire growing season from visible and thermal UAV imagery. *Biogeosciences*, 13(24), 6545-6563. <https://doi.org/10.5194/bg-13-6545-2016>
- INE. (2023). *Encuesta Nacional de Hortalizas 2023*. Instituto Nacional de Estadísticas. <https://www.ine.gov.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/hortalizas>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Ishimwe, R., Abutaleb, K., & Ahmed, F. (2014). Applications of Thermal Imaging in Agriculture - A Review. *Advances in Remote Sensing*, 3, 128-140. <https://doi.org/10.4236/ars.2014.33011>
- Kaur, R., Singh, B., Singh, M., & Thind, S. K. (2015). Hyperspectral Indices, Correlation and Regression Models for Estimating Growth Parameters of Wheat Genotypes. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 43(3), 551-558. <https://doi.org/10.1007/s12524-014-0425-1>
- King, S., Davis, A., Wenge, L., & Levi, A. (2008). Grafting for Disease Resistance. *HortScience*, 43. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.6.1673>
- Kumar, P., Roupael, Y., Cardarelli, M., & Colla, G. (2017). Vegetable Grafting as a Tool to Improve Drought Resistance and Water Use Efficiency. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01130>
- Kurbanov, R., & Zakharova, N. (2021). Justification and selection of vegetation indices to determine the early soybeans readiness for harvesting. *E3S Web of Conferences*, 273, 01008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127301008>
- Lee, J.-M., Kubota, C., Tsao, S., Bie, Z.-L., Echevarría, P., Morra, L., & Oda, M. (2010). Current status of vegetable grafting: Diffusion, grafting techniques, automation. *Scientia Horticulturae - SCI HORT-AMSTERDAM*, 127, 93-105. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.08.003>
- Levi, A., Jarret, R., Kousik, S., Wechter, P., Nimmakayala, P., & Reddy, U. K. (2017). Genetic Resources of Watermelon. In. [https://doi.org/10.1007/7397\\_2016\\_34](https://doi.org/10.1007/7397_2016_34)

- Ling, N., Song, Y., Raza, W., Huang, Q., Guo, S., & Shen, Q. (2015). The response of root-associated bacterial community to the grafting of watermelon. *Plant Soil*, 391, 253-264. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2399-3>
- Liu, Q., Yao, F., Garcia-Garcia, A., Zhang, J., Li, J., Ma, S., Li, S., & Peng, J. (2023). The response and sensitivity of global vegetation to water stress: A comparison of different satellite-based NDVI products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 120, 103341. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103341>
- Liu, S., Li, H., Lv, X., Ahammed, G. J., Xia, X.-J., Zhou, J., Shi, K., Asami, T., Yu, J., & Zhou, Y. (2016). Grafting cucumber onto luffa improves drought tolerance by increasing ABA biosynthesis and sensitivity. *Scientific Reports*, 6, 20212. <https://doi.org/10.1038/srep20212>
- Martyn, R. (2014). Fusarium Wilt of Watermelon: 120 Years of Research. *Horticultural Reviews*, 42, 349-442. <https://doi.org/10.1002/9781118916827.ch07>
- Mashilo, J., Odindo, A., Shimelis, H., Musenge, P., Tesfay, S., & Magwaza, L. (2017). Drought tolerance of selected bottle gourd [ *Lagenaria siceraria* (Molina) Standl.] landraces assessed by leaf gas exchange and photosynthetic efficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 120, 75-87. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.09.022>
- Mashilo, J., & Shimelis, H. (2018). Photosynthetic response of bottle gourd to drought stress : Relationship between Cucurbitacin accumulation and drought tolerance. *Scientia Horticulturae*, 231, 133-143.
- Maynard, D., & Maynard, D. (2000). Cucumbers, Melons, and Watermelons. In (pp. 298-313). <https://doi.org/10.1017/CHOL9780521402149.032>
- Messina, G., & Modica, G. (2020). Applications of UAV Thermal Imagery in Precision Agriculture: State of the Art and Future Research Outlook. *Remote Sensing*, 12, 1491. <https://doi.org/10.3390/rs12091491>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1), 202-216. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Mkhize, P., & Mangena, P. (2024). Effect of Drought Stress on Agronomic Traits and Total Leaf Proteins in Different Bottle Gourd [*Lagenaria siceraria* (Molina) Standl.] Genotypes. *OBM Genetics*, 08, 1-19. <https://doi.org/10.21926/obm.genet.2404267>

