

AIREACIÓN EN LA ZONA RADICULAR Y SU RELACIÓN CON EL PULSO HÍDRICO DEL SUELO POR DEBAJO DE LA CAPACIDAD DE CAMPO Y SU EFECTO EN EL CRECIMIENTO DE LA ARVEJA (*Pisun sativum* L.)

Aeration in the root zone and its relationship with soil water pulses below field capacity and their effect on the growth of pea (*Pisum sativum* L.)

Quiroga Sossa Brigido Moises¹, Oviedo Farfán José Eduardo², Taboada Belmonte Cristal³, Calle Aliaga Yhessica⁴, Castañeta Mamani Teófilo Mauricio⁵

RESUMEN

El trabajo se llevó a cabo en la Carrera de Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria, Universidad Mayor de San Andrés, con el objetivo de evaluar la saturación a nivel radicular en el cultivo de la arveja, considerando que la disminución de oxígeno genera problemas fisiológicos en el cultivo. Se evaluó la altura de la planta, área foliar, tasa de crecimiento absoluta, tasa de crecimiento relativa y absoluta con intervalos de siete días, además, de muestreos destructivos hasta los 98 días. Se evaluaron tres porcentajes de reposición de agua y su efecto en el crecimiento de la planta de arveja. Para altura de planta, el tratamiento AP75% alcanzó 144.0 cm, AP50% con 99.85 cm, AP25% con 99.12 cm. El área foliar fue mayor en AF75% con 3 509.55 cm²/tratamiento, AF50% y AF25% con 1 790.47 cm² y 1 717.73 cm² respectivamente. La TCA75% con 2.30 g/día, seguido de los tratamientos TCA50%, TCA25% con 1.16 g/día y 1.05g/día. La tasa de crecimiento relativa fue menor hasta 60 días, incrementándose posteriormente. La mayor tasa corresponde a TCR75%, en la fase de senescencia tiende a disminuir con 0.0430442 g g/día. La TAN75% alcanzó 0.00002045 g/cm²/día seguido de TAN50% con 0.00001758 g/cm²/día, finalmente el tratamiento TAN25% alcanzó 0.00001626 g/cm²/día. Con una saturación al 75% de su capacidad de campo, el cultivo de arveja presenta mejores indicadores de crecimiento.

Palabras clave: arveja, saturación, aireación, capacidad de campo, crecimiento, tasa.

ABSTRACT

The work was carried out in the Engineering Degree in Agricultural Production and Marketing, Universidad Mayor de San Andrés, with the objective of evaluating saturation at the root level in the pea crop, considering that the decrease in oxygen generates physiological problems in the crop. Plant height, leaf area, absolute growth rate, relative and absolute growth rate were evaluated with intervals of seven days, in addition to destructive sampling up to 98 days. The objective was to evaluate the effect of water saturation with three percentages of water replacement and its effect on the growth of the pea plant. For plant height, the AP75% treatment reached 144.0 cm, AP50% with 99.85 cm, AP25% with 99.12 cm. The leaf area was greater in AF75% with 3,509.55 cm²/treatment, AF50% and AF25% with 1,790.47 cm² and 1,717.73 cm² respectively. The TCA75% with 2.30 g/day, followed by the TCA50%, TCA25% treatments with 1.16 g/day and 1.05g/day. The relative growth rate was lower up to 60 days, increasing thereafter. The highest rate corresponds to TCR75%, in the senescence phase it tends to decrease with 0.0430442 g g/day. TAN75% reached 0.00002045 g/cm²/day followed by TAN50% with 0.00001758 g/cm²/day, finally the TAN25% treatment reached 0.00001626 g/cm²/day. With a saturation at 75% of its field capacity, the pea crop presents better growth indicators.

Keywords: pea, saturation, aeration, field capacity, growth, rate.

Artículo original

DOI: <https://doi.org/10.53287/gych5119pm55o>

Recibido: 22/04/2024

Aceptado: 21/06/2024

¹ Investigador, Carrera de Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9797-3965>. bmquiroga@umsa.bo

² Investigador, Carrera de Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3921-145X>. jeoviedo@umsa.bo

³ Investigador, Carrera de Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2870-5016>. gctaboada@umsa.bo

⁴ Investigador, Carrera de Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7956-8161>. ycalle13@umsa.bo

⁵ Investigador, Carrera de Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6859-0354>. teofilomauriciocastanetamamani@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El oxígeno es esencial para el metabolismo de los vegetales, su ausencia en las proximidades de las raíces de las plantas acuáticas inhibe la respiración aerobia en las raíces y posibilita la acumulación de materiales que pueden ser dañinos (Domínguez, 2003). Dacey (1987), Morhead y Reddy (1988); Reddy et al. (1989) citados por Domínguez (2003) mencionan que las plantas acuáticas transportan el oxígeno a través de sus hojas y tallos hacia la zona radicular. El exceso de agua en el suelo crea deficiencias de oxígeno en la zona radicular reduciendo su crecimiento (Khondaker y Ozawa, 2005). Fischer y Orduz-Rodríguez (2012) señalan que primero mueren las raíces finas y fibrosas. La hipoxia de las plantas, también llamada estrés por falta de oxígeno o deficiencia de oxígeno, es el resultado de lluvia excesiva, inundaciones, anegamiento del suelo, inmersión de las raíces o compactación del suelo (Wang et al., 2011 citados por Habibi, 2023). Las inundaciones y el anegamiento provocan deficiencia de oxígeno en el suelo porque el agua que ingresa al suelo elimina el aire rico en oxígeno de los poros del suelo (Kreuzwieser y Rennenberg, 2014). En suelos inundados el potencial redox disminuye, lo cual es un indicador del bajo nivel de oxígeno presente, afecta la disponibilidad de nutrientes para las plantas, inhibe la actividad de enzimas como la β -D-glucosidasa y la fosfatasa, involucradas en los ciclos del carbono, nitrógeno, fósforo y azufre y aumenta la concentración de etileno, estas condiciones cambiantes en el suelo generan efectos negativos en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Jimenez et al., 2012). El estrés abiótico es una de las principales causas de las pérdidas de las producciones agrícolas a nivel mundial, los reguladores del crecimiento vegetal tales como el ácido abscísico, etileno, ácido jasmónico y ácido salicílico son esenciales en la respuesta de las plantas al estrés abiótico (Chavez et al., 2012). La falta de oxígeno en el suelo se denomina hipoxia o anoxia; hipoxia se refiere a la reducción del oxígeno bajo el nivel óptimo y ocurre en suelos pobremente drenados o durante períodos cortos de inundación; la anoxia se refiere a una completa falta de oxígeno que generalmente ocurre en suelos después de períodos prolongados de inundación (Schaffer, 2007). La difusión de oxígeno en suelos inundados es muy baja, aproximadamente 10 000 veces más baja que en el aire y el intercambio de gases entre la raíz sumergida y el ambiente es muy limitado, inhibe la respiración mitocondrial, oxidación y los procesos de oxigenación (Koppitz, 2004 citado por Jimenez et al., 2012).

