

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los factores de mayor importancia que tiene el suelo, la cual está relacionada con el crecimiento, desarrollo y productividad de las plantas. La disponibilidad que tiene el suelo y su aprovechamiento por parte de las plantas influye directamente en el comportamiento fisiológico especialmente en condiciones de estrés hídrico.

El punto de marchitez permanente (PMP), es el límite inferior del agua útil, siendo un contenido de humedad en el suelo que las raíces no pueden absorber, cuando llegan a este estado de marchitez las hojas no pueden recuperar su turgencia incluso después de la rehidratación.

El extractor de placas de presión es un equipo ampliamente utilizado para determinar el contenido de humedad del suelo a tensiones elevadas, particularmente alrededor de 15 bar, valor que tradicionalmente se asocia con el punto de marchitez permanente (PMP). Este concepto fue establecido a partir de los trabajos clásico de (Liman J. Briggs y Homer L. Shantz. 1912), y posteriormente investigaciones desarrolladas por (A. Richards y A.J. Weaver), que contribuyo al desarrollo de métodos experimentales para su determinación y a la comprensión de la relación entre el potencial del agua en el suelo y la respuesta fisiológica de las plantas. Sin embargo, estudios como de (R. Weil y Nyle C. Brady), demostraron que el punto de marchitez permanente no es únicamente una propiedad del suelo, sino que también depende de las características fisiológicas de las plantas, como la estructura del sistema radicular, la eficiencia en la absorción de agua y la capacidad de adaptación al estrés hídrico.

Esta investigación tiene como finalidad determinar la marchitez permanente real en cinco especies vegetales diferentes. Además, se busca establecer una estimación entre los valores obtenidos en campo y los valores estimados mediante el extractor de placas, con la finalidad de evaluar con precisión

1. Antecedentes

En Bolivia, se han llevado a cabo investigaciones para mejorar la eficiencia en el uso del agua en cultivos andinos, como la quinua y la papa. Estos estudios han evaluado el punto de marchitez permanente (PMP) en diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas, utilizando métodos tradicionales y tecnologías avanzadas como el extractor de presión de placas. Los resultados han mostrado que la determinación precisa del punto de marchitez permanente (PMP) es crucial para optimizar el riego y mejorar la productividad agrícola, especialmente en regiones con recursos hídricos limitados. Estas investigaciones han contribuido al desarrollo de estrategias de manejo del riego que consideran la variabilidad en la tolerancia al estrés hídrico entre diferentes especies vegetales.

2. Justificación

El conocimiento del punto de marchitez permanente (PMP) es fundamental para comprender la disponibilidad de agua en el suelo y la respuesta fisiológica de las plantas frente al déficit hídrico. Este parámetro representa el límite a partir del cual las plantas no pueden mantener su turgencia ni continuar su desarrollo normal. En este contexto, el extractor de presión de placas es una herramienta utilizada para estimar el contenido de humedad del suelo asociado al PMP bajo condiciones controladas.

Esta investigación, cobra relevancia al cuestionar el concepto tradicional del PMP como un valor fijo e invariable del suelo, planteando que este punto puede variar según la especie vegetal. Asimismo, el estudio busca establecer una relación entre los valores obtenidos mediante el extractor de presión de placas y la respuesta fisiológica real de las plantas bajo condiciones controladas, permitiendo validar la confiabilidad de esta herramienta de laboratorio en la estimación del estado hídrico de los cultivos.

Los resultados permitirán mejorar la comprensión de la relación entre la humedad del suelo y la tolerancia de las plantas al estrés hídrico. Esta información será útil para productores y profesionales del área agronómica, ya que permitirá optimizar el manejo del riego y mejorar la eficiencia en el uso del agua.

Si no se realizan estudios de este tipo, se continuaría considerando el PMP como un valor fijo del suelo, lo que podría generar estimaciones imprecisas sobre la disponibilidad de agua para los cultivos y afectar la toma de decisiones en el manejo del riego.

Por lo tanto, este estudio aporta información relevante para mejorar la gestión del recurso hídrico y contribuir al desarrollo de prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles.

3. Planteamiento del problema

El agua es un recurso esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que su disponibilidad influye directamente en la productividad y supervivencia de las especies vegetales. En este contexto, uno de los indicadores fisiológicos más importantes para evaluar el estado hídrico de las plantas es el punto de marchitez permanente (PMP), definido como el contenido de humedad del suelo a partir del cual la planta pierde la capacidad de recuperar la turgencia de sus tejidos, incluso cuando se coloca en condiciones de alta humedad atmosférica. El conocimiento de este punto es fundamental porque permite determinar el límite inferior del agua disponible para las plantas, información clave para la planificación del riego, la evaluación de la tolerancia al estrés hídrico y el manejo eficiente del recurso hídrico en los sistemas agrícolas.

Tradicionalmente, la determinación del punto de marchitez permanente se realiza mediante métodos fisiológicos que implican la observación directa de la respuesta de las plantas al déficit hídrico. Sin embargo, estos procedimientos suelen ser prolongados, invasivos y poco prácticos cuando se requiere realizar estudios comparativos entre diferentes especies vegetales.

Ante esta situación, el extractor de presión de placas se ha propuesto como una herramienta alternativa para estimar el contenido de humedad del suelo asociado al punto de marchitez permanente, ya que permite obtener resultados bajo condiciones controladas de laboratorio de manera más rápida y estandarizada. No obstante, aún

existe incertidumbre sobre el grado de relación entre los valores obtenidos mediante este método y el punto de marchitez permanente real en distintas especies vegetales.

La escasa disponibilidad de estudios comparativos entre especies y la limitada validación de este método bajo condiciones controladas evidencian un vacío en el conocimiento actual. Por ello, surge la necesidad de evaluar la relación entre el punto de marchitez permanente real y los valores obtenidos mediante el extractor de presión de placas en diferentes especies vegetales, con el propósito de determinar la confiabilidad de este método y generar información que contribuya a mejorar su aplicación en estudios de fisiología vegetal y en el manejo agronómico del agua.

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Evaluar el punto de marchitez permanente (PMP) en cinco especies vegetales mediante mediciones en campo y en laboratorio utilizando un extractor de placas en condiciones controladas, con el fin de establecer su correlación y comprender el comportamiento fisiológico hídrico de las plantas.

5.2. Objetivos específicos

- Seleccionar cinco especies vegetales que sean representativas de diferentes grupos botánicos y que presenten variaciones en su tolerancia a la sequía.
- Determinar el potencial hídrico del suelo mediante el uso del extractor de presión de placas en condiciones controladas, con el fin de obtener valores comparativos asociados al punto de marchitez permanente (PMP).
- Analizar la relación entre el punto de marchitez permanente determinado en campo y los valores obtenidos mediante el extractor de presión, para establecer posibles correlaciones entre ambas mediciones.
- Comparar el comportamiento hídrico entre las cinco especies vegetales evaluadas, con el propósito de identificar diferencias en su tolerancia al déficit hídrico.

6. Hipótesis alternativa

Existe una diferencia significativa entre las mediciones del punto de marchitez permanente realizadas en campo y las realizadas en laboratorio con un extractor de presión de placas para las cinco especies vegetales estudiadas.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

El agua constituye uno de los factores de mayor importancia en el suelo, ya que determina el desarrollo de las plantas, siendo el principal medio de transporte de los macro y micronutrientes que están en el suelo. También actúa como un disolvente de los nutrientes disponibles que hay en el suelo para que las raíces lo absorban, permitiendo así el crecimiento, desarrollo y una correcta refrigeración para una adecuada adaptación a las condiciones climáticas.

El consumo del agua depende mayormente de cada cultivo, no todos los cultivos necesitan la misma proporción de agua. Las condiciones climáticas también son un factor que influye en el consumo de agua, la temperatura, la humedad, el viento y la radiación solar. (Fernandez, 2010)

1.1. Composición del suelo

El suelo está constituido aproximadamente en un 45% de partículas sólidas (minerales), 5% de materia orgánicas, un 25% de agua y un 25 de aire. Estos porcentajes son ideales y varían de acuerdo al tipo de suelo y al nivel de agua antes, durante o después de un riego. El aire y el agua se encuentran en el espacio poroso del suelo, que corresponden aproximadamente a un 50% del volumen y varían de acuerdo a su textura. (Viña Santa Carolina, 2019)

Textura del suelo

Suelo arenoso: 38% de espacio poroso.

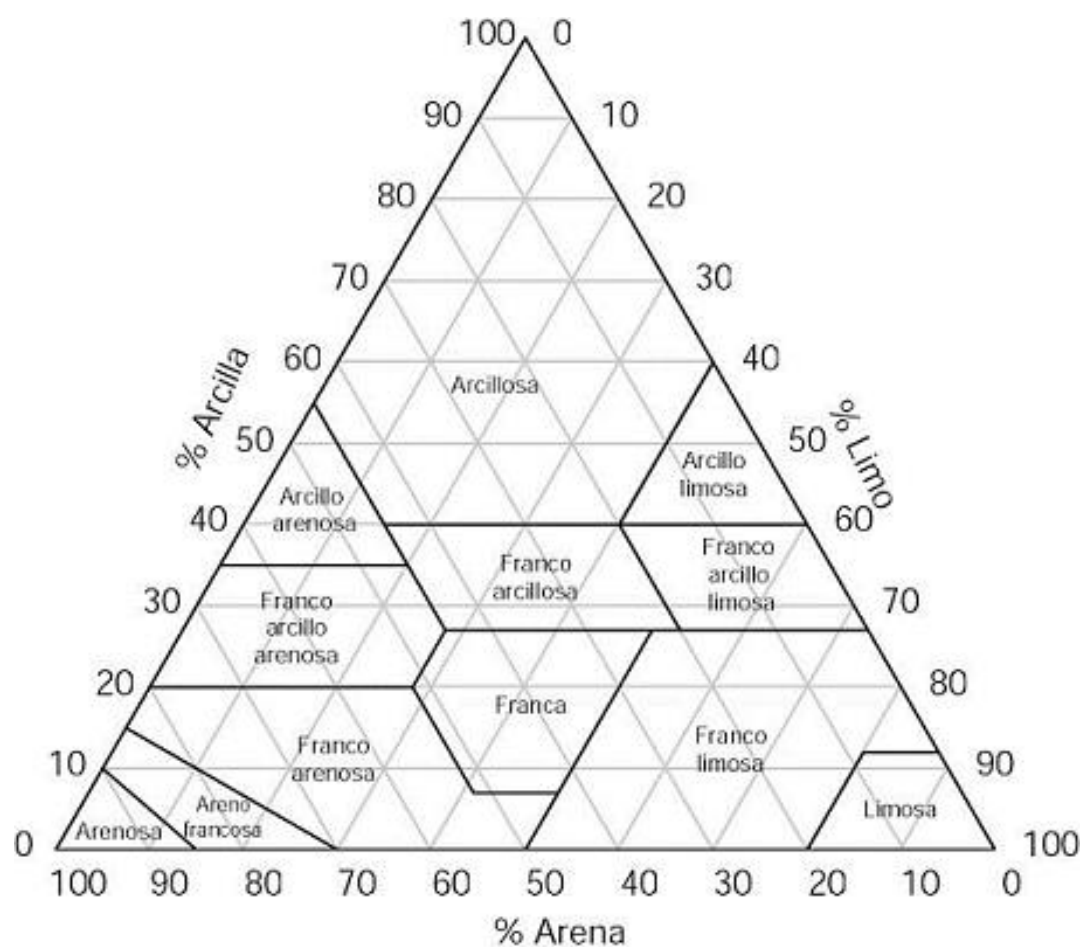
Suelo franco: 47% de espacio poroso.

Suelo arcilloso: 53% de espacio poroso.

La textura del suelo es la composición mecánica de un suelo, es decir la distribución de los tamaños de las partículas que lo constituyen, y su composición granulométrica.

Clase de textura	Definición	Grado
FY, FYL, YL, Y	Pesado	2
F, FYA, FL, L, YA	Mediano	3
A, AF, FA	Liviano	1

Fuente: FAO.



Fuente: FAO.

1.2. Potencial hídrico en el suelo

El agua en el suelo siempre tiene una energía determinada, que depende de la cantidad de agua del suelo y las fuerzas que actúan sobre ella. El potencial hídrico total (Ψ) es la energía libre por mol de agua, es decir a la capacidad de realizar trabajo del agua.

Los campos de fuerza actúan disminuyendo la energía libre del agua o capacidad de desplazarse; de esta manera si al agua se le agrega solutos, estos interactúan con ella, haciendo que la energía libre del agua disminuya. El agua pura con una altura de referencia y presión de 1 atm siempre tiene un potencial hídrico total de cero, a medida que se resta la energía libre su potencial es cero.

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_s$$

Donde:

Ψ_g = potencial gravitacional.

Ψ_p = potencial de presión.

Ψ_m = potencial matricio.

Ψ_s = potencial osmótico.

1.3. Retención del agua en el suelo

Las plantas presentan un mecanismo de transpiración que les permite regular su balance de energía. El agua que transpira proviene del suelo y es absorbida por las raíces. El suelo, además de proporcionar anclaje a las plantas, actúa como un medio donde se almacenan agua, oxígeno y dióxido de carbono, elementos que pueden ser absorbidos por las raíces. Asimismo, debido a su estructura, el suelo contiene partículas muy pequeñas que funcionan como reservorio de nutrientes. Estos nutrientes se intercambian con la solución del suelo y posteriormente pueden ser asimilados por las raíces de las plantas. (Chavarria, 2017)

1.4. Parámetros de humedad

1.4.1. Punto de saturación

Es la cantidad de agua presente en el suelo cuando todos los espacios porosos están llenos de agua, esta representa la máxima cantidad de agua que puede almacenar un suelo, sin la presencia del agua libre. En este estado, no hay aire presente en los poros del suelo limitando de esta manera la disponibilidad de oxígeno en las raíces de las plantas. Esta condición puede causar estrés hídrico, deficiencias nutricionales, pudrición radicular y la estimulación de la actividad microbiana. (Fontagro, 2023)

1.4.2. Capacidad de campo

Una vez que la lluvia o el riego cesa, el agua que se encuentra en los poros más grandes del suelo se drena hacia abajo con bastante rapidez (principalmente por la gravedad). Después de uno o tres días el suelo alcanza su capacidad de campo, en esta condición el agua ha salido de los macroporos y en su lugar está el aire y a diferencia de los microporos aún están llenos de agua y pueden suministrar el agua a las plantas. (Weil&Brady, 2017)

Según otro autor, la capacidad de campo es la cantidad de agua que permanece en el suelo después de que el agua gravitacional se haya drenado y el suelo retiene una humedad constante, que es utilizada por las plantas. Esto se da por las fuerzas capilares, que ocurre aproximadamente a una tensión de -0.33 bar. (Richards&Weaver, 1994)

El potencial mátrico varía de un suelo a otro, siendo este la energía potencial del agua en el suelo, esto se refiere a la fuerza con la que las moléculas del agua están retenidas en el suelo debido a las fuerzas de atracción de las partículas del suelo y a las moléculas del agua. Cuando el suelo está completamente saturado, la tensión del agua es cercana a cero y el potencial matricial es muy bajo, a medida que el agua se mueva fuera del suelo, las fuerzas capilares y la atracción entre el suelo y el agua hacen que el agua se mantenga retenida en el suelo y el potencial matricial se hace más negativo, entre más negativo sea la tensión del agua del suelo, más difícil para las plantas extraer el agua del suelo. Citado por (UCO, s.f)

1.4.3. Punto de marchitez permanente

Según (Briggs&Shantz, 1912) , con su método de sellado de cera para la determinación del coeficiente de marchitamiento en diferentes tipos de suelos y con una gran variedad de plantas. Demostró que las diferencias que presentan las plantas en este aspecto son menores y que resulto de poca utilidad práctica el usar una gran variedad de plantas. En cambio, comparando el coeficiente de marchitamiento de la textura de los suelos son muy significativas. Se ha descubierto que las plantas son capaces de reducir el contenido de humedad del suelo muy por debajo del correspondiente al punto de marchitez y que se produce una pérdida constante de humedad a través de los tejidos vegetales incluso después de la muerte, se cree que las ligeras diferencias observadas a la resistencia a la sequía de ciertas plantas no se deben a una mayor fuerza de tracción sobre la humedad del suelo, sino a la distribución radicular de cada variedad. Los suelos de textura gruesa como son los suelos arenosos llegan al coeficiente de marchitamiento de las plantas con un contenido de agua del 1% y de los suelos arcillas con un contenido de agua del 30%.

Las plantas absorben mediante las raíces el agua disponible del suelo y el suelo continúa secándose, las raíces absorben del agua primero de los macroporos, siendo su potencial hídrico alto, a medida que los macroporos se vacían, las raíces extraen agua de los microporos, donde el potencial hídrico mátrico es menor y las fuerzas que atraen el agua hacia la superficie solidas son mayores, provocando que las plantas tengan una dificultad para absorber el agua del suelo. Esto provoca en la planta que sus estomas se sierran, el crecimiento se detiene y las plantas llegan a un punto de marchitez insipiente. Al principio las plantas recuperan su turgencia por la noche, cuando no se pierde agua a través de las hojas y las raíces pueden absorber agua.

Las plantas herbáceas permanecen marchitas día y noche cuando las raíces no pueden generar potenciales hídricos lo suficientemente bajos como para extraer el agua restante del suelo, esta condición se desarrolla cuando el potencial hídrico del suelo alcanza un valor aproximado de (-15 bares). La cantidad de agua disponible se encuentra en 15

bar y 30 bar, pero son muy pequeñas. El suelo tiene un aspecto seco y polvoso, aunque el agua permanece en los microporos más pequeños. (Weil&Brady, 2017)

1.4.4. Agua útil

El agua útil o también llamado agua disponible para las plantas, es la fracción de agua retenida en el suelo que las plantas pueden absorber efectivamente para su crecimiento y desarrollo. Representa la cantidad de agua disponible entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (no se toma en cuenta el agua gravitacional).

Prof.	DA	CC		PMP		Agua Útil Mm
		% Hum	mm	% Hum	mm	
0-20	1.19	16.46	39.17	7.64	18.18	20.99
20-40	1.30	16.30	42.38	7.84	20.38	22.00
40-60	1.21	16.90	40.49	7.85	19.00	21.90
60-80	1.23	16.47	40.52	6.77	16.65	23.86
80-100	1.23	16.47	40.52	6.77	16.65	23.86
Tosca 0-100			203.49		90.87	112.61

Tabla 2. Capacidad de almacenaje de agua útil (mm) en un suelo franco arenoso de Embajador Martini: Haplustol Entico de la planicie con tosca.

Prof.	DA	CC		PMP		Agua Útil Mm
		% Hum	mm	% Hum	mm	
0-20	1.22	7.54	18.40	4.12	10.04	8.36
20-40	1.27	5.47	13.89	3.90	9.91	3.99
40-60	1.20	6.45	15.47	2.22	5.33	10.14
60-80	1.22	4.74	11.57	2.61	6.38	5.19
80-100	1.22	5.90	14.39	2.66	6.97	7.42
100-120	1.22	5.36	13.09	2.96	7.22	5.86
120-140	1.22	4.86	11.87	2.87	7.01	4.86
0-140			96.68		52.86	45.82

Tabla 3. Capacidad de almacenaje de agua útil (mm) en un suelo arenoso franco de Miguel Riglos: Ustipsamente Típico de la planicie medanosa.

Fuente: (INTA, 2012).

1.5 Exactor de placas

El extractor de placas de cerámica o extractor de placas de presión, es un equipo de laboratorio, que es utilizado para analizar las características de retención de agua en muestras de suelos. El extractor de placas, está compuesto por unas ollas de presión que en su interior se colocan las placas de cerámicas porosas y se sitúan las muestras de suelo. Por un medio de un compresor y el control proporcionado del sistema de regulación se alcanza la presión deseada hasta llegar al equilibrio. (Gutierrez)

Figura 1: Imagen del extractor de placas



Fuente: Elaboración propia.

1.5.1. Extractor de placas de 15 bar

(Richards&Weaver, 1943) Demostró la validación de los 15 bar mediante un trabajo de correlación entre los datos biológico de Briggs & Shantz y las mediciones físicas, utilizo muestras de los suelos de la investigación de Briggs, experimento con una amplia gama de presiones a diferentes niveles, cuando ponía a 15 bar de presión el contenido de agua que quedaba en la muestra de suelo era idéntico al que quedaba cuando la planta se moría.

Las condiciones de contenido de humedad a 15 bar de presión en campos agrícolas son pocos comunes ya que al saber su contenido de agua a esta presión se denomina punto de marchitez permanente que es la cantidad de agua disponible en el suelo, pero las raíces de las plantas no lo pueden absorber ocasionando el marchitamiento definitivo de la planta ya que al regar las plantas cuando están en PMP estas ya no se recuperan. (Fong, 2019)

1.5.2. Extractor de placas de 0,33 bar

Según (Richards&Weaver, 1943) en su investigación demostró que el valor de 0,33 bar se consolidó como una presión intermedia siendo técnicamente estable para drenar el agua retenida de los microporos sin alterar la estructura del suelo y representa un nivel definido de energía de retención del agua para la capacidad de campo. Este valor no fue elegido al azar ya que se hicieron muchas pruebas con diferentes valores y este valor fue el que más se adoptó como un punto de referencia para comparar la retención de agua entre los diferentes tipos de suelos.

Cuadro 1: Punto de marchitez permanente de diferentes tipos de suelos

Tipo de suelo	CC% peso de suelo seco	PMP peso del suelo seco
Arena	5-10	1-3
Arena franca	10-15	3-6
Franco arenoso	15-20	6-10
Franco	20-25	10-15
Franco limoso	25-30	12-18
Franco arcilloso	27-32	15-22
Arcillosos	30-40	20-30

Fuente: (Richards&Weaver, 1943).

1.6 Punto de marchitez insipiente

Según (Kramer & Boyer, 1995), definen que el punto de marchitez incipiente es el inicio de la pérdida de turgencia de las plantas que esto ocurre cuando la absorción del agua por las raíces ya no llega a compensar la transpiración, generalmente durante las horas de mayor demanda atmosférica (medio día), pero aun así las planta llegara a recuperar su turgencia cuando las temperaturas descienden esto ocurre en la tarde y la noche ya que la transpiración desciende.

1.7 Movimiento del agua en la planta

El movimiento del agua en la planta se produce siguiendo un gradiente de potencial. El agua se mueve desde zonas de mayor potencial a otras de menor potencial hídrico, en

cuanto a las plantas el potencial más elevado se encuentra en las raíces y se va disminuyendo al largo del tallo y el potencial más bajos son las hojas. (Ruscitti, 2024)

1.8 Funciones del agua en la planta

El agua es indispensable para las plantas ya que interviene en múltiples funciones que son:

1. **Constituyente:** el agua es importante cuantitativamente ya que constituye el 80 y 90 % de peso fresco. También es importante para el protoplasma, la proteína y la molécula de los lípidos, una reducción del contenido de agua en estos componentes llega a provocar la muerte de las plantas.
2. **Solvente:** es un solvente por el cual gases, minerales y otros solutos entran por las células de las plantas y se mueven de célula en célula y de órgano en órgano.
3. **Reactante:** el agua el agua es uno de los reactantes para muchos procesos importantes, como ser la fotosíntesis, hidrólisis del almidón o azúcar en la germinación de semillas.
4. **Estructura:** la turgencia es importante para el crecimiento y alargamiento de las células, también para el crecimiento y mantenimiento de las formas de la planta, ya que la turgencia es importante para la apertura de los estomas y el movimiento de las hojas, pétalos y otras estructuras de la planta. Citado por (Avella)

1.9 Balance hídrico en las plantas

La eficiencia en el uso del agua por parte de las plantas, se expresa como un coeficiente conocido como:

Requerimiento hídrico = agua perdida (Kg) / materia seca formada (Kg).

Los procesos básicos involucrados en el balance hídrico de una planta son la absorción, la conducción y la pérdida de agua. Durante el día el balance hídrico es normalmente negativo y suele restaurarse durante la noche, si hay suficiente agua en el suelo, en periodos de sequía el contenido de agua en las plantas no se restablece completamente. El balance hídrico negativo produce en las plantas un conjunto de síntomas a nivel

morfológico, metabólico y fisiológico. Afecta al crecimiento celular, cierre de estomas y posteriormente una disminución de la producción de biomasa. (Ruscitti, 2024)

1.10. Estrés hídrico en las plantas

Una planta que crece en condiciones óptimas se halla en situaciones de estrés cero, esto implica que todos los factores (luz, nutrientes, agua, temperatura, oxígeno), están en un punto óptimo, esto no siempre es así ya que hay parámetros que se alejan ligeramente del punto óptimo y eso hace que alguna función se altere circunstancialmente y poco después vuelve a la normalidad a esto se lo denomina homeostasis. Citado por (UNER)

Los factores que causan estrés son:

- **Estrés térmico:** esto se da por el exceso de calor o de frío.
- **Estrés hídrico:** es por la falta de agua, ya que el suelo no aporta la suficiente humedad a las plantas o también por el exceso de agua provocando problemas de asfixia.
- **Estrés por falta o exceso de luz:** esto depende de la especie de la planta ya que algunas necesitan una determinada cantidad de luz para su desarrollo.
- **Estrés nutricional:** ausencia o exceso de nutrientes.
- **Estrés químico:** eso se da por los metales pesados que hay en el suelo o el agua.
- **Estrés salino:** esto se da por el exceso de sales en el suelo o en el agua, otra causa también que se da es por exceso de fertilización.
- **Estrés biótico:** esto se da por la aparición de hongos, patógenos, plagas o virus entre otros. Citado por (Lida, 2022)

1.11. Acelga

Según Seymour, la acelga (*Beta vulgaris* L. var. *Cicla*) tiene un origen vinculado con las tierras bañadas por el mar Mediterráneo, sur de Europa y norte de África. Algunos expertos consideran Italia como primera referencia para su utilización en la alimentación. También se encuentran textos que hablan del consumo de esta verdura en Mesopotamia durante el siglo IX A.C. (Armando, 2022)

1.11.1. Taxonomía

Reino:	Vegetal
Phylum:	Teleomorphytae
División:	Tracheomorphytae
Subdivisión:	Anthomorphyta
Clase:	Angiospermae
Subclase:	Dicotyledoneae
Grado Evolutivo:	Archichlamydeae
Grupo de Ordenes:	Corolinos
Orden:	Centrospermales
Familia:	Chenopodiaceae
Nombre científico:	<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i> L
Nombre común:	Acelga

Fuente: (Herbario Universitario (T.B.), 2025).

1.11.2. Importancia del cultivo

El cultivo de la acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla* L.) es un cultivo muy importante debidos a su aporte significativo a la seguridad alimentaria, la economía agrícola y la sostenibilidad de los sistemas productores. Citado por (Pleasant, 2015)

❖ Nivel mundial

A nivel mundial los principales países que cultivan este producto son: Italia, Francia, Holanda, Bélgica, Alemania y el continente americano. Citado por (FAO, 2023)

❖ Nivel nacional

La importancia económica de la acelga en Bolivia es moderada, ya que es uno de los cultivos más grandes en volumen y aporta ingresos rápidos a pequeños productores, abasteciendo a mercados urbanos y fortaleciendo la seguridad alimentaria. Los principales departamentos de producción son: Cochabamba, Tarija, La Paz y Santa Cruz. Citado por (Quiroga&Candia, 2018)

❖ Nivel departamental

Tiene una buena demanda en el mercado local y se vende con facilidad, su nivel de producción es moderada y se concentra en las zonas de: San Lorenzo, Cercado, Padcaya y área periurbanas de la ciudad de Tarija. Citado por (ONG Organizacion Espeza Bolivia (OEP), 1016)

1.11.3. Descripción botánica

- **Raíz**

Presenta una raíz pivotante, robusta y fibrosa, que logra un enraizamiento profundo en el suelo y que se diferencia de la remolacha porque esta no experimenta engrosamiento significativo en el sistema radicular. Citado por (Armando, 2022)

- **Hojas**

Las hojas son grandes con un pecíolo y nerviación central muy desarrollada, los limbos de las hojas son grandes y redondeados y en ocasiones recubren ligeramente a los pecíolos hasta su base. El color de las hojas es variable desde colores amarillos hasta verdes oscuros. (Anabel, 2019)

- **Inflorescencia y flor**

La inflorescencia es una panícula alargada, que está compuesta por flores hermafroditas que solo aparecen en grupos de dos o tres, el cáliz es de color verde y este compuesto por cinco sépalos y cinco pétalos. Para que la acelga presente una floración es necesario que pase por un tiempo de temperaturas extremas de máximo a mínimo. (Zelaya, 2017)

- **Fruto y semilla**

Las semillas de la acelga (*Beta vulgaris* L. var. cicla) son muy pequeñas y están encerradas en un pequeño fruto al que comúnmente se la llama semilla (realmente es un fruto), que contiene de 3 a 4 semillas. En condiciones naturales la semilla mantiene su poder germinativo por unos cuatro años, pero puede conservarse hasta 10 años o más con un buen tratamiento. (Zelaya, 2017)

1.11.4. Requerimientos edafoclimáticos

- **Temperatura**

Es un cultivo de clima templado, no resiste a los cambios drásticos de temperatura. No resiente la temperatura de -5°C. soportan temperaturas de un mínimo de 6°C y un máximo de 27 a 33°C, con un medio óptimo de 15 y 25°C. Citado por (Anabel, 2019)

- **Luminosidad**

El cultivo de la acelga (*Beta vulgaris* L. var. Cicla) no requiere excesiva luz, siendo perjudicial cuando ésta es elevada, si va acompañada de un aumento de temperatura. (Armando, 2022)

- **Suelos**

Este necesita suelos de consistencia media y vegeta mejor cuando la textura tiende a arcillosa que cuando es arenosa. Requiere suelos profundos, permeables, con gran poder de absorción y ricos en materia orgánica en estado de humificación. Requiere suelos algo alcalinos, con un pH óptimo de 7.2, vegetando en buenas condiciones en los comprendidos entre 5.5 y 8.0, no tolera los suelos ácidos. Citado por (Zelaya, 2017)

- **Humedad Relativa**

La mayoría de las plantas se desarrolla bien con una humedad relativa de aire entre el 30 y 70%, cuando está debajo del 30% la planta se marchita y si la humedad está por encima del 70% tiene una alta incidencia de enfermedades. Citado por (Anabel, 2019)

1.12. Cebolla

El origen primario de la cebolla (*Allium cepa* L.) se lo considera en Asia central, y como centro secundario el Mediterráneo, pues se trata de una de las hortalizas de consumo más antigua. Las primeras referencias se remontan hacia 3.200 a.C. pues fue muy cultivada por los egipcios, griegos y romanos. Durante la Edad Media su cultivo se desarrolló en los países mediterráneos, donde se seleccionaron las variedades de bulbo grande, que dieron origen a las variedades modernas. (Altamirano, 2023)

1.12.1. Taxonomía

Reino:	Vegetal
Phylum:	Teleomorphytae
División:	Tracheophytae
Sub división:	Anthophyta
Clase:	Angiospermae
Sub clase:	Monocotyledoneae
Orden:	Liliflorales
Familia:	Liliaceae
Nombre científico:	<i>Allium cepa</i> L.
Nombre común:	Cebolla

Fuente: (Herbario Universitario (T.B.), 2025).

1.12.2. Descripción botánica

- **Raíz**

La cebolla (*Allium cepa* L.) posee un limitado sistema radicular y provocando que tenga una limitada capacidad de absorción. Sus primeras raíces brotan durante el periodo de germinación de la semilla, las cuales mueren gradualmente a la vez que se van formando otras nuevas. Las raíces adventicias de la cebolla se desarrollan a partir del tallo verdadero y en la mayoría de los casos, no alcanzan una profundidad mayor de 40 cm. (Altamirano, 2023)

- **Tallo**

La cebolla presenta dos tipos de tallos. Un verdadero situado en la base de los bulbos, de donde brotan las yemas, las hojas y las raíces y el otro tallo que brota de escapo floral. Durante el primer año de vida de la planta, el tallo alcanza de 0.5 a 1.5 centímetros, con un diámetro de 1,5 a 2.0 centímetros. (Altamirano, 2023)

- **Hojas**

Las hojas son erectas, huecas y semicilíndricas, con un diámetro de 0,5 cm, aproximadamente, llegan a formar de 8 a 15 hojas de una longitud de 30 a 60 cm. Al nacer cada hoja aparece dentro de la anterior y se forma una especie de tallo llamado “tallo falso” constituido por las vainas de las hojas. La porción basal de cada hoja envuelve completamente el tallo (disco), que al engrosarse por acumulación de reservas forman el bulbo. (Ayarde, 2015)

- **Bulbo**

El bulbo es el órgano donde se acumula las sustancias nutritivas de reserva durante el primer año para dar lugar a la formación de umbelas y producción de semilla en el segundo año. El bulbo consta de un conjunto de vainas envolventes o escamas carnosas (catáfilas), yemas y tallo verdadero. Las vainas pertenecientes a las hojas exteriores adquieren una consistencia membranosa y actúan como túnicas protectoras, mientras que las vainas de las interiores engrosan al acumular sustancias de reserva (catáfilas) formando la parte comestible del bulbo. (Alemán, 2019)

- **Flor**

Su inflorescencia es una umbela, en la parte superior de cada inflorescencia, las flores se abren siguiendo una secuencia definida y con un considerable espacio. Una planta con varias inflorescencias puede tener flores abiertas durante un mes o más. (Fernández, 2013)

- **Semilla**

La semilla es producida en la inflorescencia o conjunto de flores (umbela). Es relativamente pequeña, angulosa y de color negro, cuando está madura. Tiene forma arriñonada y mide unos 4x2 mm. Citado por (Ayarde, 2015)

1.12.3. Importancia del cultivo

La cebolla (*Allium cepa* L.) es una de las hortalizas más importantes a nivel mundial debido a su alto consumo, amplia adaptación agroecológica y su significativo aporte económico y nutricional.

- ❖ **Importancia mundial**

Es un cultivo que se extiende por todas las regiones templadas del mundo. Los principales países productores son: China, Estados Unidos, India y Japón. Citado por (Quintero, 2019)

- ❖ **Importancia a nivel nacional**

En Bolivia el cultivo de la cebolla se distingue entre la producción de cebolla de verdeo y la producción de cebolla en bulbo, siendo la producción de cebolla en bulbo con mayor superficie siendo esta de 7.102 ha. Cochabamba es el mayor productor con un volumen de 30,405 toneladas le sigue Tarija con 20,243 toneladas, Santa Cruz con un Volumen de 11,612 toneladas. ((DAPRO, 2020)

- ❖ **Importancia departamental**

Las zonas productoras de cebolla en Tarija son: El puente, Cercado y Padcaya, destacando por su alta producción de diversas variedades tempranas y tardías. (Alemán, 2019)

1.12.4. Requerimientos edafoclimáticos del cultivo

- **Temperatura**

Requiere una temperatura adecuada para la germinación de 16 a 25 °C. La temperatura adecuada para el desarrollo de las raíces es de 15 a 20 °C, la temperatura está relacionada con la fotosíntesis: a mayor temperatura, se produce mayor fotosíntesis y

viceversa. La semilla germina con temperatura entre 7 y 35° C, siendo la óptima de 18°C a 24° C la temperatura óptima para el desarrollo del cultivo está alrededor de 13° a 14° C con máxima de 30°C y mínima 7° C. La temperatura óptima para el desarrollo del bulbo esta entre 18° C a 25° C. Se adapta a cualquier tipo de clima cálido, templado y frío, tiene una mejor producción en altitudes arriba de los 900 msnm, con ambiente seco y luminoso. (Fernández, 2013)

- **Suelos**

No tiene dificultades para desarrollarse en cualquier tipo de suelo, pero es mejor cultivar en suelos arenoso a francos permitiendo un buen desarrollo de los bulbos, es medianamente tolerante a la salinidad y poco tolerante a la acidez. El rango de pH optimo es de 6 a 7. (Alemán, 2019)

- **Humedad**

Según Leño, un exceso de humedad en el periodo de formación de los bulbos afecta negativamente el proceso de acumulación de sustancias nutritivas en el bulbo. El estrés hídrico provocado por la falta de humedad produce el cierre de estomas dando lugar a una reducción de la fotosíntesis. Es muy sensible al exceso de humedad, pues los cambios bruscos pueden ocasionar el agrietamiento de los bulbos. Una vez que las plantas han iniciado el crecimiento, la humedad del suelo debe mantenerse por encima del 60 % del agua disponible en los primeros 45 cm del suelo. (Fernández, 2013)

1.13. Lechuga

Según algunas investigaciones la lechuga (*Lactuca sativa* L.) tiene un origen entre Asia Menor y la cuenca del mediterráneo, pero los primeros en cultivarla para su consumo fueron los egipcios, desde Egipto se extendió hasta llegar a Europa y de ahí llegó a América por la conquista española. (INIA, 2017)

1.13.1. Taxonomía

Reino:	Vegetal
Phylum:	Teleomorphytae
División:	Tracheophytae
Sub división:	Anthophyta
Clase:	Angiospermae
Sub clase:	Dicotyledoneae
Grado Evolutivo:	Metachlamydeae
Grupo de Ordenes:	Tetraciclicos
Orden:	Campanulales
Familia:	Compositae
Nombre científico:	<i>Lactuca sativa L.</i>
Nombre común:	Lechuga
Fuente:	(Herbario Universitario (T.B.), 2025)

1.13.2. Descripción botánica

- **Raíz**

Esta cuenta con una raíz pivotante con muchas raíces laterales en su mayoría se desarrolla en la capa superficial del suelo, su sistema radicular es profundo. (Orosco, 2021).

