

Efecto de Bioestimulantes en Producción y Calidad de Fresa (*Fragaria ananassa* cv. Albión) Bajo Estrés Hídrico Effect of Biostimulants on Strawberry (*Fragaria ananassa* cv. Albion) Production and Quality Under Water Stress

Ma. De Lourdes Javalera-Rincón¹, José Antonio González-Fuentes^{1†},
Adalberto Benavides-Mendoza¹, Armando Robledo-Olivo²,
Eduardo Alberto Lara-Reimers³ y Álvaro Morelos-Moreno⁴

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento de horticultura, ² Departamento de alimentos, ³ Departamento de horticultura, ⁴ Conahcyt-Departamento de horticultura. Periférico Raúl López Sánchez, Colonia Valle Verde. 27054 Torreón, Coahuila, México; (M.L.J.R.), (J.A.G.F), (A.B.M.), (A.R.O.), (E.A.L.R.), (A.M.M.).

† Autor para correspondencia: jagf252001@gmail.com

RESUMEN

Los recursos hídricos limitados afectan a nivel mundial tanto a las actividades sociales como agrícolas. En México la producción e importancia del cultivo de fresa incrementa anualmente, al igual que los problemas de desertificación. Lo anterior afecta al cultivo de fresa por ser sensible al estrés hídrico causando daños en productividad y calidad. Por ende, se evalúan tres bioestimulantes con efecto antiestresante hídrico: ácido salicílico $0.125\mu\text{M L}^{-1}$ (AS), ácido glutámico 5g L^{-1} (Glu) y cisteína 50mg L^{-1} (Cys) aplicándolos quincenalmente a plantas de fresa con 3 diferentes regímenes de riego: dos con riego (15 y 30 días respectivamente) y estrés (al tener -10 bares de potencial hídrico se restablece el riego y así cíclicamente); y un riego sin estrés. Los parámetros evaluados fueron peso y diámetro de fruto, °Brix, capacidad antioxidante por el método DPPH, compuestos fenólicos, prolina, vitamina C y acidez total titulable. El bioestimulante que favoreció el peso del fruto en cada régimen de riego fue: regular + Glu, 15 días + AS y 30 días + Cys. El diámetro incrementó por el tratamiento Glu tanto en riego regular como por 30 días, y el tratamiento AS favoreció al régimen de 15 días. La calidad nutracéutica aumentó por el régimen de riego de 15 días, en los parámetros de °Brix (21%), capacidad antioxidante (3.5%), compuestos fenólicos (59%) y acidez (250%). En estos dos últimos junto con la vitamina C se vio un efecto por el AS el cual incrementó la concentración de estos tres compuestos. Los compuestos fenólicos se incrementaron un 67% por la acción del AS, la vitamina C un 32% y la acidez titulable, es decir, el ácido ascórbico fue 215 veces superior al testigo. La prolina no varió entre tratamientos.

Palabras clave: ácido glutámico, ácido salicílico, cisteína, nutraceutico, régimen de riego.

SUMMARY

The limited water resources problematics affects at a global level both social activities and agricultural- In Mexico, the production and importance of strawberry crop is increasing annually, as well as the problems of desertification. This affect strawberry cultivation because it is sensitive to water stress, which causes damage in productivity quality. Therefore, three biostimulants with an anti-water stress effect are evaluated: salicylic acid $0.125\mu\text{M L}^{-1}$ (AS), glutamic acid 5g L^{-1} (Glu) and cysteine 50mg L^{-1} (Cys) applying them biweekly to strawberry plants with 3 different irrigation regimes, two with irrigation (15 and 30 days respectively) and stress (having -10 bars of water potential, irrigation is restored and so cyclically); and stress-free watering. The parameters evaluated were fruit weight and diameter, °Brix, antioxidant capacity



Cita recomendada:

Javalera-Rincón, M. L., González-Fuentes, J. A., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Olivo, A., Lara-Reimers, E. A., & Morelos-Moreno, A. (2024). Efecto de Bioestimulantes en Producción y Calidad de Fresa (*Fragaria ananassa* cv. Albión) Bajo Estrés Hídrico. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-12. e1937. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i.1937>

Recibido: 24 de abril de 2024.
Aceptado: 2 de septiembre de 2024.
Artículo. Volumen 42.
Octubre de 2024.

Editor de Sección:
Dr. Ronald Ernesto Ontiveros Capurata

Editor Técnico:
Dr. Fermín Pascual Ramírez



Copyright: © 2024 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

by the DPPH method, phenolic compounds, proline, vitamin C and titratable total acidity. The biostimulant that favored fruit weight in each irrigation regime was regular + Glu, 15 days + AS and 30 days + Cys. The diameter increased due to the Glu treatment both in the regular irrigation regime and for 30 days, and the AS treatment favored the 15-day regime. Nutraceutical quality was increased by 15-day irrigation regime, in the parameters °Brix (21%), antioxidant capacity (3.5%), phenolic compounds (59%) and acidity (2.5 times more). In the latter two, together with vitamin C, an effect was seen by AS which increased the concentration of these three compounds. Phenolic compounds were increased by 67% by the action of AS, vitamin C by 32% and titratable acidity or ascorbic acid was 2.15 times higher than the control. Proline did not vary between treatments.

Index words: *glutamic acid, salicylic acid, cysteine, nutraceutical, irrigation regime.*

INTRODUCCIÓN

En México la producción de fresa (*Fragaria ananassa*) en el 2021, presentó una derrama económica de 11 mil millones de pesos en 11 900 ha cultivadas. Los estados que representan el 98.1% de la producción son Michoacán, Guanajuato, Baja California, Edo. de México y Baja California Sur (SIAP, 2021).

El cultivo de fresa requiere 75% de humedad relativa y temperaturas de 15 a 25 °C; fuera de esas condiciones, se presenta un estrés hídrico, que ocasiona disminución en crecimiento, desarrollo o se ve afectado algún proceso fisiológico a causa de un factor externo, por ejemplo, cuando el agua perdida por la transpiración es superior a la absorbida (Moreno y Patricia, 2009; Ojeda-Silvera 2015¹).

El estrés hídrico genera deterioro en las plantas de fresa; por ejemplo, a nivel celular afecta la multiplicación y estabilidad estructural, lo que causa tanto lisis celular como disminución de turgencia y baja tasa de multiplicación celular. Los daños causados afectan producción al producir flores imperfectas o pérdida de éstas; el estrés oxidativo genera bajo crecimiento vegetativo lo que reduce la producción de fotosintatos (azúcares) lo cual genera pocos frutos y de baja calidad, además de tener poco peso, ya que el 85% del peso del fruto es agua (Moreno y Patricia, 2009; Raimond, 2015²; Moreno-Vega, 2015).