El oxígeno es una de las moléculas más esenciales para las actividades metabólicas celulares, es un factor limitante para el crecimiento y desarrollo de las plantas en condiciones sumergidas y anegadas (Zahra, 2021). El anegamiento puede ocasionar el cambio en los patrones de crecimiento haciendo que en algunos casos se detenga el crecimiento de la parte superior de la planta o que se acelere o sea mayor en otros (Blom y Voesenek 1996). En ausencia del aceptor de electrones, la oxidación de NADH se bloquea y no se genera el NAD⁺ necesario para glicolisis, esto disminuye la producción de la energía necesaria para soportar los procesos metabólicos de la planta (Taiz y Zeiger, 2007). La disponibilidad limitada de oxígeno crea una condición anaeróbica para las células de la raíz y causa alteraciones y disfunción del metabolismo celular, lo que eventualmente conduce a daño tisular (Herrera, 2013). El anegamiento es un estrés abiótico que conduce a niveles bajos de oxígeno en el suelo y tiene un enorme impacto negativo en el rendimiento y la calidad de los cultivos, los compuestos destructivos, como el acetaldehído o los iones de metales pesados acumulados por el bajo contenido de oxígeno en la rizosfera, también provocan daños a las raíces (Liu et al., 2022). A nivel de toda la planta, la hipoxia provoca reducciones en la fotosíntesis, la conductancia estomática, transpiración y el potencial hídrico de las hojas (Pardos, 2004). Estas respuestas fisiológicas pueden cambiar el consumo de energía, el metabolismo celular y la expresión genética que posteriormente afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas (Domingo et al., 2002). El estrés por hipoxia resulta en disminución en el número de hojas, longitud de raíces, altura de planta y producción de biomasa (Bai et al., 2010). La oxigenación radicular coadyuva en el transporte de nutrientes, el oxígeno al oxidar los minerales se convierte en el catalizador para generar la energía metabólica; para su buen funcionamiento las raíces dependen esencialmente de una cantidad óptima de oxígeno, aunque se les aporte los nutrientes adecuados, se tendrá un cultivo precario, o en casos más graves, podrían morir las raíces al no poder respirar (Samperio, 1997), según Caicedo-Camposano et al. (2019) se produce cierre de estomas y menor crecimiento de raíces, se inhibe la fotosíntesis y el transporte de los hidratos de carbono, disminuye la absorción de macro-nutrientes, debido a la mortalidad de la raíz, a la pérdida de micorrizas, y a la supresión del metabolismo de la

raíz. Según Moreno y Fischer (2016), el anegamiento produce reducción del crecimiento vegetal, menor absorción de agua y nutrientes, menor producción y muerte completa de la planta. La poca disposición de oxígeno en el suelo es consumido por las raíces y microorganismos en pocas horas (Kozłowski y Pallardy, 1996). Khondaker y Ozawa (2005) señalan que el diámetro del tallo como la altura y el desarrollo de la raíz pueden quedar disminuidos por anegamiento en tan solo 48 horas. Las hojas pueden manifestar clorosis, necrosis y abscisión (Fischer y Orduz-Rodríguez, 2012; Kozłowski y Pallardy, 1996). El área foliar es afectada por la falta de turgencia celular, ya que las raíces dejan de absorber y transportar agua (Neuman, 1993). Ferreyra et al. (2006) citados por Caicedo-Camposano et al. (2019) mencionan que las plantas más grandes toleran el exceso de humedad, una vez que el ápice de crecimiento se encuentra por encima de la superficie del agua, la probabilidad de sobrevivir aumenta en gran medida. El exceso de humedad en el suelo agota el oxígeno y aumenta el dióxido de carbono, induciendo la descomposición anaeróbica de materia orgánica, y reduciendo hierro y manganeso (Ferreyra et al., 2006). El anegamiento elimina los niveles de oxígeno de los poros, se encontró que la concentración de oxígeno puede acercarse a cero dentro de las 24 horas del anegamiento; las plantas y sus raíces necesitan oxígeno para sobrevivir, la falta de oxígeno resulta en la muerte de células radicales y la subsecuente podredumbre de raíces (Caicedo-Camposano et al. 2019).

La absorción de agua y nutrientes se ve inhibida a medida que las raíces se deterioran (Gómez et al. 2000). Las plantas expuestas a condiciones anaeróbicas pueden cambiar su metabolismo de respiración aeróbica a la vía de la fermentación, como un mecanismo adaptativo debido a la falta de oxígeno; cuando se agota el NAD⁺, necesario para la primera reacción de la fase de conservación de energía de la glicólisis, la planta metaboliza piruvato por la vía fermentativa para obtener NAD (Jiménez, 2012). Las plantas responden principalmente a la limitación de oxígeno mediante un aumento de la producción de lactato y la caída resultante del pH en el citoplasma activa la fermentación etanólica (Kato-Noguchi et al., 2000). La falta de oxígeno induce la vía anaeróbica, aumenta la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), tanto en la mitocondria como en el cloroplasto (Jimenez et al., 2012). Los suelos saturados conducen a una acumulación de especies reactivas de oxígeno en los tejidos de las plantas, la sobreproducción de ROS bajo estrés por inundación está directamente relacionada con la disminución en la tasa fotosintética (Hossain et al., 2009; Ella et al., 2003). En periodos cortos de inundación la regulación del sistema antioxidante es una respuesta de protección contra ROS, en periodo de inundación prolongada el mecanismo regulador del estrés no tiene la capacidad para reparar el daño oxidativo y como consecuencia ocurre la peroxidación lipídica (Balakhina et al., 2010). El presente trabajo de investigación tuvo como propósito determinar el efecto de la saturación de agua por debajo de su capacidad de campo en el desarrollo fisiológico de la arveja.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El trabajo se llevó a cabo en la Carrera de Ingeniería en Producción y Comercialización Agropecuaria dependiente de la Universidad Mayor de San Andrés en la ciudad de Viacha, municipio Viacha, departamento La Paz, Bolivia. La Carrera se encuentra geográficamente: 16° 38' 52" S 68° 17' 32" W y con una altitud de 3 857 m s.n.m. El periodo de evaluación fue del 2023 al 2024.