- **Tallo**

El tallo es corto de tamaño, en su etapa vegetativa, forma cilíndrica, con crecimiento primario, por lo que es herbáceo. Durante el periodo reproductivo de la planta se vuelve más alargado para brindar soporte a las estructuras reproductivas, llegando a alcanzar hasta 1 m de altura aproximadamente dependiendo la variedad. (Gonzales, 2023)

- **Hojas**

Maroto (1983), manifiesta que las hojas se disponen primeramente en roseta y después se aprietan unas junto a otras formando un cogollo más o menos consistente y apretado en unas variedades que en otras. Sus hojas pueden ser de redonda, lanceolada o casi

espatulada. La consistencia de las mismas puede ser corroas o blanduzca. El borde de los limbos foliares puede ser liso, ondulado aserrado. Citado por (Orosco, 2021)

- **Inflorescencia**

Su inflorescencia está constituida en grupos de 15 a 20 flores, están ramificadas y son de color amarillo, los pétalos son soldados (gamopétalos), posee 5 estambres y su ovario es monocular. Las flores se auto polinizan, función que se realiza antes de que las flores se abran, se reporta también que es posible la polinización cruzada. (Garzon, 2015)

- **Semillas**

Las flores son hermafroditas, están reunidas en capítulos de color blanco-amarillento, con cinco estambres soldados y un ovario bicarpelar con un solo óvulo que dará origen a la semilla. (Japon, 2020)

1.13.3. Importancia del cultivo de la lechuga

El cultivo de la lechuga es fundamental ya que su alto contenido nutricional, su bajo contenido calórico y su ciclo rápido de producción lo convierten es una producción rentable.

❖ Importancia mundial

La producción mundial de lechuga alcanzo en el 2023 una cifra de 28.085 millones de kilos, sobre una superficie de 1.261.377 ha. Con un rendimiento medio de 2,23 kilos por metro cuadrado. Los países de mayor producción son: China, Estados Unidos, India, España, etc. Citado por (HORTOINFO, 2025)

❖ Importancia nacional

En Bolivia existe una gran demanda de productores hortícolas, los principales departamentos productores de lechuga son: Chuquisaca, La Paz, Santa Cruz y Tarija.

A nivel nacional se llega producir 18.331 Tm con una superficie de 2.818 ha. (DAPRO, 2024)

❖ **Importancia departamental**

En Tarija las principales zonas de producción son: Entre Rios, San Lorenzo, Villa Montes, Yacuiba y el Puente. Con una producción total de 424 Tm, en una superficie de 70 ha. (DAPRO, 2024)

1.13.4.- Requerimiento edafoclimáticos

- **Temperatura**

Para la germinación de la semilla requieren una temperatura de 18-20°C. Durante la fase de crecimiento del cultivo se requieren temperaturas entre 14-18°C por el día y 5-8°C por la noche, pues la lechuga exige que haya diferencia de temperaturas entre el día y la noche. Durante el acogollado se requieren temperaturas en torno a los 12°C por el día y 3-5°C por la noche. (Garzon, 2015).

- **Humedad**

Según algunas investigaciones, este cultivo debe tener una humedad relativa del 70 a 90 %, indicando que la temperatura óptima es de 24°C. Este cultivo requiere permanentemente humedad de suelo que demanda unos 400 a 500 mm de agua durante el ciclo vegetativo. (Orosco, 2021)

- **Suelo**

La lechuga es una planta que se adapta bien a todo tipo de suelos, excepto los que tengan problemas de encharcamiento, siendo los más idóneos los ricos en materia orgánica y de elevada fertilidad, ligeros y bien drenados. (Sanchez, 2023)

1.14. Remolacha

Esta planta tiene origen en la zona costera del norte de África. Su cultivo es muy antiguo, data del siglo II a. C; En principio las antiguas civilizaciones solo consumían las hojas de la remolacha. La raíz de la planta se utilizaba como medicamento para combatir los dolores de muelas y de cabeza. Se sabe que los romanos consumían esta raíz, pero no fue hasta el siglo XVI cuando volvió a la dieta, en este caso, de ingleses y alemanes. (Cazon, 2016)

1.14.1. Taxonomía

Reino:	Vegetal.
Phylum:	Teleomorphytae.
División:	Tracheophytae.
Subdivisión:	Anthophyta.
Clase:	Angiospermae.
Subclase:	Dicotyledoneae.
Grado Evolutivo:	Archichlamydeae.
Grupo de Ordenes:	Corolinos.
Orden:	Centrospermales.
Familia:	Chenopodiaceae.
Nombre científico:	<i>Beta vulgaris</i> L.
Nombre común:	Remolacha.

Fuente: (Herbario Universitario (T.B.), 2025).

1.14.2. Descripción botánica

- **Raíz**

Tiene un sistema radicular desarrollado y muy ramificado llegando a los 60cm. Llega a ser resistente a la sequía. Su estructura interna de esta raíz carnosa está formada por círculos concéntricos claros y oscuros, en los primeros están más desarrollados la xilema y por ello, es menos tierno y en los segundos, el floema. Citado por (Baldiviezo, 2020)

- **Tallo**

Durante el primer ciclo de crecimiento de las plantas, corresponde al ciclo vegetativo, el tallo se presenta comprimido y sin internados desarrollados; esta es la razón que explica la existencia de la corona. El tallo, una vez que se ha iniciado el segundo ciclo, comienza a alongarse conformando el llamado tallo floral; este crece rápidamente, ramificado en forma considerable. (Debelly, 1998)

Sus hojas se originan a partir de la corola, que corresponde a un conjunto de yemas en forma de espiral. Las hojas son simples, presentan una lámina ovalada de gran tamaño y un largo peciolo. Además son opulentas, gruesas, de colores verdes claros y suaves en su superficie. (Cazon, 2016)

- **Inflorescencia**

La inflorescencia está compuesta por una larga panícula; las flores son sésiles y hermafroditas, pudiendo aparecer solas o en grupos de dos o tres. El cáliz es de color verde y está compuesto por cinco sépalos y cinco pétalos y cubre las semillas formando un pequeño fruto que contiene de 2 a 6 semillas muy. (Ortega, 2013).

- **Semillas**

Los frutos del presente cultivo son como una masa de semillas los cuales están considerados en varios ovarios, por lo tanto, cada uno contiene una semilla. La remolacha tiene una semilla de forma variada, achatada, dura y lisa cuyo color es oscuro. (Bayas, 2023)

1.14.3. Importancia del cultivo de la remolacha

Este cultivo es muy importante por su triple impacto; su valor nutricional, medicinal y su alto rendimiento industrial para la producción de azúcar. Tiene un papel clave en la rotación de cultivos mejorando la estructura del suelo.

- ❖ **Importancia mundial**

La producción mundial de remolacha fue de 252, 968, 843, en una superficie cosechada de 4,439,073 ha. Los principales países productores son: Rusia, Estados Unidos, Francia Chile. Citado por (Bastida, s.f.)

- ❖ **Importancia nacional**

El cultivo de la remolacha representa un componente clave en la agricultura boliviana especialmente en regiones como el valle alto donde se adapta bien a climas templados.

Los lugares de mayor producción a nivel nacional son: Chuquisaca, Tarija, La Paz, Potos y Oruro. (Mamani, 2013)

❖ **Importancia departamental**

En la ciudad de Tarija la remolacha se cultiva en las siguientes zonas: Cercado, O'Connor, Avilés, Méndez y Arce. Citado por (Mamani, 2013)

1.14.4. Requerimientos edafoclimáticos

- **Temperatura**

La remolacha es de clima frío, pero se desarrolla bien en climas cálidos. La temperatura de germinación esta entre 10 a 30 ° C, y empieza a germinar a los 5 ó 6 °C, siendo la óptima entre 20 y 25 ° C. La temperatura de desarrollo es de 16 a 21 ° C, pero presentando una mejor coloración y un buen contenido de azúcar de 4 a 10 °C. (Valdez, 1988).

- **Luz**

Este cultivo requiere una intensidad lumínica considerable ya que le permite elaborar azúcares y la función de la clorofila se activa de mejor manera. Se ha confirmado que la deficiencia de luz afecta directamente a la producción. (Bayas, 2023)

- **Suelo**

Según Terranova, (2014), señala que la remolacha prefiere para su desarrollo, suelos de textura mediana a liviana, buena profundidad efectiva, buena retención de humedad y un buen drenaje interno, con pH entre 6 a 7. (Baldiviezo, 2020)

- **Humedad**

La requiere de un porcentaje medio de (60 a 90 %) tanto en el suelo como en el ambiente debido a que la superficie foliar es considerada como una de más desarrolladas entre los demás cultivos, por lo tanto, el porcentaje de transpiración es elevado. (Bayas, 2023).

1.15. Tomate

El origen del tomate se localizó en América del sur (Perú, Ecuador y Bolivia). El nombre de “tomate” viene del lenguaje náhuatl de México donde se llamaba “tomalt” y las variantes han seguido al tomate en su distribución por el mundo considerándose

la aportación vegetal de México más extendida mundialmente por ser México su centro de domesticación. citado (Cordero, 2008)).

1.15.1. Taxonomía

Reino:	Vegetal.
Phylum:	Teleomorphytae
División:	Tracheophytae
Sub división:	Anthophyta
Clase:	Angiospermae
Sub clase:	Dicotyledoneae
Grado Evolutivo:	Metachlamydeae
Grupo de Ordenes:	Tetraclicicos
Orden:	Polemoniales
Familia:	Solanaceae
Nombre científico:	<i>Solanum lycopersicum</i> L.
Nombre común:	Tomate

Fuente: (Herbario Universitario (T.B.), 2025).

1.15.2. Descripción botánica

- **Raíz**

El sistema radicular del tomate está constituido por una raíz principal, secundaria y las adventicias. Generalmente se extiende superficialmente sobre un diámetro de 1,5 m y alcanza más de 0,5 m de profundidad, sin embargo, el 70 % de las raíces se localizan a menos de 20 cm de la superficie. El sistema radicular tiene como funciones la absorción y el transporte de agua y elementos nutritivos, así como la sujeción o anclaje de la planta al suelo. (Aguilar et al, 2002)

- **Tallo**

El tallo principal tiene 2 a 4 cm de diámetro en la base y está cubierto por pelos glandulares y no glandulares que salen de la epidermis; sobre el tallo se van

desarrollando hojas, tallos secundarios e inflorescencias. Éste tiene la propiedad de emitir raíces cuando se pone en contacto con el suelo, característica importante que se aprovecha en las operaciones culturales de aporque dándole mayor anclaje a la planta. (Jaramillo J. y Viviana R. 2007), citado por (Cordero, 2008)

- **Hoja**

Las hojas son compuestas e imparipinadas, con foliolos peciolados, lobulados y con un borde dentado, en un número de siete a nueve y recubiertos de los pelos glandulares. Las hojas se disponen de forma alternada sobre el tallo, son compuestas imparipinadas con siete a nueve foliolos, los cuales generalmente son peciolados, lobulados y con borde dentado, y recubiertos de pelos glandulares. Las hojas se disponen de forma alternativa sobre el tallo. (Cordero, 2008)

- **Flor**

La flor es perfecta, regular e hipógina se agrupan flores en unas inflorescencias denominadas comúnmente como “racimos”, La primera flor se forma en la yema apical y las demás se disponen lateralmente por debajo de la primera, alrededor del eje principal. Las inflorescencias se desarrollan cada 2-3 hojas en las axilas. (Cáseres, 2016)

- **Fruto**

baya bi o plurilocular, puede alcanzar un peso que oscila entre unos pocos miligramos y 600 gramos. Está constituido por el pericarpio, el tejido placentario y las semillas Citado por (MDRyT, 2017)

- **Semillas**

Es pequeña, con dimensiones aproximadas de 5 x 4 x 2 mm, pueden ser de forma globular, ovalada, achatada, casi redonda, ligeramente elongada, plana, arriñonada, triangular con la base puntiaguda. La semilla está constituida por el embrión, el endospermo y la testa o cubierta seminal recubierta de pelos. Las semillas dentro del lóculo, en sus últimas etapas de desarrollo, aparecen inmersas en una sustancia gelatinosa. Citado por (MDRyT, 2017)

1.15.3. Importancia del cultivo de tomate

El cultivo del tomate es uno de los productos hortícolas más consumido, ocupando un lugar central en la dieta diaria de la población, ya que su valor nutricional es muy elevado. Tiene una importancia económica elevada ya hay grandes y pequeñas industrias dedicadas a la producción del tomate.

❖ Importancia mundial

Los principales países productores de tomate son: China, India, Estados Unidos, Turquía, Egipto, etc. En Latinoamérica el principal país con mayor producción es Brasil. Citado por (LIANSHOU, 2023)

❖ Importancia nacional

En Bolivia los principales departamentos de producción son: Santa Cruz, Cochabamba, La Paz y Tarija. Un total de producción a nivel nacional es de 80.419 Tm, en una superficie de 5.1010 ha. (DAPRO, 2024)

❖ Importancia departamental

En Tarija las zonas de producción son: Uriondo, Entre Ríos, Padcaya, Villa Montes, San Lorenzo, Bermejo, Yunchará, Caraparí, El Puente y Yacuiba, con un total de producción de 10.034 Tm, en una superficie de 620 ha. Fuente (DAPRO, 2024)

1.15.4. Requerimientos edafoclimáticos

• Temperatura

Los rangos para un desarrollo óptimo del cultivo oscilan entre los 28 - 30° C durante el día y 15 - 18° C durante la noche. Temperaturas de más de 35° C y menos de 10° C durante la floración provocan caída de flor y limitan el cuajado del fruto, aunque existen materiales genéticos que cuajan a altas temperaturas.

• Humedad relativa

La humedad óptima oscila entre 60% a 80%. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades aéreas y el agrietamiento del fruto y dificultad de fecundación. (Melendrez, 2021)

- **Luminosidad**

La luz Los valores reducidos de luminosidad inciden de forma negativa sobre los procesos de floración, fecundación, así como el desarrollo vegetativo de la planta. En los momentos críticos durante el periodo vegetativo resulta crucial la interrelación existente entre la temperatura diurna y la luminosidad. (Melendrez, 2021)

- **Precipitación**

Otro de los componentes importantes del cultivo de tomate es la precipitación, Benedito (1986) menciona que el cultivo del tomate no soporta encharcamientos, lluvias excesivas o prolongadas, ya que favorece la incidencia de enfermedades. Todo el ciclo del cultivo del tomate tiene un requerimiento de 600 a 800 mm. de precipitación fluvial. (Melendrez, 2021)

- **Suelo**

Aunque el tomate puede producirse en una amplia gama de condiciones de suelos, los mejores resultados se obtienen en suelos profundos (1 m o más), de texturas medias, permeables y sin impedimentos físicos en el perfil. Suelos con temperaturas entre los 15 y 25 °C favorecen un óptimo establecimiento del cultivo después del trasplante (Escalona, Alvarado, Monardes, Urbina, & Martin, 2009). El pH debe oscilar entre 6 y 7. La conductividad eléctrica óptima está entre 1,5 y 2,0 dS/m. La productividad y sostenibilidad de los suelos dependen de un manejo adecuado de las propiedades físicas (textura, densidad, porosidad, entre otras), las cuales determinan la disponibilidad de nutrientes para las plantas. (MDRyT, 2017)

1.16. Bases fisiológicas del punto de marchitez permanente en cultivos hortícolas

El punto de marchitez permanente, representa el límite fisiológico inferior de disponibilidad de agua en el suelo, definido como el estado en la cual la planta ya no puede extraer agua suficiente para mantener su turgencia celular, aun cuando el suelo sea posteriormente rehumedecido. De acuerdo con Daniel Hillel, este límite se asocia a un potencial hídrico del suelo cercano a 15 bar, el valor que refleja la incapacidad del sistema radical para vencer las fuerzas de retención del agua en el suelo, en especial

suelos arenosos, donde el agua se encuentra débilmente retenida y se pierde rápidamente.

De otra manera Kramer y Boyer, señalan que por debajo de 15 bar ocurre la pérdida irreversible de la turgencia celular, acompañada del cierre de estomas, reducción del crecimiento y colapso de proceso fisiológico, confirmando el carácter fisiológico irreversibles

Desde la fisiología vegetal Taiz y Zeiger, explican que las plantas mesófitas, grupo al que pertenecen la mayoría de los cultivos hortícolas, presentan una capacidad limitada a la tolerancia del estrés hídrico.

Según estas investigaciones, el punto de marchitez permanente no depende solamente de las características físicas del suelo sino también de la fisiología que tienen cada especie vegetal. Los rangos presentados son representativos de los suelos arenosos y se fundamentan en el criterio fisiológico del potencial hídrico de 15 bares.

La acelga. - a pesar de su elevado desarrollo foliar, puede tolerar contenidos de humedad, el PMP es del 2% al 4%.

La cebolla. - es un cultivo de raíz superficial y una baja capacidad de extracción del agua, el PMP se sitúa generalmente entre el 3% y 6%.

La lechuga. -caracterizado por su elevado contenido de agua y su alta sensibilidad al déficit hídrico, el PMP está entre 4% y el 6%.

La remolacha. - tiene una mayor capacidad de almacenamiento y moderada tolerancia al estrés hídrico, el PMP está entre el 3% y 5%.

El tomate. - tiene un sistema radicular más desarrollado, alcanza un PMP del 5% y 7%.

2.3. Características climáticas

En Tarija los veranos son de días más largos, calurosos, mojados y mayormente nublados, en invierno los días son más cortos, fríos y en su mayoría despejados.

Durante el transcurso del año la temperatura varía de 5 °C a 25 °C y en algunos casos la temperatura baja a menos 1 °C o sube a más de los 29 °C.

La temporada templada empieza en octubre hasta febrero, diciembre es el mes más cálido, la temperatura máxima promedio de 24 °C y la mínima de 16 °C.

La temporada fresca o fría empieza de mayo a julio, la temperatura máxima promedio es menos 21 °C y la mínima promedio es de 5 °C.

El promedio anual de la temperatura en Tarija es de 16 °C.

2.3.1. Precipitación

La precipitación en Tarija es un día con por lo menos 1 milímetro de precipitación. La temporada con mayor precipitación es de noviembre a marzo con una probabilidad de 40 %, la temporada más seca es de abril hasta octubre. Enero es el mes con mayor precipitación de todo el año. La precipitación promedio es de 615.4 milímetro por año.

2.3.2. Viento

La velocidad promedio del viento por hora en Tarija tiene variaciones estacionales en todo el año, los meses de mayo hasta septiembre cuentan con un máximo del 52 % de vientos, la velocidad promedio oscila en 11,7 kilómetros por hora.

2.3.3. Tipo de suelo

En Tarija hay una gran variabilidad de suelo por que el territorio combina valles, terrazas aluviales, abanico aluviales, pendientes, serranías y planicies fluvio - lacustres. Esto hace que no existe un solo suelo dominante, sino varios grupos edáficos según la zona. Según la zonificación agroecológica del departamento se identifican, entre otros los siguientes suelos: Leptosoles, Cambiosoles, Fluviales, Calcisoles, Arenosos. (Tarija, 2024)

2.3.4. Vegetación

El valle central de Tarija tiene un clima templado semiárido o templado mesotérmico, con una marcada estación seca en invierno y lluvias concentradas en verano. Este tipo de climas favorece a la vegetación de valle seco interandino, que este compuesto por pastizales naturales, matorrales, arboles dispersos y áreas agrícolas, también se encuentran especies adaptadas a periodos de sequía.

Cultivos de producción

Nombre común	Nombre científico
Cebolla	<i>Allium cepa</i> L.
Tomate	<i>Solanum lycopersicum</i> L.
Maíz	<i>Zea mays</i> L.
Papa	<i>Solanum tuberosum</i> L.

Cultivos anuales

Nombre común	Nombre científico
Duraznero	<i>Prunus persica</i> (L.) Batsch.
Higuera	<i>Ficus carica</i> L.
Nogal	<i>Juglans regia</i> L.
Vid	<i>Vitis vinifera</i> L.

Arboles dispersos

Nombre común	Nombre científico
Molle	<i>Schinus molle</i> L.
Churqui	<i>Vachellia caven</i> .
Sauce criollo	<i>Salix humboldtiana</i> willd.
Tipa	<i>Tipuana tipu</i> (Benth.) Kuntze.

2.4. Materiales

2.4.1. Material vegetal

La selección de las cinco especies vegetales evaluadas se realizó considerando su importancia agronómica y su frecuente cultivo en sistemas hortícolas de la región. Los cultivos de la remolacha, cebolla, tomate, acelga y lechuga, representan especies de alto valor productivo y consumo local, además de presentar diferentes requerimientos hídricos y características fisiológicas. Esta variabilidad permitió analizar el comportamiento del punto de marchitez permanente en función de la demanda de agua de cada cultivo, facilitando la comparación del contenido de humedad del suelo asociado al estrés hídrico.

E_1 = Acelga híbrida.

E_2 = Cebolla variedad morada.

E_3 = Lechuga variedad crespa.

E_4 = Remolacha variedad lora.

E_5 = Tomate híbrido.

2.4.2. Insumos

- ❖ Arena.
- ❖ Limo.
- ❖ Materia orgánica.
- ❖ Arcilla.
- ❖ Trampas de colores.
- ❖ Jabón potásico.

2.4.3. Herramientas y materiales de campo

- ❖ Macetas.
- ❖ Pala.
- ❖ Saca bocado.
- ❖ Regadera.

- ❖ Flexómetro.

2.4.4. Materiales para el extractor de placas

- ❖ Placas de cerámica.
- ❖ Papel filtro.
- ❖ Desecador.
- ❖ Cilindro de saturación.
- ❖ Platos de secado.

2.4.5. Materiales para muestra de suelo para los tratamientos

- ❖ Cuchara.
- ❖ Sacabocado.
- ❖ Bolsas herméticas.
- ❖ Tamizador.

2.4.6. Equipo de laboratorio

- ❖ Extractor de placas de presión.
- ❖ Estufa.
- ❖ Balanza para determinar el porcentaje de humedad.

2.4.7. Equipo de campo

- ❖ Analizador de humedad y temperatura.

2.4.8. Invernadero

Construcción de un invernadero.

2.5. Diseño experimental

El estudio se estableció bajo un diseño completamente al azar (DCA), con cinco tratamientos correspondientes a las especies vegetales, con cuatro repeticiones de cada tratamiento.

El modelo matemático para el diseño es:

Cada valor Observado = Constante general + Efecto de los tratamientos + Un error.

$$Y_{ij} = m + t_i + e_{ij}$$

El análisis nos dice que una observación es el efecto de una media general alrededor de la cual se encuentran los valores de todas las observaciones (m), el efecto de tratamiento viene representado por (t_i) y un error experimental que viene dado por (e_{ij}).

Fuente: (Garnica&Rodriguez, 2008).

2.6. Factor de estudio

❖ Primer factor de estudio:

Se evaluó la manifestación visual del punto de marchitez permanente en las plantas de cada tratamiento y registrando el contenido de humedad del suelo mediante la balanza analítica.

T_1 = Remolacha.

T_2 = Cebolla.

T_3 = Tomate.

T_4 = Acelga.

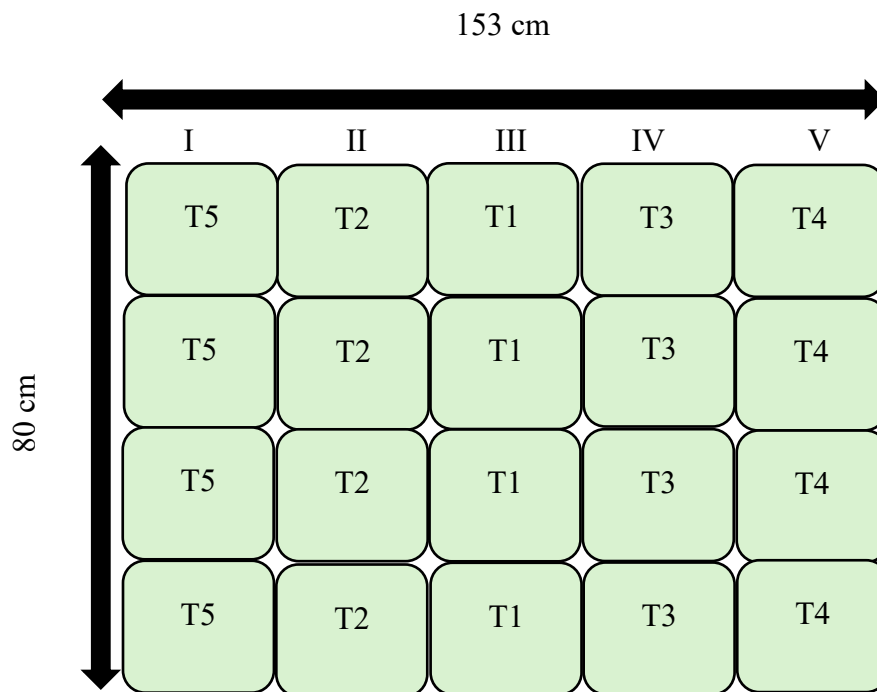
T_5 = Lechuga.

Para garantizar la homogeneidad, se empleó un único suelo preparado mediante la mezcla de arena, limo, arcilla y materia orgánica. De acuerdo con los resultados del análisis del suelo en el laboratorio, se lo clasifico como un suelo franco arenoso, tiene un porcentaje elevado de materia orgánica que es del 4,62%, con un pH de 8,16 siendo ligeramente alcalino y con una alta disponibilidad de los macronutrientes.

❖ Segundo factor de estudio:

Se utilizó un extractor de placas de presión, aplicando presiones de 0,33 bar para la determinación de capacidad de campo (CC) y para la determinación del punto de marchitez permanente (PMP), se aplicó una presión de 15 bar.

2.7. Diseño de campo



2.8. Procedimiento

❖ Ubicación geográfica

La construcción del invernadero se lo realizó dentro de unos de los viveros de la facultad de la Carrera de Ingeniería Agronómica y Forestales, el lugar se lo ubicó en un área plana con referencia hacia el sol.

❖ Armado del invernadero

Para esto se utilizó listones de dos pulgadas y listones de una pulgada, el tamaño del invernadero es de 2,5 m de largo x 2,5 m. de ancho, su perímetro es de 10 m y con un área de $6,25 m^2$.

Se colocó el analizador de temperatura y humedad dentro del invernadero para así para controlar la temperatura y la humedad, el invernadero fue totalmente cubierto sin áreas de ventilación para que así la humedad y la temperatura se mantuvieran controladas. La temperatura se lo controlaba abriendo la puerta ya sea para que baje o suba la temperatura y para mantener la humedad se regaba las áreas libres para que esta sea constante.

❖ **Preparación del suelo y llenado de las masetas**

El suelo se lo preparo con: arena, limo, materia orgánica y la arcilla cada uno en diferentes cantidades, una vez que estuvo bien mezclado se llenaron las masetas y se colocaron dentro del invernadero.

❖ **Plantines**

Los plantines se obtuvieron de una plantinera de la ciudad de Tarija, se colocaron dos plantas por cada maceta, una vez que estas ya estuvieran prendidas se comenzó a realizar las actividades agrícolas, como ser riego, limpieza de maleza y control de la humedad y temperatura.

❖ **Riego de las macetas**

Primera semana y segunda; aquí el riego se lo hacia una vez al día todos los días.

Tercera semana; la frecuencia de riego fue de un día por medio ya no requerían un riego de todos los días, ya que la temperatura y la humedad del ambiente son elevadas y no había mucha perdida de agua por la transpiración de las plantas.

De la cuarta semana en adelante: los riegos fueron un día por medio o de acuerdo al requerimiento de cada especie vegetal ya que el T_2 no requería de un riego muy frecuente.

En la novena semana: las plantas ya estaban bien desarrolladas y solo se hizo un solo riego saturando el suelo con agua y desde ese momento se suspende el riego y se procede a hacer el levantamiento de los datos.

❖ **Analizador de temperatura y humedad**

Con este analizador se pudo controlar la humedad y la temperatura dentro del invernadero. Se lo instalo dentro del invernadero.

❖ **Monitoreos**

Se monitorea la humedad para que esta se mantenga constante, que era de un 75 % si la humedad aumentaba de 90 % se abría la puerta para bajar la humedad. Si esta llegaba a bajar más de 50% se regaba las áreas vacías y se cerraba la puerta.

La temperatura se mantenía de 20 °C hasta los 31° C, si la temperatura es muy elevada se abría la puerta y si había un descenso de temperatura entonces se lo tenía cerrada la puerta.

❖ **Control de plagas**

Durante el desarrollo de la investigación se realizó un monitoreo periódico de las principales plagas presentes en el invernadero, con el fin de evitar que estrás influyan significativamente en el crecimiento y el desarrollo de los cultivos.

• **Mosca blanca**

La mosca blanca fue la primera en aparecer, afectando principalmente en los cultivos del tomate y la lechuga, el daño observado se concentró en las hojas, las cuales presentaron una sustancia pegajosa producto de la excreción de melaza, lo que afecto la superficie foliar.

Como método de control se emplearon trampas cromáticas de color amarillo, constituyendo el principal medio de manejo de esta plaga. Para su elaboración se utilizando nylon amarillo, el cual fue cortado de forma rectangular; en ambos extremos del rectángulo se colocó soportes de caña para facilitar su colocación dentro del invernadero. Posteriormente, ambas caras del nylon fueron impregnadas de aceite comestible, con el objetivo de atrapar a los insectos adultos, se instalaron tres trampas para los tratamientos, estas fueron remplazadas de manera constante.

- **Pulgón**

Estos se presentaron en la acelga, lechuga y remolacha. Para su control se utilizó jabón potásico, el cual fue aplicado de manera directa sobre las plantas. Para su aplicación se utilizó un tamizador y se distribuyó uniformemente sobre todos los tratamientos.

Con este control se pudo mantener la población de Pulgón controladas.

2.8.1. Metodología de toma de datos de campo

1. Se comienza con el levantamiento de datos del invernadero cuando las plantas entran en estrés hídrico.
2. Con el saca bocado sacamos tres muestras de una maseta de unos 7 cm de profundidad y lo colocamos en la bolsa hermética.
3. Se homogeniza la muestra y se lo lleva a laboratorio de inmediato para medir el porcentaje de humedad de ese día.
4. Este procedimiento se lo hace para todas las repeticiones todos los días ya que la humedad de suelo va variando.
5. Cuando los tratamientos entran en una marchitez insipiente se tiene que tener más cuidado ya que después es el momento en que entran en PMP.
6. Para saber si ya paso de marchitez insipiente a PMP se tiene que regar una repetición por tratamiento y si las hojas de la planta se recuperan es que aún no ha llegado al PMP.
7. Se tiene que hacer esta prueba de riego hasta que llegue al punto de regar y las hojas no revivan.

2.8.1.1 Metodología del uso de la balanza para los datos de campo

1. La balanza tiene que estar bien calibrada.
2. La muestra de suelo tiene que estar bien mezclada.
3. Se pesa 5 gramos de muestra en la balanza, se cierra el equipo y se da a iniciar el secado de la muestra para determinar el porcentaje de humedad.
4. Cuando el equipo nos da el dato, este se lo anota y se procede a retirar la muestra que está dentro de la placa de aluminio.

5. Se coloca otra placa de aluminio limpia y otra vez se comienza a pesar los 5 gramos de suelos, este procedimiento se lo realiza para todas las repeticiones de los tratamientos hasta que la planta llegue a su PMP.

2.8.2. Saturación de la muestra de suelo para el extractor de placas

Fueron 8 muestras con el mismo suelo, esta muestra es la primera muestra compuesta que se obtuvo de la preparación del suelo antes de colocar a las masetas.

1. Pegar un papel filtro en un cilindro de saturación
2. Una vez listo eso se tiene que colocar pequeñas muestras de suelo y con la pesa de 1 kg se tiene que ir compactando la muestra de suelo hasta que quede una cantidad de muestra a nivel de la parte superior del cilindro.
3. Con una brocha se tiene que limpiar los restos de los bordes.
4. (este procediendo se hace para los 8 cilindros de saturación, 4 de estos irán para determinar cc y los demás para PMP).
5. Se colocan las 8 muestras ya preparadas en los cilindros en un recipiente plano y se lo satura con agua destilada.
6. Dejar reposar por 24 horas pasado este tiempo retirar el exceso de agua y proceder a utilizar el extractor de placas.

2.8.3. Metodología del extractor de placas

1. En el desecador se tiene que saturar con agua destilada (7 litros), las placas de cerámica porosa que son de 1 bar y de 15 bar, 24 horas antes de utilizar el extractor de presión.
2. Cuando ya se pasaron las 24 horas de saturación de las placas de cerámica, en el extractor de presión se colocan los soportes de repisa para apoyar las cuatro placas.
3. Se colocan las cuatro placas del extractor de presión, en cada placa va una manguera de flujo de salida, esta debe ser colocadas con una pequeña curva.
4. En la última placa de la parte superior se colocan las muestras de suelo y se procede al sellado del extractor de presión.

(El extractor de presión cuenta con dos ollas las cuales estrás trabajan a presiones diferentes ya que la una trabaja a 1 bar de presión que es para determinar la CC y la otra olla trabaja a 15 bar de presión que es para determinar el PMP. Cada olla tiene que trabajar con sus placas que también son de 1 bar y de 15 bar. Para cada olla el procedimiento del colocado de las placas de cerámicas es el mismo).

5. Una vez colocada las muestras del suelo se coloca la tapa del equipo y para sellarlo de manera correcta se ajusta los pernos de forma cruzada, hasta que esté bien sellado. (es lo mismo para ambas ollas).
6. Todas las llaves deben estar cerradas.
7. Encender compresor
8. Para la olla que trabaja a 1 bar de presión se tiene que abrir válvula 1
9. Abrir regulador 3 y llevar hasta 1,5 bar (ajustar tuerca).
10. Cerrar válvula 1.
11. Abrir válvula de escape.
12. Abrir llave amarilla entre 3-4.
13. Abrir llave 2.
14. Abrir llave 4 hasta 0,33 bar.
15. Abrir llave amarilla debajo del escape
16. Para la olla que trabaja a 15 bar abrir llave 1
17. Abrir llave 3 y poner hasta 15 bar.
18. Abrir llave amarilla debajo del escape.

(Se coloca un recipiente a lado de las ollas en la parte del flujo de escape ya que empezará a salir agua, para esto se tiene que hacer un control de 24 horas, pasado este tiempo se tiene que verificar si aún sale agua y si sigue saliendo a las 48 horas otras se tienen que controlar hasta que deje de salir agua, la parte de los flujos de escape tienen que estar secos para recién apagar el equipo).

19. Para apagar el equipo se apaga el compresor.
20. Para la olla que trabaja a 1 bar, se cierra la llave amarilla debajo del escape.
21. Cerrar llave 2,3 y 4

22. Abrir escape
23. Para la olla que trabaja a 15 bar, cerrar la llave amarilla
24. Cerrar la llave 1
25. Ir a medir el porcentaje de humedad en la balanza para obtener los datos del PMP y CC para esa muestra.

2.9.- Variables respuesta

- ❖ Determinar el punto de marchitez permanente de cada tratamiento mediante el equipo de la balanza para determinar el porcentaje de humedad del suelo.
- ❖ Corroborar con el extractor de placas el resultado del PMP.
- ❖ Tabla de ANVA

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Condiciones ambientales del invernadero

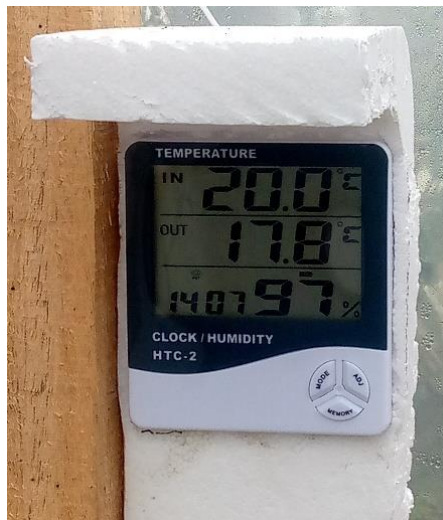
Durante el periodo experimental (septiembre- diciembre), la temperatura y la humedad relativa, fueron los factores que más influencia tuvieron en el desarrollo de las especies vegetales. Para el monitoreo de la temperatura y del porcentaje de humedad se utilizó el equipo de “Clock/humidity HTC- 2”, con el cual se pudo registrar la temperatura dentro y fuera del invernadero.