En sistemas de producción a campo abierto, los efectos del estrés hídrico se acentúan debido a la radiación solar, la temperatura y el viento, que influyen en la evapotranspiración. En condiciones de agricultura protegida hay aumento de la temperatura en suelo y planta por la cubierta plástica y la poca ventilación, sin embargo, de tener sistemas de refrigeración se pueden modificar las condiciones y hacer un uso eficiente del agua (Salazar-Moreno, Rojano y López, 2014; InfoAgro, 2000; Domínguez-Morales, 2012³).

Para reducir los efectos del estrés hídrico se realizan riegos en exceso, los cuales incrementan los riesgos de afectación por patógenos debido a la humedad excesiva; además, se trata de una práctica insostenible que implica un uso ineficiente del agua (Ojeda-Real *et al.*, 2018).

Con el fin de tener un mejor uso del recurso hídrico, se plantea que con la aplicación de bioestimulantes como ácido salicílico (AS), ácido glutámico (Glu) y cisteína (Cys), se pueda mitigar el estrés hídrico. Al reducir los daños por estrés se tendrá un efecto positivo en la producción ya que los bioestimulantes seleccionados ha demostrado que inducen floración, ayudan al cuajado de frutos, aumento en vigor y sabor de la fresa, actúan como osmolitos, precursores de prolina y evitan el estrés oxidativo (Ojeda-Real *et al.*, 2018; Muñoz-Amaya, 2018; Markus, 2019). Aunado a lo anterior se espera un incremento de la calidad nutracéutica del fruto aumentando los metabolitos secundarios, los cuales son importantes porque proveen un efecto favorable a la salud (Ojeda-Silvera, 2015¹; Pérez-Leonard, 2006; Luna-Zapién *et al.*, 2016).

Por lo tanto, el objetivo de este experimento fue evaluar el efecto de la aplicación de tres bioestimulantes: ácido salicílico, ácido glutámico y cisteína, como anti estresantes hídricos en la producción y calidad nutracéutica en el cultivo de fresa.

¹ Ojeda-Silvera, C. M. (2015). *Efecto de un producto bioactivo compuesto por oligogalacturonidos como mitigador del estrés hídrico en variedades de albahaca (Ocimum basilicum L.)*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Disponible en: <http://dspace.cibnor.mx:8080/handle/123456789/2194>

² Raimond, S. (2015). *Efecto del ácido salicílico sobre el desarrollo de plantas de lechosa (Carica papaya L.) sometidas a estrés hídrico duante la fase de vivero*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Agronomo. Universidad Central Venezuela. Disponible en <http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/20889/1/Trabajo%20de%20Grado%20Sebastian%20Raimond.pdf>

³ Domínguez-Morales, P. (2012). *Evaluación agronómica de selecciones avanzadas del Programa Nacional de Mejora Genética de Fresa (Fragaria x ananassa Duch.), en diferentes sistemas de cultivo y valoración de parámetros de calidad del fruto*. Tesis para obtener el grado en Doctor en Ciencias. Universidad de Córdoba. Disponible en: <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/8275/2012000000639.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo bajo condiciones controladas de invernadero con tecnología media, el cual cuenta con sistema de calefacción, pared húmeda, extractores y controles semiautomáticos para en encendido de los sistemas de control de temperatura antes mencionados, los cuales depende de la temperatura interna, humedad relativa y radiación. Dicho invernadero se encuentra ubicado dentro de las instalaciones del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila, México con coordenadas 25° 21' 22.0" N 101° 02' 09.1" O. El experimento inició en febrero del 2022 y concluyó en septiembre del mismo año. Se utilizaron plántulas de fresas cultivar Albión con raíz desnuda recortada a 10 cm de longitud y con diámetro de corona similar entre ellas. El trasplante fue en bolsas de 4 litros de volumen con una mezcla de sustrato peat moss: perlita en proporción 70:30 con una aireación del 25 por ciento en base a volumen.

Evaluación del Riego y Aplicación de Bioestimulantes

Se utilizó un diseño experimental factorial (3×4) completamente al azar. El factor A fue la variación en el contenido de humedad por tres diferentes regímenes de riegos seguidos por un estrés hasta alcanzar -10 bares de potencial hídrico del tallo, el primero después de 15 días de riego normal, el segundo después de 30 días de riego normal y el tercero sin estrés (-4 bar) el cual constó de tres riegos semanales de un litro de solución Steiner por planta, con lo cual se obtuvo un drenaje del 30%. La concentración del fertirriego fue aumentando según requerimientos del cultivo llegando a un máximo de 75% con un CE menor a 1.2 dS m⁻¹ y pH entre 5.7 a 6.3.

El factor B consistió en aplicaciones quincenales de tres bioestimulantes, ácido salicílico 0.125 μM, ácido glutámico 5 g L⁻¹, cisteína 50 mg L⁻¹ y el testigo sin aplicación. Cada tratamiento tuvo 5 repeticiones.

Durante la puesta en marcha se llevaron a cabo podas de estolones con la finalidad de hacer a la planta productiva y no vegetativa. Para el control sanitario, al inicio del cultivo se utilizó un control químico, abamectina, el cual se cambió por un producto orgánico de producción propia a base de ajo, pimienta y chile. Con ambos productos se controlaron plagas como el falso medidor y la arañita roja. Hubo baja incidencia de botritis que se controló por la eliminación del órgano afectado. Para la polinización se colocaron abejorros durante la etapa de producción.

El potencial hídrico del tallo se midió usando hojas y peciolo de la parte baja de la planta, de acuerdo con procedimiento descrito por Fulton *et al.* (2001) con una bomba de presión Scholander (PMS Instrument Company). Las mediciones fueron a lo largo del periodo de estrés hasta alcanzar el nivel deseado de -10 bares; a partir de este punto se normalizó el riego hasta completar el ciclo siguiente.

Debido al alto contenido de sales en el agua de riego, y a la sensibilidad del cultivo de fresa a la salinidad, se diluyó el agua por una mezcla entre agua de riego normal y purificada en proporción 1:1.

Evaluación de la Producción

La cosecha fue entre los meses de junio a septiembre del 2022, se realizaron cortes de fruto cada tercer día. Se pesaron los frutos de manera individual por planta y por repetición usando una báscula digital BASE 5-EP (TRUPER). En cada fruto se midió el diámetro ecuatorial y polar con un vernier digital CALDI-6MP (TRUPER).

Los sólidos solubles fueron determinados, al momento de la cosecha, con base en °Brix mediante el refractómetro óptico RHB-32ATC (PROCOMSA). Se utilizó un par de gotas del jugo, obtenidas por medio de trituración de una sección del fruto y colocadas en el equipo. Para el resto de las determinaciones los frutos se congelaron a -20 °C manteniéndolos así hasta su uso o liofilización para su posterior evaluación.