Metodología

Unidades experimentales

El trabajo se realizó bajo tres tratamientos, cada tratamiento consistió en la reposición de agua al 75, 50 y 25 % por debajo de su capacidad de campo, se tuvo nueve repeticiones, haciendo un total de 27 unidades de experimentales independientes, cada unidad con un volumen aproximado de 15 litros. Se elaboró un sustrato para las 27 unidades experimentales con: 1 parte de abono, 1 parte de turba y 2 partes de suelo.

Siembra y cosecha

Se utilizó semillas de arveja (*Pisum sativum* L.), se sembraron diez semillas germinadas en grupos de dos por unidad experimental, a las tres semanas se eliminó cinco plantas quedando cinco plantas por unidad experimental, el ensayo se realizó desde el 24 de agosto al 30 de noviembre del año 2023. La evaluación se realizó cada siete días, con tres muestreos destructivos de biomasa cada 30 días, aproximadamente. La materia seca se determinó a una temperatura de 74 °C y peso constante.

Capacidad de campo

La capacidad de campo del sustrato se determinó mediante la Ecuación 1:

$$CC = \frac{WSh - WSs}{WSs} \cdot 100 \quad (1)$$

Dónde: CC = capacidad de campo; WSh = peso de sustrato húmedo; WSs = peso de sustrato seco.

La humedad de capacidad de campo se determinó con el sustrato completamente seco, se adicionó agua a saturación restando el agua escurrida hasta tres días posteriores, con lo que se determinó el agua retenida en cada unidad experimental (Ramirez, 2024), método para calcular la reposición en base a la CC.

Variables evaluadas

Para el presente trabajo se evaluó: altura de la planta, área foliar, tasa de crecimiento absoluta, tasa de crecimiento relativa, tasa de asimilación neta e índice de área foliar.

Altura de la planta: se determinó desde la base de la planta hasta el ápice, dicha variable es expresada en cm. El seguimiento y recolección de datos se realizó una vez por semana.

Área foliar: mediante la relación área-peso. Para obtener el área de la hoja, se pesó el área delimitada en la muestra, posteriormente se realizó la relación matemática, de acuerdo a la siguiente Ecuación 2:

$$\text{Área foliar} = \frac{A}{M} \cdot MT \quad (2)$$

Donde: AF = área foliar (cm²); A = área (cm²); M = masa; MT = masa total.

Tasa de crecimiento absoluta: se midió durante el crecimiento de la arveja, cosechando mensualmente, determinando la biomasa y materia seca, se determinó mediante la siguiente Ecuación 3 (Hunt, 1978).

$$TCA = \frac{W2 - W1}{(t2 - t1)} \quad (3)$$

Donde: TCA = tasa de crecimiento absoluto (g/día); W1 = peso seco inicial (g); W2 = peso seco final (g); t2 = tiempo final (días); t1 = tiempo inicial (días).

Tasa de crecimiento relativa: se evaluó durante el crecimiento de la arveja, cosechando mensualmente, determinando la biomasa y materia seca. Para la obtención de la tasa de crecimiento relativa, se empleó la siguiente Ecuación 4 (Santos et al., 2010).

$$TCR = \frac{\ln W2 - \ln W1}{(t2 - t1)} \quad (4)$$

Donde: TCR = tasa de crecimiento relativa (g/g/día); W1 = peso seco inicial (g); W2 = peso seco final (g); t2 = tiempo final (días); t1 = tiempo inicial (días); ln = logaritmo natural.

Tasa de asimilación neta: A partir de la materia seca y el área foliar se determinó la tasa de asimilación neta (Ecuación 5) (Hunt, 1978).

$$TAN = \frac{W2-W1}{A2-A1} \cdot \frac{\ln A2 - \ln A1}{t2-t1} \quad (5)$$

Donde: TAN = tasa de asimilación neta (g/cm²/día); W1 = peso seco inicial (g); W2 = peso seco final (g); A1 = área foliar inicial (cm²); A2 = área foliar final (cm²); t2 = tiempo final (días); t1 = tiempo inicial (días); ln = logaritmo natural.

Evaluación estadística

Para la evaluación estadística se empleó el método de mínimos cuadrados para la generación de la función que modele el comportamiento del ensayo, con un coeficiente de determinación por encima de 75 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Altura de la planta de arveja

La altura de planta en los tres tratamientos presenta diferencias, generan una función polinómica de segundo orden (Figura 1), con un coeficiente de determinación alto en los tres tratamientos (Tabla 1). El tratamiento AP75% alcanzó la mayor altura con 144.0 cm, seguido del tratamiento AP50% con una altura de 99.85 cm, finalmente el tratamiento AP25% con una altura de 99.12 cm, los tres tratamientos evaluados a los 98 días.

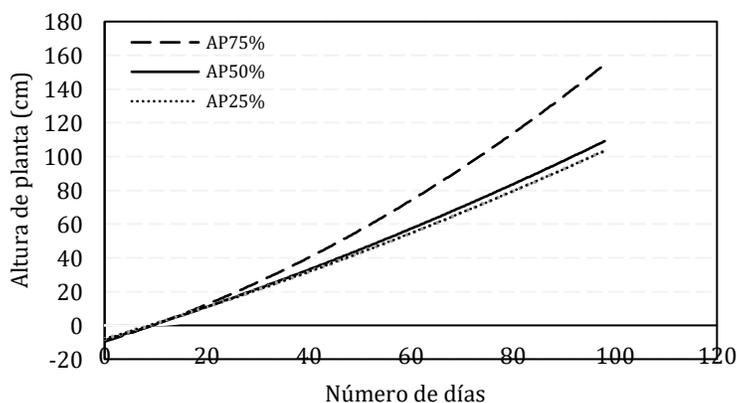


Figura 1. Altura de planta de arveja (cm) en la aireación de la zona radicular y su relación con el pulso hídrico del suelo por debajo de la capacidad de campo y su efecto en el crecimiento.