La temperatura interna del invernadero oscilo entre 21,08 y 28° C, con una media de 24,5 ° C y la temperatura externa oscilaba entre 19,24 y 23, 38° C.

La humedad relativa se mantuvo en un rango de 69 – 85%, con un promedio de 78%

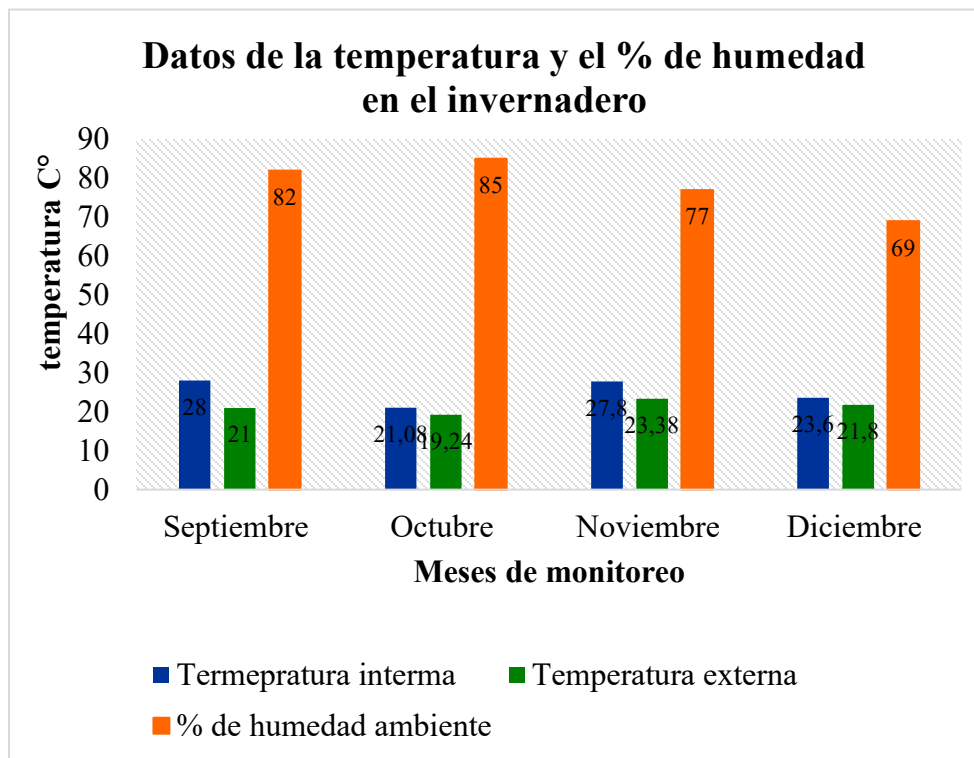
Estas condiciones se encuentran dentro del rango óptimo para cultivos hortícolas, según (Valdez,1988). La diferencia térmica entre el interior y el exterior del invernadero ($\Delta T = 3\text{-}5^{\circ}\text{C}$).

Figura 2: Imagen del equipo Clock/humidity HTC- 2



Equipo de Clock/humidity HTC- 2.

Figura 3: Temperatura y humedad relativa en el invernadero



Fuente: Equipo de Clock/humidity HTC- 2.

3.2 Características morfológicas de los diferentes tratamientos

3.2.1. Remolacha

Los resultados obtenidos en el cultivo de la remolacha evidenciaron un adecuado desarrollo morfológico bajo las condiciones controladas del invernadero. Las plantas alcanzaron una altura de 34 y 40 cm en las diferentes repeticiones, a los 51 días de su trasplante en el invernadero ya contaban con la formación de bulbos en todas las unidades experimentales evaluadas. Este comportamiento indica que las condiciones ambientales proporcionadas especialmente la temperatura, humedad y manejo hídrico favorecieron el crecimiento vegetativo y al desarrollo de bulbo.

Según (Valdez, 1988), la remolacha se desarrolla de manera óptima en temperaturas moderadas de 20° a 25° C, y con una adecuada disponibilidad de humedad en el suelo y el ambiente que está entre los 60% y 90% de humedad, estas condiciones permiten

la correcta formación de la planta. Los resultados observados en el presente estudio estarían dentro de lo que señala el autor ya que el ambiente protegido de invernadero favoreció en las características morfológicas y el desarrollo fisiológico.

Cuadro 2: Características morfológicas de la remolacha

Características morfológicas de la remolacha		
Repeticiones	Altura de la planta	Presencia de bulbo
R1	34 cm	SI
R2	38 cm	SI
R3	37 cm	SI
R4	40 cm	SI

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Cebolla

Entre las cinco especies evaluadas, la cebolla fue la que presento mayor sensibilidad a las condiciones de la investigación que eran de una humedad y temperatura elevada, tuvo un desarrollo morfológico limitado en comparación con los demás cultivos. Aunque las plantas lograron prender después del trasplante, posteriormente mostraron síntomas claros de estrés, característico por la pérdida de turgencia en las hojas, incluso después de regar.

Figura 4: Marchitez de la cebolla



Fuente: Elaboración propia.

Este comportamiento puede explicarse por las características morfológicas del sistema radicular de la cebolla, la cual es relativamente superficial y con una limitada capacidad de expansión en el suelo, lo que reduce su eficiencia en la absorción de agua cuando las condiciones no son favorables. Según (Altamirano, 2023).

Según (Fernández 1995), señalan que cuando el contenido de humedad del suelo alcanza niveles críticos, la absorción del agua por las raíces no logra compensar la pérdida fisiológica de la planta, provocando una pérdida irreversible de turgencia en los tejidos. La temperatura óptima para su desarrollo está entre 20° C a 25° C y el % de humedad no debe ser elevada.

En este caso, las condiciones del invernadero, particularmente la falta de ventilación y el microclima generado en su interior, pudieron intensificar el estrés en las plantas de cebolla, afectando su capacidad de recuperación y su desarrollo normal.

Cuadro 3: Características morfológicas de la cebolla

Características morfológicas de la cebolla		
Repeticiones	Altura de la planta	Número de hojas
R1	40	5
R2	30	5
R3	35	4
R4	40	4

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Tomate

En el cultivo del tomate se observó un desarrollo morfológico favorable bajo las condiciones del experimento. Las plantas presentaron un crecimiento vigoroso y relativamente uniforme, alcanzando alturas comprendidas entre 60 cm y 74 cm en las diferentes repeticiones. Asimismo, se vio la formación de ramilletes florales y la presencia de frutos hacia el final de la investigación. Esto nos indica que el cultivo logro completar adecuadamente su fase vegetativa y avanzar hacia la fase reproductiva. Este comportamiento sugiere que las condiciones ambientales dentro del invernadero permitieron un adecuado desarrollo fisiológico y morfológico de las plantas.

Es importante considerar, que al final de la investigación las plantas fueron sometidas a condiciones de estrés hídrico con el objetivo de determinar el PMP. Bajo estas condiciones, la aparición de frutos se lo considera como una respuesta fisiológica adaptativa al estrés.

Según (Kramer & Boyer, 1995), En las diversas investigaciones Fisiológicas señalan, que cuando la planta experimente déficit hídrico, tienden a modificar la distribución de sus recursos metabólicos, reduciendo el crecimiento vegetativo y priorizando los procesos reproductivos con el fin de asegurar la producción de semillas antes que las condiciones ambientales se vuelvan desfavorables, a esto se lo conoce como una estrategia de escape al estrés. En este sentido la fructificación observada en el cultivo

del tomate está asociada a la respuesta de la planta frente al estrés hídrico durante la determinación del PMP.

Cuadro 4: Características morfológicas del tomate

Características morfológicas de tomate			
Repeticiones	Altura de la planta	Ramillete floral	Flores
R1	60	1	5
R2	66	1	6
R3	62	1	6
R4	74	2	5

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Acelga

El cultivo de la acelga se observó un adecuado desarrollo morfológico bajo las condiciones controladas del invernadero. Las plantas tuvieron un buen desarrollo que se vio principalmente por el tamaño de las hojas las cuales alcanzaban una longitud de 36 a 45 cm y un ancho de 10 a 13 cm en las diferentes repeticiones evaluadas. El número de hojas oscilo entre 11 y 13 hojas lo que indica un crecimiento vegetativo favorable y una buena adaptación del cultivo a las condiciones de temperatura, humedad y del manejo hídrico dentro del invernadero.

Según (Armando, 2022), la acelga se caracteriza por poseer una elevada capacidad de adaptación a diferentes condiciones, especialmente en ambientes protegidos. Las hojas presentan un limbo amplio y un peciolo bien desarrollado, características que favorecen al desarrollar la fotosíntesis. Los resultados obtenidos coinciden con lo que señala este autor.

Aunque hacia la fase final de la investigación, las plantas fueron sometidas a condiciones de estrés hídrico para la determinación del PMP, la acelga logro mantener un desarrollo vegetativo adecuado durante la gran parte del trabajo, lo que demuestra su tolerancia a variaciones en la disponibilidad de agua.

Cuadro 5: Características morfológicas de la acelga

Características morfológicas de la acelga			
Repeticiones	Tamaño de hoja	Ancho de la hoja	Número de hojas
R1	38 Cm	13cm	12
R2	40 cm	11 cm	13
R3	36 cm	11cm	11
R4	45 cm	10 cm	11

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5. Lechuga

En el cultivo de la lechuga se observó un desarrollo morfológico limitado bajo de las condiciones del invernadero. El alargamiento del tallo se lo observo desde las primeras etapas del crecimiento lo cual se atribuye principalmente a las condiciones micro climáticas del invernadero.

Las plantas lograron prender adecuadamente después de trasplante, la falta de ventilación provoco la acumulación de calor y una humedad relativa elevada, influyeron de manera directa en el desarrollo morfológico de la planta. En este ambiente se provocó un acelerado crecimiento del tallo y una menor compactación de las hojas, esto se lo conoce como espigamento prematuro, esto ocurre cuando las condiciones ambientales son desfavorables.

El alargamiento observado en las plantas, también pueden ser relacionados con alteraciones en la regulación hormonal del crecimiento. Las fitohormonas, en especial las giberelinas y las auxinas, desempeñan un papel fundamental en la elongación celular y en el desarrollo del tallo. Bajo condiciones ambientales como temperaturas

elevadas, alta humedad relativa, y baja ventilación, estas hormonas pudieron incrementarse, provocando un crecimiento más alargado de la planta. Las temperaturas dentro del invernadero pudieron haber influido indirectamente en la regulación de las hormonas de este cultivo.

Cuadro 6: Características morfológicas de la lechuga

Características morfología de la lechuga			
Repeticiones	Altura de planta	Números de hojas	Ancho de la hoja
R1	53cm	12	10
R2	64cm	14	10
R3	52cm	10	8
R4	67cm	8	10

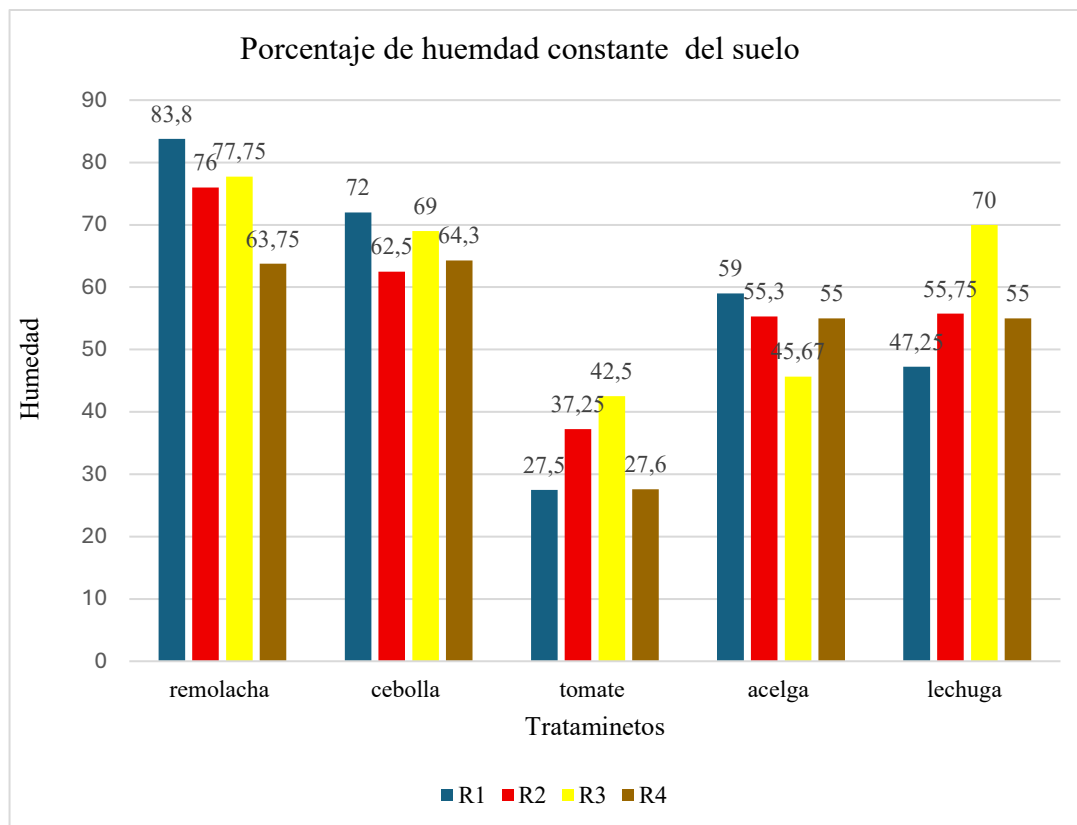
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Porcentaje de humedad constante del suelo antes de la saturación

Cuadro 7: Porcentaje de humedad del suelo

Porcentaje de humedad constante del suelo						
Tratamiento	R1	R2	R3	R4	Suma	Media
Remolacha	83,80%	76,00%	77,75%	63,75%	301,30%	75,3%
Cebolla	72,00%	62,50%	69,05%	64,30%	267,80%	67,0%
Tomate	27,50%	37,25%	42,50%	27,60%	134,85%	33,7%
Acelga	59,00%	55,30%	45,67%	55,00%	214,97%	53,7%
Lechuga	47,25%	55,75%	70,00%	55,00%	228	57,0%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5: Porcentaje de humedad en el suelo

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 7, se presentan los valores del porcentaje de humedad constante del suelo registrados antes del proceso de saturación. Estos valores corresponden al contenido hídrico inicial del suelo utilizado en los diferentes tratamientos durante el desarrollo del experimento.

Estos resultados muestran variaciones en el porcentaje de humedad en el suelo entre las unidades experimentales. Se obtuvo un promedio de 75,3 % para el tratamiento de remolacha, 67% para la cebolla, 57% para la lechuga, para la acelga 53,7% y un 33,7 % para el tomate. Estas diferencias están asociadas principalmente a la dinámica de consumo de agua por parte de cada especie vegetal durante su desarrollo, así como las características fisiológicas de cada cultivo como ser; tamaño de planta, desarrollo del

sistema radicular y la superficie foliar tienden a presentar un mayor consumo de agua, lo que influye directamente en el contenido de humedad en el suelo.

3.4. Resultados del extractor de placas

El cuadro 8, muestra los resultados obtenidos del PMP y CC mediante el uso del extractor de placas de presión.

Estos resultados indican que el suelo franco arenoso tiene una capacidad de campo del 11,9 % y el punto de marchitez permanente es de 6,8%.

Cuadro 8: Resultados del punto de marchitez permanente según el extractor de placas de presión

Suelo AF	PMP	CC
M1	6,82%	11,97%
M2	7,07%	12,25%
M3	6,94%	11,82%
M4	6,56%	11,63%
Σ	27,39%	47,67%
Media	6,8%	11,9%

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indican una media de 11,9 % para la CC y 6,8 % para el PMP, lo que representa un contenido de agua útil de 5,1 %. Estos valores son consistentes con el marco metodológico establecido por (Richards y Weaver 1943), quienes validaron el uso de una presión de 0,33 bar para estimar la CC y de 15 bar para el PMP, considerando que a esta última tensión el agua se encuentra retenida con una fuerza tal que la mayoría de las plantas herbáceas no pueden extraerla.

Según (Hillel,1972), el potencial matricial de -15 bar refleja la incapacidad del sistema radicular para vencer las fuerzas de retención del suelo, especialmente en texturas franco-arenosas donde el agua se pierde con mayor rapidez por drenaje y evaporación.

La baja dispersión observada entre las cuatro repeticiones (rango de 0,62 puntos porcentuales para CC y 0,51 para PMP) evidencia la homogeneidad del sustrato y la precisión técnica del procedimiento de laboratorio.

No obstante, como advierten (Weil&Brady, 2017) , el PMP no constituye un valor físico invariable, sino un umbral que también está influenciado por las características fisiológicas de cada especie. En este sentido, el valor de 6,8 % obtenido mediante el extractor representa una referencia edáfica base, la cual en esta investigación se contrasta con los límites fisiológicos reales de cada cultivo, demostrando que el método de laboratorio tiende a sobrestimar el punto de marchitez al no considerar la capacidad diferencial de extracción hídrica ni los mecanismos de ajuste osmótico propios de cada especie vegetal.

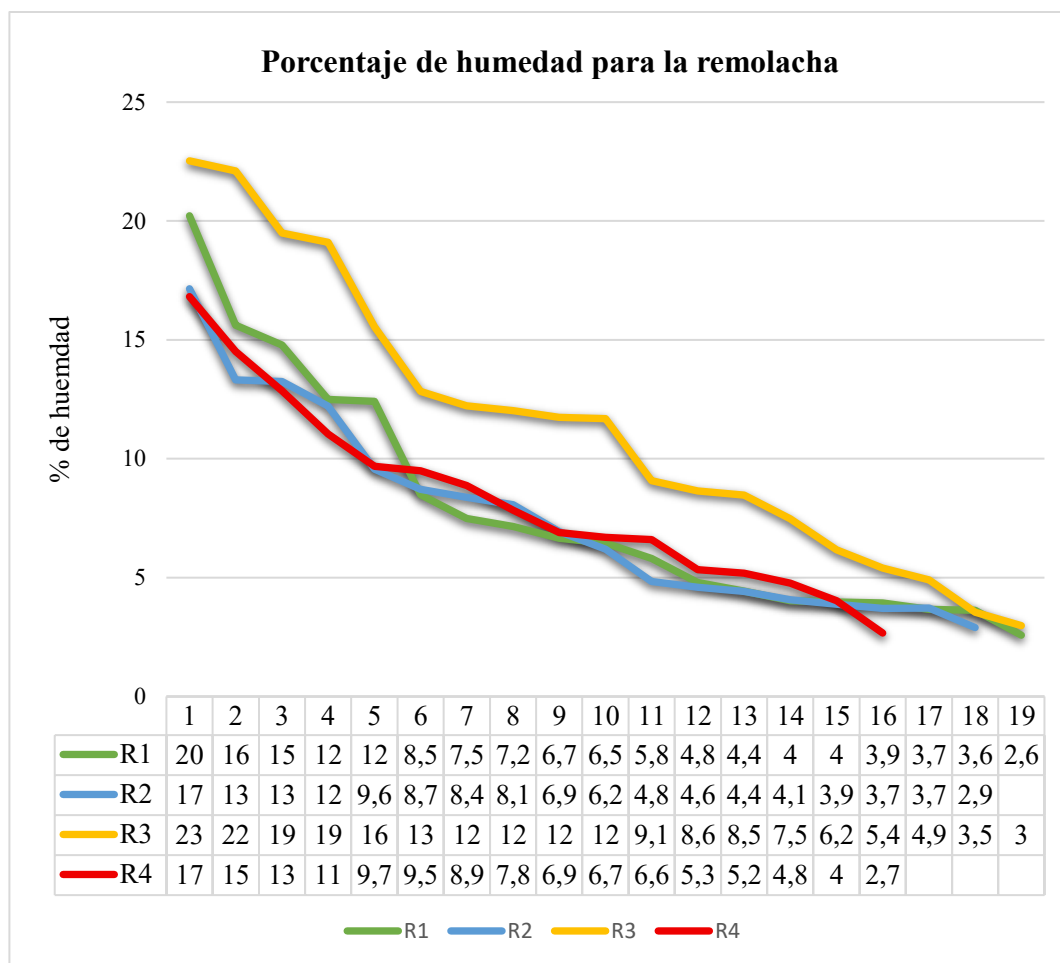
3.5. Porcentaje de humedad en el suelo hasta llegar al punto de marchitez permanente de las diferentes especies vegetales

3.5.1. Porcentaje de humedad en el suelo hasta llegar al punto de marchitez permanente para la remolacha (T1)

Cuadro 9: Porcentaje de humedad en el suelo del cultivo de la remolacha (T1)

Remolacha						
Día	R1	R2	R3	R4	Total	Promedio
1	20,22%	17,15%	22,53%	16,82%	76,72%	19,18%
2	15,62%	13,31%	22,1%	14,52%	65,555	16,39%
3	14,78%	13,25%	19,49%	12,86%	60,38%	15,1%
4	12,49%	12,21%	19,1%	11,04%	54,84%	13,71%
5	12,41%	9,56% ⁵	15,55%	9,68%	47,2%	11,8%
6	8,49%	8,71%	12,83%	9,5%	39,53%	9,88%
7	7,49%	8,38%	12,22%	8,88%	36,97%	9,24%
8	7,15%	8,07%	12,03%	7,84%	35,09%	8,77%
9	6,65%	6,94%	11,74%	6,9%	32,23%	8,06%
10	6,45%	6,19%	11,69%	6,7%	31,03%	7,76%
11	5,8%	4,84%	9,07%	6,6%	26,31%	6,58%
12	4,79%	4,59%	8,64%	5,34%	23,36%	5,84%
13	4,43%	4,42%	8,47%	5,19%	22,51%	5,63%
14	4,03%	4,07%	7,48%	4,77%	20,35%	5,09%
15	3,98%	3,88%	6,17%	4,03%	18,06%	4,52%
16	3,93%	3,7%	5,4%	2,67%	15,7%	3,93%
17	3,66%	3,72%	4,9%		12,28%	4,09%
18	3,63%	2,9%	3,54%		10,07%	3,36%
19	2,58%		2,98%		5,56%	2,78%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6: Porcentaje de humedad en el suelo para la remolacha

Fuente: Elaboración propia.

En el tratamiento 1 que corresponde al cultivo de la remolacha, se puede observar una disminución progresiva del contenido de humedad del suelo a medida que transcurre los días posteriores a la suspensión del riego. Este comportamiento nos muestra el proceso natural de la absorción del agua por parte de las plantas, así como también hay la pérdida de agua del suelo por evaporación dentro del invernadero.

Durante el primer día del control de humedad, el porcentaje promedio de humedad en el suelo fue de 19,18%, este valor nos indica que el suelo aún tiene una cantidad considerable de agua disponible para las plantas. Las plantas se encuentran en

condiciones fisiológicas normales, manteniendo su turgencia y un adecuado funcionamiento metabólico.

Entre los días 2 y 6 se observa una disminución progresiva del porcentaje de humedad en el suelo, pasando del 16,39% a un 9,88%, esto nos indica el consumo continuo de agua por parte de las plantas para sostener sus procesos fisiológicos, estos datos todavía se encuentran en el rango que permite la absorción hídrica por parte del sistema radicular.

Entre los días 7 y 10, el porcentaje de humedad del suelo baja hasta 7,76% las plantas comienzan a manifestarse con una ligera pérdida de turgencia en las hojas durante las horas de mayor temperatura, al descender la temperatura estas vuelen a recuperar su turgencia, esto se lo ve en horas de la mañana.

En los días 11 y 15, se registran valores de 6,58%, a este porcentaje de humedad las plantas recuperan su turgencia en las mañanas demostrando que aún están en una marchitez insipiente y al 4, 52% el suelo alcanza niveles de humedad muy bajos, el agua se encuentra retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo.

Las repeticiones que llegaron a obtener un valor del 4% de humedad se las hace una prueba para confirmar si recuperan o no. Los resultados mostraron que cuando el suelo llega a tener un porcentaje de humedad próximo del 4% la planta se recupera. La planta está en estrés hídrico y no se recupera por la mañana, pero aun así se recupera si se lo riega.

De los 16 días hasta los 19 días que son los últimos días, se registran valores del % de humedad inferiores al 3%, alcanzando un promedio final de 2,78% de humedad del suelo, siendo este el valor del PMP. Se hace la prueba para ver si se recupera la planta, echándole agua y esta no se recupera

3.5.2. Porcentaje de humedad en el suelo hasta llegar al punto de marchitez permanente para la cebolla (T2)

Durante el desarrollo del experimento, el cultivo de la cebolla presentó una pérdida de turgencia foliar que no fue reversible tras la rehidratación del suelo, aun cuando el contenido de humedad del suelo era elevado. Este comportamiento indica que la marchitez observada no respondió exclusivamente a un déficit hídrico del suelo, sino que estuvo asociada a la interacción de diversos factores de estrés, entre ellos condiciones térmicas elevadas, manejo hídrico y una posible limitación en la ventilación del invernadero. En consecuencia, no fue posible determinar de manera confiable el PMP fisiológico de la cebolla bajo las condiciones del microclima dado.

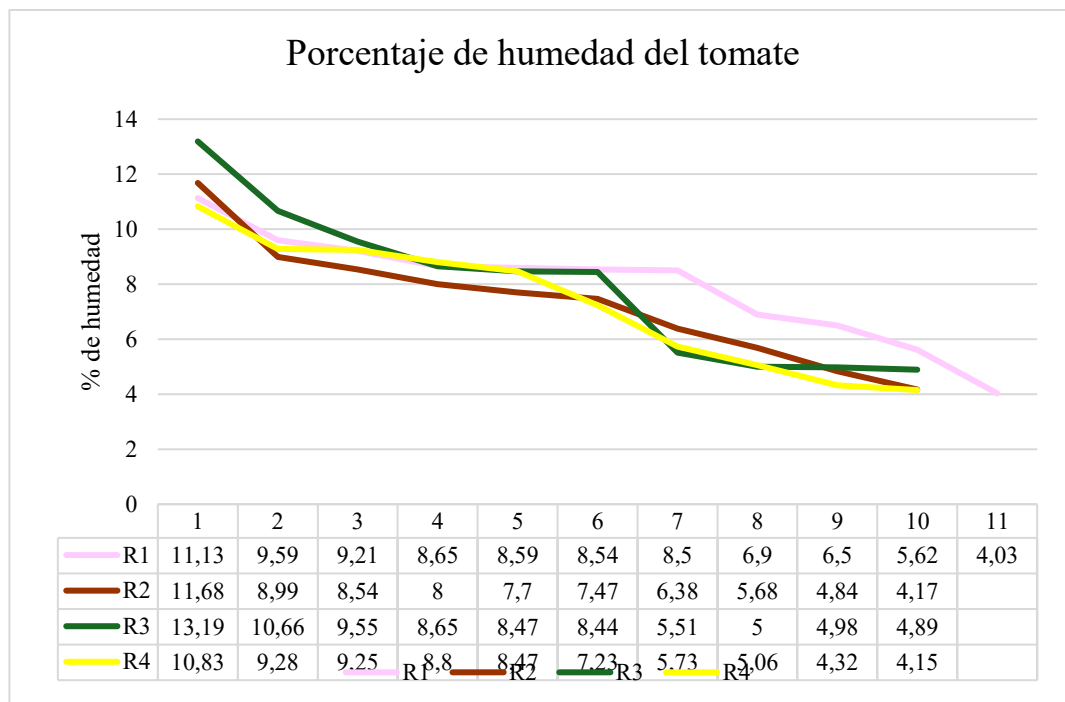
La exclusión del cultivo de cebolla del análisis comparativo no constituye una limitación del diseño experimental, sino una decisión metodológica fundamentada en el principio de rigor científico. En este sentido, únicamente se consideraron para el análisis estadístico aquellos datos que cumplieron con los supuestos del modelo y con los criterios fisiológicos definidos para la variable respuesta. Este procedimiento es coherente con lo señalado en la literatura especializada en experimentación agronómica, donde se establece que la calidad y validez de los datos deben prevalecer sobre la cantidad de tratamientos evaluados. (Garnica & Rodríguez, 2008)

3.5.3. Porcentaje de humedad en el suelo hasta llegar al punto de marchitez permanente en el tomate (T3)

Cuadro 10: Porcentaje de humedad en el suelo para el cultivo del tomate (T3)

Tomate						
Dia	R1	R2	R3	R4	total	promedio
1	11,13%	11,68%	13,19%	10,83%	46,83%	11,70%
2	9,59%	8,99%	10,66%	9,28%	38,52%	9,63%
3	9,21%	8,54%	9,55%	9,25%	36,55%	9,13%
4	8,65%	8%	8,65%	8,8%	34,1%	8,52%
5	8,59%	7,7%	8,47%	8,47%	33,23%	8,30%
6	8,54%	7,47%	8,44%	7,23%	31,68%	7,92%
7	8,5%	6,38%	5,51%	5,73%	26,12%	6,53%
8	6,9%	5,68%	5%	5,06%	22,64%	5,66%
9	6,5%	4,84%	4,98%	4,32%	20,645%	5,16%
10	5,62%	4,17%	4,89%	4,15%	18,83%	4,70%
11	4,03%				4,03%	4,03%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7: Porcentaje de humedad del suelo para el tomate

Fuente: Elaboración propia.

El tratamiento 3 que corresponde al cultivo del tomate, se observó una disminución progresiva del contenido de humedad del suelo, reflejando el consumo del agua por parte de las plantas y la pérdida por evaporación.

El día 1, el contenido promedio de humedad fue 11,7 %, el suelo aun disponía de agua para el desarrollo normal de las plantas. Al estar en este porcentaje de humedad las hojas no presentaban estrés hídrico.

En los días 2 y 4, la humedad del suelo disminuyó gradualmente desde 9,63% hasta 8,72%, en este porcentaje de humedad se vio una ligera pérdida de turgencia en las horas de más calor.

En los días 5 y 7, el porcentaje de humedad del suelo bajó hasta el 6,53%, la planta ya perdió su turgencia por completo y no se recuperaba en las horas de la madrugada. Se lo regó para ver si la planta recuperaba su turgencia y efectivamente recuperó su turgencia.

En los días 8 y 9 % el porcentaje de humedad bajo más hasta un 5,16 % de humedad, las plantas estaban más marchitas, las hojas más viejas ya estaban marchitas, se volvió a regar y la planta se recuperó en cuestión de horas.

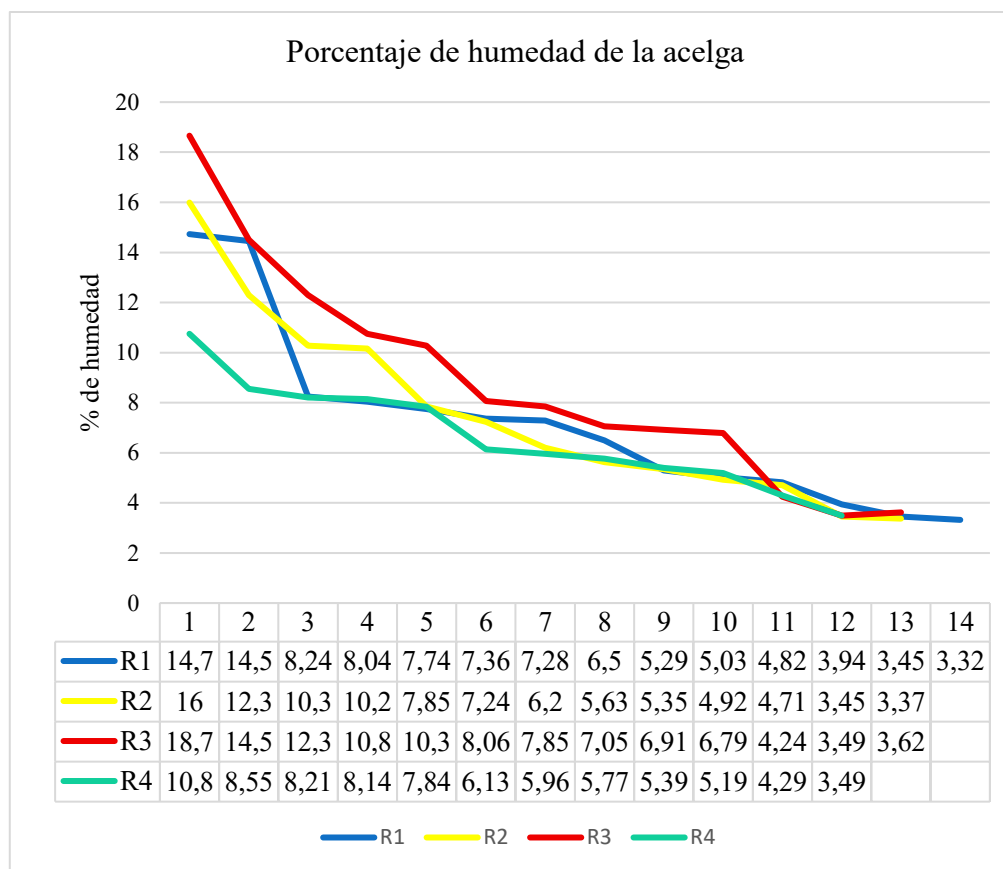
Cuando el porcentaje de humedad bajo hasta 4,03%, que fue en día 11, las hojas viejas ya estaban secas y las hojas nuevas estaban completamente marchitas, se lo rego y esta vez la planta no se recuperó.

3.5.4. Porcentaje de humedad en el suelo hasta llegar al punto de marchitez permanente en la acelga

Cuadro 11: Porcentaje de humedad en el suelo para el cultivo de la acelga (T4)

Acelga						
Día	R1	R2	R3	R4	Total	Promedio
1	14,73%	15,99%	18,66%	10,75%	60,13%	15,03%
2	14,46%	12,29%	14,5%	8,55%	49,8%	12,45%
3	8,24%	10,28%	12,3%	8,21%	39,03%	9,76%
4	8,04%	10,16%	10,75%	8,14%	37,09%	9,27%
5	7,74%	7,85%	10,27%	7,84%	33,7%	8,43%
6	7,36%	7,24%	8,06%	6,13%	28,79%	7,2%
7	7,28%	6,25%	7,85%	5,96%	27,29%	6,82%
8	6,5%	5,63%	7,05%	5,77%	24,95%	6,24%
9	5,29%	5,35%	6,91%	5,39%	22,94%	5,74%
10	5,03%	4,92%	6,79%	5,19%	21,93%	5,48%
11	4,82%	4,71%	4,24%	4,29%	18,06%	4,52%
12	3,94%	3,45%	3,49%	3,49%	14,37%	3,59%
13	3,45%	3,37%	3,62%		10,44%	3,48%
14	3,32%				3,32%	3,32%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8: Porcentaje de humedad en el suelo para la acelga

Fuente: Elaboración propia.

El tratamiento 4 que corresponde el cultivo de la acelga, se observó una disminución progresiva del contenido de humedad del suelo a medida que transcurrieron los días después de la suspensión del riego.

En día 1, el contenido de humedad del suelo presento un valor relativamente alto, con un promedio del 15,03 % de humedad. El suelo aun contiene agua disponible para el desarrollo normal del cultivo. Mantenían su estado fisiológico adecuado, sin signos de estrés hídrico.

En los días 4 y 5, la humedad fue bajando de 9,87% a 8,24 %, la planta aun no presentaba signos de marchitamiento. Lo cual el contenido de agua en el suelo aún era disponible para la planta.

En los días 8 y 9, el contenido de humedad era del 6, 24% a 5, 74%, las plantas en este punto ya presentaban signos de marchitamiento completo en las hojas viejas, las nuevas hojas aun mantenían su turgencia.

En el día 11 con un porcentaje de humedad del 4% en el suelo, las hojas viejas estaban marchitas y las nuevas hojas perdieron turgencia. Se rego una réplica para verificar el PMP y la planta recupera la turgencia en las hojas.