Capacidad antioxidante. La determinación se llevó a cabo por medio del método de DPPH descrito por Brand-Williams 1995 con modificación para micro placa en abril del 2023. Las extracciones se realizaron con 1500 μL de cada solvente, se tuvieron tanto extracciones lipofílicas, (Hexano:Acetona, a proporción 3:2) como hidrofílicas. Se utilizó como solvente un buffer de fosfatos, conformado de fosfato de sodio monobásico y di básico, con una concentración final de 14 mM y 36 mM respectivamente. Se añadieron 5mg de polivinilpirrolidona (PVP) el cual es un estabilizador, que se adiciona con el fin de evitar la pérdida de los compuestos y preservar la capacidad antioxidante real. Se llevó a vórtex y se procedió a colocar en un sonicador por 10 minutos. Se centrifugó a 12 500 RPM a 4 °C y finalmente se purificó con filtros de politetrafluoroetileno (PTFE). Cada extracción se diluyó en una relación 1:9 para continuar con el procedimiento.

Compuestos fenólicos. La determinación de compuestos fenólicos siguió el método de Folin y Ciocalteu (1927) con modificaciones para micro placa, la cual se realizó en el semestre septiembre - noviembre del 2022 al igual que el resto de las determinaciones.

Se pesaron 100 mg de muestra liofilizada y mezclaron, con solvente agua:acetona 1:1, para la extracción. Posteriormente se sometió a sónica por 5 minutos y finalmente se centrifugó a 12 500 RPM a 4 °C. Con el extracto se prosiguió con el método.

Prolina. El método seguido fue el descrito por Bates, Waldren y Teare (1973) donde se tomaron 50 mg de muestra liofilizada para realizar el extracto, los cuales fueron disueltos con 2 ml de ácido sulfosalicílico y sometidos a vórtex 1 minuto y a centrifugación por 30 minutos a 3500 RPM.

Vitamina C. Para la extracción se maceraron 10 g de la muestra congelada, no liofilizada, con 10 ml de HCl al 2%, posteriormente se filtraron por medio de una gasa fina y se aforó a 100 ml. Del extracto se toma una alícuota de 10 mililitros.

Se tituló con diclorofenol, el cual es preparado 24 horas previas a la evaluación con 50 mg de 2.6. diclorofenol aforado a 250 ml de agua destilada. Finalmente, los datos obtenidos se transforman mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Vitamina C} = \frac{\text{ml gastados} \times 0.088 \times \text{dilución} \times 100}{\text{gramos de muestra} \times \text{ml de alícuota}} \quad (1)$$

Donde el valor 0.088 es una constante específica para el ácido ascórbico.

Acidez titulable. La extracción se realizó de un fruto congelado completo macerado con 2-5 gotas de fenoltaleína, el cual se titula con hidróxido de sodio al 0.1N. El resultado se reporta como equivalentes de ácido cítrico con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Acidez titulable} = \frac{\text{ml gastados} \times \text{normalidad} \times 0.064 \times 100}{\text{gramos de muestra}} \quad (2)$$

Donde el valor 0.064 es la constante específica del ácido cítrico.

Los datos obtenidos se analizaron por medio de un análisis de varianza (ANOVA) usando el programa estadístico Infostat versión 2020 (Di Rienzo *et al.*, 2020). Para la separación de medias se utilizó la prueba LSD de Fisher ($P < 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros Agronómicos

Interacción de Regímenes de Riego y Bioestimulantes en Peso de Fruto

En riego sin estrés, el peso de fruto se vio favorecido por el Glu en comparación con AS (10%), Cys (60%) y el testigo (65%) (Figura 1) teniendo un mejor resultado los tratamientos Glu y AS en relación al testigo. En el riego de 15 días + estrés el bioestimulante AS obtuvo un mayor peso de fruto y superó al testigo con 5%, Glu un 19% y Cys 20%. Sin embargo, aunque estas últimas obtuvieron menor peso que las plantas testigo, en este régimen de riego quincenal, al comparar las plantas tratadas con Cys en el régimen de riego regular, los frutos en el régimen quincenal incrementaron su peso en 35% a pesar de presentarse un estrés, lo que sugiere que la Cys es un anti estresante que aporta beneficio con respecto al peso del fruto. El resultado obtenido demuestra la acción de la Cys que activa la respuesta al estrés propia de la planta formando mensajeros y hormonas como el ácido abscísico para el cierre de estomas y así controlar el uso del agua haciéndolo más eficiente, además de elicitar osmolitos que son fotosintatos que dan peso y mantienen el agua evitando la pérdida de peso por transpiración. Al no perder agua la fruta tampoco pierde su peso, ya que el agua contenida en el fruto representa el 85% del peso de este (Moreno y Patricia, 2009; Castillo-Rodríguez, 2005 y Raimond, 2015²).

Por el contrario, en el tratamiento con Glu no se observó un efecto antiestresante, ya que en el riego con quincenal con estrés se obtuvo un 22% menos peso que en el regular sin estrés. En el riego de 30 días + estrés el testigo fue quien obtuvo un mayor peso de fruto, superando a los tratamientos Cys, AS y Glu, un 13, 22 y 23% respectivamente. Sin embargo, en este régimen de riego las plantas tratadas con Cys obtuvieron un peso de 5% más que las plantas tratadas con Cys en el riego quincenal. Esto indica que la Cys a medida que incrementan los tiempos a estrés continúa aportando un beneficio sostenido en incremento de peso, lo que no sucedió con las plantas tratadas con AS y Glu en las cuales disminuyó el peso al comparar con el régimen quincenal.

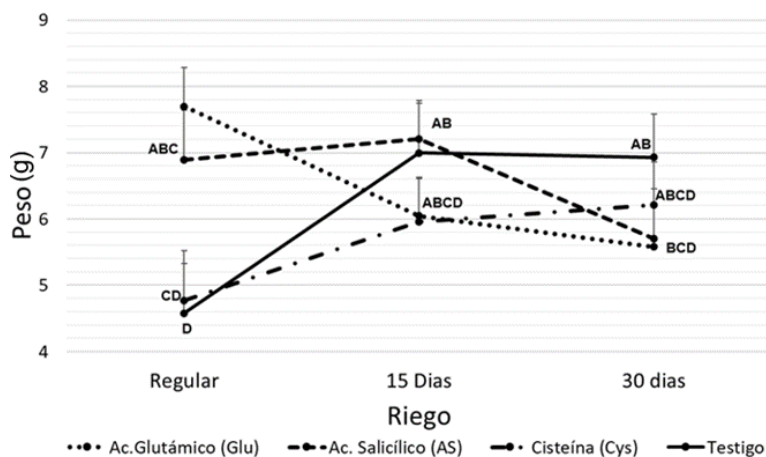


Figura 1. Peso de fruto en la interacción de factores. Efecto en peso de frutos de fresa (*Fragaria x ananassa*) por la interacción del régimen de riego regular, estrés después de 15 y 30 días; y aplicaciones de ácido salicílico (AS), glutámico (Glu), cisteína (Cys) y sin aplicación (testigo) Letras diferentes simbolizan diferencia estadística ($P \leq 0.05$).