- Mndela, Y., Ndou, N., & Nyamugama, A. (2023). Irrigation Scheduling for Small-Scale Crops Based on Crop Water Content Patterns Derived from UAV Multispectral Imagery. *Sustainability*, *15*(15).
- Nemeskéri, E., & Helyes, L. (2019). Physiological Responses of Selected Vegetable Crop Species to Water Stress. *Agronomy*, *9*, 447. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080447>
- Padilla, Y. G., Gisbert-Mullor, R., López-Galarza, S., Albacete, A., Martínez-Melgarejo, P. A., & Calatayud, Á. (2023). Short-term water stress responses of grafted pepper plants are associated with changes in the hormonal balance [Original Research]. *Frontiers in Plant Science, Volume 14 - 2023*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1170021>
- Penella, C., Nebauer, S. G., López-Galarza, S., San Bautista, A., Rodríguez-Burruezo, A., & Calatayud, Á. (2014). Evaluation of some pepper genotypes as rootstocks in water stress conditions. *Horticultural Science*, *41*, 192-200.
- R, C. T. (2023). *A Language and Environment for Statistical Computing*. In
- Rivero, R., Ruiz, J., & Romero, L. (2003). Role of grafting in horticultural plants under stress condition. *Journal of the Food Agriculture and Environment*, *1*, 70-74.
- Rouphael, Y., Cardarelli, M., Colla, G., & Rea, E. (2008). Yield, Mineral Composition, Water Relations, and Water Use Efficiency of Grafted Mini-watermelon Plants Under Deficit Irrigation. *HortScience*, *43*, 730-736. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.730>
- Sapkota, A., Haghverdi, A., & Merhaut, D. (2023). Effects of Deficit Irrigation on Canopy Temperature Dynamics and Physiology of Landscape Groundcovers. *HortScience*, *58*(11), 1321-1331. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17303-23>
- Schwarz, D., Rouphael, Y., Colla, G., & Venema, J. H. (2010). Grafting as a tool to improve tolerance of vegetables to abiotic stresses: Thermal stress, water stress and organic pollutants. *Scientia Horticulturae*, *127*, 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.09.016>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L. (2021). Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants*, *10*(2).
- Sharifi, A. (2020). Remotely sensed vegetation indices for crop nutrition mapping. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *100*(14), 5191-5196. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.10568>

- Wilhite, D., Sivakumar, M., & Wood, D. A. (2000). Early warning systems for drought preparedness and drought management. *Proceedings of an Expert Group Meeting. Lisbon, Portugal*, 5-7.
- Yang, Y.-J., Bi, M.-H., Nie, Z.-F., Jiang, H., Liu, X.-D., Fang, X.-W., & Brodrribb, T. J. (2021). Evolution of stomatal closure to optimize water-use efficiency in response to dehydration in ferns and seed plants. *New Phytologist*, *230*(5), 2001-2010. <https://doi.org/10.1111/nph.17278>
- Yetisir, H., & Sari, N. (2003). Effect of different rootstock on plant growth, yield and quality of watermelon. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *43*, 1269-1274. <https://doi.org/10.1071/EA02095>
- Zhang, F., & Zhou, G. (2019). Estimation of vegetation water content using hyperspectral vegetation indices: A comparison of crop water indicators in response to water stress treatments for summer maize. *BMC Ecology*, *19*. <https://doi.org/10.1186/s12898-019-0233-0>
- Zhou, Z., Majeed, Y., Diverres, G., & Gambacorta, E. (2021). Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, *182*, 106019. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106019>

## ANEXOS

Anexo 1. Diferencias significativas en interacción, portainjerto y tratamiento hídrico a los 48, 60, 76, 83 y 90 días después de plantación.

		Temperatura				
		48 DDP	60 DDP	76 DDP	83 DDP	90 DDP
Tratamiento hídrico	WW	25,1 b	35,49 a	33,68 a	35,34 a	29,64 a
	WD	26,5 a	32,93 b	33,33 a	33,53 b	28,5 b
Portainjerto	BG48	26,0 a	34,9 b	33,28 ab	34,65 a	29,66 c
	Illapel	25,7 a	34,32 ab	33,89 b	34,62 a	28,61 ab
	Osorno	25,4 a	33,37 a	33,02 a	34,06 a	28,33 a
	Pelops	26,1 a	34,56 b	33,76 ab	34,33 a	29,24 bc
	Phillipines	25,7 a	33,88 ab	33,59 ab	34,52 a	29,53 c
Tratamiento hídrico x portainjerto	WW					
	BG48	25,5 abc	35,34 def	33,34 ab	35,1 cd	29,89 c
	Illapel	26,5 bcd	36,63 e	34,43 b	36,26 c	29,4 c
	Osorno	24,5 a	34,64 cdf	33,13 ab	34,56 bd	29,2 bc
	Pelops	27,0 d	36,12 def	34,11 ab	35,3 cd	29,65 c
	Phillipines	24,5 a	34,7 df	33,39 ab	35,48 cd	30,07 c
	WD					
	BG48	26,3 bcd	34,46 bcf	33,22 ab	34,2 abd	29,42 c
	Illapel	25,5 abc	32,01 ab	33,35 ab	32,98 a	27,81 ab

	Osorno	26,7 cd	32,1 ab	32,92 a	33,56 ab	27,46 ab
	Pelops	25,4 ab	33 ab	33,4 ab	33,36 ab	28,83 abc
	Phillipines	26,0 bcd	33,06 abc	33,78 ab	33,56 ab	28,99 bc

Las letras a un costado de las temperaturas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) según la prueba de Tukey.