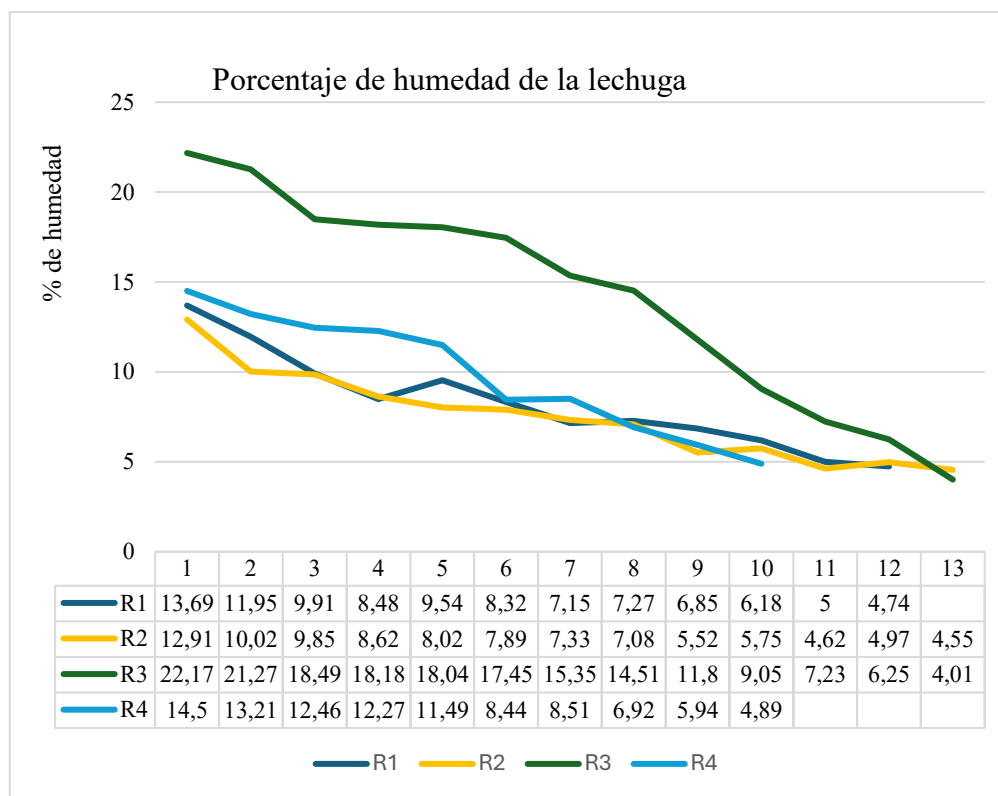
En los días 13 y 14, el % de humedad estaba entre el 3,48% y el 3,32 %, las hojas estaban completamente marchitas, las hojas viejas estaban secas y las hojas nuevas ya estaban para entrar a esa fase, se lo rego para ver si volvían, esta vez la planta no se recuperó.

3.5.5. Porcentaje de humedad en el suelo hasta llegar al punto de marchitez permanente en la lechuga

Cuadro 12: Porcentaje de humedad en el suelo para el cultivo de la lechuga (T5)

Lechuga						
Día	R1	R2	R3	R4	Total	Promedio
1	13,69%	12,91%	22,17%	14,5%	63,27%	15,8%
2	11,95%	10,02%	21,27%	13,21%	47,45%	11,9%
3	9,91%	9,85%	18,49%	12,46%	50,71%	12,7%
4	8,48%	8,62%	18,18%	12,27%	47,55%	11,9%
5	9,54%	8,02%	18,04%	11,49%	47,09%	11,8%
6	8,32%	7,89%	17,45%	8,44%	42,1%	10,5%
7	7,15%	7,33%	15,35%	8,51%	38,34%	9,59%
8	7,27%	7,08%	14,51%	6,92%	35,78%	8,95%
9	6,85%	5,52%	11,8%	5,94%	30,11%	7,53%
10	6,18%	5,75%	9,05%	4,89%	25,87%	6,47%
11	5%	4,62%	7,23%		16,85%	5,62%
12	4,74%	4,97%	6,25%		15,96%	5,32%
13		4,55%	4,01%		8,56%	4,28%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 9: Porcentaje de humedad para la lechuga

Fuente: Elaboración propia.

Para el tratamiento 5 que corresponde al cultivo de la lechuga, el primer día presento un contenido promedio de humedad alto que fue del 15,8 %. La planta no presento ningún síntoma de marchitamiento.

Entre los días 2 y 5, la humedad del suelo comenzó a disminuir de forma gradual debido a la abrasión del agua de parte de las plantas y a la pérdida de evaporación.

En el día 9, el porcentaje promedio de humedad bajo hasta 7,53 % las hojas pierden su turgencia en las horas de mayor calor y la vuelven a recuperar en la mañana.

En el día 11 la humedad del suelo continuó disminuyendo, provocando una mayor dificultad para que las raíces extrajeran agua del suelo. Esto se debe a que el agua se encontraba retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo, limitando la disponibilidad del agua para las plantas, en este punto el promedio del porcentaje de

humedad era del 5, 62%, las hojas estaban completamente marchitas, se regó una réplica para poder determinar el PMP, con este porcentaje de humedad la planta recuperó su turgencia.

El día 12, algunas repeticiones estaban con un porcentaje de humedad del 4, 74% R1 y 4,97% R2. Las hojas estaban completamente marchitas, el tallo estaba caído, se hizo una prueba de riego y la planta no se recuperó.

3.6. Punto de marchitez permanente de las diferentes especies

El punto de marchitez permanente no es algo que se lo atribuye totalmente al tipo de suelo, sino que las características fisiológicas y morfológicas de cada especie vegetal también influyen en este proceso.

3.6.1. Punto de marchitez permanente de la remolacha (*Beta vulgaris* L.)

Cuadro 13: Punto de marchitez permanente de la remolacha

PMP de la Remolacha	
T1R1	2,58%
T1R2	2,9%
T1R3	2,98%
T1R4	2,67%
Σ	11,13%
media	2,783%

Fuente: Elaboración propia.

El punto de marchitez permanente para el cultivo de la remolacha, en condiciones de invernadero es del 2,78%.

La remolacha posee una raíz pivotante engrosada, que actúa como reservorio de agua y carbohidratos. Este órgano permite a la planta regular su balance hídrico y mantener sus funciones fisiológicas aun cuando el contenido de agua en el suelo es bajo. Gracias a esta adaptación, la remolacha presenta la mayor capacidad de almacenamiento de agua, por ende, mayor tolerancia al déficit hídrico.

Figura 10: Sistema radicular de la remolacha

Fuente: Sitio web.

3.6.2. Punto de marchitez permanente del tomate (*Solanum Lycopersicum* L.)

Cuadro 14: Punto de marchitez permanente para el tomate

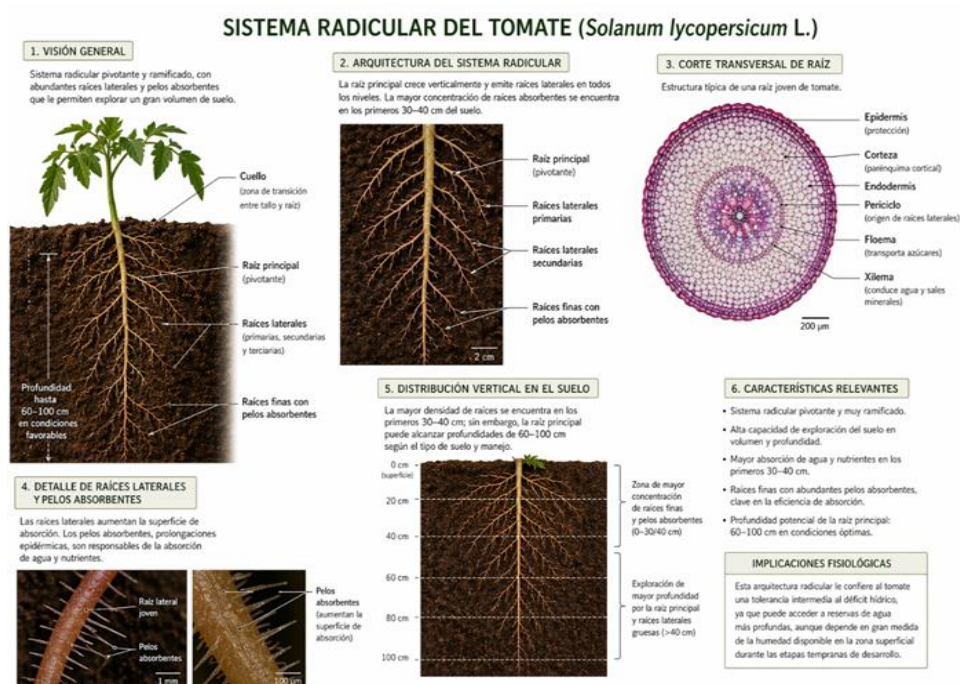
PMP del Tomate	
T3R1	4,03%
T3R2	4,17%
T3R3	4,89%
T3R4	4,15%
Σ	17,24%
media	4,310%

Fuente: Elaboración propia.

El punto de marchitez permanente para el cultivo del tomate, en condiciones de invernadero es del 4,31 %.

El tomate almacena agua en las hojas y tallos carnosos, lo que le confiere una capacidad de almacenamiento interna, esta reserva hídrica permite a la planta mantener su funcionamiento fisiológico durante cortos periodos de déficit hídrico; sin embargo, al no poseer órganos de almacenamiento especializados, dicha tolerancia es limitada.

Figura 11: Sistema radicular del tomate



Fuente: Sitio web.

3.6.3. Punto de marchitez permanente de la acelga (*Beta vulgaris* L. var. cicla)

Cuadro 15: Punto de marchitez permanente para la acelga

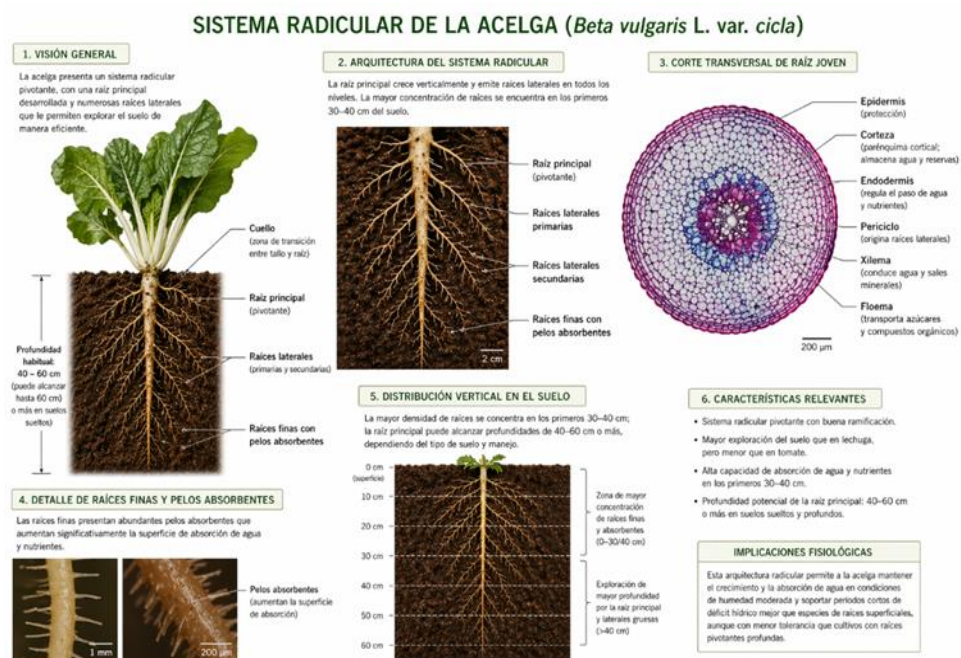
PMP de la Acelga	
T4R1	3,32%
T4R2	3,37%
T4R3	3,62%
T4R4	3,49%
Σ	13,8%
media	3,450%

Fuente: Elaboración propia.

El punto de marchitez permanente para el cultivo de la acelga, en condiciones de invernadero es del 3,45%.

La acelga presenta una raíz pivotante poco engrosada, con mayor desarrollo de tejido parenquimático. El agua se almacena principalmente en la corteza y el parénquima del cilindro central, lo que le permite conservar la humedad interna durante periodos moderados al estrés hídrico.

Figura 12: Sistema radicular de la acelga



Fuente: Sitio web.

3.6.4. Punto de marchitez permanente de la lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Cuadro 16: Punto de marchitez permanente para la lechuga

PMP de la lechuga	
T5R1	4,74%
T5R2	4,55%
T5R3	4,01%
T5R4	4,89%
Σ	18,19%
Media	4,548%

Fuente: Elaboración propia.

El punto de marchitez permanente para el cultivo de la lechuga, en condiciones de invernadero es del 4,55%.

En la lechuga, las raíces son finas y poco engrosadas, por lo que el almacenamiento de agua en la raíz es muy limitado. El agua se encuentra principalmente en la corteza radicular, pero debido al escaso desarrollo del parénquima y al reducido diámetro de las raíces, esta reserva es mínima y de corta duración, es así que esta depende exclusivamente del agua absorbida de manera continua desde el suelo.

Figura 13: Sistema radicular de la lechuga



Fuente: Sitio web.

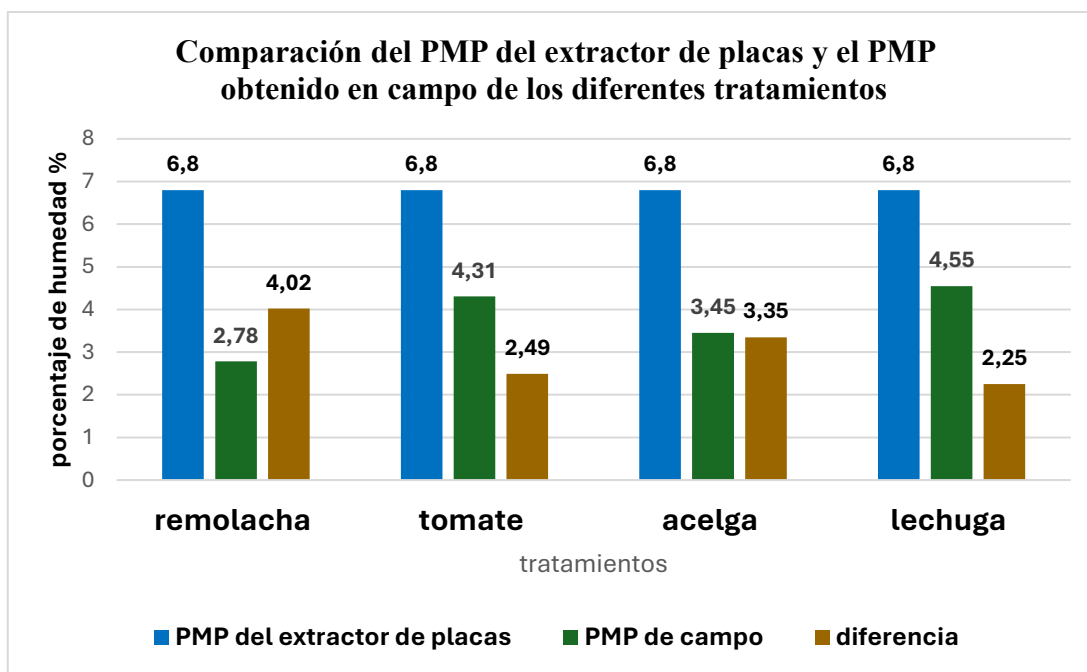
3.7. Comparación entre el punto de marchitez permanente de campo y el punto de marchitez del extractor de placas de presión.

Cuadro 17: Diferenciación del punto de marchitez permanente del extractor de placas y el punto de marchitez obtenido para las diferentes especies vegetales

	Remolacha	Tomate	Acelga	Lechuga
PMP del extractor de placas	6,8 %	6,8 %	6,8 %	6,8 %
PMP de campo	2,78 %	4,31 %	3,45 %	4,55 %
diferencia	4,02 %	2,49 %	3,35 %	2,25 %

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14: Comparación del punto de marchitez del extractor de placas y el punto de marchitez obtenido en campo de las diferentes especies vegetales



Fuente: Elaboración propia.

La figura 14, nos indica que hay diferencia entre el punto de marchitez permanente que da el extractor de placas con un valor de 6,8% y el punto de marchitez que obtuvimos

de cada tratamiento, obteniendo así una diferencia del; 4,02 % para la remolacha siendo este tratamiento que tuvo mayor diferencia, 2,49 % para el tomate, 3,35 % para la acelga y el 2,25 % para la lechuga, esta especie tubo una menor diferencia.

Cuadro 18: Diferenciación del valor del punto de marchitez permanente del extractor de placas y el valor promedio del punto de marchitez obtenido en campo

Punto de marchitez permanente del extractor de placas	Punto de marchitez permanente de campo
6,8 %	3,02%

Fuente; Elaboración propia.

Diferencia promedio del PMP: $6,8\% - 3,02\% = 3,8\%$

El cuadro 18, nos indica la diferencia que hay entre el punto de marchitez permanente que nos da el extractor de placas que es de 6.8% y el promedio del punto de marchitez de campo de 3,02%, obteniendo así una diferencia del 3,8% de un suelo franco arenoso.

El extractor de placas de presión determina el contenido de agua retenida por el suelo a una tensión de 15 bar, el valor ha sido tradicionalmente adaptado como referencias para el PMP del suelo. Sin embargo, diferentes autores han señalado que el PMP no depende exclusivamente del suelo, sino que responde a la interacción entre el suelo y las características fisiológicas de las plantas. De esta manera ((Briggs&Shantz, 1912), establecieron que el punto de marchitez permanente corresponde al contenido de agua del suelo en el cual la planta pierde irreversiblemente su capacidad de recuperar su turgencia, aun cuando es colocada en un ambiente saturado de humedad, señalando que diferentes especies vegetales pueden alcanzar el PMP en distintos niveles de humedad del suelo.

Asimismo, (Richards, 1994), indico que el valor de 15 bar representa una aproximación practica para estimar el PMP en condiciones controladas de laboratorio, no obstante, en condiciones de campo las plantas pueden continuar extrayendo agua del suelo a tensiones de mayor o menor humedad, dependiendo de la especie. Este autor sostiene

que el PMP debe interpretarse como un resultado de la interacción del suelo-planta-agua.

3.8 Determinación del agua útil

Cuadro 19: Agua útil para las diferentes especies vegetales.

Especies	Tratamiento	% CC	% PMP	Agua Útil
Remolacha	T1	11,9%	2,78%	9,12%
Tomate	T3	11,9%	4,31%	7,59%
Acelga	T4	11,9%	3,45%	8,45%
Lechuga	T5	11,9%	4,55%	7,35%

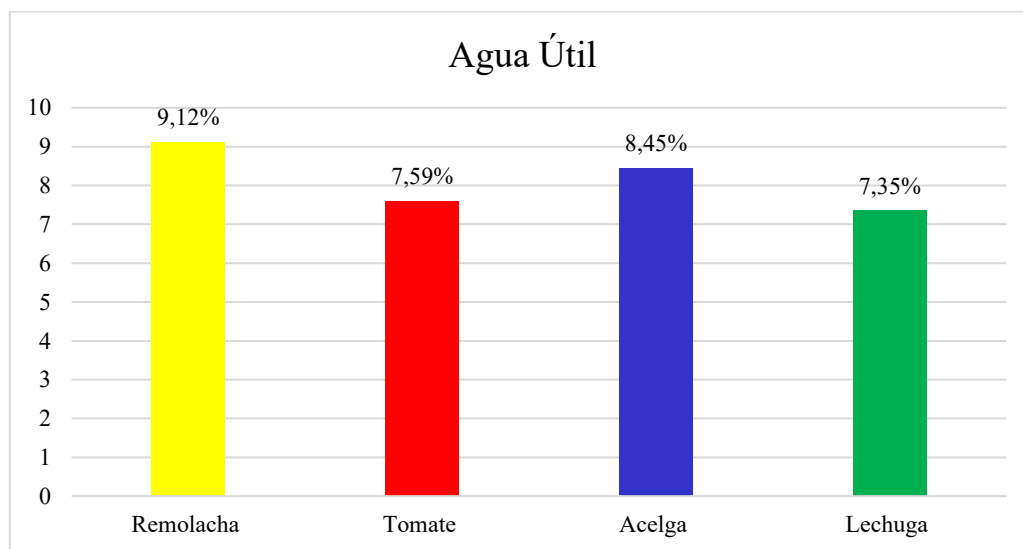
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 20: Valor del agua útil según el extractor de placas

% CC	% PMP	Agua Útil
11,9%	6,8%	5,1%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 15: Valor del agua útil para las diferentes especies vegetales



Fuente: Elaboración propia.

La remolacha (T1) presento el mayor valor de agua útil con un valor de 9,12%, esta se lo asocia a su raíz pivotante engrosada, que es capaz de explorar capas más profundas del suelo y de almacenar agua en tejidos parenquimáticos de reserva, permitiendo aprovechar un mayor rango de humedad disponible.

La acelga (T4) su valor de agua útil es de 8,45%, se lo relaciona con su raíz pivotante moderadamente desarrollada, presenta una adecuada capacidad de absorción y retención hídrica.

El tomate (T3) su valor de agua útil es de 7,59% este se lo atribuye a su sistema radicular pivotante con abundantes raíces laterales, permitiéndole una buena exploración del suelo, tiene una limitada capacidad de almacenamiento interno del agua.

La lechuga (T5) presento el menor valor de agua útil 7,35% debido a que tiene un sistema radicular superficial y poco profundo, con escasa capacidad de explorar el suelo y sin capacidad de almacenar el agua.

Según el extractor de placas se tiene un valor de agua útil del 5,1%, basándonos que este valor es únicamente en las propiedades físicas del suelo subestima la disponibilidad real del agua. Según Hill señala que el agua disponible para los cultivos se define por el intervalo de humedad comprendido entre CC y el PMP, pero que la amplitud efectiva de este rango depende de la capacidad de las raíces para extraer agua del suelo. De igual manera (Briggs&Shantz, 1912), indican que la cantidad de agua útil no depende exclusivamente de las propiedades físicas del suelo sino también del sistema radicular y la adaptación de cada especie vegetales.

El cuadro 20, nos muestra que aun que los tratamientos se desarrollen en un mismo suelo, la disponibilidad de agua útil es diferente entre especies, siendo el sistema radicular un factor clave para explicar estas diferencias. Los tratamientos con raíces de capacidad de almacenamiento de agua presentan un mayor rango de humedad aprovechable y las raíces superficiales y con escasa capacidad de almacenamiento presentan una disponibilidad hídrica más limitada.

3.9. Análisis de varianza y prueba de medias de Tukey

3.9.1. Resultados del análisis de varianza (ANVA)

Para determinar si existe diferencias estadísticas significativas en el punto de marchitez permanente (PMP), entre las cuatro especies vegetales evaluadas (remolacha, tomate, acelga y lechuga). Se realizó un análisis de varianza bajo un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento.

Cuadro 21: Resultados obtenidos para el punto de marchitez permanente de las diferentes especies vegetales

Tratamiento	Replicas				Σ	x
	I	II	III	IV		
Remolacha	2,58	2,9	2,98	2,67	11,13	2,783
Tomate	4,03	4,17	4,89	4,15	17,24	4,310
Acelga	3,32	3,37	3,62	3,49	13,8	3,450
Lechuga	4,74	4,55	4,01	4,89	18,19	4,548
Σ					60,36	15,090

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 22: Análisis de varianza ANVA para el punto de marchitez permanente

FC	GL	SC	CM	FC	FT	
					5%	1%
Total	15	8,958				
Tratamiento	3	7,895	2,632	29,691	3,26	5,95
Error	12	1,064	0,089			

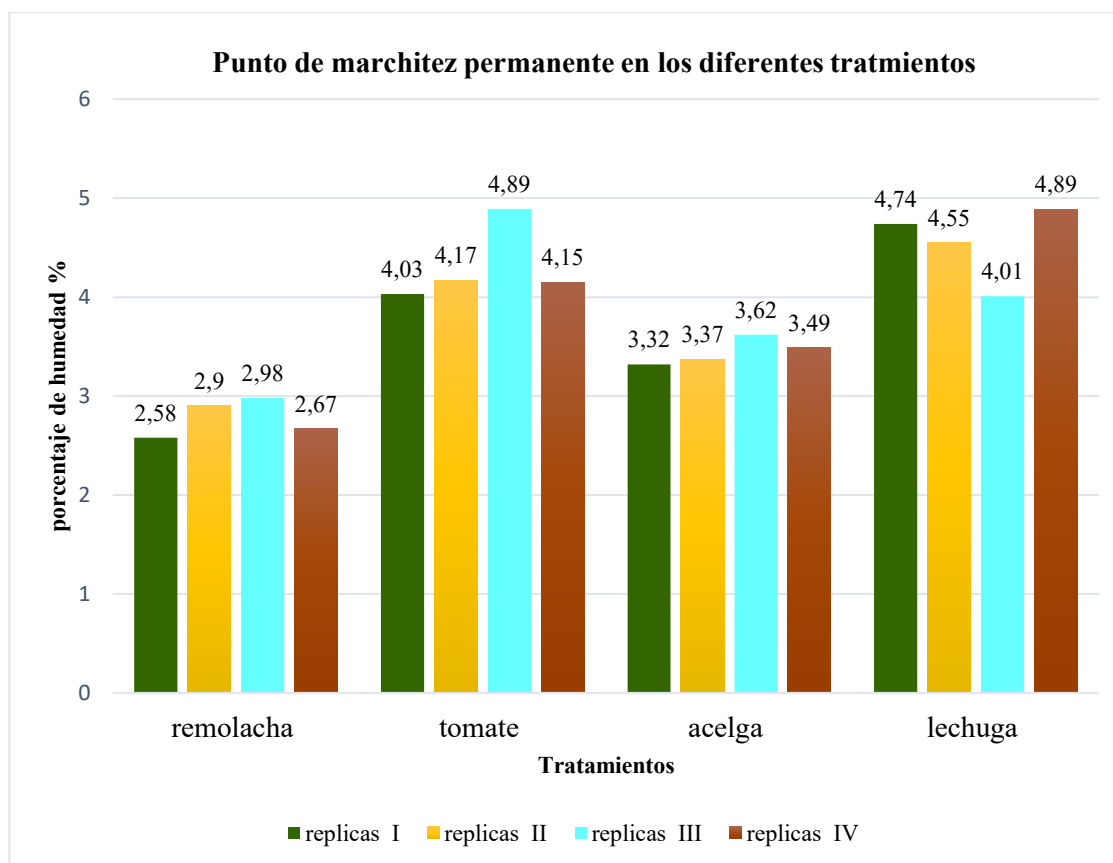
Fuente: Elaboración propia.

El análisis estadístico reveló una diferencia altamente significativa entre los tratamientos evaluados ($F_c = 29,691 > f_{t\ 1\%} = 5,95$; $p < 0,01$). Esto nos indica que el factor “especie vegetal” incluye de manera determinante con el contenido de humedad

del suelo al momento de alcanzar el punto de marchitez permanente, rechazando la hipótesis nula de igualdad de medias.

La elevada relación de F calculada (29,691) sugiere que la variabilidad observada entre las especies es atribuible principalmente a las diferencias fisiológicas de cada cultivo como; su sistema radicular, eficiencia a la absorción hídrica, capacidad de ajuste osmótico y estrategias de respuesta al estrés hídrico.

Figura 16: Porcentaje del punto de marchitez en las diferentes especies vegetales



Fuente: Elaboración propia.

3.9.2. Coeficiente de variación

$$Cv = \frac{\sqrt{CMe}}{\bar{X}} * 100 = \frac{\sqrt{0,089}}{3,772} * 100 = 7,909$$

El coeficiente de varianza obtenido en el presente estudio ($Cv = 7,909$) se clasifica dentro del rango de excelente precisión experimental ($< 10\%$), conforme a los criterios establecidos por autores de referencia en estadística agronómica.

Este valor indica que la variabilidad observada en los datos del punto de marchitez permanente entre las especies evaluadas responde principalmente a diferencias fisiológicas inherentes a cada cultivo, como la eficiencia del sistema radicular, la capacidad de ajuste osmótico y la estrategia de extracción hídrica.

Esto valida que las diferencias significativas detectadas entre los tratamientos atribuidos al factor “especie vegetal” tienen una alta confiabilidad.

3.9.3. Prueba de comparación de medias (Tukey)

Dado que el ANVA detectó diferencias significativas, se aplicó la prueba de Tukey

($\alpha = 0,005$ y $\alpha = 0.01$).

prueba Tukey	
q	4,2
sx	0,15
t	0,63

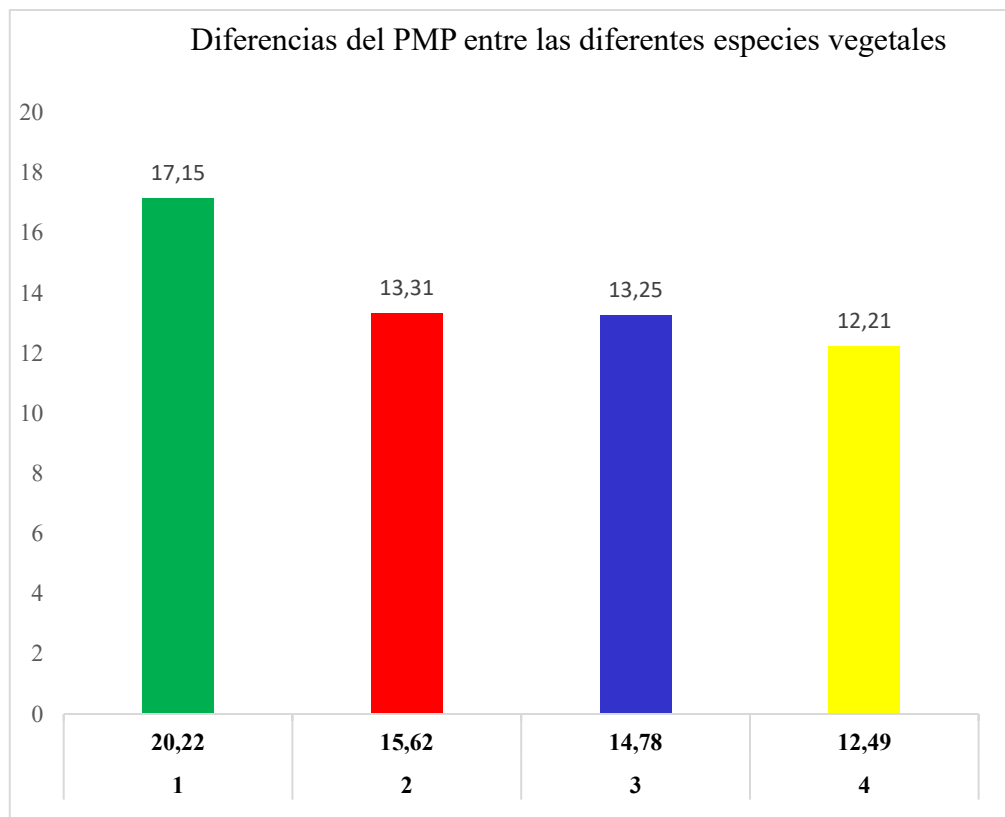
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 23: Prueba de Tukey al 5% y al 1% de significancia

Prueba de comparación de medias (TUKEY)			
Especies	Tratamiento	5%	1%
Lechuga	T5	4,548% A	4,548% A
Tomate	T3	4,310% A	4,310% A
Acelga	T4	3,450% B	3,450% B
Remolacha	T1	2,783% C	2,783% B

Fuente: Elaboración propia.

Figura 17: Diferencia del punto de marchitez entre las diferentes especies vegetales



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la prueba de Tukey al 5 % de significancia, indican que la lechuga (T5) con un valor de 4,548 % de humedad en el suelo y el tomate (T3) con un valor de 4,31% de humedad en el suelo, no tienen diferencia significativa entre ellas, pero si tienen una diferencia significativa con el resto de las especies vegetales.

La remolacha (T1) con un valor del 2,783 % de humedad en el suelo, tiene una diferencia significativa con todas las especies vegetales.

Al 1 % de significancia, la remolacha (T1) con un valor de 2,783 % y la acelga (T4) con un valor de 3,45% no tienen una diferencia altamente significativa, pero si hay una diferencia altamente significativa con la lechuga (T5) con un valor de 4,548 %y el tomate (T3) con un valor de 4,31%.

Las especies vegetales de la lechuga y el tomate, presentaron los valores más elevados del punto de marchitez permanente, lo que indica que requieren una mayor cantidad de agua retenida en el suelo para evitar la marchitez permanente. Este comportamiento coincide con lo que señala (Taiz y Zeiger), que indica que las especies vegetales con elevadas demandas de transpiración y sistema radicular poco profundo presenta una mayor dependencia de humedad en el suelo.

Por el contrario, la remolacha mostro una mayor capacidad de adaptación a condiciones de limitada disponibilidad hídrica, lo cual se atribuye a su sistema radicular más profundo y su mecanismo fisiológico permiten mantener su turgencia celular a menor potencial hídrico del suelo. Esto concuerda con lo que dijo Kramer y Boyer, las especies vegetales con mayor eficiencia en la absorción y uso del agua presentan una mayor tolerancia a la sequía.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

1. Se determinó que el punto de marchitez permanente (PMP) real varía entre las especies vegetales evaluadas, demostrando que este parámetro no es un valor fijo del suelo, sino que depende de las características fisiológicas y morfológicas propias de cada cultivo.
2. Los valores del punto de marchitez permanente real obtenidos bajo condiciones controladas fueron las siguientes; la remolacha (*Beta vulgaris* L.), es del 2,78%, en el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es del 4,31%, en la acelga (*Beta vulgaris* L.) es del 3,45%, en la lechuga (*Lactuca sativa* L.) es del 4,55%, demostrando distintos niveles de tolerancia al déficit hídrico.
3. El extractor de placas de presión a 15 bar arrojó un valor constante de humedad del suelo de 6,8% para todas las especies vegetales, lo cual sobreestimo sistemáticamente el punto de marchitez permanente real determinado en campo de las diferentes especies vegetales de la cual se obtuvo un promedio de 3,02%. Esto demuestra que el método de laboratorio refleja únicamente las propiedades físicas de retención hídrica del suelo, sin incorporar la variabilidad fisiológica ni la capacidad de extracción radicular de cada cultivo.
4. La disponibilidad de agua útil varía según la fisiología y el sistema radicular de cada cultivo: La remolacha presentó la mayor agua útil (9,12 %), seguida de la acelga (8,45 %), el tomate (7,59 %) y la lechuga (7,35 %). El cálculo basado únicamente en el extractr arrojó un agua útil de 5,1 %, lo que confirma que el método físico no captura la capacidad real de aprovechamiento hídrico de los cultivos.
5. La prueba de comparación de medias de Tukey permitió agrupar a las especies vegetales en funciones de su tolerancia hídrica, identificando a la remolacha ya la acelga como cultivos con mayor capacidad de tolerancia al déficit hídrico

además de demostrar un alto desarrollo vegetativo ante el microclima del invernadero. El tomate es más sensible al déficit hídrico, pero tuvo un buen desarrollo vegetativo ante las condiciones dadas dentro del invernadero. La lechuga fue que presentó una menor tolerancia al déficit hídrico, además presentó una alteración morfológica (mayor desarrollo del tallo) lo cual se lo atribuye a las condiciones del microclima dado.

6. El coeficiente de variación obtenido (7,909 %) indicó una alta precisión experimental, lo que respalda la confiabilidad de los resultados obtenidos en el estudio.
7. La exclusión del cultivo de cebolla del análisis estadístico se debió a la presencia de estrés fisiológico atípico, atribuible a las condiciones microclimáticas desfavorables, lo que impidió una determinación representativa de su punto de marchitez permanente.

4.2. Recomendaciones

1. Considerar el punto de marchitez permanente como un parámetro dependiente de las especies vegetales y no como un valor fijo del suelo al momento de planificar el manejo del riego en las especies vegetales.
2. Ajustar los programas de riego en función de los valores reales del punto de marchitez permanente determinado para cada especie vegetal evaluada, con el fin de optimizar el uso del agua y reducir el riesgo del estrés hídrico.
3. Ampliar futuras investigaciones incorporando un mayor número de especies vegetales y diferentes tipos de suelos, para fortalecer el conocimiento de la variabilidad del punto de marchitez permanente y su relación con factores edáficos , fisiológicos y morfológicos.
4. Desarrollar estudios específicos para el cultivo de cebolla bajo condiciones microclimáticas controladas, que permitan una adecuada determinación de su punto de marchitez permanente sin la influencia de estrés fisiológico no asociado al déficit hídrico.
5. Promover el uso conjunto de metodologías de campo y laboratorio en la determinación de parámetros hídricos del suelo, orientadas a mejorar la toma de decisiones agronómicas y la sostenibilidad del uso del recurso hídrico.

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los factores de mayor importancia que tiene el suelo, la cual está relacionada con el crecimiento, desarrollo y productividad de las plantas. La disponibilidad que tiene el suelo y su aprovechamiento por parte de las plantas influye directamente en el comportamiento fisiológico especialmente en condiciones de estrés hídrico.

El punto de marchitez permanente (PMP), es el límite inferior del agua útil, siendo un contenido de humedad en el suelo que las raíces no pueden absorber, cuando llegan a este estado de marchitez las hojas no pueden recuperar su turgencia incluso después de la rehidratación.

El extractor de placas de presión es un equipo ampliamente utilizado para determinar el contenido de humedad del suelo a tensiones elevadas, particularmente alrededor de 15 bar, valor que tradicionalmente se asocia con el punto de marchitez permanente (PMP). Este concepto fue establecido a partir de los trabajos clásico de (Liman J. Briggs y Homer L. Shantz. 1912), y posteriormente investigaciones desarrolladas por (A. Richards y A.J. Weaver), que contribuyo al desarrollo de métodos experimentales para su determinación y a la comprensión de la relación entre el potencial del agua en el suelo y la respuesta fisiológica de las plantas. Sin embargo, estudios como de (R. Weil y Nyle C. Brady), demostraron que el punto de marchitez permanente no es únicamente una propiedad del suelo, sino que también depende de las características fisiológicas de las plantas, como la estructura del sistema radicular, la eficiencia en la absorción de agua y la capacidad de adaptación al estrés hídrico.