Figure 1. Fruit weight in the interaction of factors. Effect on weight of strawberry fruits (*Fragaria x ananassa*) due to the interaction of the regular irrigation regime, stress after 15 and 30 days; and applications of salicylic acid (AS), glutamic acid (Glu), cysteine (Cys) and no application (control) Different letters symbolize statistical difference ($P \leq 0.05$).

El ácido glutámico tiene su importancia en que ha demostrado que contrarresta los daños por estrés hídrico gracias a que mejora la absorción de nutrientes y la polinización evitando la pérdida de producción. Gang et al. (2024) mitigaron el estrés hídrico por medio de aplicaciones de ácido glutámico en el cultivo de trigo. La acción del Glu fue de igual manera en este estudio (Viñals-Verde et al., 2011).

Shemi et al. (2021) reportan que al aplicar ácido salicílico en otras plantas como el maíz aumentó rendimiento en condiciones de estrés hídrico. Aunado a lo anterior, Khan, Fatma, Per, Anjum y Khan (2015) reporta que al realizar aplicaciones de AS se eficientiza el uso del agua al cerrar estomas y reducir la transpiración, lo cual provoca un aumento de la biomasa en otras plantas como soya y pinos.

Interacción de Regímenes de Riego y Bioestimulantes en Diámetro Polar

Los resultados fueron similar a la variable peso, ya que las plantas con riego regular y tratadas con Glu presentaron un aumento del 22% en relación con el testigo, superándola las plantas tratadas con AS que sólo incrementaron un 8%. La cisteína presentó una diferencia del 4% en relación al testigo. Mostrando que los dos bioestimulantes que favorecen el tamaño del fruto en el riego regular son Glu y AS.

En el régimen de riego con estrés cada 15 días y tratadas con AS presenta diferencia de un 3.5% más en el diámetro polar, comparado al testigo. En contraste Glu y Cys fueron inferiores al testigo con un 4 y 3.5% respectivamente dentro de este mismo régimen de riego. Sin embargo, en comparación con el testigo absoluto (riego regular sin estrés), los tres tratamientos lo sobrepasan, AS con un 19%, Cys un 11% y Glu un 10 por ciento.

Finalmente, en el régimen de riego de 30 días el diámetro polar de las plantas testigo, no fue diferente a los frutos de plantas tratadas con Glu y AS, sin embargo, el diámetro polar de las plantas tratadas con Cys fue menor en un 15% al comparar con el testigo.

Considerando lo anterior, los tratamientos con AS y Cys y que recibieron estrés moderado en el régimen de riego de 15 días (Figura 2) produjeron los mayores diámetros polares de frutos comparados con el riego regular y el régimen de 30 días. Con respecto a las plantas tratadas con Glu los frutos obtuvieron mayor diámetro polar con riego regular comparado con ambos regímenes de riego de 15 y 30 días. Finalmente, el diámetro en las plantas testigo incremento 15% en el régimen de 15 días y 24% más en el régimen de 30 días al comparar con los frutos de las plantas en riego regular.

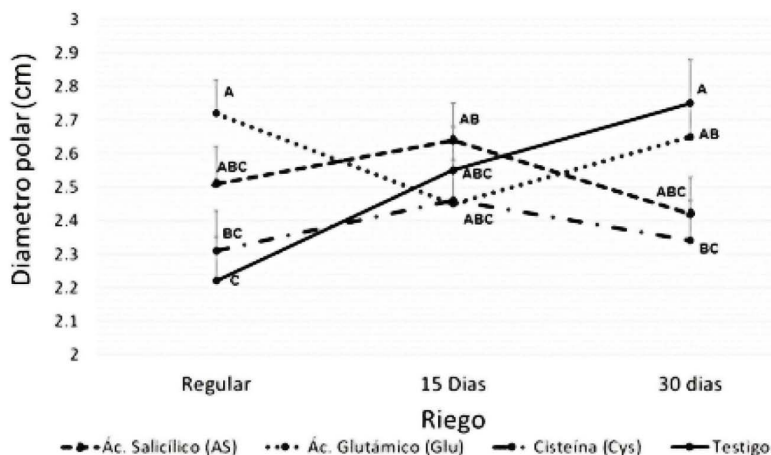


Figura 2. Diámetro en la interacción de factores. Diámetro polar (cm) de frutos de fresa (*Fragaria x ananassa*) y su interacción con los factores de regímenes de riego: regular, 15 y 30 días; y aplicaciones: ácido salicílico AS, glutámico Glu, cisteína Cys y testigo. Letras diferentes simbolizan diferencia estadística ($P \leq 0.05$).

Figure 2. Diameter in the interaction of factors. Polar diameter (cm) of strawberry fruits (*Fragaria x ananassa*) and its interaction with the factors of irrigation regimes: regular, 15 and 30 days; and applications: AS salicylic acid, glutamic Glu, Cys cysteine and control. Different letters symbolize statistical difference ($P \leq 0.05$).

El aumento del peso se presenta por la formación y acumulación de osmolitos debido tanto al estrés presentando como a las aplicaciones realizadas, ya que los bioestimulantes aplicados son elicitores de tales compuestos. Tucuch-Haas *et al.* (2016) reportó que debido a que los osmolitos son azúcares en el fruto, al acumularse en este dan un aumento no sólo de peso, sino también de °Brix.

Aunado a lo anterior, Chávez-Suárez, Álvarez y Ramírez (2012) mencionó que el ácido salicílico es un regulador del crecimiento y regula los procesos de defensa contra el estrés de la planta. Por ello se presenta un incremento del tamaño del fruto en presencia del AS en comparación con el testigo.

Parámetros de Calidad

El régimen de riego de 15 días con estrés moderado influyó positivamente con 21% más en °Brix con respecto a los frutos del riego regular (Figura 3), mientras que los °Brix en el régimen de 30 días fue similar al riego regular. Esto indica que se puede tener una producción de mejor calidad organoléptica con un estrés moderado (-10 bar) cada 15 días.

Al presentarse un estrés la planta genera osmoprotectores que mantienen un equilibrio en el potencial osmótico, permitiendo que el agua se mantenga en las estructuras celulares y no se pierda. Dichos compuestos son solutos compatibles como los azúcares (Florido-Bacallao y Bao, 2014; Tucuch-Haas *et al.*, 2016).