La altura de planta de arveja, AP75% es mayor cuando el suelo es saturando a un 75 % debajo de su capacidad de campo (Figura 1), el coeficiente de determinación presenta un ajuste de 0.9871, en comparación a los demás tratamientos, la saturación al 75 % refleja que hay mayor espacio aéreo que permite la circulación del aire. Yetisir et al. (2006) menciona que la disminución del crecimiento es debido a que en el agua los gases se mueven más despacio causando la deficiencia de oxígeno, un elemento crucial para la supervivencia de muchas plantas y microorganismos del suelo. En comparación con los tratamientos AP50% y AP25% con 99.85 y 99.12 cm respectivamente, estos por su baja saturación presentan mayor espacio aéreo para que el oxígeno circule libremente en la zona radicular, sin embargo, la baja disponibilidad de agua limita el crecimiento de la planta de arveja, Shrivastava y Kumar (2015) citados por Contreras-Medina y Melo-Sabogal (2022) señalan que la escasez de agua disminuye el rendimiento de los cultivos entre un 20 y 50 %.

La altura de planta de arveja en un periodo de 98 días, en los tres tratamientos tiene un crecimiento sostenido, con diferencias entre los tres tratamientos, ajustando la función de crecimiento a un modelo cuadrático, los tres

tratamientos presentan un modelo de crecimiento con un ajuste alto con 0.9871, 0.9779, 0.9837, para los tratamientos AP75%, AP50%, AP25% respectivamente (Tabla 1).

Tabla 1. Funciones y coeficientes de determinación para altura de planta de arveja (cm) en la aireación de la zona radicular y su relación con el pulso hídrico del suelo por debajo de la capacidad de campo y su efecto en el crecimiento.

Tratamiento	Variable (X)	Variable (Y)	Ecuación de regresión	r ²
AP75%	Días	Altura	$y = 0.0075x^2 + 0.9442x - 9.5112$	r ² = 0.9871
AP50%	Días	Altura	$y = 0.0027x^2 + 0.9444x - 9.0308$	r ² = 0.9779
AP25%	Días	Altura	$y = 0.0025x^2 + 0.8979x - 0.9837$	r ² = 0.9837

El crecimiento denota los cambios cuantitativos que tienen lugar durante el desarrollo (Azcón-Bieto y Talón, 2008). La variación de altura en relación al tiempo genera diferentes velocidades de desarrollo, en las tres fases: exponencial, lineal y senescencia (Argüello et al., 2010). El proceso de crecimiento depende de la actividad fisiológica propia de la planta, y es influenciada por las condiciones de campo (Barrera et al., 2010).

Área foliar de la planta de arveja

El área foliar presenta diferencias en los tres tratamientos, sin embargo, el que más se destaca corresponde al tratamiento AF75% con 3 509.55 cm²/tratamiento, frente a los tratamientos AF50% y AF25% con 1 790.47 cm² y 1 717.73 cm² respectivamente.

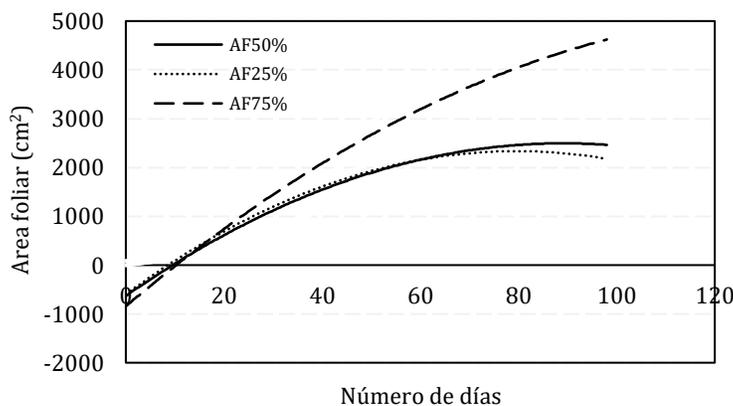


Figura 2. Área foliar por tratamiento de la planta de arveja (cm²) en la aireación de la zona radicular y su relación con el pulso hídrico del suelo por debajo de la capacidad de campo y su efecto en el crecimiento.

La medición del índice de área foliar es importante en los estudios del crecimiento de las plantas (de Jesús, 2001). Dentro de una misma especie, las diferentes variedades, razas, cultivares o genotipos pueden exhibir variaciones significativas en su capacidad para interceptar la radiación solar porque ello depende de la magnitud del ÁF, del arreglo espacial de las hojas y de la evolución de los estadios fenológicos, es decir de los cambios fisiológicos y morfológicos por los que atraviesa la planta durante su ciclo ontogenético (Boote et al., 2001; Singh, 1991; White, 1985 citados por Warnock et al., 2006). El ÁF es una variable de importancia principal para el modelaje de los mecanismos de intercambio de agua y energía que ayuda a comprender las interacciones cultivo-ambiente (Barradas et al., 1999). Gomes (2000) señala que el estrés hídrico reduce el índice de área foliar.

El crecimiento del área foliar en un periodo de 98 días, en los tres tratamientos tiene un crecimiento diferenciado en los tres tratamientos (Tabla 2), el tratamiento AF75% con mayor área foliar presenta un ajuste de 88.82 %, con la misma tendencia no existe mucha diferencia en los tratamientos AF50% y AF25%, y presentan ajustes menor ajuste con 84.77 y 83.81 % respectivamente.

Tabla 2. Funciones y coeficientes de determinación para el área foliar de la planta de arveja (cm²) en la aireación de la zona radicular y su relación con el pulso hídrico del suelo por debajo de la capacidad de campo y su efecto en el crecimiento.

Tratamiento	Variable (X)	Variable (Y)	Ecuación de regresión	r ²
AP75%	Días	Área foliar	$y = -0.3014x^2 + 85.319x - 843.9$	r ² = 0.8882
AP50%	Días	Área foliar	$y = -0.3931x^2 + 70.122x - 631.64$	r ² = 0.8477
AP25%	Días	Área foliar	$y = -0.4622x^2 + 73.614x - 596.75$	r ² = 0.8381

Tasa de crecimiento absoluta de la planta de arveja

La tasa de crecimiento absoluta en los tres tratamientos presenta diferencias. El tratamiento TCA75% con 2.30 g/día al 30 de noviembre alcanzó la mayor cantidad de biomasa, seguido de los tratamientos TCA50%, TCA25% con 1.16 y 1.05 g/día (Figura 3). De acuerdo a la Tabla 3, los tres tratamientos presentan ajustes altos a un modelo cuadrático.