Esta investigación tiene como finalidad determinar la marchitez permanente real en cinco especies vegetales diferentes. Además, se busca establecer una estimación entre los valores obtenidos en campo y los valores estimados mediante el extractor de placas, con la finalidad de evaluar con precisión

1. Antecedentes

En Bolivia, se han llevado a cabo investigaciones para mejorar la eficiencia en el uso del agua en cultivos andinos, como la quinua y la papa. Estos estudios han evaluado el punto de marchitez permanente (PMP) en diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas, utilizando métodos tradicionales y tecnologías avanzadas como el extractor de presión de placas. Los resultados han mostrado que la determinación precisa del punto de marchitez permanente (PMP) es crucial para optimizar el riego y mejorar la productividad agrícola, especialmente en regiones con recursos hídricos limitados. Estas investigaciones han contribuido al desarrollo de estrategias de manejo del riego que consideran la variabilidad en la tolerancia al estrés hídrico entre diferentes especies vegetales.

2. Justificación

El conocimiento del punto de marchitez permanente (PMP) es fundamental para comprender la disponibilidad de agua en el suelo y la respuesta fisiológica de las plantas frente al déficit hídrico. Este parámetro representa el límite a partir del cual las plantas no pueden mantener su turgencia ni continuar su desarrollo normal. En este contexto, el extractor de presión de placas es una herramienta utilizada para estimar el contenido de humedad del suelo asociado al PMP bajo condiciones controladas.

Esta investigación, cobra relevancia al cuestionar el concepto tradicional del PMP como un valor fijo e invariable del suelo, planteando que este punto puede variar según la especie vegetal. Asimismo, el estudio busca establecer una relación entre los valores obtenidos mediante el extractor de presión de placas y la respuesta fisiológica real de las plantas bajo condiciones controladas, permitiendo validar la confiabilidad de esta herramienta de laboratorio en la estimación del estado hídrico de los cultivos.

Los resultados permitirán mejorar la comprensión de la relación entre la humedad del suelo y la tolerancia de las plantas al estrés hídrico. Esta información será útil para productores y profesionales del área agronómica, ya que permitirá optimizar el manejo del riego y mejorar la eficiencia en el uso del agua.

Si no se realizan estudios de este tipo, se continuaría considerando el PMP como un valor fijo del suelo, lo que podría generar estimaciones imprecisas sobre la disponibilidad de agua para los cultivos y afectar la toma de decisiones en el manejo del riego.

Por lo tanto, este estudio aporta información relevante para mejorar la gestión del recurso hídrico y contribuir al desarrollo de prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles.

3. Planteamiento del problema

El agua es un recurso esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que su disponibilidad influye directamente en la productividad y supervivencia de las especies vegetales. En este contexto, uno de los indicadores fisiológicos más importantes para evaluar el estado hídrico de las plantas es el punto de marchitez permanente (PMP), definido como el contenido de humedad del suelo a partir del cual la planta pierde la capacidad de recuperar la turgencia de sus tejidos, incluso cuando se coloca en condiciones de alta humedad atmosférica. El conocimiento de este punto es fundamental porque permite determinar el límite inferior del agua disponible para las plantas, información clave para la planificación del riego, la evaluación de la tolerancia al estrés hídrico y el manejo eficiente del recurso hídrico en los sistemas agrícolas.

Tradicionalmente, la determinación del punto de marchitez permanente se realiza mediante métodos fisiológicos que implican la observación directa de la respuesta de las plantas al déficit hídrico. Sin embargo, estos procedimientos suelen ser prolongados, invasivos y poco prácticos cuando se requiere realizar estudios comparativos entre diferentes especies vegetales.

Ante esta situación, el extractor de presión de placas se ha propuesto como una herramienta alternativa para estimar el contenido de humedad del suelo asociado al punto de marchitez permanente, ya que permite obtener resultados bajo condiciones controladas de laboratorio de manera más rápida y estandarizada. No obstante, aún

existe incertidumbre sobre el grado de relación entre los valores obtenidos mediante este método y el punto de marchitez permanente real en distintas especies vegetales.

La escasa disponibilidad de estudios comparativos entre especies y la limitada validación de este método bajo condiciones controladas evidencian un vacío en el conocimiento actual. Por ello, surge la necesidad de evaluar la relación entre el punto de marchitez permanente real y los valores obtenidos mediante el extractor de presión de placas en diferentes especies vegetales, con el propósito de determinar la confiabilidad de este método y generar información que contribuya a mejorar su aplicación en estudios de fisiología vegetal y en el manejo agronómico del agua.

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Evaluar el punto de marchitez permanente (PMP) en cinco especies vegetales mediante mediciones en campo y en laboratorio utilizando un extractor de placas en condiciones controladas, con el fin de establecer su correlación y comprender el comportamiento fisiológico hídrico de las plantas.

5.2. Objetivos específicos

- Seleccionar cinco especies vegetales que sean representativas de diferentes grupos botánicos y que presenten variaciones en su tolerancia a la sequía.
- Determinar el potencial hídrico del suelo mediante el uso del extractor de presión de placas en condiciones controladas, con el fin de obtener valores comparativos asociados al punto de marchitez permanente (PMP).
- Analizar la relación entre el punto de marchitez permanente determinado en campo y los valores obtenidos mediante el extractor de presión, para establecer posibles correlaciones entre ambas mediciones.
- Comparar el comportamiento hídrico entre las cinco especies vegetales evaluadas, con el propósito de identificar diferencias en su tolerancia al déficit hídrico.

6. Hipótesis alternativa

Existe una diferencia significativa entre las mediciones del punto de marchitez permanente realizadas en campo y las realizadas en laboratorio con un extractor de presión de placas para las cinco especies vegetales estudiadas.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

El agua constituye uno de los factores de mayor importancia en el suelo, ya que determina el desarrollo de las plantas, siendo el principal medio de transporte de los macro y micronutrientes que están en el suelo. También actúa como un disolvente de los nutrientes disponibles que hay en el suelo para que las raíces lo absorban, permitiendo así el crecimiento, desarrollo y una correcta refrigeración para una adecuada adaptación a las condiciones climáticas.

El consumo del agua depende mayormente de cada cultivo, no todos los cultivos necesitan la misma proporción de agua. Las condiciones climáticas también son un factor que influye en el consumo de agua, la temperatura, la humedad, el viento y la radiación solar. (Fernandez, 2010)

1.1. Composición del suelo

El suelo está constituido aproximadamente en un 45% de partículas sólidas (minerales), 5% de materia orgánicas, un 25% de agua y un 25 de aire. Estos porcentajes son ideales y varían de acuerdo al tipo de suelo y al nivel de agua antes, durante o después de un riego. El aire y el agua se encuentran en el espacio poroso del suelo, que corresponden aproximadamente a un 50% del volumen y varían de acuerdo a su textura. (Viña Santa Carolina, 2019)

Textura del suelo

Suelo arenoso: 38% de espacio poroso.

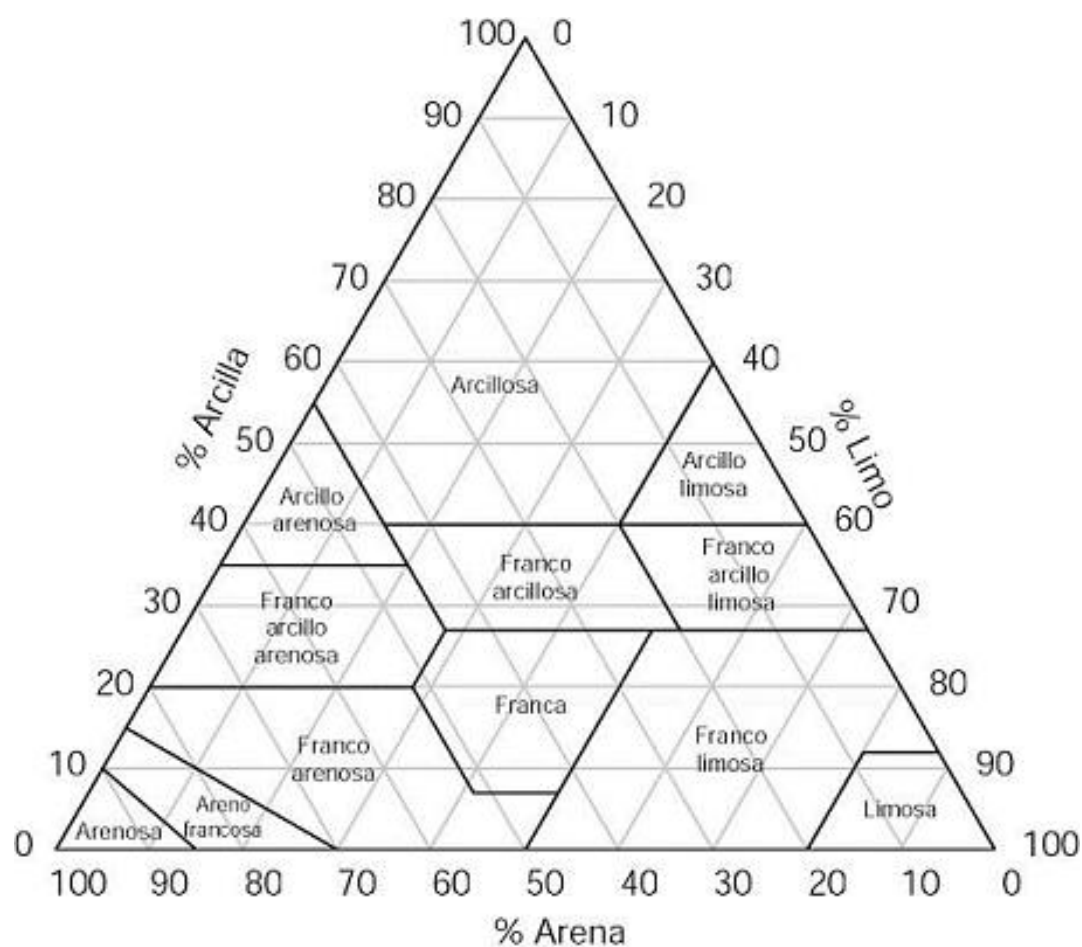
Suelo franco: 47% de espacio poroso.

Suelo arcilloso: 53% de espacio poroso.

La textura del suelo es la composición mecánica de un suelo, es decir la distribución de los tamaños de las partículas que lo constituyen, y su composición granulométrica.

Clase de textura	Definición	Grado
FY, FYL, YL, Y	Pesado	2
F, FYA, FL, L, YA	Mediano	3
A, AF, FA	Liviano	1

Fuente: FAO.



Fuente: FAO.

1.2. Potencial hídrico en el suelo

El agua en el suelo siempre tiene una energía determinada, que depende de la cantidad de agua del suelo y las fuerzas que actúan sobre ella. El potencial hídrico total (Ψ) es la energía libre por mol de agua, es decir a la capacidad de realizar trabajo del agua.

Los campos de fuerza actúan disminuyendo la energía libre del agua o capacidad de desplazarse; de esta manera si al agua se le agrega solutos, estos interactúan con ella, haciendo que la energía libre del agua disminuya. El agua pura con una altura de referencia y presión de 1 atm siempre tiene un potencial hídrico total de cero, a medida que se resta la energía libre su potencial es cero.

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_s$$

Donde:

Ψ_g = potencial gravitacional.

Ψ_p = potencial de presión.

Ψ_m = potencial matrico.

Ψ_s = potencial osmótico.

1.3. Retención del agua en el suelo

Las plantas presentan un mecanismo de transpiración que les permite regular su balance de energía. El agua que transpira proviene del suelo y es absorbida por las raíces. El suelo, además de proporcionar anclaje a las plantas, actúa como un medio donde se almacenan agua, oxígeno y dióxido de carbono, elementos que pueden ser absorbidos por las raíces. Asimismo, debido a su estructura, el suelo contiene partículas muy pequeñas que funcionan como reservorio de nutrientes. Estos nutrientes se intercambian con la solución del suelo y posteriormente pueden ser asimilados por las raíces de las plantas. (Chavarria, 2017)

1.4. Parámetros de humedad

1.4.1. Punto de saturación

Es la cantidad de agua presente en el suelo cuando todos los espacios porosos están llenos de agua, esta representa la máxima cantidad de agua que puede almacenar un suelo, sin la presencia del agua libre. En este estado, no hay aire presente en los poros del suelo limitando de esta manera la disponibilidad de oxígeno en las raíces de las plantas. Esta condición puede causar estrés hídrico, deficiencias nutricionales, pudrición radicular y la estimulación de la actividad microbiana. (Fontagro, 2023)

1.4.2. Capacidad de campo

Una vez que la lluvia o el riego cesa, el agua que se encuentra en los poros más grandes del suelo se drena hacia abajo con bastante rapidez (principalmente por la gravedad). Después de uno o tres días el suelo alcanza su capacidad de campo, en esta condición el agua ha salido de los macroporos y en su lugar está el aire y a diferencia de los microporos aún están llenos de agua y pueden suministrar el agua a las plantas. (Weil&Brady, 2017)

Según otro autor, la capacidad de campo es la cantidad de agua que permanece en el suelo después de que el agua gravitacional se haya drenado y el suelo retiene una humedad constante, que es utilizada por las plantas. Esto se da por las fuerzas capilares, que ocurre aproximadamente a una tensión de -0.33 bar. (Richards&Weaver, 1994)

El potencial mátrico varía de un suelo a otro, siendo este la energía potencial del agua en el suelo, esto se refiere a la fuerza con la que las moléculas del agua están retenidas en el suelo debido a las fuerzas de atracción de las partículas del suelo y a las moléculas del agua. Cuando el suelo está completamente saturado, la tensión del agua es cercana a cero y el potencial matricial es muy bajo, a medida que el agua se mueva fuera del suelo, las fuerzas capilares y la atracción entre el suelo y el agua hacen que el agua se mantenga retenida en el suelo y el potencial matricial se hace más negativo, entre más negativo sea la tensión del agua del suelo, más difícil para las plantas extraer el agua del suelo. Citado por (UCO, s.f)

1.4.3. Punto de marchitez permanente

Según (Briggs&Shantz, 1912) , con su método de sellado de cera para la determinación del coeficiente de marchitamiento en diferentes tipos de suelos y con una gran variedad de plantas. Demostró que las diferencias que presentan las plantas en este aspecto son menores y que resulto de poca utilidad práctica el usar una gran variedad de plantas. En cambio, comparando el coeficiente de marchitamiento de la textura de los suelos son muy significativas. Se ha descubierto que las plantas son capaces de reducir el contenido de humedad del suelo muy por debajo del correspondiente al punto de marchitez y que se produce una pérdida constante de humedad a través de los tejidos vegetales incluso después de la muerte, se cree que las ligeras diferencias observadas a la resistencia a la sequía de ciertas plantas no se deben a una mayor fuerza de tracción sobre la humedad del suelo, sino a la distribución radicular de cada variedad. Los suelos de textura gruesa como son los suelos arenosos llegan al coeficiente de marchitamiento de las plantas con un contenido de agua del 1% y de los suelos arcillas con un contenido de agua del 30%.

Las plantas absorben mediante las raíces el agua disponible del suelo y el suelo continúa secándose, las raíces absorben del agua primero de los macroporos, siendo su potencial hídrico alto, a medida que los macroporos se vacían, las raíces extraen agua de los microporos, donde el potencial hídrico mátrico es menor y las fuerzas que atraen el agua hacia la superficie solidas son mayores, provocando que las plantas tengan una dificultad para absorber el agua del suelo. Esto provoca en la planta que sus estomas se sierran, el crecimiento se detiene y las plantas llegan a un punto de marchitez insipiente. Al principio las plantas recuperan su turgencia por la noche, cuando no se pierde agua a través de las hojas y las raíces pueden absorber agua.

Las plantas herbáceas permanecen marchitas día y noche cuando las raíces no pueden generar potenciales hídricos lo suficientemente bajos como para extraer el agua restante del suelo, esta condición se desarrolla cuando el potencial hídrico del suelo alcanza un valor aproximado de (-15 bares). La cantidad de agua disponible se encuentra en 15

bar y 30 bar, pero son muy pequeñas. El suelo tiene un aspecto seco y polvoso, aunque el agua permanece en los microporos más pequeños. (Weil&Brady, 2017)

1.4.4. Agua útil

El agua útil o también llamado agua disponible para las plantas, es la fracción de agua retenida en el suelo que las plantas pueden absorber efectivamente para su crecimiento y desarrollo. Representa la cantidad de agua disponible entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (no se toma en cuenta el agua gravitacional).

Prof.	DA	CC		PMP		Agua Útil Mm
		% Hum	mm	% Hum	mm	
0-20	1.19	16.46	39.17	7.64	18.18	20.99
20-40	1.30	16.30	42.38	7.84	20.38	22.00
40-60	1.21	16.90	40.49	7.85	19.00	21.90
60-80	1.23	16.47	40.52	6.77	16.65	23.86
80-100	1.23	16.47	40.52	6.77	16.65	23.86
Tosca 0-100			203.49		90.87	112.61

Tabla 2. Capacidad de almacenaje de agua útil (mm) en un suelo franco arenoso de Embajador Martini: Haplustol Entico de la planicie con tosca.

Prof.	DA	CC		PMP		Agua Útil Mm
		% Hum	mm	% Hum	mm	
0-20	1.22	7.54	18.40	4.12	10.04	8.36
20-40	1.27	5.47	13.89	3.90	9.91	3.99
40-60	1.20	6.45	15.47	2.22	5.33	10.14
60-80	1.22	4.74	11.57	2.61	6.38	5.19
80-100	1.22	5.90	14.39	2.66	6.97	7.42
100-120	1.22	5.36	13.09	2.96	7.22	5.86
120-140	1.22	4.86	11.87	2.87	7.01	4.86
0-140			96.68		52.86	45.82

Tabla 3. Capacidad de almacenaje de agua útil (mm) en un suelo arenoso franco de Miguel Riglos: Ustipsamente Típico de la planicie medanosa.

Fuente: (INTA, 2012).

1.5 Extractor de placas

El extractor de placas de cerámica o extractor de placas de presión, es un equipo de laboratorio, que es utilizado para analizar las características de retención de agua en muestras de suelos. El extractor de placas, está compuesto por unas ollas de presión que en su interior se colocan las placas de cerámicas porosas y se sitúan las muestras de suelo. Por un medio de un compresor y el control proporcionado del sistema de regulación se alcanza la presión deseada hasta llegar al equilibrio. (Gutierrez)

Figura 1: Imagen del extractor de placas



Fuente: Elaboración propia.

1.5.1. Extractor de placas de 15 bar

(Richards&Weaver, 1943) Demostró la validación de los 15 bar mediante un trabajo de correlación entre los datos biológico de Briggs & Shantz y las mediciones físicas, utilizo muestras de los suelos de la investigación de Briggs, experimento con una amplia gama de presiones a diferentes niveles, cuando ponía a 15 bar de presión el contenido de agua que quedaba en la muestra de suelo era idéntico al que quedaba cuando la planta se moría.

Las condiciones de contenido de humedad a 15 bar de presión en campos agrícolas son pocos comunes ya que al saber su contenido de agua a esta presión se denomina punto de marchitez permanente que es la cantidad de agua disponible en el suelo, pero las raíces de las plantas no lo pueden absorber ocasionando el marchitamiento definitivo de la planta ya que al regar las plantas cuando están en PMP estas ya no se recuperan. (Fong, 2019)

1.5.2. Extractor de placas de 0,33 bar

Según (Richards&Weaver, 1943) en su investigación demostró que el valor de 0,33 bar se consolidó como una presión intermedia siendo técnicamente estable para drenar el agua retenida de los microporos sin alterar la estructura del suelo y representa un nivel definido de energía de retención del agua para la capacidad de campo. Este valor no fue elegido al azar ya que se hicieron muchas pruebas con diferentes valores y este valor fue el que más se adoptó como un punto de referencia para comparar la retención de agua entre los diferentes tipos de suelos.

Cuadro 1: Punto de marchitez permanente de diferentes tipos de suelos

Tipo de suelo	CC% peso de suelo seco	PMP peso del suelo seco
Arena	5-10	1-3
Arena franca	10-15	3-6
Franco arenoso	15-20	6-10
Franco	20-25	10-15
Franco limoso	25-30	12-18
Franco arcilloso	27-32	15-22
Arcillosos	30-40	20-30

Fuente: (Richards&Weaver, 1943).

1.6 Punto de marchitez insipiente

Según (Kramer & Boyer, 1995), definen que el punto de marchitez incipiente es el inicio de la pérdida de turgencia de las plantas que esto ocurre cuando la absorción del agua por las raíces ya no llega a compensar la transpiración, generalmente durante las horas de mayor demanda atmosférica (medio día), pero aun así las planta llegara a recuperar su turgencia cuando las temperaturas descienden esto ocurre en la tarde y la noche ya que la transpiración desciende.

1.7 Movimiento del agua en la planta

El movimiento del agua en la planta se produce siguiendo un gradiente de potencial. El agua se mueve desde zonas de mayor potencial a otras de menor potencial hídrico, en

cuanto a las plantas el potencial más elevado se encuentra en las raíces y se va disminuyendo al largo del tallo y el potencial más bajos son las hojas. (Ruscitti, 2024)

1.8 Funciones del agua en la planta

El agua es indispensable para las plantas ya que interviene en múltiples funciones que son:

1. **Constituyente:** el agua es importante cuantitativamente ya que constituye el 80 y 90 % de peso fresco. También es importante para el protoplasma, la proteína y la molécula de los lípidos, una reducción del contenido de agua en estos componentes llega a provocar la muerte de las plantas.
2. **Solvente:** es un solvente por el cual gases, minerales y otros solutos entran por las células de las plantas y se mueven de célula en célula y de órgano en órgano.
3. **Reactante:** el agua el agua es uno de los reactantes para muchos procesos importantes, como ser la fotosíntesis, hidrólisis del almidón o azúcar en la germinación de semillas.
4. **Estructura:** la turgencia es importante para el crecimiento y alargamiento de las células, también para el crecimiento y mantenimiento de las formas de la planta, ya que la turgencia es importante para la apertura de los estomas y el movimiento de las hojas, pétalos y otras estructuras de la planta. Citado por (Avella)

1.9 Balance hídrico en las plantas

La eficiencia en el uso del agua por parte de las plantas, se expresa como un coeficiente conocido como:

Requerimiento hídrico = agua perdida (Kg) / materia seca formada (Kg).

Los procesos básicos involucrados en el balance hídrico de una planta son la absorción, la conducción y la pérdida de agua. Durante el día el balance hídrico es normalmente negativo y suele restaurarse durante la noche, si hay suficiente agua en el suelo, en periodos de sequía el contenido de agua en las plantas no se restablece completamente. El balance hídrico negativo produce en las plantas un conjunto de síntomas a nivel

morfológico, metabólico y fisiológico. Afecta al crecimiento celular, cierre de estomas y posteriormente una disminución de la producción de biomasa. (Ruscitti, 2024)

1.10. Estrés hídrico en las plantas

Una planta que crece en condiciones óptimas se halla en situaciones de estrés cero, esto implica que todos los factores (luz, nutrientes, agua, temperatura, oxígeno), están en un punto óptimo, esto no siempre es así ya que hay parámetros que se alejan ligeramente del punto óptimo y eso hace que alguna función se altere circunstancialmente y poco después vuelve a la normalidad a esto se lo denomina homeostasis. Citado por (UNER)

Los factores que causan estrés son:

- **Estrés térmico:** esto se da por el exceso de calor o de frío.
- **Estrés hídrico:** es por la falta de agua, ya que el suelo no aporta la suficiente humedad a las plantas o también por el exceso de agua provocando problemas de asfixia.
- **Estrés por falta o exceso de luz:** esto depende de la especie de la planta ya que algunas necesitan una determinada cantidad de luz para su desarrollo.
- **Estrés nutricional:** ausencia o exceso de nutrientes.
- **Estrés químico:** eso se da por los metales pesados que hay en el suelo o el agua.
- **Estrés salino:** esto se da por el exceso de sales en el suelo o en el agua, otra causa también que se da es por exceso de fertilización.
- **Estrés biótico:** esto se da por la aparición de hongos, patógenos, plagas o virus entre otros. Citado por (Lida, 2022)

1.11. Acelga

Según Seymour, la acelga (*Beta vulgaris* L. var. *Cicla*) tiene un origen vinculado con las tierras bañadas por el mar Mediterráneo, sur de Europa y norte de África. Algunos expertos consideran Italia como primera referencia para su utilización en la alimentación. También se encuentran textos que hablan del consumo de esta verdura en Mesopotamia durante el siglo IX A.C. (Armando, 2022)

1.11.1. Taxonomía

Reino:	Vegetal
Phylum:	Teleomorphytae
División:	Tracheomorphytae
Subdivisión:	Anthomorphyta
Clase:	Angiospermae
Subclase:	Dicotyledoneae
Grado Evolutivo:	Archichlamydeae
Grupo de Ordenes:	Corolinos
Orden:	Centrospermales
Familia:	Chenopodiaceae
Nombre científico:	<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i> L
Nombre común:	Acelga

Fuente: (Herbario Universitario (T.B.), 2025).

1.11.2. Importancia del cultivo

El cultivo de la acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla* L.) es un cultivo muy importante debidos a su aporte significativo a la seguridad alimentaria, la economía agrícola y la sostenibilidad de los sistemas productores. Citado por (Pleasant, 2015)

❖ Nivel mundial

A nivel mundial los principales países que cultivan este producto son: Italia, Francia, Holanda, Bélgica, Alemania y el continente americano. Citado por (FAO, 2023)

❖ Nivel nacional

La importancia económica de la acelga en Bolivia es moderada, ya que es uno de los cultivos más grandes en volumen y aporta ingresos rápidos a pequeños productores, abasteciendo a mercados urbanos y fortaleciendo la seguridad alimentaria. Los principales departamentos de producción son: Cochabamba, Tarija, La Paz y Santa Cruz. Citado por (Quiroga&Candia, 2018)

❖ Nivel departamental

Tiene una buena demanda en el mercado local y se vende con facilidad, su nivel de producción es moderada y se concentra en las zonas de: San Lorenzo, Cercado, Padcaya y área periurbanas de la ciudad de Tarija. Citado por (ONG Organizacion Espeza Bolivia (OEP), 1016)

1.11.3. Descripción botánica

- **Raíz**

Presenta una raíz pivotante, robusta y fibrosa, que logra un enraizamiento profundo en el suelo y que se diferencia de la remolacha porque esta no experimenta engrosamiento significativo en el sistema radicular. Citado por (Armando, 2022)

- **Hojas**

Las hojas son grandes con un pecíolo y nerviación central muy desarrollada, los limbos de las hojas son grandes y redondeados y en ocasiones recubren ligeramente a los pecíolos hasta su base. El color de las hojas es variable desde colores amarillos hasta verdes oscuros. (Anabel, 2019)

- **Inflorescencia y flor**

La inflorescencia es una panícula alargada, que está compuesta por flores hermafroditas que solo aparecen en grupos de dos o tres, el cáliz es de color verde y este compuesto por cinco sépalos y cinco pétalos. Para que la acelga presente una floración es necesario que pase por un tiempo de temperaturas extremas de máximo a mínimo. (Zelaya, 2017)

- **Fruto y semilla**

Las semillas de la acelga (*Beta vulgaris* L. var. cicla) son muy pequeñas y están encerradas en un pequeño fruto al que comúnmente se la llama semilla (realmente es un fruto), que contiene de 3 a 4 semillas. En condiciones naturales la semilla mantiene su poder germinativo por unos cuatro años, pero puede conservarse hasta 10 años o más con un buen tratamiento. (Zelaya, 2017)

1.11.4. Requerimientos edafoclimáticos

- **Temperatura**

Es un cultivo de clima templado, no resiste a los cambios drásticos de temperatura. No resiente la temperatura de -5°C. soportan temperaturas de un mínimo de 6°C y un máximo de 27 a 33°C, con un medio óptimo de 15 y 25°C. Citado por (Anabel, 2019)

- **Luminosidad**

El cultivo de la acelga (*Beta vulgaris* L. var. Cicla) no requiere excesiva luz, siendo perjudicial cuando ésta es elevada, si va acompañada de un aumento de temperatura. (Armando, 2022)

- **Suelos**

Este necesita suelos de consistencia media y vegeta mejor cuando la textura tiende a arcillosa que cuando es arenosa. Requiere suelos profundos, permeables, con gran poder de absorción y ricos en materia orgánica en estado de humificación. Requiere suelos algo alcalinos, con un pH óptimo de 7.2, vegetando en buenas condiciones en los comprendidos entre 5.5 y 8.0, no tolera los suelos ácidos. Citado por (Zelaya, 2017)

- **Humedad Relativa**

La mayoría de las plantas se desarrolla bien con una humedad relativa de aire entre el 30 y 70%, cuando está debajo del 30% la planta se marchita y si la humedad está por encima del 70% tiene una alta incidencia de enfermedades. Citado por (Anabel, 2019)

1.12. Cebolla

El origen primario de la cebolla (*Allium cepa* L.) se lo considera en Asia central, y como centro secundario el Mediterráneo, pues se trata de una de las hortalizas de consumo más antigua. Las primeras referencias se remontan hacia 3.200 a.C. pues fue muy cultivada por los egipcios, griegos y romanos. Durante la Edad Media su cultivo se desarrolló en los países mediterráneos, donde se seleccionaron las variedades de bulbo grande, que dieron origen a las variedades modernas. (Altamirano, 2023)

1.12.1. Taxonomía

Reino:	Vegetal
Phylum:	Teleomorphytae
División:	Tracheophytae
Sub división:	Anthophyta
Clase:	Angiospermae
Sub clase:	Monocotyledoneae
Orden:	Liliflorales
Familia:	Liliaceae
Nombre científico:	<i>Allium cepa</i> L.
Nombre común:	Cebolla

Fuente: (Herbario Universitario (T.B.), 2025).

1.12.2. Descripción botánica

- **Raíz**

La cebolla (*Allium cepa* L.) posee un limitado sistema radicular y provocando que tenga una limitada capacidad de absorción. Sus primeras raíces brotan durante el periodo de germinación de la semilla, las cuales mueren gradualmente a la vez que se van formando otras nuevas. Las raíces adventicias de la cebolla se desarrollan a partir del tallo verdadero y en la mayoría de los casos, no alcanzan una profundidad mayor de 40 cm. (Altamirano, 2023)

- **Tallo**

La cebolla presenta dos tipos de tallos. Un verdadero situado en la base de los bulbos, de donde brotan las yemas, las hojas y las raíces y el otro tallo que brota de escapo floral. Durante el primer año de vida de la planta, el tallo alcanza de 0.5 a 1.5 centímetros, con un diámetro de 1,5 a 2.0 centímetros. (Altamirano, 2023)

- **Hojas**

Las hojas son erectas, huecas y semicilíndricas, con un diámetro de 0,5 cm, aproximadamente, llegan a formar de 8 a 15 hojas de una longitud de 30 a 60 cm. Al nacer cada hoja aparece dentro de la anterior y se forma una especie de tallo llamado “tallo falso” constituido por las vainas de las hojas. La porción basal de cada hoja envuelve completamente el tallo (disco), que al engrosarse por acumulación de reservas forman el bulbo. (Ayarde, 2015)

- **Bulbo**

El bulbo es el órgano donde se acumula las sustancias nutritivas de reserva durante el primer año para dar lugar a la formación de umbelas y producción de semilla en el segundo año. El bulbo consta de un conjunto de vainas envolventes o escamas carnosas (catáfilas), yemas y tallo verdadero. Las vainas pertenecientes a las hojas exteriores adquieren una consistencia membranosa y actúan como túnicas protectoras, mientras que las vainas de las interiores engrosan al acumular sustancias de reserva (catáfilas) formando la parte comestible del bulbo. (Alemán, 2019)

- **Flor**

Su inflorescencia es una umbela, en la parte superior de cada inflorescencia, las flores se abren siguiendo una secuencia definida y con un considerable espacio. Una planta con varias inflorescencias puede tener flores abiertas durante un mes o más. (Fernández, 2013)

- **Semilla**

La semilla es producida en la inflorescencia o conjunto de flores (umbela). Es relativamente pequeña, angulosa y de color negro, cuando está madura. Tiene forma arriñonada y mide unos 4x2 mm. Citado por (Ayarde, 2015)

1.12.3. Importancia del cultivo

La cebolla (*Allium cepa* L.) es una de las hortalizas más importantes a nivel mundial debido a su alto consumo, amplia adaptación agroecológica y su significativo aporte económico y nutricional.

- ❖ **Importancia mundial**

Es un cultivo que se extiende por todas las regiones templadas del mundo. Los principales países productores son: China, Estados Unidos, India y Japón. Citado por (Quintero, 2019)

- ❖ **Importancia a nivel nacional**

En Bolivia el cultivo de la cebolla se distingue entre la producción de cebolla de verdeo y la producción de cebolla en bulbo, siendo la producción de cebolla en bulbo con mayor superficie siendo esta de 7.102 ha. Cochabamba es el mayor productor con un volumen de 30,405 toneladas le sigue Tarija con 20,243 toneladas, Santa Cruz con un Volumen de 11,612 toneladas. ((DAPRO, 2020)

- ❖ **Importancia departamental**

Las zonas productoras de cebolla en Tarija son: El puente, Cercado y Padcaya, destacando por su alta producción de diversas variedades tempranas y tardías. (Alemán, 2019)

1.12.4. Requerimientos edafoclimáticos del cultivo

- **Temperatura**

Requiere una temperatura adecuada para la germinación de 16 a 25 °C. La temperatura adecuada para el desarrollo de las raíces es de 15 a 20 °C, la temperatura está relacionada con la fotosíntesis: a mayor temperatura, se produce mayor fotosíntesis y

viceversa. La semilla germina con temperatura entre 7 y 35° C, siendo la óptima de 18°C a 24° C la temperatura óptima para el desarrollo del cultivo está alrededor de 13° a 14° C con máxima de 30°C y mínima 7° C. La temperatura óptima para el desarrollo del bulbo esta entre 18° C a 25° C. Se adapta a cualquier tipo de clima cálido, templado y frío, tiene una mejor producción en altitudes arriba de los 900 msnm, con ambiente seco y luminoso. (Fernández, 2013)

- **Suelos**

No tiene dificultades para desarrollarse en cualquier tipo de suelo, pero es mejor cultivar en suelos arenoso a francos permitiendo un buen desarrollo de los bulbos, es medianamente tolerante a la salinidad y poco tolerante a la acidez. El rango de pH optimo es de 6 a 7. (Alemán, 2019)

- **Humedad**

Según Leño, un exceso de humedad en el periodo de formación de los bulbos afecta negativamente el proceso de acumulación de sustancias nutritivas en el bulbo. El estrés hídrico provocado por la falta de humedad produce el cierre de estomas dando lugar a una reducción de la fotosíntesis. Es muy sensible al exceso de humedad, pues los cambios bruscos pueden ocasionar el agrietamiento de los bulbos. Una vez que las plantas han iniciado el crecimiento, la humedad del suelo debe mantenerse por encima del 60 % del agua disponible en los primeros 45 cm del suelo. (Fernández, 2013)

1.13. Lechuga

Según algunas investigaciones la lechuga (*Lactuca sativa* L.) tiene un origen entre Asia Menor y la cuenca del mediterráneo, pero los primeros en cultivarla para su consumo fueron los egipcios, desde Egipto se extendió hasta llegar a Europa y de ahí llegó a América por la conquista española. (INIA, 2017)

1.13.1. Taxonomía

Reino:	Vegetal
Phylum:	Teleomorphytae
División:	Tracheophytae
Sub división:	Anthophyta
Clase:	Angiospermae
Sub clase:	Dicotyledoneae
Grado Evolutivo:	Metachlamydeae
Grupo de Ordenes:	Tetraciclicos
Orden:	Campanulales
Familia:	Compositae
Nombre científico:	<i>Lactuca sativa L.</i>
Nombre común:	Lechuga
Fuente:	(Herbario Universitario (T.B.), 2025)

1.13.2. Descripción botánica

- **Raíz**

Esta cuenta con una raíz pivotante con muchas raíces laterales en su mayoría se desarrolla en la capa superficial del suelo, su sistema radicular es profundo. (Orosco, 2021).