En otros cultivos como la caña de azúcar Wahid (2007) reportó que bajo un estrés por calor se presentó un incremento en la acumulación de azúcares solubles y prolina de manera lineal. Lo anterior sugiere que el estrés hídrico causa el mismo efecto en el cultivo de fresa, aumentado el contenido de estos solutos compatibles ayudando a la retención de agua.

Con respecto a la capacidad antioxidante en el extracto de compuestos hidrofílicos, se presentó un incremento del 3.4% en el régimen de riego de 15 días en comparación con el testigo y el régimen de 30 días (Figura 4), mientras que estos dos últimos no fueron diferentes entre ellos.

En la respuesta contra el estrés, se generan metabolitos secundarios anti estresantes como el propio AS, por lo cual, el aumento de estos genera una actividad biológica potenciada en el parámetro evaluado. El AS por su naturaleza fenólica tiene la función de antioxidante dentro de la planta, sin embargo, no sólo realiza esa función, sino que a su vez modifica la síntesis y actividad de enzimas y otros compuestos antioxidantes regulando el balance redox (Ramírez-Zambrano, 2012⁴).

⁴ Ramírez-Zambrano, R. (2012). *Efecto del ácido salicílico en el crecimiento y desarrollo de acelga*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero en Agrobiología. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6449/62236%20RAMIREZ%20ZAMBRANO,%20RICARDO.pdf?sequence=1>

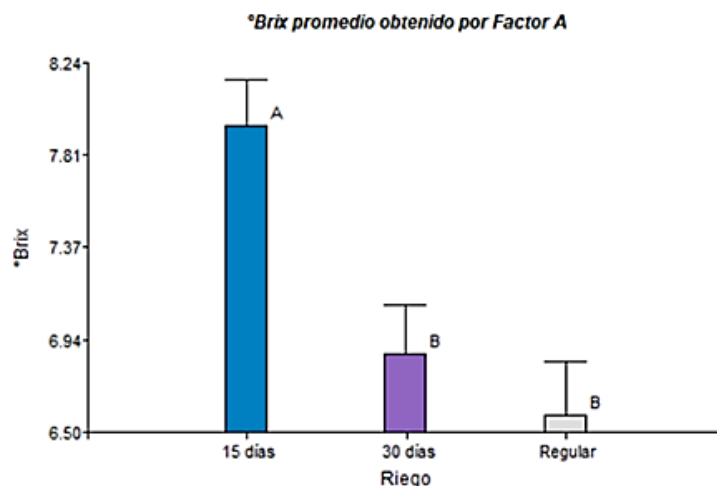


Figura 3. °Brix en frutos de fresa de acuerdo a los diferentes regímenes de riego: regular, 15 y 30 días con posterior estrés moderado (-10 bar). Letras diferentes simbolizan diferencia estadística ($P \leq 0.05$).

Figure 3. °Brix in strawberry fruits according to the different irrigation regimes: regular, 15 and 30 days with subsequent moderate stress (-10 bar). Different letters symbolize statistical difference ($P \leq 0.05$).

Los compuestos fenólicos proveen de actividad biológica al fruto, es decir, al aumentar estos compuestos se aumenta a su vez la capacidad antioxidante del fruto (Peñarrieta, Tejeda, Mollinedo, Vila y Bravo, 2014). En el riego de 15 días con estrés, se presenta un incremento del 59% en la concentración de tales compuestos con respecto al riego regular. Sin embargo, para el riego de 30 días se presenta un decremento del 46% en este parámetro al comparar con el testigo (Figura 5a).

La aplicación de AS y Glu presentaron un incremento en la concentración de compuestos fenólicos con respecto al testigo de 67% y 36% respectivamente ($P \leq 0.05$). Entre ambos tratamientos se presenta una diferencia estadística, con una relación $\text{Glu} < \text{AS}$. Por otro lado, la Cys fue estadísticamente igual al testigo y al Glu. Sin embargo, presentó un aumento del 22% (Figura 5b).

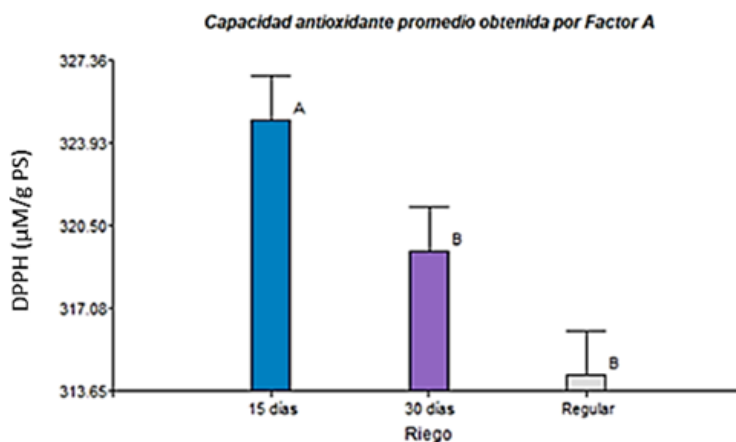


Figura 4. Capacidad antioxidante en los diferentes riegos. Capacidad antioxidante promedio del fruto por el método del reactivo de DPPH ($\mu\text{M g}^{-1}$ PS) del factor riego: regular, 15 y 30 días con posterior estrés. Letras diferentes simbolizan diferencia estadística ($P \leq 0.05$).

Figure 4. Antioxidant capacity in different irrigations. Average antioxidant capacity of the fruit by the DPPH reagent method ($\mu\text{M g}^{-1}$ PS) of the irrigation factor: regular, 15 and 30 days with subsequent stress. Different letters symbolize statistical difference ($P \leq 0.05$).

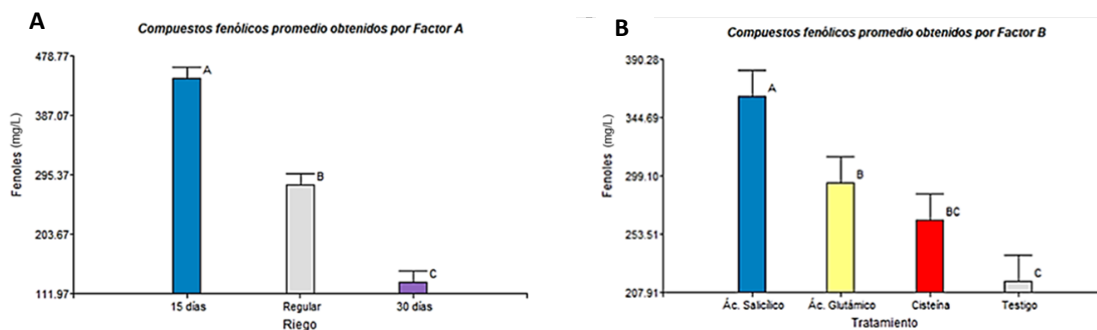


Figura 5. Compuestos fenólicos. (a) En los diferentes riegos. Compuestos fenólicos promedio de fruto por el método de Folin-Ciocalteu (mg L^{-1}) del factor riego: regular, 15 y 30 días con posterior estrés. Letras diferentes simbolizan diferencia estadística ($P \leq 0.05$); (b) Por tratamiento. Compuestos fenólicos promedio de fruto por el método de Folin-Ciocalteu del factor tratamientos: ácido salicílico, glutámico, cisteína y testigo. Letras diferentes simbolizan diferencia estadística ($P \leq 0.05$).