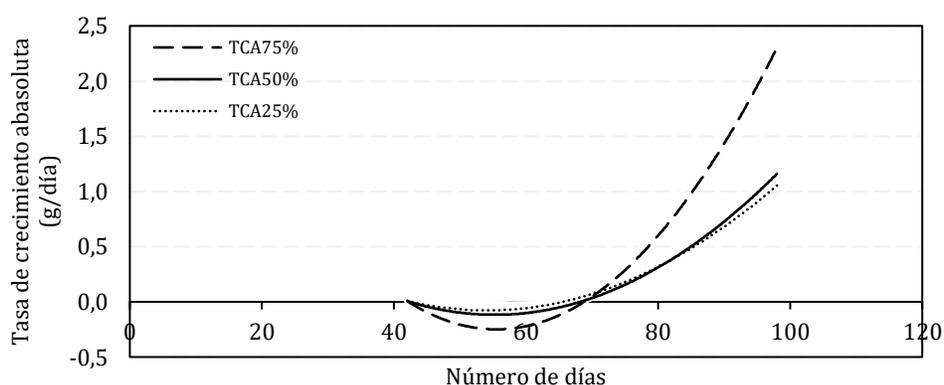


Figura 3. Tasa de crecimiento absoluto por tratamiento de la planta de arveja (g/día) en la aireación de la zona radicular y su relación con el pulso hídrico del suelo por debajo de la capacidad de campo y su efecto en el crecimiento.

Gomes (2000) señala que el estrés hídrico reduce la biomasa aérea y la tasa de crecimiento del cultivo. El estrés salino origina una lenta tasa de crecimiento (Sánchez-Bernal et al., 2008). Córdova-Rodríguez et al. (2011) indica en especies forestales se mantiene la humedad del suelo cercana a capacidad de campo o por debajo de 20 % de humedad aprovechable durante un periodo de 160 días. La restricción del riego redujo en 27 % el número de raíces principales y en 51 % la biomasa de la raíz debajo de los 15 cm de profundidad del suelo, pero aumentó en 166 % el número de raíces laterales y en 83 % el número de raíces finas en crecimiento y redujo en 30 % la relación parte aérea/raíz. Las especies nativas de sitios con un menor índice de aridez, fueron más afectadas por la sequía al sistema radicular. Eventos periódicos de sequía ocasionan estrés hídrico dentro de las plantas, afectando el crecimiento, anatomía, morfología, fisiología y bioquímica de los tejidos vegetales (Kramer y Kozłowski, 1947 citados por Córdova-Rodríguez et al., 2011). Aravena (2018) obtuvo plantas con mayores tasas de crecimiento absoluto cuando se las cultivó en celdas de mayor volumen. Se puede deducir a mayor volumen de celdas, mayor oxigenación y desarrollo radicular y de las plantas. Chen et al. (2002) en suelos inundados con diferentes días, en comparación a suelos menos inundados con potencial hídrico de -20 kPa, el estrés por inundación redujo la biomasa en *Lepidium latifolium*, la producción de etileno en las raíces fue mayor. Los cambios bioquímicos en las plantas son usualmente inducidos por un periodo corto de inundación mientras que los cambios anatómicos y morfológicos están involucrados con aclimatación a largos periodos de inundación. La hipoxia en la dinámica intracelular de la raíz de arroz y trigo, produjo una acidificación citoplasmática (7.6-7.7 a 7.1) con una recuperación de 0.3 unidades. La anoxia produjo una reducción de 7.6-7.7 a 7.0 de pH, donde solo el arroz tuvo una recuperación parcial, en el trigo continuo la acidificación hasta 6.8; en el trigo hubo una deficiente inducción de alcohol deshidrogenasa, mientras que el aumento de la actividad de las enzimas de

fermentación alcohólica se generó en el arroz, cuando se acidifica el citoplasma, se suprime la síntesis de proteínas, se detiene la glicolisis y se presenta un déficit extremo de energía en la planta (Kulichikhin et al., 2008).

Tabla 3. Funciones y coeficientes de determinación para el crecimiento absoluto de la planta de arveja (g/día) en la aireación de la zona radicular y su relación con el pulso hídrico del suelo por debajo de la capacidad de campo y su efecto en el crecimiento.

Tratamiento	Variable (X)	Variable (Y)	Ecuación de regresión	r ²
TCA75%	Días	Tasa crecimiento absoluto	$y = 0.0014x^2 - 0.1569x + 4.1055$	r ² = 1
TCA50%	Días	Tasa crecimiento absoluto	$y = 0.0006x^2 - 0.0633x + 1.6326$	r ² = 1
TCA25%	Días	Tasa crecimiento absoluto	$y = 0.0007x^2 - 0.0773x + 2.019$	r ² = 1

Tasa de crecimiento relativa de la planta de arveja

La tasa de crecimiento relativa en los tres tratamientos presenta una leve diferencia, en la primera fase hasta los 60 días a mayor saturación de agua el crecimiento relativo es menor en comparación a los tratamientos con menor reposición de agua. A partir de los 60 días con mayor saturación de agua, la tasa de crecimiento relativa se incrementa en y disminuye la tasa con menor reposición de agua. La mayor eficiencia del crecimiento relativo se logra con el tratamiento TCR75% hasta los 80 días en la segunda fase de crecimiento, en la tercera fase el crecimiento tiende a disminuir entrando a la fase de senescencia con 0.0430442 g g/día de materia seca. De acuerdo a la Tabla 4 los tres tratamientos presentan un ajuste alto, bajo un modelo de segundo grado.

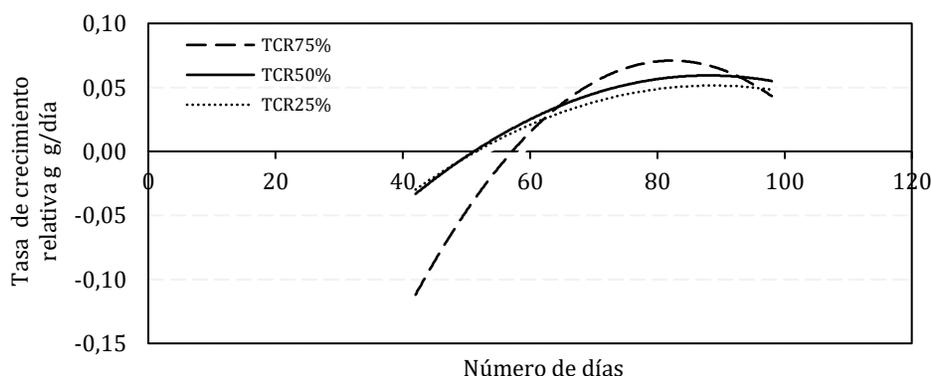


Figura 4. Tasa de crecimiento relativo por tratamiento de la planta de arveja (g g/día) en la aireación de la zona radicular y su relación con el pulso hídrico del suelo por debajo de la capacidad de campo y su efecto en el crecimiento.