- **Tallo**

El tallo es corto de tamaño, en su etapa vegetativa, forma cilíndrica, con crecimiento primario, por lo que es herbáceo. Durante el periodo reproductivo de la planta se vuelve más alargado para brindar soporte a las estructuras reproductivas, llegando a alcanzar hasta 1 m de altura aproximadamente dependiendo la variedad. (Gonzales, 2023)

- **Hojas**

Maroto (1983), manifiesta que las hojas se disponen primeramente en roseta y después se aprietan unas junto a otras formando un cogollo más o menos consistente y apretado en unas variedades que en otras. Sus hojas pueden ser de redonda, lanceolada o casi

espatulada. La consistencia de las mismas puede ser corroas o blanduzca. El borde de los limbos foliares puede ser liso, ondulado aserrado. Citado por (Orosco, 2021)

- **Inflorescencia**

Su inflorescencia está constituida en grupos de 15 a 20 flores, están ramificadas y son de color amarillo, los pétalos son soldados (gamopétalos), posee 5 estambres y su ovario es monocular. Las flores se auto polinizan, función que se realiza antes de que las flores se abran, se reporta también que es posible la polinización cruzada. (Garzon, 2015)

- **Semillas**

Las flores son hermafroditas, están reunidas en capítulos de color blanco-amarillento, con cinco estambres soldados y un ovario bicarpelar con un solo óvulo que dará origen a la semilla. (Japon, 2020)

1.13.3. Importancia del cultivo de la lechuga

El cultivo de la lechuga es fundamental ya que su alto contenido nutricional, su bajo contenido calórico y su ciclo rápido de producción lo convierten es una producción rentable.

❖ Importancia mundial

La producción mundial de lechuga alcanzo en el 2023 una cifra de 28.085 millones de kilos, sobre una superficie de 1.261.377 ha. Con un rendimiento medio de 2,23 kilos por metro cuadrado. Los países de mayor producción son: China, Estados Unidos, India, España, etc. Citado por (HORTOINFO, 2025)

❖ Importancia nacional

En Bolivia existe una gran demanda de productores hortícolas, los principales departamentos productores de lechuga son: Chuquisaca, La Paz, Santa Cruz y Tarija.

A nivel nacional se llega producir 18.331 Tm con una superficie de 2.818 ha. (DAPRO, 2024)

❖ **Importancia departamental**

En Tarija las principales zonas de producción son: Entre Rios, San Lorenzo, Villa Montes, Yacuiba y el Puente. Con una producción total de 424 Tm, en una superficie de 70 ha. (DAPRO, 2024)

1.13.4.- Requerimiento edafoclimáticos

- **Temperatura**

Para la germinación de la semilla requieren una temperatura de 18-20°C. Durante la fase de crecimiento del cultivo se requieren temperaturas entre 14-18°C por el día y 5-8°C por la noche, pues la lechuga exige que haya diferencia de temperaturas entre el día y la noche. Durante el acogollado se requieren temperaturas en torno a los 12°C por el día y 3-5°C por la noche. (Garzon, 2015).

- **Humedad**

Según algunas investigaciones, este cultivo debe tener una humedad relativa del 70 a 90 %, indicando que la temperatura óptima es de 24°C. Este cultivo requiere permanentemente humedad de suelo que demanda unos 400 a 500 mm de agua durante el ciclo vegetativo. (Orosco, 2021)

- **Suelo**

La lechuga es una planta que se adapta bien a todo tipo de suelos, excepto los que tengan problemas de encharcamiento, siendo los más idóneos los ricos en materia orgánica y de elevada fertilidad, ligeros y bien drenados. (Sanchez, 2023)

1.14. Remolacha

Esta planta tiene origen en la zona costera del norte de África. Su cultivo es muy antiguo, data del siglo II a. C; En principio las antiguas civilizaciones solo consumían las hojas de la remolacha. La raíz de la planta se utilizaba como medicamento para combatir los dolores de muelas y de cabeza. Se sabe que los romanos consumían esta raíz, pero no fue hasta el siglo XVI cuando volvió a la dieta, en este caso, de ingleses y alemanes. (Cazon, 2016)

1.14.1. Taxonomía

Reino:	Vegetal.
Phylum:	Teleomorphytae.
División:	Tracheophytae.
Subdivisión:	Anthophyta.
Clase:	Angiospermae.
Subclase:	Dicotyledoneae.
Grado Evolutivo:	Archichlamydeae.
Grupo de Ordenes:	Corolinos.
Orden:	Centrospermales.
Familia:	Chenopodiaceae.
Nombre científico:	<i>Beta vulgaris</i> L.
Nombre común:	Remolacha.

Fuente: (Herbario Universitario (T.B.), 2025).

1.14.2. Descripción botánica

- **Raíz**

Tiene un sistema radicular desarrollado y muy ramificado llegando a los 60cm. Llega a ser resistente a la sequía. Su estructura interna de esta raíz carnosa está formada por círculos concéntricos claros y oscuros, en los primeros están más desarrollados la xilema y por ello, es menos tierno y en los segundos, el floema. Citado por (Baldiviezo, 2020)

- **Tallo**

Durante el primer ciclo de crecimiento de las plantas, corresponde al ciclo vegetativo, el tallo se presenta comprimido y sin internados desarrollados; esta es la razón que explica la existencia de la corona. El tallo, una vez que se ha iniciado el segundo ciclo, comienza a alongarse conformando el llamado tallo floral; este crece rápidamente, ramificado en forma considerable. (Debelly, 1998)

Sus hojas se originan a partir de la corola, que corresponde a un conjunto de yemas en forma de espiral. Las hojas son simples, presentan una lámina ovalada de gran tamaño y un largo peciolo. Además son opulentas, gruesas, de colores verdes claros y suaves en su superficie. (Cazon, 2016)

- **Inflorescencia**

La inflorescencia está compuesta por una larga panícula; las flores son sésiles y hermafroditas, pudiendo aparecer solas o en grupos de dos o tres. El cáliz es de color verde y está compuesto por cinco sépalos y cinco pétalos y cubre las semillas formando un pequeño fruto que contiene de 2 a 6 semillas muy. (Ortega, 2013).

- **Semillas**

Los frutos del presente cultivo son como una masa de semillas los cuales están considerados en varios ovarios, por lo tanto, cada uno contiene una semilla. La remolacha tiene una semilla de forma variada, achatada, dura y lisa cuyo color es oscuro. (Bayas, 2023)

1.14.3. Importancia del cultivo de la remolacha

Este cultivo es muy importante por su triple impacto; su valor nutricional, medicinal y su alto rendimiento industrial para la producción de azúcar. Tiene un papel clave en la rotación de cultivos mejorando la estructura del suelo.

- ❖ **Importancia mundial**

La producción mundial de remolacha fue de 252, 968, 843, en una superficie cosechada de 4,439,073 ha. Los principales países productores son: Rusia, Estados Unidos, Francia Chile. Citado por (Bastida, s.f.)

- ❖ **Importancia nacional**

El cultivo de la remolacha representa un componente clave en la agricultura boliviana especialmente en regiones como el valle alto donde se adapta bien a climas templados.

Los lugares de mayor producción a nivel nacional son: Chuquisaca, Tarija, La Paz, Potos y Oruro. (Mamani, 2013)

❖ **Importancia departamental**

En la ciudad de Tarija la remolacha se cultiva en las siguientes zonas: Cercado, O'Connor, Avilés, Méndez y Arce. Citado por (Mamani, 2013)

1.14.4. Requerimientos edafoclimáticos

- **Temperatura**

La remolacha es de clima frío, pero se desarrolla bien en climas cálidos. La temperatura de germinación esta entre 10 a 30 ° C, y empieza a germinar a los 5 ó 6 °C, siendo la óptima entre 20 y 25 ° C. La temperatura de desarrollo es de 16 a 21 ° C, pero presentando una mejor coloración y un buen contenido de azúcar de 4 a 10 °C. (Valdez, 1988).

- **Luz**

Este cultivo requiere una intensidad lumínica considerable ya que le permite elaborar azúcares y la función de la clorofila se activa de mejor manera. Se ha confirmado que la deficiencia de luz afecta directamente a la producción. (Bayas, 2023)

- **Suelo**

Según Terranova, (2014), señala que la remolacha prefiere para su desarrollo, suelos de textura mediana a liviana, buena profundidad efectiva, buena retención de humedad y un buen drenaje interno, con pH entre 6 a 7. (Baldiviezo, 2020)

- **Humedad**

La requiere de un porcentaje medio de (60 a 90 %) tanto en el suelo como en el ambiente debido a que la superficie foliar es considerada como una de más desarrolladas entre los demás cultivos, por lo tanto, el porcentaje de transpiración es elevado. (Bayas, 2023).

1.15. Tomate

El origen del tomate se localizó en América del sur (Perú, Ecuador y Bolivia). El nombre de “tomate” viene del lenguaje náhuatl de México donde se llamaba “tomalt” y las variantes han seguido al tomate en su distribución por el mundo considerándose

la aportación vegetal de México más extendida mundialmente por ser México su centro de domesticación. citado (Cordero, 2008)).

1.15.1. Taxonomía

Reino:	Vegetal.
Phylum:	Teleomorphytae
División:	Tracheophytae
Sub división:	Anthophyta
Clase:	Angiospermae
Sub clase:	Dicotyledoneae
Grado Evolutivo:	Metachlamydeae
Grupo de Ordenes:	Tetraclicicos
Orden:	Polemoniales
Familia:	Solanaceae
Nombre científico:	<i>Solanum lycopersicum</i> L.
Nombre común:	Tomate

Fuente: (Herbario Universitario (T.B.), 2025).

1.15.2. Descripción botánica

- **Raíz**

El sistema radicular del tomate está constituido por una raíz principal, secundaria y las adventicias. Generalmente se extiende superficialmente sobre un diámetro de 1,5 m y alcanza más de 0,5 m de profundidad, sin embargo, el 70 % de las raíces se localizan a menos de 20 cm de la superficie. El sistema radicular tiene como funciones la absorción y el transporte de agua y elementos nutritivos, así como la sujeción o anclaje de la planta al suelo. (Aguilar et al, 2002)

- **Tallo**

El tallo principal tiene 2 a 4 cm de diámetro en la base y está cubierto por pelos glandulares y no glandulares que salen de la epidermis; sobre el tallo se van

desarrollando hojas, tallos secundarios e inflorescencias. Éste tiene la propiedad de emitir raíces cuando se pone en contacto con el suelo, característica importante que se aprovecha en las operaciones culturales de aporque dándole mayor anclaje a la planta. (Jaramillo J. y Viviana R. 2007), citado por (Cordero, 2008)

- **Hoja**

Las hojas son compuestas e imparipinadas, con foliolos peciolados, lobulados y con un borde dentado, en un numero de siete a nueve y recubiertos ce los pelos glandulares. Las hojas se disponen de forma alternada sobre el tallo, son compuestas imparipinadas con siete a nueve foliolos, los cuales generalmente son peciolados, lobulados y con borde dentado, y recubiertos de pelos glandulares. Las hojas se disponen de forma alternativa sobre el tallo. (Cordero, 2008)

- **Flor**

La flor es perfecta, regular e hipógina se agrupan flores en unas inflorescencias denominadas comúnmente como “racimos”, La primera flor se forma en la yema apical y las demás se disponen lateralmente por debajo de la primera, alrededor del eje principal. Las inflorescencias se desarrollan cada 2-3 hojas en las axilas. (Cáseres, 2016)

- **Fruto**

baya bi o plurilocular, puede alcanzar un peso que oscila entre unos pocos miligramos y 600 gramos. Está constituido por el pericarpio, el tejido placentario y las semillas Citado por (MDRyT, 2017)

- **Semillas**

Es pequeña, con dimensiones aproximadas de 5 x 4 x 2 mm, pueden ser de forma globular, ovalada, achatada, casi redonda, ligeramente elongada, plana, arriñonada, triangular con la base puntiaguda. La semilla está constituida por el embrión, el endospermo y la testa o cubierta seminal recubierta de pelos. Las semillas dentro del lóculo, en sus últimas etapas de desarrollo, aparecen inmersas en una sustancia gelatinosa. Citado por (MDRyT, 2017)

1.15.3. Importancia del cultivo de tomate

El cultivo del tomate es uno de los productos hortícolas más consumido, ocupando un lugar central en la dieta diaria de la población, ya que su valor nutricional es muy elevado. Tiene una importancia económica elevada ya hay grandes y pequeñas industrias dedicadas a la producción del tomate.

❖ Importancia mundial

Los principales países productores de tomate son: China, India, Estados Unidos, Turquía, Egipto, etc. En Latinoamérica el principal país con mayor producción es Brasil. Citado por (LIANSHOU, 2023)

❖ Importancia nacional

En Bolivia los principales departamentos de producción son: Santa Cruz, Cochabamba, La Paz y Tarija. Un total de producción a nivel nacional es de 80.419 Tm, en una superficie de 5.1010 ha. (DAPRO, 2024)

❖ Importancia departamental

En Tarija las zonas de producción son: Uriondo, Entre Ríos, Padcaya, Villa Montes, San Lorenzo, Bermejo, Yunchará, Caraparí, El Puente y Yacuiba, con un total de producción de 10.034 Tm, en una superficie de 620 ha. Fuente (DAPRO, 2024)

1.15.4. Requerimientos edafoclimáticos

• Temperatura

Los rangos para un desarrollo óptimo del cultivo oscilan entre los 28 - 30° C durante el día y 15 - 18° C durante la noche. Temperaturas de más de 35° C y menos de 10° C durante la floración provocan caída de flor y limitan el cuajado del fruto, aunque existen materiales genéticos que cuajan a altas temperaturas.

• Humedad relativa

La humedad óptima oscila entre 60% a 80%. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades aéreas y el agrietamiento del fruto y dificultad de fecundación. (Melendrez, 2021)

- **Luminosidad**

La luz Los valores reducidos de luminosidad inciden de forma negativa sobre los procesos de floración, fecundación, así como el desarrollo vegetativo de la planta. En los momentos críticos durante el periodo vegetativo resulta crucial la interrelación existente entre la temperatura diurna y la luminosidad. (Melendrez, 2021)

- **Precipitación**

Otro de los componentes importantes del cultivo de tomate es la precipitación, Benedito (1986) menciona que el cultivo del tomate no soporta encharcamientos, lluvias excesivas o prolongadas, ya que favorece la incidencia de enfermedades. Todo el ciclo del cultivo del tomate tiene un requerimiento de 600 a 800 mm. de precipitación fluvial. (Melendrez, 2021)

- **Suelo**

Aunque el tomate puede producirse en una amplia gama de condiciones de suelos, los mejores resultados se obtienen en suelos profundos (1 m o más), de texturas medias, permeables y sin impedimentos físicos en el perfil. Suelos con temperaturas entre los 15 y 25 °C favorecen un óptimo establecimiento del cultivo después del trasplante (Escalona, Alvarado, Monardes, Urbina, & Martin, 2009). El pH debe oscilar entre 6 y 7. La conductividad eléctrica óptima está entre 1,5 y 2,0 dS/m. La productividad y sostenibilidad de los suelos dependen de un manejo adecuado de las propiedades físicas (textura, densidad, porosidad, entre otras), las cuales determinan la disponibilidad de nutrientes para las plantas. (MDRyT, 2017)

1.16. Bases fisiológicas del punto de marchitez permanente en cultivos hortícolas

El punto de marchitez permanente, representa el límite fisiológico inferior de disponibilidad de agua en el suelo, definido como el estado en la cual la planta ya no puede extraer agua suficiente para mantener su turgencia celular, aun cuando el suelo sea posteriormente rehumedecido. De acuerdo con Daniel Hillel, este límite se asocia a un potencial hídrico del suelo cercano a 15 bar, el valor que refleja la incapacidad del sistema radical para vencer las fuerzas de retención del agua en el suelo, en especial

suelos arenosos, donde el agua se encuentra débilmente retenida y se pierde rápidamente.

De otra manera Kramer y Boyer, señalan que por debajo de 15 bar ocurre la pérdida irreversible de la turgencia celular, acompañada del cierre de estomas, reducción del crecimiento y colapso de proceso fisiológico, confirmando el carácter fisiológico irreversibles

Desde la fisiología vegetal Taiz y Zeiger, explican que las plantas mesófitas, grupo al que pertenecen la mayoría de los cultivos hortícolas, presentan una capacidad limitada a la tolerancia del estrés hídrico.

Según estas investigaciones, el punto de marchitez permanente no depende solamente de las características físicas del suelo sino también de la fisiología que tienen cada especie vegetal. Los rangos presentados son representativos de los suelos arenosos y se fundamentan en el criterio fisiológico del potencial hídrico de 15 bares.

La acelga. - a pesar de su elevado desarrollo foliar, puede tolerar contenidos de humedad, el PMP es del 2% al 4%.

La cebolla. - es un cultivo de raíz superficial y una baja capacidad de extracción del agua, el PMP se sitúa generalmente entre el 3% y 6%.

La lechuga. -caracterizado por su elevado contenido de agua y su alta sensibilidad al déficit hídrico, el PMP está entre 4% y el 6%.

La remolacha. - tiene una mayor capacidad de almacenamiento y moderada tolerancia al estrés hídrico, el PMP está entre el 3% y 5%.

El tomate. - tiene un sistema radicular más desarrollado, alcanza un PMP del 5% y 7%.

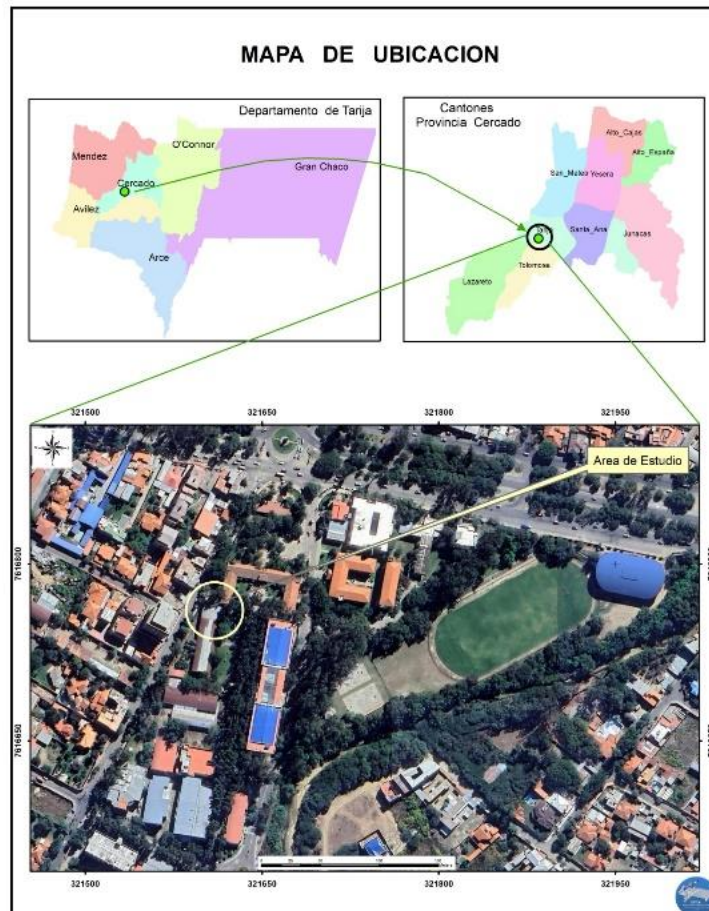
CAPITULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ubicación

La presente investigación se lo llevo a cabo en la provincia Cercado de la ciudad de Tarija, dentro del predio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, (Zona el Tejar). Esta tiene las siguientes coordenadas; 21°32'35''S - 64°43'21''W.

2.2. Mapa de la ubicación



Fuente: Gabinete de Sing. de FCyF.

2.3. Características climáticas

En Tarija los veranos son de días más largos, calurosos, mojados y mayormente nublados, en invierno los días son más cortos, fríos y en su mayoría despejados.

Durante el transcurso del año la temperatura varía de 5 °C a 25 °C y en algunos casos la temperatura baja a menos 1 °C o sube a más de los 29 °C.

La temporada templada empieza en octubre hasta febrero, diciembre es el mes más cálido, la temperatura máxima promedio de 24 °C y la mínima de 16 °C.

La temporada fresca o fría empieza de mayo a julio, la temperatura máxima promedio es menos 21 °C y la mínima promedio es de 5 °C.

El promedio anual de la temperatura en Tarija es de 16 °C.

2.3.1. Precipitación

La precipitación en Tarija es un día con por lo menos 1 milímetro de precipitación. La temporada con mayor precipitación es de noviembre a marzo con una probabilidad de 40 %, la temporada más seca es de abril hasta octubre. Enero es el mes con mayor precipitación de todo el año. La precipitación promedio es de 615.4 milímetro por año.

2.3.2. Viento

La velocidad promedio del viento por hora en Tarija tiene variaciones estacionales en todo el año, los meses de mayo hasta septiembre cuentan con un máximo del 52 % de vientos, la velocidad promedio oscila en 11,7 kilómetros por hora.

2.3.3. Tipo de suelo

En Tarija hay una gran variabilidad de suelo por que el territorio combina valles, terrazas aluviales, abanico aluviales, pendientes, serranías y planicies fluvio - lacustres. Esto hace que no existe un solo suelo dominante, sino varios grupos edáficos según la zona. Según la zonificación agroecológica del departamento se identifican, entre otros los siguientes suelos: Leptosoles, Cambiosoles, Fluviales, Calcisoles, Arenosos. (Tarija, 2024)

2.3.4. Vegetación

El valle central de Tarija tiene un clima templado semiárido o templado mesotérmico, con una marcada estación seca en invierno y lluvias concentradas en verano. Este tipo de climas favorece a la vegetación de valle seco interandino, que este compuesto por pastizales naturales, matorrales, arboles dispersos y áreas agrícolas, también se encuentran especies adaptadas a periodos de sequía.

Cultivos de producción

Nombre común	Nombre científico
Cebolla	<i>Allium cepa</i> L.
Tomate	<i>Solanum lycopersicum</i> L.
Maíz	<i>Zea mays</i> L.
Papa	<i>Solanum tuberosum</i> L.

Cultivos anuales

Nombre común	Nombre científico
Duraznero	<i>Prunus persica</i> (L.) Batsch.
Higuera	<i>Ficus carica</i> L.
Nogal	<i>Juglans regia</i> L.
Vid	<i>Vitis vinifera</i> L.

Arboles dispersos

Nombre común	Nombre científico
Molle	<i>Schinus molle</i> L.
Churqui	<i>Vachellia caven</i> .
Sauce criollo	<i>Salix humboldtiana</i> willd.
Tipa	<i>Tipuana tipu</i> (Benth.) Kuntze.

2.4. Materiales

2.4.1. Material vegetal

La selección de las cinco especies vegetales evaluadas se realizó considerando su importancia agronómica y su frecuente cultivo en sistemas hortícolas de la región. Los cultivos de la remolacha, cebolla, tomate, acelga y lechuga, representan especies de alto valor productivo y consumo local, además de presentar diferentes requerimientos hídricos y características fisiológicas. Esta variabilidad permitió analizar el comportamiento del punto de marchitez permanente en función de la demanda de agua de cada cultivo, facilitando la comparación del contenido de humedad del suelo asociado al estrés hídrico.

E_1 = Acelga híbrida.

E_2 = Cebolla variedad morada.

E_3 = Lechuga variedad crespa.

E_4 = Remolacha variedad lora.

E_5 = Tomate híbrido.

2.4.2. Insumos

- ❖ Arena.
- ❖ Limo.
- ❖ Materia orgánica.
- ❖ Arcilla.
- ❖ Trampas de colores.
- ❖ Jabón potásico.

2.4.3. Herramientas y materiales de campo

- ❖ Macetas.
- ❖ Pala.
- ❖ Saca bocado.
- ❖ Regadera.

- ❖ Flexómetro.

2.4.4. Materiales para el extractor de placas

- ❖ Placas de cerámica.
- ❖ Papel filtro.
- ❖ Desecador.
- ❖ Cilindro de saturación.
- ❖ Platos de secado.

2.4.5. Materiales para muestra de suelo para los tratamientos

- ❖ Cuchara.
- ❖ Sacabocado.
- ❖ Bolsas herméticas.
- ❖ Tamizador.

2.4.6. Equipo de laboratorio

- ❖ Extractor de placas de presión.
- ❖ Estufa.
- ❖ Balanza para determinar el porcentaje de humedad.

2.4.7. Equipo de campo

- ❖ Analizador de humedad y temperatura.

2.4.8. Invernadero

Construcción de un invernadero.

2.5. Diseño experimental

El estudio se estableció bajo un diseño completamente al azar (DCA), con cinco tratamientos correspondientes a las especies vegetales, con cuatro repeticiones de cada tratamiento.

El modelo matemático para el diseño es:

Cada valor Observado = Constante general + Efecto de los tratamientos + Un error.

$$Y_{ij} = m + t_i + e_{ij}$$

El análisis nos dice que una observación es el efecto de una media general alrededor de la cual se encuentran los valores de todas las observaciones (m), el efecto de tratamiento viene representado por (t_i) y un error experimental que viene dado por (e_{ij}).

Fuente: (Garnica&Rodriguez, 2008).

2.6. Factor de estudio

❖ Primer factor de estudio:

Se evaluó la manifestación visual del punto de marchitez permanente en las plantas de cada tratamiento y registrando el contenido de humedad del suelo mediante la balanza analítica.

T_1 = Remolacha.

T_2 = Cebolla.

T_3 = Tomate.

T_4 = Acelga.

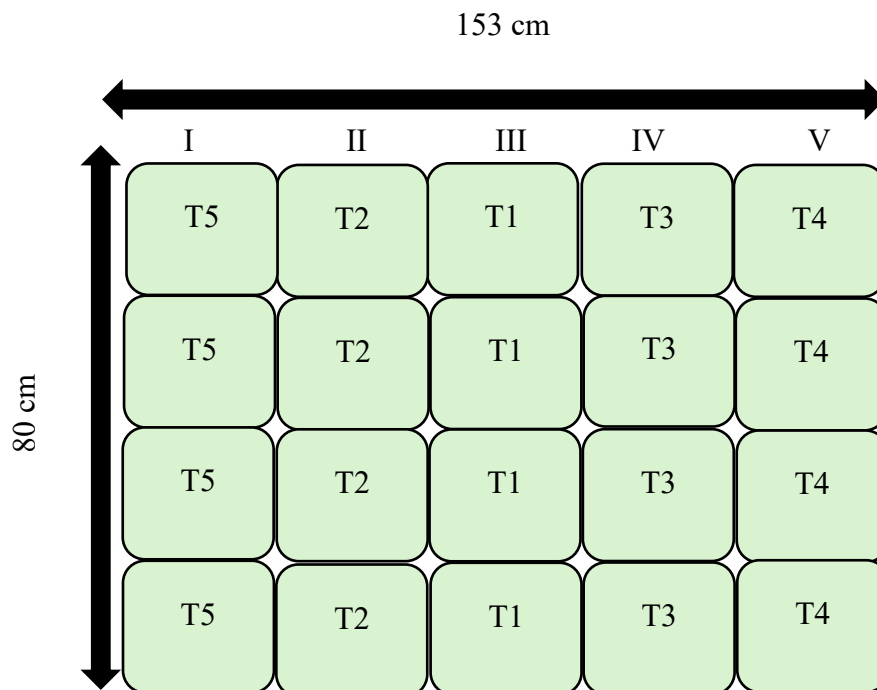
T_5 = Lechuga.

Para garantizar la homogeneidad, se empleó un único suelo preparado mediante la mezcla de arena, limo, arcilla y materia orgánica. De acuerdo con los resultados del análisis del suelo en el laboratorio, se lo clasifico como un suelo franco arenoso, tiene un porcentaje elevado de materia orgánica que es del 4,62%, con un pH de 8,16 siendo ligeramente alcalino y con una alta disponibilidad de los macronutrientes.

❖ Segundo factor de estudio:

Se utilizó un extractor de placas de presión, aplicando presiones de 0,33 bar para la determinación de capacidad de campo (CC) y para la determinación del punto de marchitez permanente (PMP), se aplicó una presión de 15 bar.

2.7. Diseño de campo



2.8. Procedimiento

❖ Ubicación geográfica

La construcción del invernadero se lo realizó dentro de unos de los viveros de la facultad de la Carrera de Ingeniería Agronómica y Forestales, el lugar se lo ubicó en un área plana con referencia hacia el sol.

❖ Armado del invernadero

Para esto se utilizó listones de dos pulgadas y listones de una pulgada, el tamaño del invernadero es de 2,5 m de largo x 2,5 m. de ancho, su perímetro es de 10 m y con un área de $6,25 \text{ m}^2$.

Se colocó el analizador de temperatura y humedad dentro del invernadero para así para controlar la temperatura y la humedad, el invernadero fue totalmente cubierto sin áreas de ventilación para que así la humedad y la temperatura se mantuvieran controladas. La temperatura se lo controlaba abriendo la puerta ya sea para que baje o suba la temperatura y para mantener la humedad se regaba las áreas libres para que esta sea constante.

❖ **Preparación del suelo y llenado de las masetas**

El suelo se lo preparo con: arena, limo, materia orgánica y la arcilla cada uno en diferentes cantidades, una vez que estuvo bien mezclado se llenaron las masetas y se colocaron dentro del invernadero.

❖ **Plantines**

Los plantines se obtuvieron de una plantinera de la ciudad de Tarija, se colocaron dos plantas por cada maceta, una vez que estas ya estuvieran prendidas se comenzó a realizar las actividades agrícolas, como ser riego, limpieza de maleza y control de la humedad y temperatura.

❖ **Riego de las macetas**

Primera semana y segunda; aquí el riego se lo hacia una vez al día todos los días.

Tercera semana; la frecuencia de riego fue de un día por medio ya no requerían un riego de todos los días, ya que la temperatura y la humedad del ambiente son elevadas y no había mucha perdida de agua por la transpiración de las plantas.

De la cuarta semana en adelante: los riegos fueron un día por medio o de acuerdo al requerimiento de cada especie vegetal ya que el T_2 no requería de un riego muy frecuente.

En la novena semana: las plantas ya estaban bien desarrolladas y solo se hizo un solo riego saturando el suelo con agua y desde ese momento se suspende el riego y se procede a hacer el levantamiento de los datos.

❖ **Analizador de temperatura y humedad**

Con este analizador se pudo controlar la humedad y la temperatura dentro del invernadero. Se lo instalo dentro del invernadero.

❖ **Monitoreos**

Se monitorea la humedad para que esta se mantenga constante, que era de un 75 % si la humedad aumentaba de 90 % se abría la puerta para bajar la humedad. Si esta llegaba a bajar más de 50% se regaba las áreas vacías y se cerraba la puerta.

La temperatura se mantenía de 20 °C hasta los 31° C, si la temperatura es muy elevada se abría la puerta y si había un descenso de temperatura entonces se lo tenía cerrada la puerta.

❖ **Control de plagas**

Durante el desarrollo de la investigación se realizó un monitoreo periódico de las principales plagas presentes en el invernadero, con el fin de evitar que estrás influyan significativamente en el crecimiento y el desarrollo de los cultivos.

• **Mosca blanca**

La mosca blanca fue la primera en aparecer, afectando principalmente en los cultivos del tomate y la lechuga, el daño observado se concentró en las hojas, las cuales presentaron una sustancia pegajosa producto de la excreción de melaza, lo que afecto la superficie foliar.

Como método de control se emplearon trampas cromáticas de color amarillo, constituyendo el principal medio de manejo de esta plaga. Para su elaboración se utilizando nylon amarillo, el cual fue cortado de forma rectangular; en ambos extremos del rectángulo se colocó soportes de caña para facilitar su colocación dentro del invernadero. Posteriormente, ambas caras del nylon fueron impregnadas de aceite comestible, con el objetivo de atrapar a los insectos adultos, se instalaron tres trampas para los tratamientos, estas fueron remplazadas de manera constante.

- **Pulgón**

Estos se presentaron en la acelga, lechuga y remolacha. Para su control se utilizó jabón potásico, el cual fue aplicado de manera directa sobre las plantas. Para su aplicación se utilizó un tamizador y se distribuyó uniformemente sobre todos los tratamientos.

Con este control se pudo mantener la población de Pulgón controladas.

2.8.1. Metodología de toma de datos de campo

1. Se comienza con el levantamiento de datos del invernadero cuando las plantas entran en estrés hídrico.
2. Con el saca bocado sacamos tres muestras de una maseta de unos 7 cm de profundidad y lo colocamos en la bolsa hermética.
3. Se homogeniza la muestra y se lo lleva a laboratorio de inmediato para medir el porcentaje de humedad de ese día.
4. Este procedimiento se lo hace para todas las repeticiones todos los días ya que la humedad de suelo va variando.
5. Cuando los tratamientos entran en una marchitez insipiente se tiene que tener más cuidado ya que después es el momento en que entran en PMP.
6. Para saber si ya paso de marchitez insipiente a PMP se tiene que regar una repetición por tratamiento y si las hojas de la planta se recuperan es que aún no ha llegado al PMP.
7. Se tiene que hacer esta prueba de riego hasta que llegue al punto de regar y las hojas no revivan.

2.8.1.1 Metodología del uso de la balanza para los datos de campo

1. La balanza tiene que estar bien calibrada.
2. La muestra de suelo tiene que estar bien mezclada.
3. Se pesa 5 gramos de muestra en la balanza, se cierra el equipo y se da a iniciar el secado de la muestra para determinar el porcentaje de humedad.
4. Cuando el equipo nos da el dato, este se lo anota y se procede a retirar la muestra que está dentro de la placa de aluminio.

5. Se coloca otra placa de aluminio limpia y otra vez se comienza a pesar los 5 gramos de suelos, este procedimiento se lo realiza para todas las repeticiones de los tratamientos hasta que la planta llegue a su PMP.

2.8.2. Saturación de la muestra de suelo para el extractor de placas

Fueron 8 muestras con el mismo suelo, esta muestra es la primera muestra compuesta que se obtuvo de la preparación del suelo antes de colocar a las masetas.

1. Pegar un papel filtro en un cilindro de saturación
2. Una vez listo eso se tiene que colocar pequeñas muestras de suelo y con la pesa de 1 kg se tiene que ir compactando la muestra de suelo hasta que quede una cantidad de muestra a nivel de la parte superior del cilindro.
3. Con una brocha se tiene que limpiar los restos de los bordes.
4. (este procediendo se hace para los 8 cilindros de saturación, 4 de estos irán para determinar cc y los demás para PMP).
5. Se colocan las 8 muestras ya preparadas en los cilindros en un recipiente plano y se lo satura con agua destilada.
6. Dejar reposar por 24 horas pasado este tiempo retirar el exceso de agua y proceder a utilizar el extractor de placas.

2.8.3. Metodología del extractor de placas

1. En el desecador se tiene que saturar con agua destilada (7 litros), las placas de cerámica porosa que son de 1 bar y de 15 bar, 24 horas antes de utilizar el extractor de presión.
2. Cuando ya se pasaron las 24 horas de saturación de las placas de cerámica, en el extractor de presión se colocan los soportes de repisa para apoyar las cuatro placas.
3. Se colocan las cuatro placas del extractor de presión, en cada placa va una manguera de flujo de salida, esta debe ser colocadas con una pequeña curva.
4. En la última placa de la parte superior se colocan las muestras de suelo y se procede al sellado del extractor de presión.

(El extractor de presión cuenta con dos ollas las cuales estrás trabajan a presiones diferentes ya que la una trabaja a 1 bar de presión que es para determinar la CC y la otra olla trabaja a 15 bar de presión que es para determinar el PMP. Cada olla tiene que trabajar con sus placas que también son de 1 bar y de 15 bar. Para cada olla el procedimiento del colocado de las placas de cerámicas es el mismo).

5. Una vez colocada las muestras del suelo se coloca la tapa del equipo y para sellarlo de manera correcta se ajusta los pernos de forma cruzada, hasta que esté bien sellado. (es lo mismo para ambas ollas).
6. Todas las llaves deben estar cerradas.
7. Encender compresor
8. Para la olla que trabaja a 1 bar de presión se tiene que abrir válvula 1
9. Abrir regulador 3 y llevar hasta 1,5 bar (ajustar tuerca).
10. Cerrar válvula 1.
11. Abrir válvula de escape.
12. Abrir llave amarilla entre 3-4.
13. Abrir llave 2.
14. Abrir llave 4 hasta 0,33 bar.
15. Abrir llave amarilla debajo del escape
16. Para la olla que trabaja a 15 bar abrir llave 1
17. Abrir llave 3 y poner hasta 15 bar.
18. Abrir llave amarilla debajo del escape.

(Se coloca un recipiente a lado de las ollas en la parte del flujo de escape ya que empezará a salir agua, para esto se tiene que hacer un control de 24 horas, pasado este tiempo se tiene que verificar si aún sale agua y si sigue saliendo a las 48 horas otras se tienen que controlar hasta que deje de salir agua, la parte de los flujos de escape tienen que estar secos para recién apagar el equipo).

19. Para apagar el equipo se apaga el compresor.
20. Para la olla que trabaja a 1 bar, se cierra la llave amarilla debajo del escape.
21. Cerrar llave 2,3 y 4

22. Abrir escape
23. Para la olla que trabaja a 15 bar, cerrar la llave amarilla
24. Cerrar la llave 1
25. Ir a medir el porcentaje de humedad en la balanza para obtener los datos del PMP y CC para esa muestra.