Figure 5. Phenolic compounds. (a) In the different irrigations. Average phenolic compounds of fruit by the Folin-Ciocalteu method (mg L^{-1}) for the irrigation factor: regular, 15 and 30 days with subsequent stress. Different letters symbolize statistical difference ($P \leq 0.05$); (b) By treatment. Average phenolic compounds of fruit by the Folin-Ciocalteu method for factor treatments: salicylic acid, glutamic, cysteine and control. Different letters symbolize statistical difference ($P \leq 0.05$).

La prolina es un indicador de estrés hídrico. Su acumulación en los tejidos se presenta cuando la planta percibe falta de agua, esto activa otros mecanismos para el uso eficiente de agua. Al restablecerse el riego, la prolina acumulada por la falta de agua, es utilizada por la planta como fuente de energía y material de reconstrucción para liberarse de los daños causados por el estrés (De la O-Quezada, Ojeda, Hernández, Sánchez y Martínez, 2011). En la Figura 6 se observa que no se obtuvo una diferencia estadística entre los regímenes de riego de 15 y 30 días ($P \leq 0.05$), lo cual indica que el nivel de estrés no aumentó considerablemente la prolina a pesar de someter a estrés moderado las plantas. Sin embargo, se observa una tendencia en las plantas que fueron sometidas al déficit hídrico (-10bar) después de 15 y 30 días de riego normal las cuales presentaron un menor grado de acumulación de prolina que aquellas que fueron regadas con normalidad, esto pudo haber sido ocasionado debido que las plantas no se sometieron a un estrés continuo. Estos resultados son análogos a los de Pagán-Rubio (2012⁵) donde se tuvo un riego similar al aplicado en este experimento, restituyendo el riego después de un estrés, y reportaron aumentos en el crecimiento de especies forestales evaluadas.

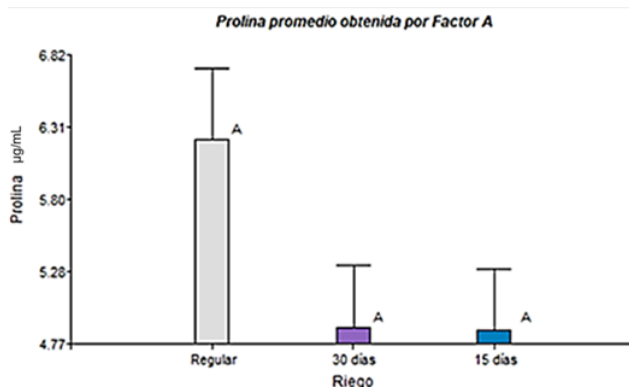


Figura 6. Prolina en los diferentes riegos. Prolina promedio de fruto por el método de Bates, Waldren y Teare (1973) ($\mu\text{g mL}^{-1}$) del factor riego: regular, 15 y 30 días con posterior estrés. Letras diferentes simbolizan diferencia estadística ($P \leq 0.05$).

Figure 6. Proline in the different irrigations. Average fruit proline by the method of Bates, Waldren y Teare (1973) ($\mu\text{g mL}^{-1}$) for the irrigation factor: regular, 15 and 30 days with subsequent stress. Different letters symbolize statistical difference ($P \leq 0.05$).

⁵ Pagán-Rubio, E. (2012). *Uso de indicadores del Estado Hídrico de la planta para la Optimización de el Riego en cultivos Leñosos*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias. Universidad Politécnica de Cartagena. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10317/2764>

Uno de los principales antioxidantes presentes en la fresa es el ácido ascórbico o Vitamina C. Éste se encuentra relacionado con la acidez del fruto, ya que es uno de los ácidos de mayor concentración en estos, además de estar ligado con el ácido cítrico. Esta relación se debe a que el ácido ascórbico puede reducir el hierro ayudando a su absorción, sin embargo, a su vez requiere de la producción de ácido cítrico para ello (Smirnoff, 2018).

La aplicación de AS fue el tratamiento que presentó variación con respecto al testigo, siendo superior un 32% (Figura 7), incrementando el valor nutracéutico de los frutos.

El incremento de la vitamina C con la aplicación del AS se debe a que existe una relación entre la concentración de la vitamina C que induce la activación de las señales del AS. Así, al desencadenarse las reacciones mediadas por el AS, la planta relaciona dicha acción con la baja concentración de ácido ascórbico, llevando a la producción y acumulación del mismo (Akram, Shafiq y Ashraf, 2017).

La vitamina C es el antioxidante más abundante en plantas ya que se usa como cofactor de enzimas redox al donar sus electrones a los radicales libres, así (Gaucin-Delgado *et al.*, 2022) participa en la defensa contra estrés oxidativo biótico y abiótico al degradar H_2O_2 vía el ciclo glutatión-ascorbato (Akram *et al.*, 2017) favoreciendo el crecimiento de las plantas.

Además, Gaucin-Delgado *et al.*, (2022) reportó que la vitamina C está presente en cloroplastos, vacuolas, citosol y espacio apoplástico, y lo cataloga como un precursor tanto de metabolitos secundarios como primarios ayudando a la defensa de la planta contra el estrés producido por exceso de energía.

Al estar presente en diferentes organelos y áreas de las células vegetales, Smirnoff (2021) reporta que la vitamina C influye directamente en la fotosíntesis lo que se refleja en frutos de mayor tamaño como se observa en este estudio donde las plantas tratadas con AS produjeron los frutos de mayor peso.

Finalmente, el parámetro de acidez se expresa en % equivalente a ácido cítrico, ya que es uno de los más abundantes en el fruto. Al igual que el ácido ascórbico, es un antioxidante natural con características nutracéuticas.

El tratamiento hídrico que favoreció al parámetro de acidez, en relación con el testigo, fue el de 15 días de riego regular + estrés, presentando un incremento del 250%. El riego de 30 días + estrés fue estadísticamente igual al testigo (Figura 8a). Así que el riego con mayor dulzor ($^{\circ}$ Brix) fue el de 15 días.