Aravena (2018) durante la determinación (2 a 6 hojas), el tamaño de celda y el tipo de fertilizante utilizado no produjeron diferencias significativas en los valores de la tasa de crecimiento relativo para ninguno de los tres intervalos de las determinaciones (2 a 4; 2 a 6 y 4 a 6 hojas), así como tampoco pudo observarse una interacción entre dichos factores. El efecto osmótico de la salinidad del agua de riego contribuye a reducir la tasa de crecimiento relativo de las hortalizas (Roque, 2016).

Tabla 4. Funciones y coeficientes de determinación para el crecimiento relativo de la planta de arveja (g g/día) en la aireación de la zona radicular y su relación con el pulso hídrico del suelo por debajo de la capacidad de campo y su efecto en el crecimiento.

Tratamiento	Variable (X)	Variable (Y)	Ecuación de regresión	r ²
TCR75%	Días	Tasa crecimiento relativo	$y = -0.0001x^2 + 0.0186x - 0.6924$	r ² = 1
TCR50%	Días	Tasa crecimiento relativo	$y = -4E-05x^2 + 0.00633x - 0.2419$	r ² = 1
TCR25%	Días	Tasa crecimiento relativo	$y = -4E-05x^2 + 0.077x - 0.2791$	r ² = 1

Tasa de asimilación neta de la planta de arveja

En la primera fase aproximadamente a los 60 días, la mayor eficiencia fotosintética se produce en el tratamiento TAN25% en comparación al TAN75%, por un exceso de saturación de agua la TAN es menos eficiente; en la segunda fase entre 60 a 100 días la TAN se invierte en los tratamientos, donde la TAN al 75% presenta mayor eficiencia con mayor saturación, esto en función al mayor incremento de área foliar 3 509.55 cm² (Figura 2), la tasa de asimilación neta presenta un incremento sostenido para TAN75% de 0.00000079206 hasta 0.00002045 g/cm²/día. Para TAN50% el incremento va desde 0.00000068699 hasta 0.00001758 g/cm²/día, finalmente, el tratamiento TAN25% con 0.000000755 hasta 0.00001626 g/cm²/día. En los tres tratamientos existe una diferencia leve, el mayor incremento se logra con el mayor porcentaje de reposición de agua hasta 75% de capacidad de campo (Figura 5).

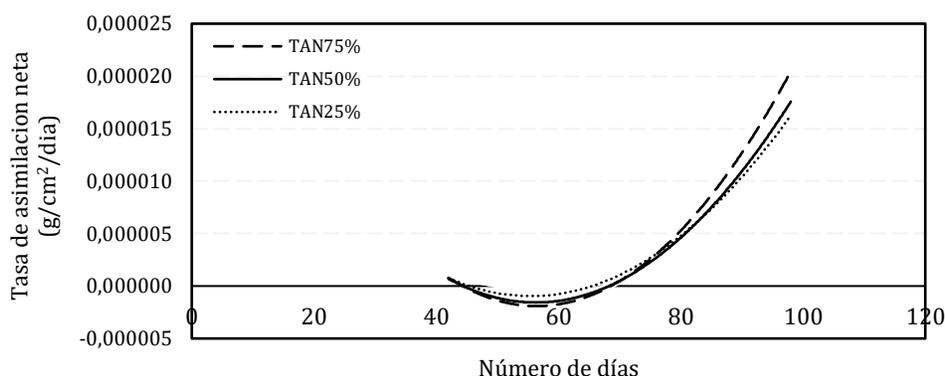


Figura 5. Tasa de asimilación neta por tratamiento de la planta de arveja (g/cm²/día) en la aireación de la zona radicular y su relación con el pulso hídrico del suelo por debajo de la capacidad de campo y su efecto en el crecimiento.

De acuerdo a la Tabla 5, los valores de la tasa de asimilación neta presentan funciones que se ajustan a un modelo cuadrático con un coeficiente de determinación (r^2) del 100 % en los tres tratamientos.

Tabla 5. Tasa de asimilación neta de la planta de arveja (g/cm²/día) en la aireación de la zona radicular y su relación con el pulso hídrico del suelo por debajo de la capacidad de campo y su efecto en el crecimiento.

Tratamiento	Variable (X)	Variable (Y)	Ecuación de regresión	r^2
TAN75%	Días	Tasa asimilación neta	$y = 1E-08x^2 - 1E-06xx + 4E-05$	$r^2 = 1$
TAN50%	Días	Tasa asimilación neta	$y = 1E-08x^2 - 1E-06x + 3E-05$	$r^2 = 1$
TAN25%	Días	Tasa asimilación neta	$y = 1E-08x^2 - 1E-06x + 3E-05$	$r^2 = 1$

Kubiske y Abrams (1992) en las relaciones hídricas y la fotosíntesis durante períodos de sequía: mesoicos y xéricos hallaron que la tasa fotosintética y la conductancia del vapor de agua estomático fueron mayores en las plántulas del sitio xérico con plántulas bien irrigadas; durante la sequía, las plántulas de la estación xérica mantuvieron una fotosíntesis neta positiva para un menor potencial hídrico de las hojas antes del amanecer y un menor contenido de agua. Las plántulas de la estación mesoica mostraron una mayor variación intraprocedencia en el intercambio de gases durante los períodos de sequía, esta variación podría estar relacionada con una fuerza menos selectiva para los rasgos de tolerancia a la sequía en el sitio méxico. Criollo y García (2009) en evaluación en rábanos, las bajas densidades incrementaron el área foliar y el rendimiento por planta, pero redujeron la producción por área. Los mayores valores de la tasa de asimilación neta (TAN) se determinaron para los tratamientos de 3 (2.01 g/dm²/d) y 4 plantas/maceta (1.57 g/dm²/d) se presentaron en la cuarta lectura (16 ddt), el tratamiento con 2 plantas/maceta alcanzó su valor máximo a los 12 ddt (tercera lectura) y el tratamiento con 1 planta/maceta en la última lectura con 2.81 g/dm²/d. Kleiman et al. (1992) en *Lolium multiflorum* cultivado en arena regada con solución nutritiva completa, en invernáculo; la hipoxia se obtuvo al inundar las macetas con una lámina de solución nutritiva de 3.5 cm; esta no afectó la producción de biomasa de