2.9.- Variables respuesta

- ❖ Determinar el punto de marchitez permanente de cada tratamiento mediante el equipo de la balanza para determinar el porcentaje de humedad del suelo.
- ❖ Corroborar con el extractor de placas el resultado del PMP.
- ❖ Tabla de ANVA

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Condiciones ambientales del invernadero

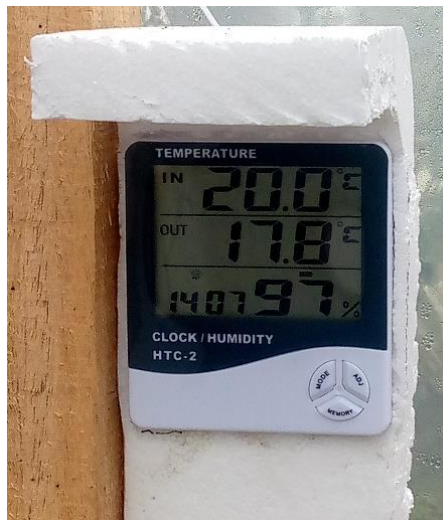
Durante el periodo experimental (septiembre- diciembre), la temperatura y la humedad relativa, fueron los factores que más influencia tuvieron en el desarrollo de las especies vegetales. Para el monitoreo de la temperatura y del porcentaje de humedad se utilizó el equipo de “Clock/humidity HTC- 2”, con el cual se pudo registrar la temperatura dentro y fuera del invernadero.

La temperatura interna del invernadero oscilo entre 21,08 y 28° C, con una media de 24,5 ° C y la temperatura externa oscilaba entre 19,24 y 23, 38° C.

La humedad relativa se mantuvo en un rango de 69 – 85%, con un promedio de 78%

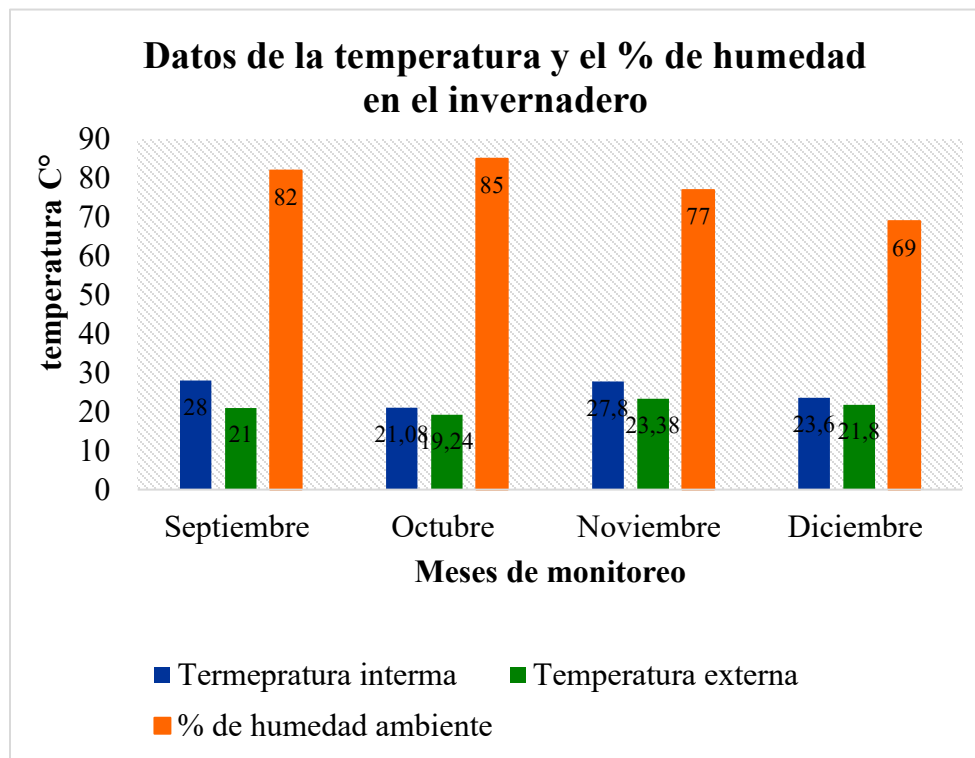
Estas condiciones se encuentran dentro del rango óptimo para cultivos hortícolas, según (Valdez,1988). La diferencia térmica entre el interior y el exterior del invernadero ($\Delta T = 3\text{-}5^{\circ}\text{C}$).

Figura 2: Imagen del equipo Clock/humidity HTC- 2



Equipo de Clock/humidity HTC- 2.

Figura 3: Temperatura y humedad relativa en el invernadero



Fuente: Equipo de Clock/humidity HTC- 2.

3.2 Características morfológicas de los diferentes tratamientos

3.2.1. Remolacha

Los resultados obtenidos en el cultivo de la remolacha evidenciaron un adecuado desarrollo morfológico bajo las condiciones controladas del invernadero. Las plantas alcanzaron una altura de 34 y 40 cm en las diferentes repeticiones, a los 51 días de su trasplante en el invernadero ya contaban con la formación de bulbos en todas las unidades experimentales evaluadas. Este comportamiento indica que las condiciones ambientales proporcionadas especialmente la temperatura, humedad y manejo hídrico favorecieron el crecimiento vegetativo y al desarrollo de bulbo.

Según (Valdez, 1988), la remolacha se desarrolla de manera óptima en temperaturas moderadas de 20° a 25° C, y con una adecuada disponibilidad de humedad en el suelo y el ambiente que está entre los 60% y 90% de humedad, estas condiciones permiten

la correcta formación de la planta. Los resultados observados en el presente estudio estarían dentro de lo que señala el autor ya que el ambiente protegido de invernadero favoreció en las características morfológicas y el desarrollo fisiológico.

Cuadro 2: Características morfológicas de la remolacha

Características morfológicas de la remolacha		
Repeticiones	Altura de la planta	Presencia de bulbo
R1	34 cm	SI
R2	38 cm	SI
R3	37 cm	SI
R4	40 cm	SI

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Cebolla

Entre las cinco especies evaluadas, la cebolla fue la que presento mayor sensibilidad a las condiciones de la investigación que eran de una humedad y temperatura elevada, tuvo un desarrollo morfológico limitado en comparación con los demás cultivos. Aunque las plantas lograron prender después del trasplante, posteriormente mostraron síntomas claros de estrés, característico por la pérdida de turgencia en las hojas, incluso después de regar.

Figura 4: Marchitez de la cebolla



Fuente: Elaboración propia.

Este comportamiento puede explicarse por las características morfológicas del sistema radicular de la cebolla, la cual es relativamente superficial y con una limitada capacidad de expansión en el suelo, lo que reduce su eficiencia en la absorción de agua cuando las condiciones no son favorables. Según (Altamirano, 2023).

Según (Fernández 1995), señalan que cuando el contenido de humedad del suelo alcanza niveles críticos, la absorción del agua por las raíces no logra compensar la pérdida fisiológica de la planta, provocando una pérdida irreversible de turgencia en los tejidos. La temperatura óptima para su desarrollo está entre 20° C a 25° C y el % de humedad no debe ser elevada.

En este caso, las condiciones del invernadero, particularmente la falta de ventilación y el microclima generado en su interior, pudieron intensificar el estrés en las plantas de cebolla, afectando su capacidad de recuperación y su desarrollo normal.

Cuadro 3: Características morfológicas de la cebolla

Características morfológicas de la cebolla		
Repeticiones	Altura de la planta	Número de hojas
R1	40	5
R2	30	5
R3	35	4
R4	40	4

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Tomate

En el cultivo del tomate se observó un desarrollo morfológico favorable bajo las condiciones del experimento. Las plantas presentaron un crecimiento vigoroso y relativamente uniforme, alcanzando alturas comprendidas entre 60 cm y 74 cm en las diferentes repeticiones. Asimismo, se vio la formación de ramilletes florales y la presencia de frutos hacia el final de la investigación. Esto nos indica que el cultivo logro completar adecuadamente su fase vegetativa y avanzar hacia la fase reproductiva. Este comportamiento sugiere que las condiciones ambientales dentro del invernadero permitieron un adecuado desarrollo fisiológico y morfológico de las plantas.

Es importante considerar, que al final de la investigación las plantas fueron sometidas a condiciones de estrés hídrico con el objetivo de determinar el PMP. Bajo estas condiciones, la aparición de frutos se lo considera como una respuesta fisiológica adaptativa al estrés.

Según (Kramer & Boyer, 1995), En las diversas investigaciones Fisiológicas señalan, que cuando la planta experimente déficit hídrico, tienden a modificar la distribución de sus recursos metabólicos, reduciendo el crecimiento vegetativo y priorizando los procesos reproductivos con el fin de asegurar la producción de semillas antes que las condiciones ambientales se vuelvan desfavorables, a esto se lo conoce como una estrategia de escape al estrés. En este sentido la fructificación observada en el cultivo

del tomate está asociada a la respuesta de la planta frente al estrés hídrico durante la determinación del PMP.

Cuadro 4: Características morfológicas del tomate

Características morfológicas de tomate			
Repeticiones	Altura de la planta	Ramillete floral	Flores
R1	60	1	5
R2	66	1	6
R3	62	1	6
R4	74	2	5

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Acelga

El cultivo de la acelga se observó un adecuado desarrollo morfológico bajo las condiciones controladas del invernadero. Las plantas tuvieron un buen desarrollo que se vio principalmente por el tamaño de las hojas las cuales alcanzaban una longitud de 36 a 45 cm y un ancho de 10 a 13 cm en las diferentes repeticiones evaluadas. El número de hojas oscilo entre 11 y 13 hojas lo que indica un crecimiento vegetativo favorable y una buena adaptación del cultivo a las condiciones de temperatura, humedad y del manejo hídrico dentro del invernadero.

Según (Armando, 2022), la acelga se caracteriza por poseer una elevada capacidad de adaptación a diferentes condiciones, especialmente en ambientes protegidos. Las hojas presentan un limbo amplio y un peciolo bien desarrollado, características que favorecen al desarrollar la fotosíntesis. Los resultados obtenidos coinciden con lo que señala este autor.

Aunque hacia la fase final de la investigación, las plantas fueron sometidas a condiciones de estrés hídrico para la determinación del PMP, la acelga logro mantener un desarrollo vegetativo adecuado durante la gran parte del trabajo, lo que demuestra su tolerancia a variaciones en la disponibilidad de agua.

Cuadro 5: Características morfológicas de la acelga

Características morfológicas de la acelga			
Repeticiones	Tamaño de hoja	Ancho de la hoja	Número de hojas
R1	38 Cm	13cm	12
R2	40 cm	11 cm	13
R3	36 cm	11cm	11
R4	45 cm	10 cm	11

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5. Lechuga

En el cultivo de la lechuga se observó un desarrollo morfológico limitado bajo de las condiciones del invernadero. El alargamiento del tallo se lo observo desde las primeras etapas del crecimiento lo cual se atribuye principalmente a las condiciones micro climáticas del invernadero.

Las plantas lograron prender adecuadamente después de trasplante, la falta de ventilación provoco la acumulación de calor y una humedad relativa elevada, influyeron de manera directa en el desarrollo morfológico de la planta. En este ambiente se provocó un acelerado crecimiento del tallo y una menor compactación de las hojas, esto se lo conoce como espigamento prematuro, esto ocurre cuando las condiciones ambientales son desfavorables.

El alargamiento observado en las plantas, también pueden ser relacionados con alteraciones en la regulación hormonal del crecimiento. Las fitohormonas, en especial las giberelinas y las auxinas, desempeñan un papel fundamental en la elongación celular y en el desarrollo del tallo. Bajo condiciones ambientales como temperaturas

elevadas, alta humedad relativa, y baja ventilación, estas hormonas pudieron incrementarse, provocando un crecimiento más alargado de la planta. Las temperaturas dentro del invernadero pudieron haber influido indirectamente en la regulación de las hormonas de este cultivo.

Cuadro 6: Características morfológicas de la lechuga

Características morfología de la lechuga			
Repeticiones	Altura de planta	Números de hojas	Ancho de la hoja
R1	53cm	12	10
R2	64cm	14	10
R3	52cm	10	8
R4	67cm	8	10

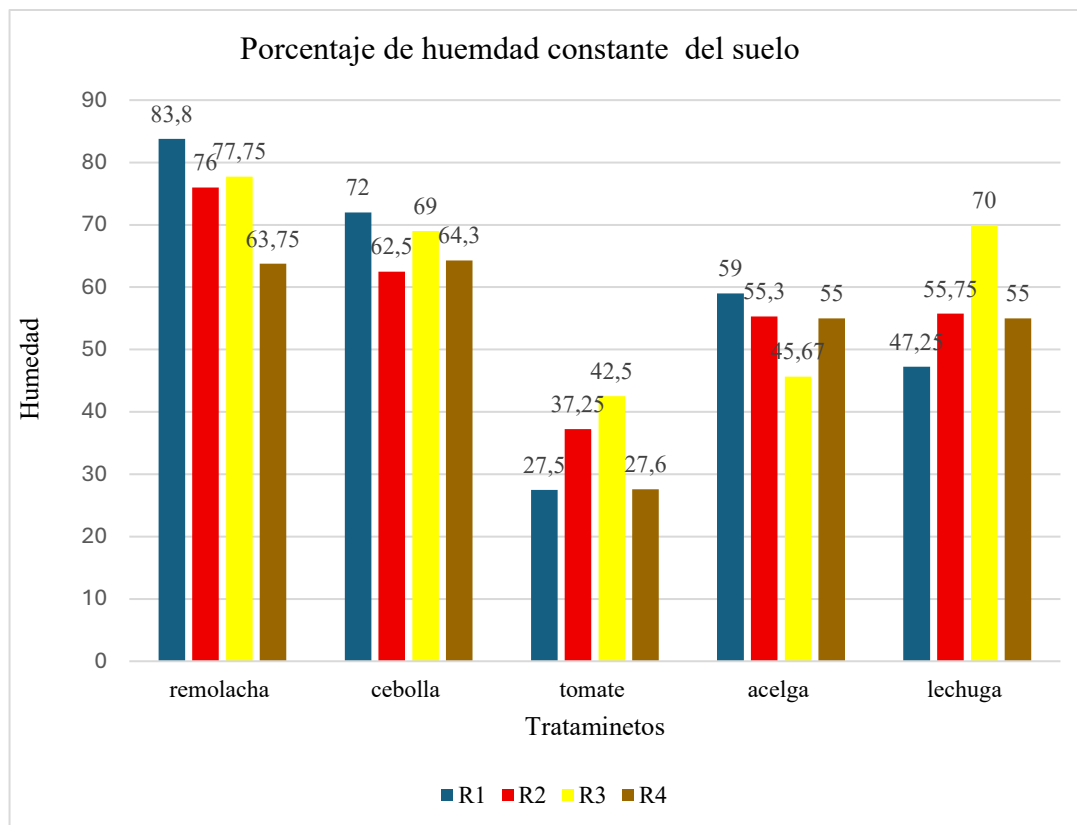
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Porcentaje de humedad constante del suelo antes de la saturación

Cuadro 7: Porcentaje de humedad del suelo

Porcentaje de humedad constante del suelo						
Tratamiento	R1	R2	R3	R4	Suma	Media
Remolacha	83,80%	76,00%	77,75%	63,75%	301,30%	75,3%
Cebolla	72,00%	62,50%	69,05%	64,30%	267,80%	67,0%
Tomate	27,50%	37,25%	42,50%	27,60%	134,85%	33,7%
Acelga	59,00%	55,30%	45,67%	55,00%	214,97%	53,7%
Lechuga	47,25%	55,75%	70,00%	55,00%	228	57,0%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5: Porcentaje de humedad en el suelo

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 7, se presentan los valores del porcentaje de humedad constante del suelo registrados antes del proceso de saturación. Estos valores corresponden al contenido hídrico inicial del suelo utilizado en los diferentes tratamientos durante el desarrollo del experimento.

Estos resultados muestran variaciones en el porcentaje de humedad en el suelo entre las unidades experimentales. Se obtuvo un promedio de 75,3 % para el tratamiento de remolacha, 67% para la cebolla, 57% para la lechuga, para la acelga 53,7% y un 33,7 % para el tomate. Estas diferencias están asociadas principalmente a la dinámica de consumo de agua por parte de cada especie vegetal durante su desarrollo, así como las características fisiológicas de cada cultivo como ser; tamaño de planta, desarrollo del

sistema radicular y la superficie foliar tienden a presentar un mayor consumo de agua, lo que influye directamente en el contenido de humedad en el suelo.

3.4. Resultados del extractor de placas

El cuadro 8, muestra los resultados obtenidos del PMP y CC mediante el uso del extractor de placas de presión.

Estos resultados indican que el suelo franco arenoso tiene una capacidad de campo del 11,9 % y el punto de marchitez permanente es de 6,8%.

Cuadro 8: Resultados del punto de marchitez permanente según el extractor de placas de presión

Suelo AF	PMP	CC
M1	6,82%	11,97%
M2	7,07%	12,25%
M3	6,94%	11,82%
M4	6,56%	11,63%
Σ	27,39%	47,67%
Media	6,8%	11,9%

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indican una media de 11,9 % para la CC y 6,8 % para el PMP, lo que representa un contenido de agua útil de 5,1 %. Estos valores son consistentes con el marco metodológico establecido por (Richards y Weaver 1943), quienes validaron el uso de una presión de 0,33 bar para estimar la CC y de 15 bar para el PMP, considerando que a esta última tensión el agua se encuentra retenida con una fuerza tal que la mayoría de las plantas herbáceas no pueden extraerla.

Según (Hillel,1972), el potencial matricial de -15 bar refleja la incapacidad del sistema radicular para vencer las fuerzas de retención del suelo, especialmente en texturas franco-arenosas donde el agua se pierde con mayor rapidez por drenaje y evaporación.

La baja dispersión observada entre las cuatro repeticiones (rango de 0,62 puntos porcentuales para CC y 0,51 para PMP) evidencia la homogeneidad del sustrato y la precisión técnica del procedimiento de laboratorio.

No obstante, como advierten (Weil&Brady, 2017) , el PMP no constituye un valor físico invariable, sino un umbral que también está influenciado por las características fisiológicas de cada especie. En este sentido, el valor de 6,8 % obtenido mediante el extractor representa una referencia edáfica base, la cual en esta investigación se contrasta con los límites fisiológicos reales de cada cultivo, demostrando que el método de laboratorio tiende a sobrestimar el punto de marchitez al no considerar la capacidad diferencial de extracción hídrica ni los mecanismos de ajuste osmótico propios de cada especie vegetal.

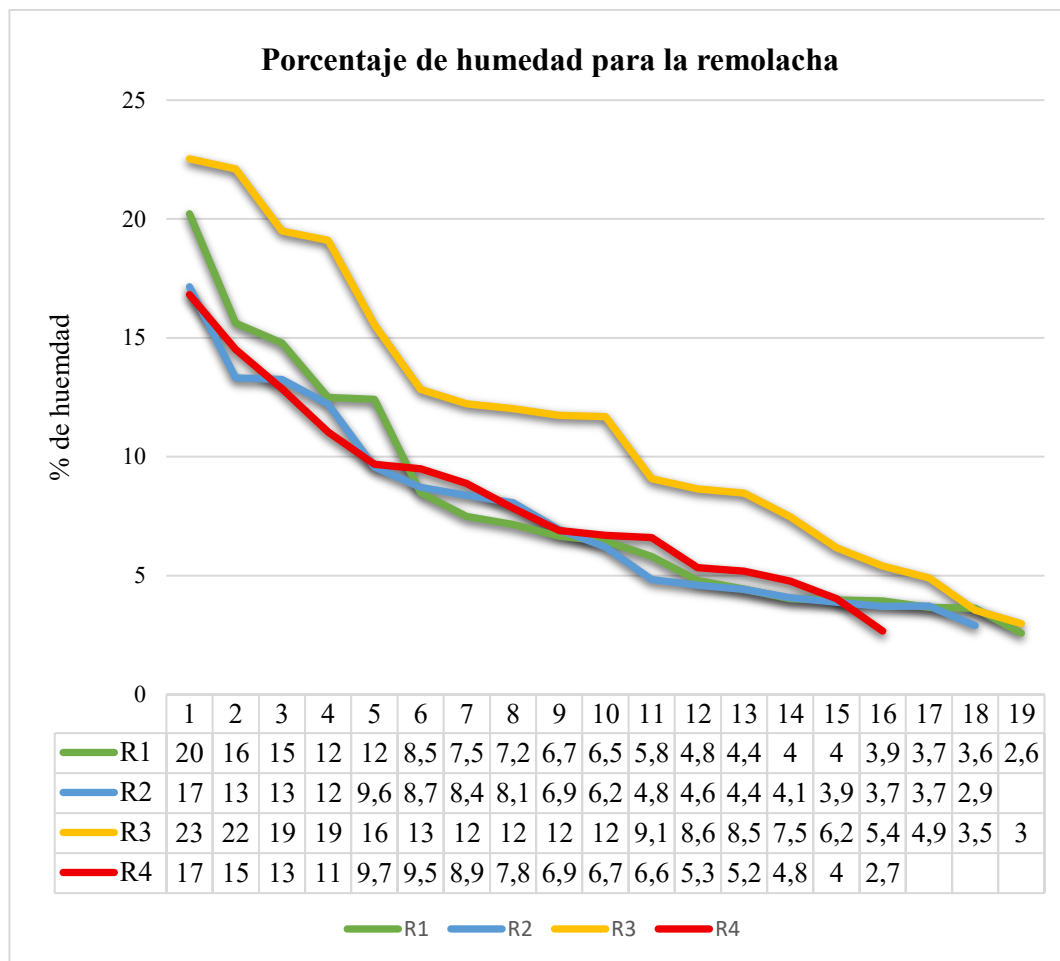
3.5. Porcentaje de humedad en el suelo hasta llegar al punto de marchitez permanente de las diferentes especies vegetales

3.5.1. Porcentaje de humedad en el suelo hasta llegar al punto de marchitez permanente para la remolacha (T1)

Cuadro 9: Porcentaje de humedad en el suelo del cultivo de la remolacha (T1)

Remolacha						
Día	R1	R2	R3	R4	Total	Promedio
1	20,22%	17,15%	22,53%	16,82%	76,72%	19,18%
2	15,62%	13,31%	22,1%	14,52%	65,555	16,39%
3	14,78%	13,25%	19,49%	12,86%	60,38%	15,1%
4	12,49%	12,21%	19,1%	11,04%	54,84%	13,71%
5	12,41%	9,56% ⁵	15,55%	9,68%	47,2%	11,8%
6	8,49%	8,71%	12,83%	9,5%	39,53%	9,88%
7	7,49%	8,38%	12,22%	8,88%	36,97%	9,24%
8	7,15%	8,07%	12,03%	7,84%	35,09%	8,77%
9	6,65%	6,94%	11,74%	6,9%	32,23%	8,06%
10	6,45%	6,19%	11,69%	6,7%	31,03%	7,76%
11	5,8%	4,84%	9,07%	6,6%	26,31%	6,58%
12	4,79%	4,59%	8,64%	5,34%	23,36%	5,84%
13	4,43%	4,42%	8,47%	5,19%	22,51%	5,63%
14	4,03%	4,07%	7,48%	4,77%	20,35%	5,09%
15	3,98%	3,88%	6,17%	4,03%	18,06%	4,52%
16	3,93%	3,7%	5,4%	2,67%	15,7%	3,93%
17	3,66%	3,72%	4,9%		12,28%	4,09%
18	3,63%	2,9%	3,54%		10,07%	3,36%
19	2,58%		2,98%		5,56%	2,78%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6: Porcentaje de humedad en el suelo para la remolacha

Fuente: Elaboración propia.

En el tratamiento 1 que corresponde al cultivo de la remolacha, se puede observar una disminución progresiva del contenido de humedad del suelo a medida que transcurre los días posteriores a la suspensión del riego. Este comportamiento nos muestra el proceso natural de la absorción del agua por parte de las plantas, así como también hay la pérdida de agua del suelo por evaporación dentro del invernadero.

Durante el primer día del control de humedad, el porcentaje promedio de humedad en el suelo fue de 19,18%, este valor nos indica que el suelo aún tiene una cantidad considerable de agua disponible para las plantas. Las plantas se encuentran en

condiciones fisiológicas normales, manteniendo su turgencia y un adecuado funcionamiento metabólico.

Entre los días 2 y 6 se observa una disminución progresiva del porcentaje de humedad en el suelo, pasando del 16,39% a un 9,88%, esto nos indica el consumo continuo de agua por parte de las plantas para sostener sus procesos fisiológicos, estos datos todavía se encuentran en el rango que permite la absorción hídrica por parte del sistema radicular.

Entre los días 7 y 10, el porcentaje de humedad del suelo baja hasta 7,76% las plantas comienzan a manifestarse con una ligera pérdida de turgencia en las hojas durante las horas de mayor temperatura, al descender la temperatura estas vuelen a recuperar su turgencia, esto se lo ve en horas de la mañana.

En los días 11 y 15, se registran valores de 6,58%, a este porcentaje de humedad las plantas recuperan su turgencia en las mañanas demostrando que aún están en una marchitez insipiente y al 4, 52% el suelo alcanza niveles de humedad muy bajos, el agua se encuentra retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo.

Las repeticiones que llegaron a obtener un valor del 4% de humedad se las hace una prueba para confirmar si recuperan o no. Los resultados mostraron que cuando el suelo llega a tener un porcentaje de humedad próximo del 4% la planta se recupera. La planta está en estrés hídrico y no se recupera por la mañana, pero aun así se recupera si se lo riega.

De los 16 días hasta los 19 días que son los últimos días, se registran valores del % de humedad inferiores al 3%, alcanzando un promedio final de 2,78% de humedad del suelo, siendo este el valor del PMP. Se hace la prueba para ver si se recupera la planta, echándole agua y esta no se recupera

3.5.2. Porcentaje de humedad en el suelo hasta llegar al punto de marchitez permanente para la cebolla (T2)

Durante el desarrollo del experimento, el cultivo de la cebolla presentó una pérdida de turgencia foliar que no fue reversible tras la rehidratación del suelo, aun cuando el contenido de humedad del suelo era elevado. Este comportamiento indica que la marchitez observada no respondió exclusivamente a un déficit hídrico del suelo, sino que estuvo asociada a la interacción de diversos factores de estrés, entre ellos condiciones térmicas elevadas, manejo hídrico y una posible limitación en la ventilación del invernadero. En consecuencia, no fue posible determinar de manera confiable el PMP fisiológico de la cebolla bajo las condiciones del microclima dado.

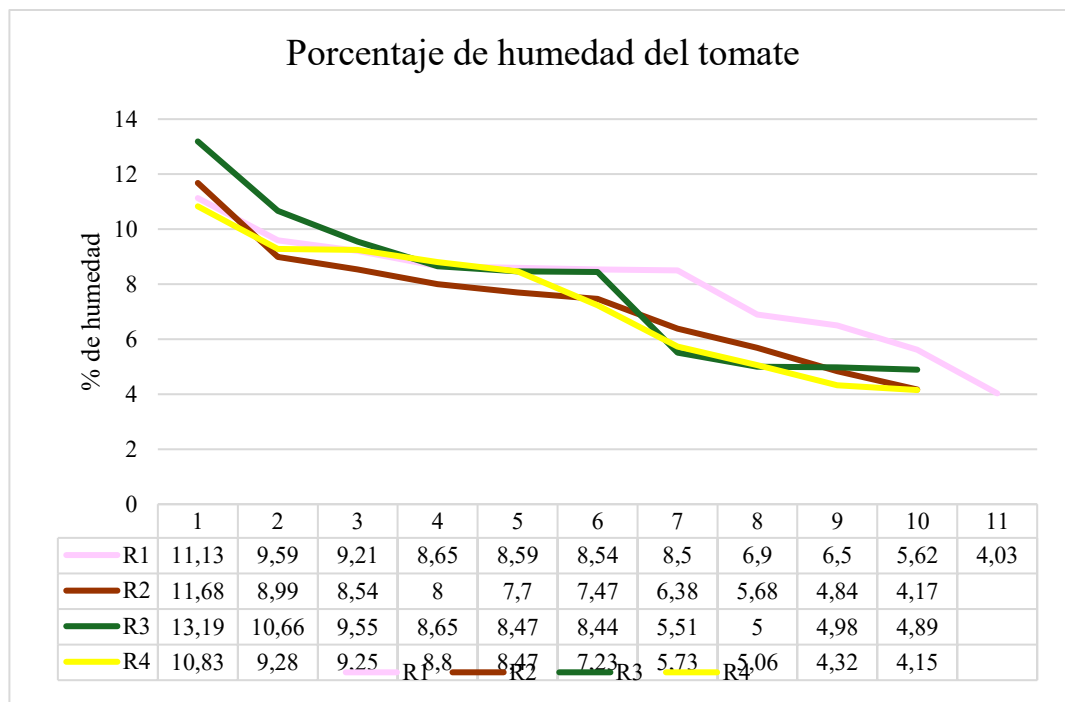
La exclusión del cultivo de cebolla del análisis comparativo no constituye una limitación del diseño experimental, sino una decisión metodológica fundamentada en el principio de rigor científico. En este sentido, únicamente se consideraron para el análisis estadístico aquellos datos que cumplieron con los supuestos del modelo y con los criterios fisiológicos definidos para la variable respuesta. Este procedimiento es coherente con lo señalado en la literatura especializada en experimentación agronómica, donde se establece que la calidad y validez de los datos deben prevalecer sobre la cantidad de tratamientos evaluados. (Garnica & Rodríguez, 2008)

3.5.3. Porcentaje de humedad en el suelo hasta llegar al punto de marchitez permanente en el tomate (T3)

Cuadro 10: Porcentaje de humedad en el suelo para el cultivo del tomate (T3)

Tomate						
Dia	R1	R2	R3	R4	total	promedio
1	11,13%	11,68%	13,19%	10,83%	46,83%	11,70%
2	9,59%	8,99%	10,66%	9,28%	38,52%	9,63%
3	9,21%	8,54%	9,55%	9,25%	36,55%	9,13%
4	8,65%	8%	8,65%	8,8%	34,1%	8,52%
5	8,59%	7,7%	8,47%	8,47%	33,23%	8,30%
6	8,54%	7,47%	8,44%	7,23%	31,68%	7,92%
7	8,5%	6,38%	5,51%	5,73%	26,12%	6,53%
8	6,9%	5,68%	5%	5,06%	22,64%	5,66%
9	6,5%	4,84%	4,98%	4,32%	20,645%	5,16%
10	5,62%	4,17%	4,89%	4,15%	18,83%	4,70%
11	4,03%				4,03%	4,03%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7: Porcentaje de humedad del suelo para el tomate

Fuente: Elaboración propia.

El tratamiento 3 que corresponde al cultivo del tomate, se observó una disminución progresiva del contenido de humedad del suelo, reflejando el consumo del agua por parte de las plantas y la pérdida por evaporación.

El día 1, el contenido promedio de humedad fue 11,7 %, el suelo aun disponía de agua para el desarrollo normal de las plantas. Al estar en este porcentaje de humedad las hojas no presentaban estrés hídrico.

En los días 2 y 4, la humedad del suelo disminuyó gradualmente desde 9,63% hasta 8,72%, en este porcentaje de humedad se vio una ligera pérdida de turgencia en las horas de más calor.

En los días 5 y 7, el porcentaje de humedad del suelo bajó hasta el 6,53%, la planta ya perdió su turgencia por completo y no se recuperaba en las horas de la madrugada. Se lo regó para ver si la planta recuperaba su turgencia y efectivamente recuperó su turgencia.

En los días 8 y 9 % el porcentaje de humedad bajo más hasta un 5,16 % de humedad, las plantas estaban más marchitas, las hojas más viejas ya estaban marchitas, se volvió a regar y la planta se recuperó en cuestión de horas.

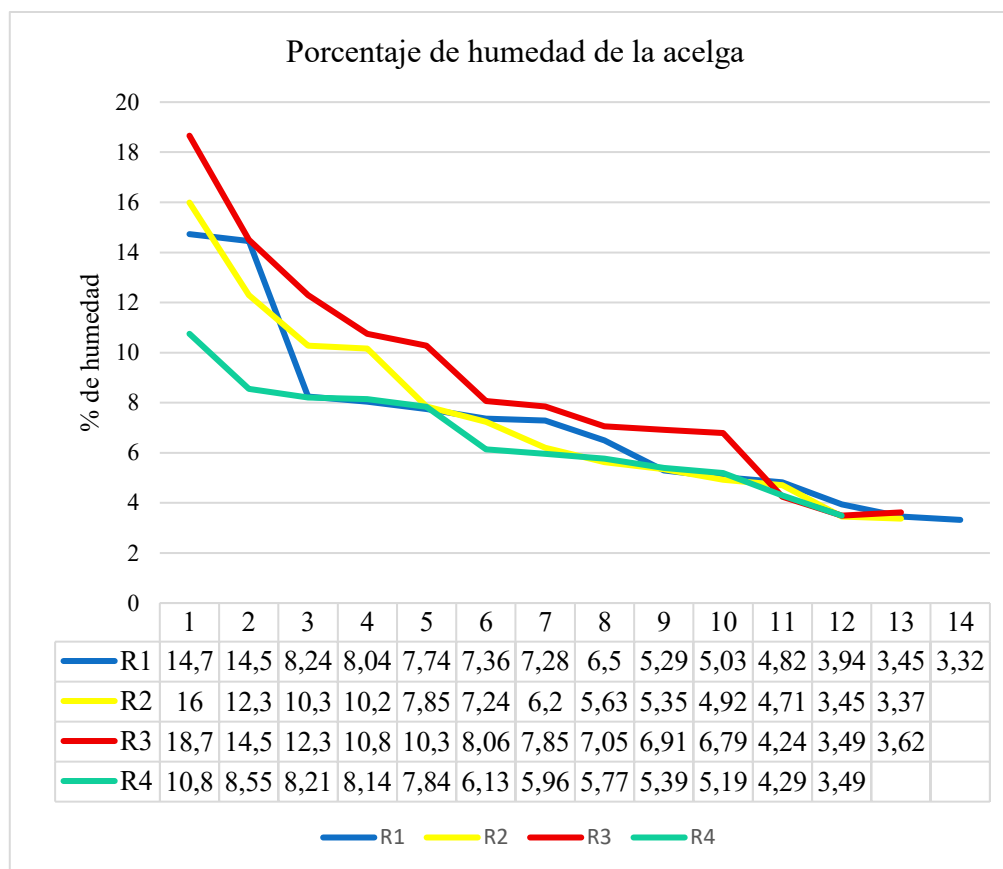
Cuando el porcentaje de humedad bajo hasta 4,03%, que fue en día 11, las hojas viejas ya estaban secas y las hojas nuevas estaban completamente marchitas, se lo rego y esta vez la planta no se recuperó.

3.5.4. Porcentaje de humedad en el suelo hasta llegar al punto de marchitez permanente en la acelga

Cuadro 11: Porcentaje de humedad en el suelo para el cultivo de la acelga (T4)

Acelga						
Día	R1	R2	R3	R4	Total	Promedio
1	14,73%	15,99%	18,66%	10,75%	60,13%	15,03%
2	14,46%	12,29%	14,5%	8,55%	49,8%	12,45%
3	8,24%	10,28%	12,3%	8,21%	39,03%	9,76%
4	8,04%	10,16%	10,75%	8,14%	37,09%	9,27%
5	7,74%	7,85%	10,27%	7,84%	33,7%	8,43%
6	7,36%	7,24%	8,06%	6,13%	28,79%	7,2%
7	7,28%	6,25%	7,85%	5,96%	27,29%	6,82%
8	6,5%	5,63%	7,05%	5,77%	24,95%	6,24%
9	5,29%	5,35%	6,91%	5,39%	22,94%	5,74%
10	5,03%	4,92%	6,79%	5,19%	21,93%	5,48%
11	4,82%	4,71%	4,24%	4,29%	18,06%	4,52%
12	3,94%	3,45%	3,49%	3,49%	14,37%	3,59%
13	3,45%	3,37%	3,62%		10,44%	3,48%
14	3,32%				3,32%	3,32%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8: Porcentaje de humedad en el suelo para la acelga

Fuente: Elaboración propia.

El tratamiento 4 que corresponde el cultivo de la acelga, se observó una disminución progresiva del contenido de humedad del suelo a medida que transcurrieron los días después de la suspensión del riego.

En día 1, el contenido de humedad del suelo presento un valor relativamente alto, con un promedio del 15,03 % de humedad. El suelo aun contiene agua disponible para el desarrollo normal del cultivo. Mantenían su estado fisiológico adecuado, sin signos de estrés hídrico.

En los días 4 y 5, la humedad fue bajando de 9,87% a 8,24 %, la planta aun no presentaba signos de marchitamiento. Lo cual el contenido de agua en el suelo aún era disponible para la planta.

En los días 8 y 9, el contenido de humedad era del 6, 24% a 5, 74%, las plantas en este punto ya presentaban signos de marchitamiento completo en las hojas viejas, las nuevas hojas aun mantenían su turgencia.

En el día 11 con un porcentaje de humedad del 4% en el suelo, las hojas viejas estaban marchitas y las nuevas hojas perdieron turgencia. Se rego una réplica para verificar el PMP y la planta recupera la turgencia en las hojas.