Por lo que toca a los bioestimulantes, la aplicación de AS fue superior 215% respecto al testigo, lo cual puede observarse con claridad en la Figura 8b. Respecto a los tratamientos, se comportaron de igual manera que el parámetro anterior, siendo sólo significativo el riego de 15 días.

Rodríguez-Larramendi, Santos y Infante (2008) encontraron que, al aplicar concentraciones de ácido salicílico a semillas de tomate, los frutos obtenidos tenían un incremento tanto en peso fresco como en contenido de vitamina C y ácido cítrico. Así también al aplicar AS a frutos de frambuesa se incrementó la acidez de los frutos proporcionando un mejor balance en el sabor del mismo (Sigala-Aguilar *et al.*, 2023) ya que el sabor dulce-acido de los frutos es causado por el balance de la acidez originado por ácidos orgánicos (Pašalić, Todorović, Koleška, Bosančić y Đekić, 2016) y por la concentración de azúcares (Iglesias *et al.*, 2015).

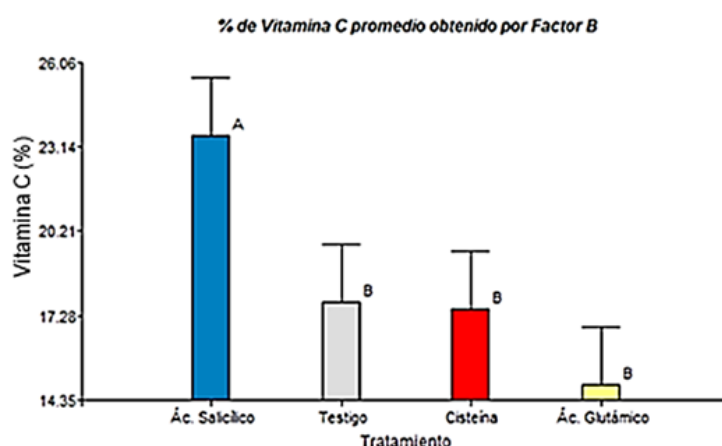


Figura 7. Concentración de vitamina C para los tratamientos. Concentración de vitamina C promedio de fruto por volumetría del factor tratamientos: ácido salicílico, glutámico, cisteína y testigo. Letras diferentes simbolizan diferencia estadística ($P \leq 0.05$).

Figure 7. Vitamin C concentration for treatments. Average vitamin C concentration of fruit by volumetry method for the factor treatments: salicylic acid, glutamic, cysteine and control. Different letters symbolize statistical difference ($P \leq 0.05$).

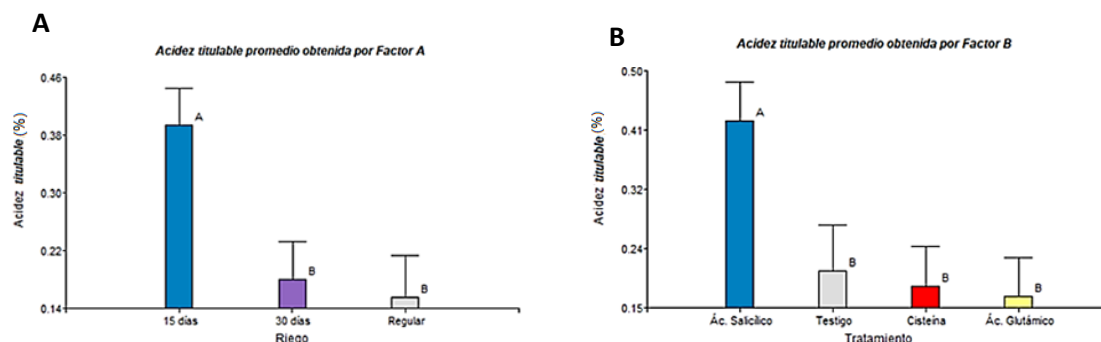


Figura 8. Acidez titulable. (a) En diferentes riegos. Acidez total titulable promedio de fruto del factor riego: regular, 15 y 30 días con posterior estrés. Letras diferentes simbolizan diferencia estadística ($P \leq 0.05$); (b) Por tratamientos. Acidez titulable promedio de fruto del factor tratamientos: ácido salicílico, glutámico, cisteína y testigo. Letras diferentes simbolizan diferencia estadística ($P \leq 0.05$).

Figure 8. Titratable acidity. (a) At different irrigation. Average titrateable acidity of the fruit of the irrigation factor: regular, 15 and 30 days with subsequent stress. Different letters symbolize statistical difference ($P \leq 0.05$); (b) For treatments. Average titrateable acidity of fruit of the factor treatments: salicylic acid, glutamic, cysteine and control. Different letters symbolize statistical difference ($P \leq 0.05$).

Aunado a lo anterior, se tiene que el valor de acidez titulable de la fresa para considerarse de buena calidad debe ser menor del 0.7 % para mantener su sabor característico. Como se observa en los resultados en la Figura 8, a pesar de incrementar el ácido cítrico y ascórbico que dan calidad nutracéutica, la calidad del sabor no se ve afectada (Madrid y Beaudry, 2020).

CONCLUSIONES

Los parámetros agronómicos peso y diámetro de fruto se vieron beneficiados tanto por los riegos con estrés como con las aplicaciones de bioestimulantes. En el tratamiento de riego por 15 días + estrés con la aplicación de AS se mostraron mayor peso y talla. La aplicación de Glu tuvo resultados similares, pero en regímenes de riego con mayor consumo de agua. Una mejora de calidad nutracéutica (60%) y de producción (50%) se obtuvo con la aplicación de AS con el régimen de riego de 15 días.

Cada bioestimulante tuvo un mayor efecto en alguno de los regímenes de riego. Siendo AS el ideal para el riego 15 días + estrés (reducción de agua del 50%), Cys para 30 días + estrés (reducción del 33% del agua) y Glu para el testigo.

De esta manera se puede incrementar tanto calidad como producción ya sea por medio únicamente de la aplicación un bioestimulante, como por medio de la acción de estos en conjunto con un estrés. Al aplicar el estrés además de tener un producto en cantidad y con calidad y valor nutracéutico se tiene un uso eficiente del agua, lo cual apoya de manera económica, ecológica y evita problemas por exceso de humedad.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, M.L.J.R. y J.A.G.F. Metodología: A.B.M. y A.M.M Software y validación: A.R.O. y E.AL.R.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias al apoyo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, la cual prestó sus instalaciones y equipos tanto de campo como de laboratorio; y al CONAHCYT por su apoyo económico para realización de estudios y trabajo de investigación.