la parte aérea y total ni la tasa de asimilación neta de la planta, sin embargo, la deficiencia de oxígeno provocó la disminución del macollaje y crecimiento del área foliar y raíces. Martínez-Andrade et al. (2023) en el estudio del crecimiento y dinámica nutrimental de chile con diferentes niveles de conductividad, observó que una vez los tratamientos 1.5, 2.0 y 2.5 dS/m tuvieron los máximos valores de TAN al inicio del cultivo, su eficiencia disminuyó constantemente a través del tiempo; posterior a los 45 ddt (días después del trasplante) un pequeño incremento fue observado en 1.0, 1.5 y 2.0 dS/m en los valores de TAN, y posteriormente un decremento constante se observó después de los 90 ddt. Respecto a 2.5 dS/m, los valores de TAN se incrementaron después de los 75 ddt, para finalmente mostrar una disminución en la acumulación de materia seca total a los 120 ddt. Tales resultados sugieren que en este periodo la planta debe ser abastecida con mayor cantidad de agua y nutrientes, debido a que en esta etapa se produce y acumula mayor cantidad de fotoasimilados

CONCLUSIONES

La disponibilidad de oxígeno en la zona radicular emerge como un factor crítico que influye notablemente en el desarrollo de las plantas de arveja. Cuando el suelo se satura con agua al 100 % de su capacidad de campo, se constata una disminución significativa en el crecimiento de las plantas. Con una saturación al 75 % alcanzó la mayor altura con 144 cm. La tasa absoluta de crecimiento fue 2.3 g/día al 75 % de saturación. La mayor tasa relativa de crecimiento fue 0.0363289 g g/día, finalmente la mayor tasa de asimilación neta fue al 75 % alcanzando 0.00002045 g/cm²/día.

Durante la primera fase de crecimiento, la altura de la planta, área foliar, crecimiento relativo, crecimiento absoluto y la tasa de asimilación neta de las plantas de arveja se ven comprometidos debido al estrés hídrico, lo que resulta en un crecimiento reducido. Sin embargo, en la segunda fase, el incremento en la biomasa conlleva a una disminución del estrés hídrico, lo que a su vez estimula un crecimiento más vigoroso de las plantas.

BIBLIOGRAFÍA

- Aravena, J. (2018). Crecimiento y calidad de plantines de lechuga (*Lactuca sativa* L.), según tipo de fertilizante y tamaño de celda utilizado en almacigo. Doctoral dissertation. Universidad Nacional de Luján.
- Argüello, A.D.P.B., Ovalle, A.I., Roncancio, V.J.F., & Cordoba, B.C. (2010). Crecimiento en clavel estándar cv. Nelson, en suelo y en sustratos. *Bragantia*, 69:1-8.
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2008). Fundamentos fisiología vegetal.
- Bai, T., Li, C., Ma, F., Feng, F., & Shu, H. (2010). Responses of growth and antioxidant system to root-zone hypoxia stress in two *Malus* species de *Malus*. *Plant y Soil*, 327(1):95-105.
- Balakhnina, T.I., Bennicelli, R.P., Stępniewska, Z., Stępniewski, W., & Fomina, I.R. (2010). Oxidative damage and antioxidant defense system in leaves of *Vicia faba* major L. cv. Bartom during soil flooding and subsequent drainage. *Plant and soil*, 327:293-301.
- Barradas, V.L., Jones, H.G., & Clark, J.A. (1999). Orientación y distribución de las hojas en un cultivo de *Phaseolus vulgaris* L. y su relación con el microclima lumínico. *Revista Internacional de Biometeorología*, 43:64-70.
- Barrera, J., Suárez, D., & Melgarejo, L.M. (2010). Análisis de crecimiento en plantas. Experimentos en fisiología vegetal. Melgarejo, LM (Ed). Laboratorio de Fisiología y Bioquímica Vegetal. Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia, 25-39.
- Blom, C.W.P.M., & Voeselek, L.A.C.J. (1996). Inundaciones: las estrategias de supervivencia de las plantas. *Tendencias en ecología y evolución*, 11(7):290-295.
- Caicedo-Camposano, O., Cadena-Piedrahita, D., Galarza-Centeno, E., & Solorzano-Galarza, D. (2019). Permisibilidad del maíz (*Zea mays* L.) sometido a diferentes condiciones de inundación: Determinación del tiempo de drenaje en Babahoyo, Ecuador. *Revista Científica y Tecnológica UPSE (RCTU)*, 6(2):67-75. <https://incyt.upse.edu.ec/ciencia/revistas/index.php/rctu/article/view/472/445>
- Chávez, L., Álvarez, A., & Ramírez, R. (2012). Apuntes sobre algunos reguladores del crecimiento vegetal que participan en la respuesta de las plantas frente al estrés abiótico. *Cultivos Tropicales*, 33(3):47-56.