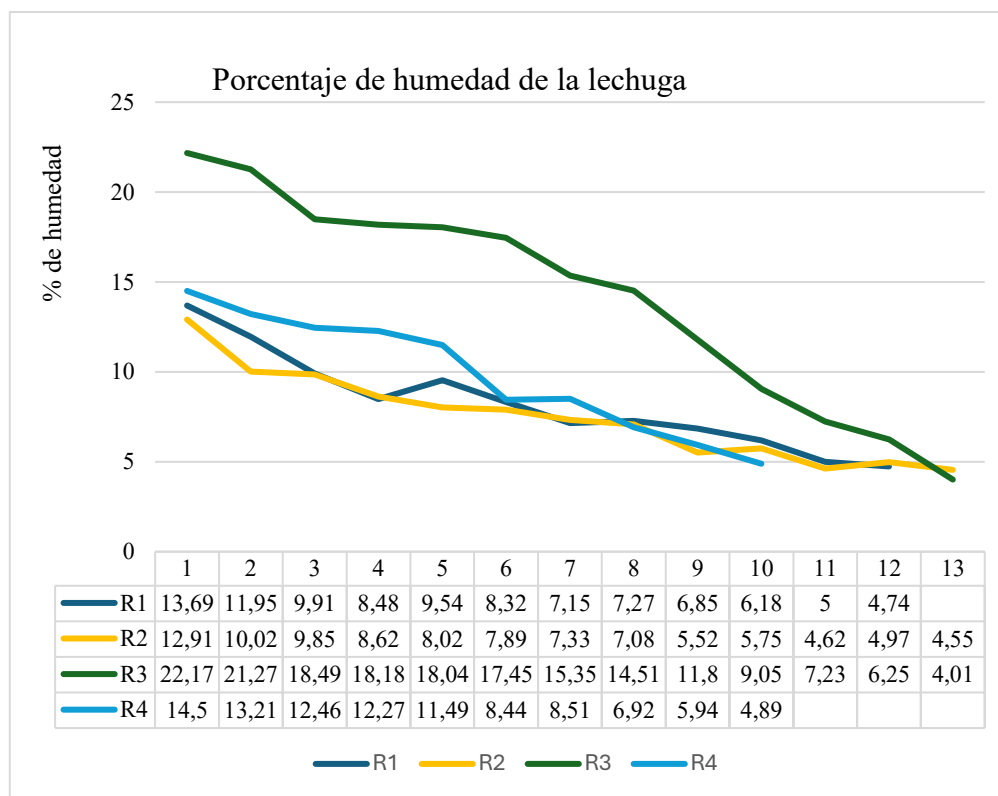
En los días 13 y 14, el % de humedad estaba entre el 3,48% y el 3,32 %, las hojas estaban completamente marchitas, las hojas viejas estaban secas y las hojas nuevas ya estaban para entrar a esa fase, se lo rego para ver si volvían, esta vez la planta no se recuperó.

3.5.5. Porcentaje de humedad en el suelo hasta llegar al punto de marchitez permanente en la lechuga

Cuadro 12: Porcentaje de humedad en el suelo para el cultivo de la lechuga (T5)

Lechuga						
Día	R1	R2	R3	R4	Total	Promedio
1	13,69%	12,91%	22,17%	14,5%	63,27%	15,8%
2	11,95%	10,02%	21,27%	13,21%	47,45%	11,9%
3	9,91%	9,85%	18,49%	12,46%	50,71%	12,7%
4	8,48%	8,62%	18,18%	12,27%	47,55%	11,9%
5	9,54%	8,02%	18,04%	11,49%	47,09%	11,8%
6	8,32%	7,89%	17,45%	8,44%	42,1%	10,5%
7	7,15%	7,33%	15,35%	8,51%	38,34%	9,59%
8	7,27%	7,08%	14,51%	6,92%	35,78%	8,95%
9	6,85%	5,52%	11,8%	5,94%	30,11%	7,53%
10	6,18%	5,75%	9,05%	4,89%	25,87%	6,47%
11	5%	4,62%	7,23%		16,85%	5,62%
12	4,74%	4,97%	6,25%		15,96%	5,32%
13		4,55%	4,01%		8,56%	4,28%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 9: Porcentaje de humedad para la lechuga

Fuente: Elaboración propia.

Para el tratamiento 5 que corresponde al cultivo de la lechuga, el primer día presento un contenido promedio de humedad alto que fue del 15,8 %. La planta no presento ningún síntoma de marchitamiento.

Entre los días 2 y 5, la humedad del suelo comenzó a disminuir de forma gradual debido a la abrasión del agua de parte de las plantas y a la pérdida de evaporación.

En el día 9, el porcentaje promedio de humedad bajo hasta 7,53 % las hojas pierden su turgencia en las horas de mayor calor y la vuelven a recuperar en la mañana.

En el día 11 la humedad del suelo continuó disminuyendo, provocando una mayor dificultad para que las raíces extrajeran agua del suelo. Esto se debe a que el agua se encontraba retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo, limitando la disponibilidad del agua para las plantas, en este punto el promedio del porcentaje de

humedad era del 5, 62%, las hojas estaban completamente marchitas, se regó una réplica para poder determinar el PMP, con este porcentaje de humedad la planta recuperó su turgencia.

El día 12, algunas repeticiones estaban con un porcentaje de humedad del 4, 74% R1 y 4,97% R2. Las hojas estaban completamente marchitas, el tallo estaba caído, se hizo una prueba de riego y la planta no se recuperó.

3.6. Punto de marchitez permanente de las diferentes especies

El punto de marchitez permanente no es algo que se lo atribuye totalmente al tipo de suelo, sino que las características fisiológicas y morfológicas de cada especie vegetal también influyen en este proceso.

3.6.1. Punto de marchitez permanente de la remolacha (*Beta vulgaris* L.)

Cuadro 13: Punto de marchitez permanente de la remolacha

PMP de la Remolacha	
T1R1	2,58%
T1R2	2,9%
T1R3	2,98%
T1R4	2,67%
Σ	11,13%
media	2,783%

Fuente: Elaboración propia.

El punto de marchitez permanente para el cultivo de la remolacha, en condiciones de invernadero es del 2,78%.

La remolacha posee una raíz pivotante engrosada, que actúa como reservorio de agua y carbohidratos. Este órgano permite a la planta regular su balance hídrico y mantener sus funciones fisiológicas aun cuando el contenido de agua en el suelo es bajo. Gracias a esta adaptación, la remolacha presenta la mayor capacidad de almacenamiento de agua, por ende, mayor tolerancia al déficit hídrico.

Figura 10: Sistema radicular de la remolacha

Fuente: Sitio web.

3.6.2. Punto de marchitez permanente del tomate (*Solanum Lycopersicum* L.)

Cuadro 14: Punto de marchitez permanente para el tomate

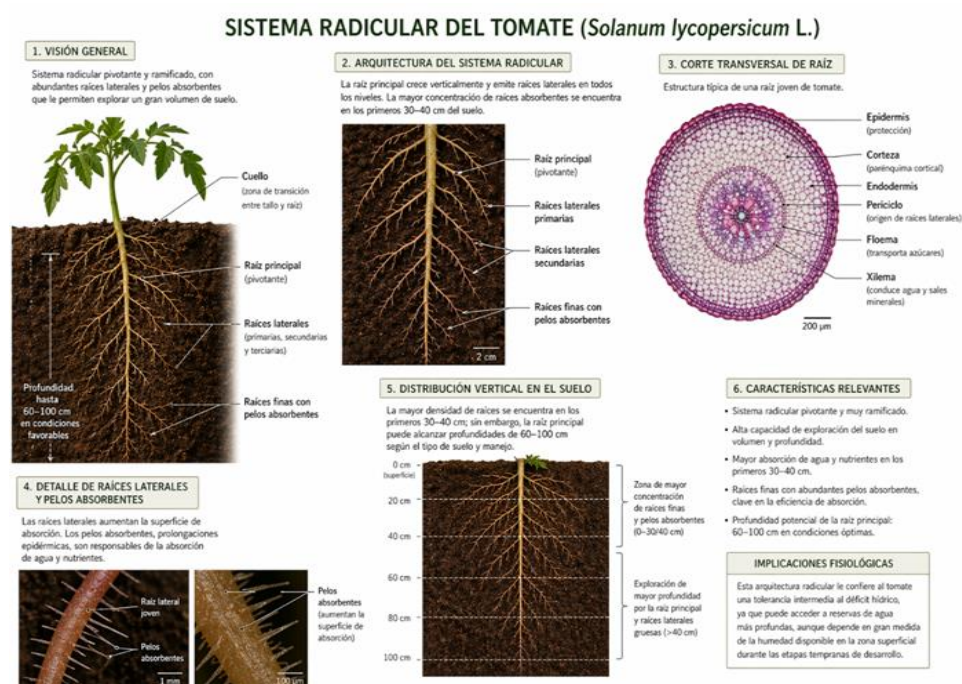
PMP del Tomate	
T3R1	4,03%
T3R2	4,17%
T3R3	4,89%
T3R4	4,15%
Σ	17,24%
media	4,310%

Fuente: Elaboración propia.

El punto de marchitez permanente para el cultivo del tomate, en condiciones de invernadero es del 4,31 %.

El tomate almacena agua en las hojas y tallos carnosos, lo que le confiere una capacidad de almacenamiento interna, esta reserva hídrica permite a la planta mantener su funcionamiento fisiológico durante cortos periodos de déficit hídrico; sin embargo, al no poseer órganos de almacenamiento especializados, dicha tolerancia es limitada.

Figura 11: Sistema radicular del tomate



Fuente: Sitio web.

3.6.3. Punto de marchitez permanente de la acelga (*Beta vulgaris* L. var. cicla)

Cuadro 15: Punto de marchitez permanente para la acelga

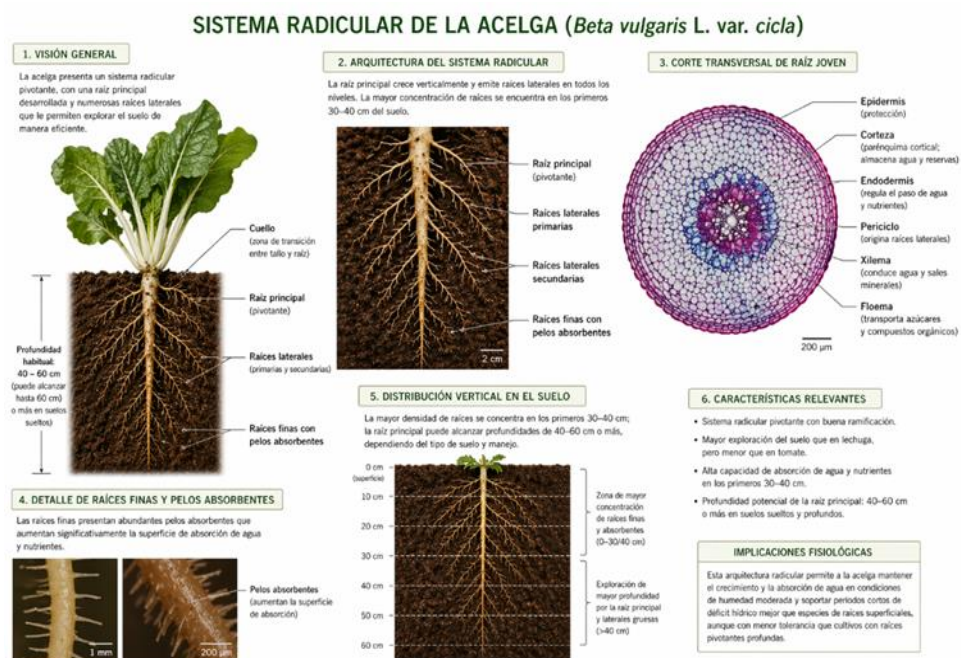
PMP de la Acelga	
T4R1	3,32%
T4R2	3,37%
T4R3	3,62%
T4R4	3,49%
Σ	13,8%
media	3,450%

Fuente: Elaboración propia.

El punto de marchitez permanente para el cultivo de la acelga, en condiciones de invernadero es del 3,45%.

La acelga presenta una raíz pivotante poco engrosada, con mayor desarrollo de tejido parenquimático. El agua se almacena principalmente en la corteza y el parénquima del cilindro central, lo que le permite conservar la humedad interna durante periodos moderados al estrés hídrico.

Figura 12: Sistema radicular de la acelga



Fuente: Sitio web.

3.6.4. Punto de marchitez permanente de la lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Cuadro 16: Punto de marchitez permanente para la lechuga

PMP de la lechuga	
T5R1	4,74%
T5R2	4,55%
T5R3	4,01%
T5R4	4,89%
Σ	18,19%
Media	4,548%

Fuente: Elaboración propia.

El punto de marchitez permanente para el cultivo de la lechuga, en condiciones de invernadero es del 4,55%.

En la lechuga, las raíces son finas y poco engrosadas, por lo que el almacenamiento de agua en la raíz es muy limitado. El agua se encuentra principalmente en la corteza radicular, pero debido al escaso desarrollo del parénquima y al reducido diámetro de las raíces, esta reserva es mínima y de corta duración, es así que esta depende exclusivamente del agua absorbida de manera continua desde el suelo.

Figura 13: Sistema radicular de la lechuga



Fuente: Sitio web.

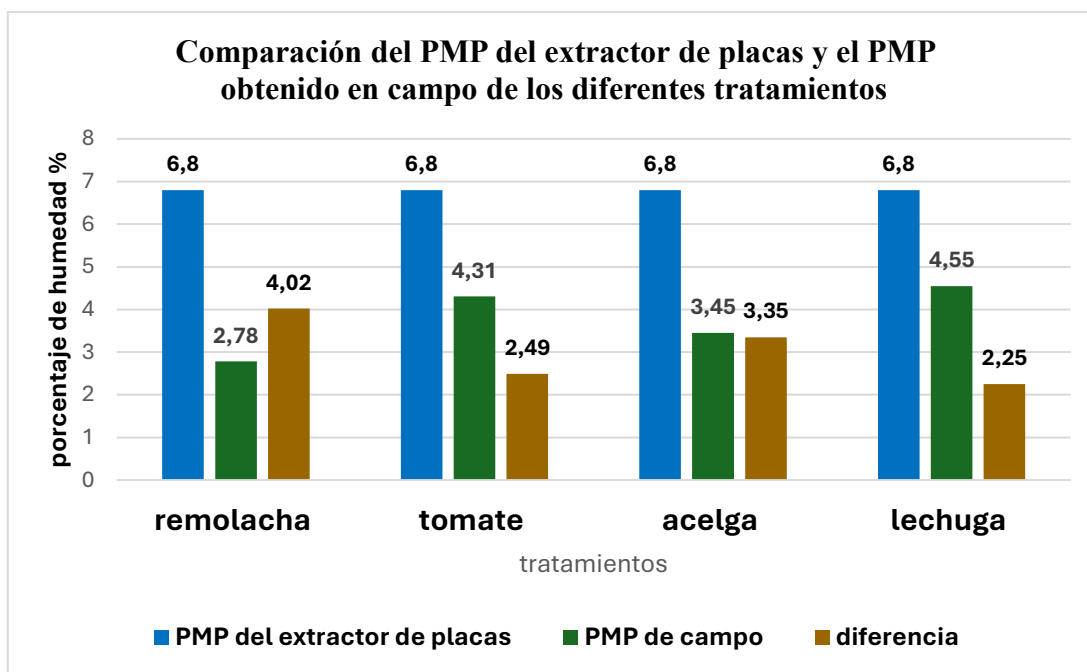
3.7. Comparación entre el punto de marchitez permanente de campo y el punto de marchitez del extractor de placas de presión.

Cuadro 17: Diferenciación del punto de marchitez permanente del extractor de placas y el punto de marchitez obtenido para las diferentes especies vegetales

	Remolacha	Tomate	Acelga	Lechuga
PMP del extractor de placas	6,8 %	6,8 %	6,8 %	6,8 %
PMP de campo	2,78 %	4,31 %	3,45 %	4,55 %
diferencia	4,02 %	2,49 %	3,35 %	2,25 %

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14: Comparación del punto de marchitez del extractor de placas y el punto de marchitez obtenido en campo de las diferentes especies vegetales



Fuente: Elaboración propia.

La figura 14, nos indica que hay diferencia entre el punto de marchitez permanente que da el extractor de placas con un valor de 6,8% y el punto de marchitez que obtuvimos

de cada tratamiento, obteniendo así una diferencia del; 4,02 % para la remolacha siendo este tratamiento que tuvo mayor diferencia, 2,49 % para el tomate, 3,35 % para la acelga y el 2,25 % para la lechuga, esta especie tubo una menor diferencia.

Cuadro 18: Diferenciación del valor del punto de marchitez permanente del extractor de placas y el valor promedio del punto de marchitez obtenido en campo

Punto de marchitez permanente del extractor de placas	Punto de marchitez permanente de campo
6,8 %	3,02%

Fuente; Elaboración propia.

Diferencia promedio del PMP: $6,8\% - 3,02\% = 3,8\%$

El cuadro 18, nos indica la diferencia que hay entre el punto de marchitez permanente que nos da el extractor de placas que es de 6.8% y el promedio del punto de marchitez de campo de 3,02%, obteniendo así una diferencia del 3,8% de un suelo franco arenoso.

El extractor de placas de presión determina el contenido de agua retenida por el suelo a una tensión de 15 bar, el valor ha sido tradicionalmente adaptado como referencias para el PMP del suelo. Sin embargo, diferentes autores han señalado que el PMP no depende exclusivamente del suelo, sino que responde a la interacción entre el suelo y las características fisiológicas de las plantas. De esta manera ((Briggs&Shantz, 1912), establecieron que el punto de marchitez permanente corresponde al contenido de agua del suelo en el cual la planta pierde irreversiblemente su capacidad de recuperar su turgencia, aun cuando es colocada en un ambiente saturado de humedad, señalando que diferentes especies vegetales pueden alcanzar el PMP en distintos niveles de humedad del suelo.

Asimismo, (Richards, 1994), indico que el valor de 15 bar representa una aproximación practica para estimar el PMP en condiciones controladas de laboratorio, no obstante, en condiciones de campo las plantas pueden continuar extrayendo agua del suelo a tensiones de mayor o menor humedad, dependiendo de la especie. Este autor sostiene

que el PMP debe interpretarse como un resultado de la interacción del suelo-planta-agua.

3.8 Determinación del agua útil

Cuadro 19: Agua útil para las diferentes especies vegetales.

Especies	Tratamiento	% CC	% PMP	Agua Útil
Remolacha	T1	11,9%	2,78%	9,12%
Tomate	T3	11,9%	4,31%	7,59%
Acelga	T4	11,9%	3,45%	8,45%
Lechuga	T5	11,9%	4,55%	7,35%

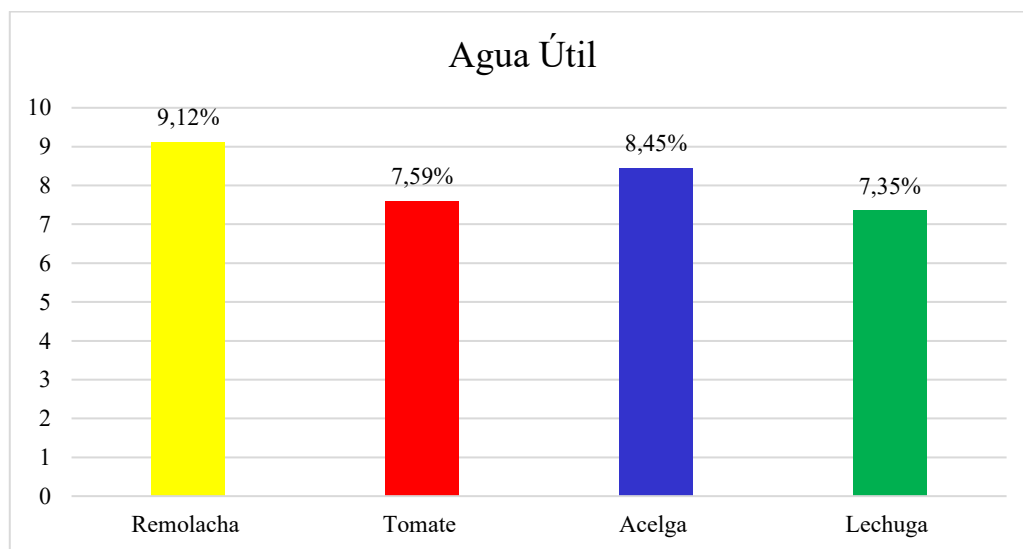
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 20: Valor del agua útil según el extractor de placas

% CC	% PMP	Agua Útil
11,9%	6,8%	5,1%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 15: Valor del agua útil para las diferentes especies vegetales



Fuente: Elaboración propia.

La remolacha (T1) presenta el mayor valor de agua útil con un valor de 9,12%, esta se lo asocia a su raíz pivotante engrosada, que es capaz de explorar capas más profundas del suelo y de almacenar agua en tejidos parenquimáticos de reserva, permitiendo aprovechar un mayor rango de humedad disponible.

La acelga (T4) su valor de agua útil es de 8,45%, se lo relaciona con su raíz pivotante moderadamente desarrollada, presenta una adecuada capacidad de absorción y retención hídrica.

El tomate (T3) su valor de agua útil es de 7,59% este se lo atribuye a su sistema radicular pivotante con abundantes raíces laterales, permitiéndole una buena exploración del suelo, tiene una limitada capacidad de almacenamiento interno del agua.

La lechuga (T5) presenta el menor valor de agua útil 7,35% debido a que tiene un sistema radicular superficial y poco profundo, con escasa capacidad de explorar el suelo y sin capacidad de almacenar el agua.

Según el extractor de placas se tiene un valor de agua útil del 5,1%, basándonos que este valor es únicamente en las propiedades físicas del suelo subestima la disponibilidad real del agua. Según Hill señala que el agua disponible para los cultivos se define por el intervalo de humedad comprendido entre CC y el PMP, pero que la amplitud efectiva de este rango depende de la capacidad de las raíces para extraer agua del suelo. De igual manera (Briggs&Shantz, 1912), indican que la cantidad de agua útil no depende exclusivamente de las propiedades físicas del suelo sino también del sistema radicular y la adaptación de cada especie vegetales.

El cuadro 20, nos muestra que aun que los tratamientos se desarrollen en un mismo suelo, la disponibilidad de agua útil es diferente entre especies, siendo el sistema radicular un factor clave para explicar estas diferencias. Los tratamientos con raíces de capacidad de almacenamiento de agua presentan un mayor rango de humedad aprovechable y las raíces superficiales y con escasa capacidad de almacenamiento presentan una disponibilidad hídrica más limitada.

3.9. Análisis de varianza y prueba de medias de Tukey

3.9.1. Resultados del análisis de varianza (ANVA)

Para determinar si existe diferencias estadísticas significativas en el punto de marchitez permanente (PMP), entre las cuatro especies vegetales evaluadas (remolacha, tomate, acelga y lechuga). Se realizó un análisis de varianza bajo un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento.

Cuadro 21: Resultados obtenidos para el punto de marchitez permanente de las diferentes especies vegetales

Tratamiento	Replicas				Σ	x
	I	II	III	IV		
Remolacha	2,58	2,9	2,98	2,67	11,13	2,783
Tomate	4,03	4,17	4,89	4,15	17,24	4,310
Acelga	3,32	3,37	3,62	3,49	13,8	3,450
Lechuga	4,74	4,55	4,01	4,89	18,19	4,548
Σ					60,36	15,090

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 22: Análisis de varianza ANVA para el punto de marchitez permanente

FC	GL	SC	CM	FC	FT	
					5%	1%
Total	15	8,958				
Tratamiento	3	7,895	2,632	29,691	3,26	5,95
Error	12	1,064	0,089			

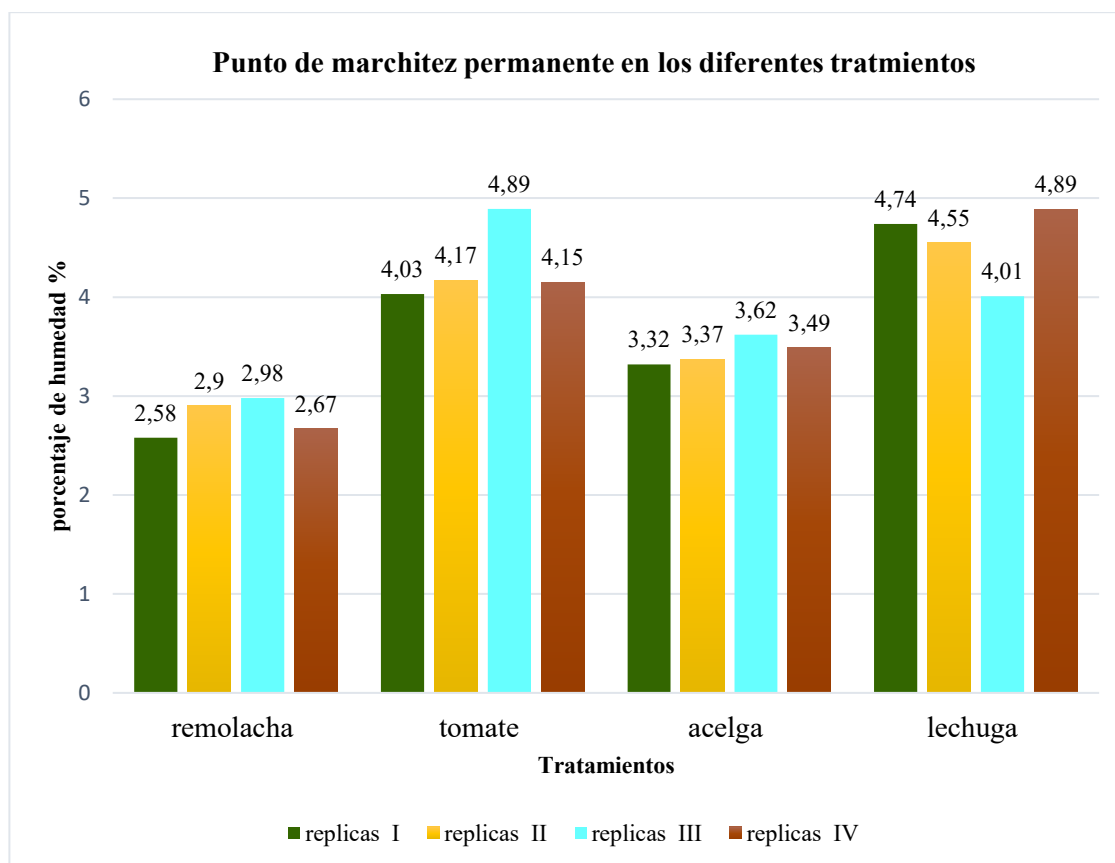
Fuente: Elaboración propia.

El análisis estadístico reveló una diferencia altamente significativa entre los tratamientos evaluados ($F_c = 29,691 > f_{t 1\%} = 5,95$; $p < 0,01$). Esto nos indica que el factor “especie vegetal” incluye de manera determinante con el contenido de humedad

del suelo al momento de alcanzar el punto de marchitez permanente, rechazando la hipótesis nula de igualdad de medias.

La elevada relación de F calculada (29,691) sugiere que la variabilidad observada entre las especies es atribuible principalmente a las diferencias fisiológicas de cada cultivo como; su sistema radicular, eficiencia a la absorción hídrica, capacidad de ajuste osmótico y estrategias de respuesta al estrés hídrico.

Figura 16: Porcentaje del punto de marchitez en las diferentes especies vegetales



Fuente: Elaboración propia.

3.9.2. Coeficiente de variación

$$Cv = \frac{\sqrt{CMe}}{\bar{X}} * 100 = \frac{\sqrt{0,089}}{3,772} * 100 = 7,909$$

El coeficiente de varianza obtenido en el presente estudio ($C_v = 7,909$) se clasifica dentro del rango de excelente precisión experimental ($< 10\%$), conforme a los criterios establecidos por autores de referencia en estadística agronómica.

Este valor indica que la variabilidad observada en los datos del punto de marchitez permanente entre las especies evaluadas responde principalmente a diferencias fisiológicas inherentes a cada cultivo, como la eficiencia del sistema radicular, la capacidad de ajuste osmótico y la estrategia de extracción hídrica.

Esto valida que las diferencias significativas detectadas entre los tratamientos atribuidos al factor “especie vegetal” tienen una alta confiabilidad.

3.9.3. Prueba de comparación de medias (Tukey)

Dado que el ANVA detectó diferencias significativas, se aplicó la prueba de Tukey

($\alpha = 0,005$ y $\alpha = 0.01$).

prueba Tukey	
q	4,2
sx	0,15
t	0,63

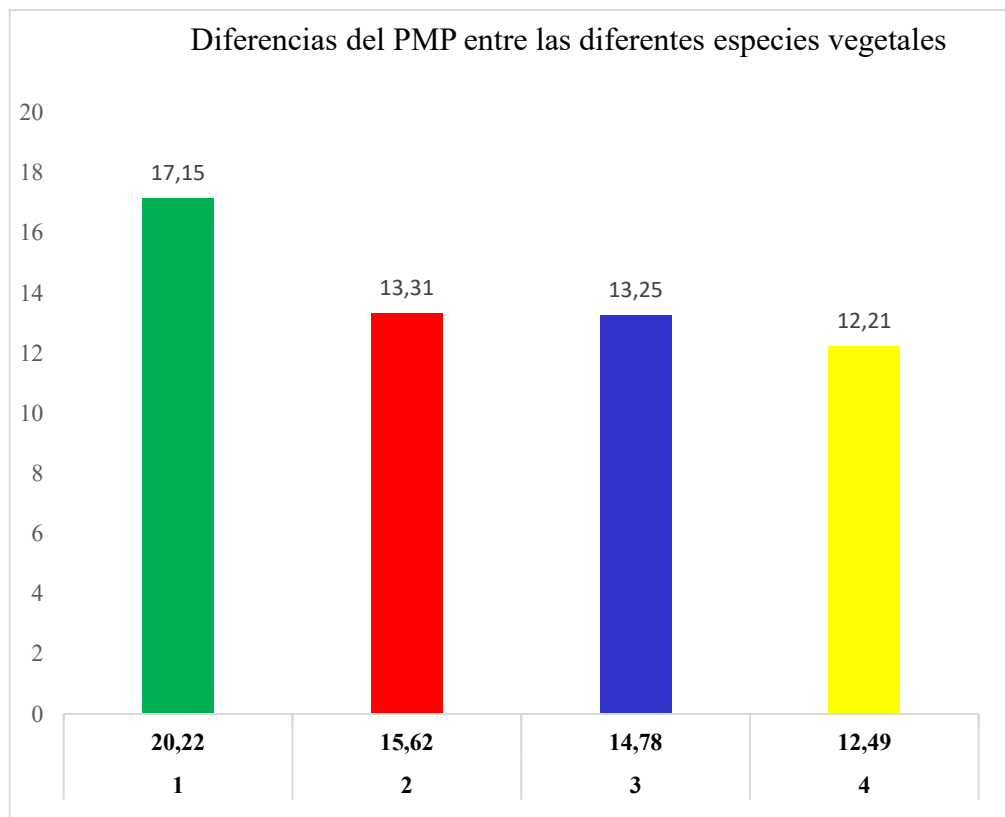
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 23: Prueba de Tukey al 5% y al 1% de significancia

Prueba de comparación de medias (TUKEY)			
Especies	Tratamiento	5%	1%
Lechuga	T5	4,548% A	4,548% A
Tomate	T3	4,310% A	4,310% A
Acelga	T4	3,450% B	3,450% B
Remolacha	T1	2,783% C	2,783% B

Fuente: Elaboración propia.

Figura 17: Diferencia del punto de marchitez entre las diferentes especies vegetales



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la prueba de Tukey al 5 % de significancia, indican que la lechuga (T5) con un valor de 4,548 % de humedad en el suelo y el tomate (T3) con un valor de 4,31% de humedad en el suelo, no tienen diferencia significativa entre ellas, pero si tienen una diferencia significativa con el resto de las especies vegetales.

La remolacha (T1) con un valor del 2,783 % de humedad en el suelo, tiene una diferencia significativa con todas las especies vegetales.

Al 1 % de significancia, la remolacha (T1) con un valor de 2,783 % y la acelga (T4) con un valor de 3,45% no tienen una diferencia altamente significativa, pero si hay una diferencia altamente significativa con la lechuga (T5) con un valor de 4,548 %y el tomate (T3) con un valor de 4,31%.

Las especies vegetales de la lechuga y el tomate, presentaron los valores más elevados del punto de marchitez permanente, lo que indica que requieren una mayor cantidad de agua retenida en el suelo para evitar la marchitez permanente. Este comportamiento coincide con lo que señala (Taiz y Zeiger), que indica que las especies vegetales con elevadas demandas de transpiración y sistema radicular poco profundo presenta una mayor dependencia de humedad en el suelo.

Por el contrario, la remolacha mostro una mayor capacidad de adaptación a condiciones de limitada disponibilidad hídrica, lo cual se atribuye a su sistema radicular más profundo y su mecanismo fisiológico permiten mantener su turgencia celular a menor potencial hídrico del suelo. Esto concuerda con lo que dijo Kramer y Boyer, las especies vegetales con mayor eficiencia en la absorción y uso del agua presentan una mayor tolerancia a la sequía.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

1. Se determinó que el punto de marchitez permanente (PMP) real varía entre las especies vegetales evaluadas, demostrando que este parámetro no es un valor fijo del suelo, sino que depende de las características fisiológicas y morfológicas propias de cada cultivo.
2. Los valores del punto de marchitez permanente real obtenidos bajo condiciones controladas fueron las siguientes; la remolacha (*Beta vulgaris* L.), es del 2,78%, en el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es del 4,31%, en la acelga (*Beta vulgaris* L.) es del 3,45%, en la lechuga (*Lactuca sativa* L.) es del 4,55%, demostrando distintos niveles de tolerancia al déficit hídrico.
3. El extractor de placas de presión a 15 bar arrojó un valor constante de humedad del suelo de 6,8% para todas las especies vegetales, lo cual sobreestimo sistemáticamente el punto de marchitez permanente real determinado en campo de las diferentes especies vegetales de la cual se obtuvo un promedio de 3,02%. Esto demuestra que el método de laboratorio refleja únicamente las propiedades físicas de retención hídrica del suelo, sin incorporar la variabilidad fisiológica ni la capacidad de extracción radicular de cada cultivo.
4. La disponibilidad de agua útil varía según la fisiología y el sistema radicular de cada cultivo: La remolacha presentó la mayor agua útil (9,12 %), seguida de la acelga (8,45 %), el tomate (7,59 %) y la lechuga (7,35 %). El cálculo basado únicamente en el extractr arrojó un agua útil de 5,1 %, lo que confirma que el método físico no captura la capacidad real de aprovechamiento hídrico de los cultivos.
5. La prueba de comparación de medias de Tukey permitió agrupar a las especies vegetales en funciones de su tolerancia hídrica, identificando a la remolacha ya la acelga como cultivos con mayor capacidad de tolerancia al déficit hídrico

además de demostrar un alto desarrollo vegetativo ante el microclima del invernadero. El tomate es más sensible al déficit hídrico, pero tuvo un buen desarrollo vegetativo ante las condiciones dadas dentro del invernadero. La lechuga fue que presentó una menor tolerancia al déficit hídrico, además presentó una alteración morfológica (mayor desarrollo del tallo) lo cual se lo atribuye a las condiciones del microclima dado.

6. El coeficiente de variación obtenido (7,909 %) indicó una alta precisión experimental, lo que respalda la confiabilidad de los resultados obtenidos en el estudio.
7. La exclusión del cultivo de cebolla del análisis estadístico se debió a la presencia de estrés fisiológico atípico, atribuible a las condiciones microclimáticas desfavorables, lo que impidió una determinación representativa de su punto de marchitez permanente.

4.2. Recomendaciones

1. Considerar el punto de marchitez permanente como un parámetro dependiente de las especies vegetales y no como un valor fijo del suelo al momento de planificar el manejo del riego en las especies vegetales.
2. Ajustar los programas de riego en función de los valores reales del punto de marchitez permanente determinado para cada especie vegetal evaluada, con el fin de optimizar el uso del agua y reducir el riesgo del estrés hídrico.
3. Ampliar futuras investigaciones incorporando un mayor número de especies vegetales y diferentes tipos de suelos, para fortalecer el conocimiento de la variabilidad del punto de marchitez permanente y su relación con factores edáficos, fisiológicos y morfológicos.
4. Desarrollar estudios específicos para el cultivo de cebolla bajo condiciones microclimáticas controladas, que permitan una adecuada determinación de su punto de marchitez permanente sin la influencia de estrés fisiológico no asociado al déficit hídrico.
5. Promover el uso conjunto de metodologías de campo y laboratorio en la determinación de parámetros hídricos del suelo, orientadas a mejorar la toma de decisiones agronómicas y la sostenibilidad del uso del recurso hídrico.