LITERATURA CITADA

- Akram, N. A., Shafiq, F., & Ashraf, M. (2017). Ascorbic acid-a potential oxidant scavenger and its role in plant development and abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 8, 613.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. A., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Castillo-Rodríguez, F. (2005). *Biotecnología ambiental*. Madrid, España: Editorial Tebar. ISBN: 8473602110
- Chávez-Suárez, L., Álvarez-Fonseca, A., & Ramírez-Fernández, 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.
- De la O-Quezada, G. A., Ojeda-Barríos, D. L., Hernández-Rodríguez, O. A., Sánchez-Chávez, E., & Martínez-Tellez, J. (2011). Biomasa, prolina y parámetros nitrogenados en plántulas de nogal bajo estrés hídrico y fertilización nitrogenada. *Revista Chapingo Serie horticultura*, 17(1), 13-18.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L. A., Tablada, E. M., & Robledo, C. W. (2020). *InfoStat versión 2020*. software estadístico. Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat.
- Folin, O., & Ciocalteu, V. (1927) On tyrosine and tryptophan. *Journal of Biological Chemistry*, 73, 627-650.
- Fulton, A., Buchner, R., Olson, B., Schwankl, L., Gilles, C., Bertagna, N., ... & Shackel, K. (2001). Rapid equilibration of leaf and stem water potential under field conditions in almonds, walnuts and prunes. *HortTechnology*, 11(4), 609-615.
- Florida-Bacallao, M., & Bao-Fundora, L. (2014). Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos Tropicales*, 35(3), 70-88.
- Gaucin-Delgado, J. M., Ortiz-Campos, A., Hernandez-Montiel, L. G., Fortis-Hernandez, M., Reyes-Pérez, J. J., Gonzáles-Fuentes, J. A., & Preciado-Rangel, P. (2022). CuO-NPs improve biosynthesis of bioactive compounds in lettuce. *Plants*, 11(7), 912.
- Gang, L., Chao, C., Yan-dong, W., Kai, Y., Jia, L., Zeng, T. Y., ... & Chun, Y. (2024). Effects of exogenous L-glutamic acid on dry matter accumulation distribution, grain filling characteristics and quality formation under post-anthesis drought stress in wheat. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 30(5), 848-862.
- InfoAgro (2000). El cultivo de la fresa. Consultado el 20 de febrero, 2023, desde https://www.infoagro.com/documentos/el_cultivo_fresa.asp
- Iglesias, M. J., García-López, J., Collados-Luján, J. F., López-Ortiz, F., Díaz, M., Toresano, F., & Camacho, F. (2015). Differential response to environmental and nutritional factors of high-quality tomato varieties. *Food Chemistry*, 176, 278-287.
- Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2015). Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6, 462.
- Luna-Zapién, E. A., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Meza-Velázquez, J. A., Martínez-Rodríguez, F. J., & Esparza-Rivera, J. R. (2016). Capacidad antioxidante de fresa (*Fragaria vesca*) hidropónica producida bajo diferente aportación de potasio-nitrógeno. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(2), 307-312.
- Madrid, M., & Beaudry, R. (2020). Small fruits: Raspberries, blackberries, blueberries. In M. A. Gil (Ed.). *Controlled and Modified Atmospheres for Fresh and Fresh-Cut Produce* (pp. 335-346). Cambridge, MA, USA: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804599-2.00020-X>
- Markus, M. (2019). *Scientia et ars: La fuerza pirotécnica de critales súper-planos*. Santiago, Chile: Ediciones UC. ISBN: 9789561424708
- Moreno, F., & Patricia, L. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 179-191.
- Moreno-Vega, A. (2015). *Actividades de riego, abonado y tratamiento en cultivos*. España: Editorial Paraninfo. ISBN: 9788497324267
- Muñiz-Amaya, C. B. (2018). *Búsqueda de nuevos bioestimulantes para el desarrollo de plantas: ácido elálgico*. Saltillo, Coahuila: CIQA.
- Ojeda-Real, L. A., Cárdenas-Navarro, R., Lobit, P., Grageda-Cabrera, O., Valencia-Cantero, E., & Macías-Rodríguez, L. (2008). Efecto de la nutrición nitríca y sistemas de riego en el sabor de la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Revista Chapingo Serie horticultura*, 14(1), 61-70.
- Pašalić, B., Todorović, V., Koleška, I., Bosančić, B., & Đekić, N. (2016). Effects of salinity on color changes, sugar and acid concentration in tomato fruit. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 81(3), 137-142.
- Pérez-Leonard, H. (2006). Nutraceuticos: componenete emergente para el benefico de la salud. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 40(3), 20-28.
- Peñarrieta, J. M., Tejada, L., Mollinedo, P., Vila, J. L., & Bravo, J. A. (2014). Compuestos fenólicos y su presencia en alimentos. *Revista Boliviana de Química*, 31(2), 68-81.
- Rodríguez-Larramendi, L., Matos, Y., Santos, P., & Infante, S. (2008). Crecimiento, floración y fructificación en plantas de tomate (*Lycompersicom esculentum* L., var. Vyta) provenientes de semillas tratadas con ácido salicílico. *Centro Agrícola*, 35(1), 29-34.
- Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., & López-Cruz, I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(2), 177-183.
- Sigala-Aguilar, N. A., González-Fuentes, J. A., Valdez-Aguilar, L. A., López-Pérez, M. G., Medrano-Macias, J., Benavides-Mendoza, A., & González Morales, S. (2023). Effect of elicitors and biostimulants on the content of bioactive compounds in raspberry fruits. *Horticultural Science*, 50(2), 1-11.

-
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2021) Producción agrícola. Consultado el 20 de febrero, 2023, desde <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Shemi, R., Wang, R., Gheith, E. S. M., Hussain, H. A., Hussain, S., Irfan, M., ... & Wang, L. (2021). Effects of salicylic acid, zinc and glycine betaine on morpho-physiological growth and yield of maize under drought stress. *Scientific Reports*, *11*(1), 3195.
- Smirnov, N. (2018). Ascorbic acid metabolism and functions: A comparison of plants and mammals. *Free Radical Biology and Medicine*, *122*, 116-129. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.03.033>
- Tucuch-Haas, C. J., Alcántar-González, G., Volke-Haller, V. H., Salinas-Moreno, Y., Trejo-Téllez, L. I., & Larqué-Saavedra, A. (2016). Efecto del ácido salicílico sobre el crecimiento de raíz de plántulas de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *7*(3), 709-716.
- Viñals-Verde, M., García-García, A., Montano-Martínez, R. L., Villar-Delgado, J. C., García-Martínez, T., & Ramil-Mesa, M. (2011). Estimulante de crecimiento agrícola FITOMAS®; resultados de producción del año 2010 y su impacto en cultivos seleccionados de alimentos. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, *45*(3), 1-23.
- Wahid, A. (2007). Physiological implications of metabolite biosynthesis for net assimilation and heat-stress tolerance of sugarcane (*Saccharum officinarum*) sprouts. *Journal of Plant Research*, *120*, 219-228.