- Chen, H., Qualls, R. G., & Miller, G. C. (2002). Adaptive responses of *Lepidium latifolium* to soil flooding: biomass allocation, adventitious rooting, aerenchyma formation and ethylene production. *Environmental and Experimental Botany*, 48(2):119-128.
- Contreras-Medina, L.M., & Melo-Sabogal, D.V. (2022). ¿Cómo afecta la escasez de agua a la producción de tus alimentos y qué estrategias agrícolas se han implementado para reducir su impacto? *Digital Ciencia@ UAQRO*, 15(1): 20-28.
- Córdoba-Rodríguez, D., Vargas-Hernández, J.J., López-Upton, J., & Muñoz-Orozco, A. (2011). Crecimiento de la raíz en plantas jóvenes de *Pinus pinceana* Gordon en respuesta a la humedad del suelo. *Agrociencia*, 45(4):493-506.
- Criollo, H., & García, J. (2009). Efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) bajo invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 3(2):210-222.
- de Jesús, W.C., do Vale, F.X.R., Coelho, R.R., & Costa, L.C. (2001). Comparación de dos métodos para estimar el índice de área foliar en frijol común. *Revista de agronomía*, 93 (5):989-991.
- Domínguez, A.L. (2003). Transporte de oxígeno a través de plantas acuáticas. *Scientia et Technica*, 1(21).
- Domingo, R., Pérez-Pastor, A., & Ruiz-Sánchez, Ma. (2002). Physiological responses of apricot plants grafted on two different rootstocks to flooding conditions, *Journal of Plant Physiology*, 159:725-732. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-0670>
- Ella, E.S., Kawano, N., & Ito, O. (2003). Importancia del sistema activo de eliminación de oxígeno en la recuperación de plántulas de arroz después de la inmersión. *Ciencia de las Plantas*, 165(1):85-93.
- Ferreira, R., Selles, G., Silva, H., Ahumada, R., Muñoz, I., & Muñoz, V. (2006). Efecto del agua aplicada en las relaciones hídricas y productividad de la vid 'Crimson Seedless'. *Pesquisa agropecuaria brasileira*, 41:1109-1118.
- Fischer, G., & Orduz-Rodríguez, J.O. (2012). *Ecofisiología en frutales. Manual para el cultivo de frutales en el trópico*, 54-72.
- Gomes, A.A., Araújo, A. P., Rossiello, R.O.P., & Pimentel, C. (2000). Acumulação de biomassa, características fisiológicas e rendimento de grãos em cultivares de feijoeiro irrigado e sob sequeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35:1927-1937.
- Habibi, F.H., Liu, T., Adnan, M., Schaffer, B., & Ali, S. (2023). Physiological, biochemical, and molecular responses of fruit trees to root zone hypoxia. *Environmental and Experimental Botany*, (206). <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105179>
- Herrera, A. (2013). Respuestas a la inundación de las relaciones hídricas de las plantas y al intercambio de gases foliares en árboles tropicales tolerantes de un humedal de aguas negras. *Fronteras en la Ciencia Vegetal*, 4:45373.
- Hossain, Z., López-Climent, MF, Arbona, V., Pérez-Clemente, R.M., & Gómez-Cadenas, A. (2009). Modulación del sistema antioxidante en cítricos bajo anegamiento y posterior drenaje. *Revista de Fisiología Vegetal*, 166(13):1391-1404.
- Hunt, R. (1978). *Plant growth analysis*. Edward Arnold Publishers, London.
- Jiménez, J.D.L.C., Moreno, L.P., & Magnitskiy, S. (2012). Respuesta de las plantas a estrés por inundación. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1):96-109.
- Kato-Noguchi, H. (2000). Evaluation of the importance of lactate for the activation of ethanolic fermentation in lettuce roots in anoxia. *Physiologia Plantarum*, 109(1):28-33.
- Khondaker, N.A. & Ozawa, K. (2005). El crecimiento de las plantas de papaya se ve afectado por la deficiencia de oxígeno en el aire del suelo. En I Simposio Internacional sobre Papaya 740 (225-232). https://www.researchgate.net/publication/284350317_Papaya_plant_growth_as_affected_by_soil_air_oxygen_deficiency
- Kleiman, I.D., Cogliatti, D.H., & Santa María, G.E. (1992). Efecto de la hipoxia sobre el crecimiento y adquisición de nutrientes en *Lolium multiflorum*. *Turrialba* 42.
- Kozłowski, T.T., & Pallardy, S.G. (1996). *Fisiología de las plantas leñosas*. Elsevier.
- Kreuzwieser, J., & Rennenberg, H. (2014). Respuestas moleculares y fisiológicas de los árboles al estrés por anegamiento. *Planta, Célula y Medio Ambiente*, 37(10):2245-2259.
- Kubiske, M.E., & Abrams, M.D. (1992). Photosynthesis, water relations, and leaf morphology of xeric versus mesic *Quercus rubra* ecotypes in central Pennsylvania in relation to moisture stress. *Canadian Journal of Forest Research*, 22(9):1402-1407.
- Kulichikhin, K.Y., Chirkova, T.V., & Fagerstedt, K.V. (2008). Intracellular pH in rice and wheat root tips under hypoxic and anoxic conditions. *Plant Signaling & Behavior*, 3(4):240-242.

- Liu, J., Chen, Y., Wang, W., Liu, J., Zhu, Ch., Zhong, Y., Zhang, H., Liu, X., & Yin, X. (2022). Transcription factors AcERF74/75 respond to waterlogging stress and trigger alcoholic fermentation-related genes in kiwifruit, *Plant Science*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.111115>
- Martínez-Andrade, N., Castro-Brindis, R., Pérez-Grajales, M., & Rodríguez-Pérez, J. E. (2023). Análisis de crecimiento y dinámica nutrimental de chile poblano (*Capsicum annuum* L. var. *grossum* sendt), bajo invernadero. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1):1950-1971.
- Moreno, A., & Fischer, G. (2016). Revisión de los efectos del anegamiento en plantas frutales.
- Neuman, D.S. (1993). Shoot responses to root stress-a resource gathering point of view. *Journal of Arboriculture*, 19(2):118-123.
- Pardos, J.A. (2004). Respuestas de las plantas al anegamiento del suelo. *Forest Systems*, 13(4):101-107.
- Ramirez, E. (2024). Ciencia del suelo. El origen del mundo que nos rodea. <https://sueloscience.blogspot.com/2012/07/capacidad-de-campo-y-punto-de-marchitez.html>
- Roque, M. (2016). Análisis de crecimiento de cuatro hortalizas en sistema de producción orgánico en invernadero urbano-familiar en la ciudad de La Paz. Universidad Mayor de San Andrés.
- Santos, M., Segura, M., & Núñez, C.E. (2010). Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(1):5253-5266.
- Samperio, R.G. (1997). Hidroponía básica. Editorial Diana, 176.
- Sánchez-Bernal, E., Ortega-Escobar, M., González-Hernández, V., Camacho-Escobar, M., & Kohashi-Shibata, J. (2008). Crecimiento de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) Cv. Alpha, inducido por diversas soluciones salinas. *Interciencia*, 33(9):643-650.
- Schaffer, B. (2007) Efectos de la deficiencia de oxígeno del suelo en paltos (*Persea americana* Mill.). Quillota: Serie Actas - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 41. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/8560>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2007). Fisiología vegetal, 10. Universitat Jaume I.
- Warnock, R., Valenzuela, J., Trujillo, A., Madriz, P., & Gutiérrez, M. (2006). Área foliar, componentes del área foliar y rendimiento de seis genotipos de caraota. *Agronomía tropical*, 56(1):21-42.
- Yetisir, H., Caliskan, M.E., Soylu, S., & Sakar, M. (2006). Some physiological and growth responses of watermelon [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. and Nakai] grafted onto *Lagenaria siceraria* to flooding. *Environmental and experimental botany*, 58(1-3):1-8.
- Zahra, N., Bilal, M., Shaukat, K., Wahid A., Hussein, S., Naseer, R., Raza A., Iqbal S., & Farooq, M. (2021). Hypoxia and anoxia stress: plant responses and tolerance mechanisms. *Journal of agronomy and Crop Science*. (207):249-284. <https://doi.org/10.1111/jac.12471>