

BIOESTIMULANTES DE ALGAS MARINAS COMO ESTRATEGIA PARA REDUCIR EL ESTRÉS OXIDATIVO Y MANTENER EL CRECIMIENTO EN PLANTAS DE PIMIENTO (*Capsicum annuum* L.) BAJO CONDICIONES DE ESTRÉS HÍDRICO

SEAWEED BIOSTIMULANTS AS A STRATEGY TO REDUCE OXIDATIVE STRESS AND MAINTAIN GROWTH IN PEPPER PLANTS (*Capsicum annuum* L.) UNDER WATER STRESS CONDITIONS

Karen Chambilla M.^{1,2}, Milagros Chang L.^{1,3}; Alfredo Rodríguez-Delfín^{1,4},
Sabina Huamanyauri T.^{5,6} y Juan Carlos Bisbal V.^{5,7}

Resumen

La disponibilidad de agua es el factor más crítico para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La aplicación de bioestimulantes de extractos de algas marinas pueden mejorar la resistencia al déficit de agua en los cultivos y reducir el impacto negativo que este genera en el rendimiento de los cultivos. Se realizó un experimento para evaluar el efecto de cuatro bioestimulantes: Fertimar (2.5 g·l⁻¹), Fertimar SC (5 ml·l⁻¹), EA 1000-13 (5 ml·l⁻¹) y Fertikelp (5 ml·l⁻¹), formulados a partir de algas marinas sobre el crecimiento, rendimiento y estrés oxidativo en plantas de pimiento sometidas a dos regímenes de riego: 1) riego continuo, 2) riego cada tres días (estrés hídrico). Para medir el efecto del estrés oxidativo, se evaluó la actividad de las enzimas nitrato reductasa (NR), catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD) y guayacol peroxidasa (GPX). Se determinó el contenido de prolina y el contenido relativo de clorofila en hojas. Las variables de crecimiento evaluadas (peso seco de hojas, tallos y frutos) resultaron significativos ($p < 0.05$). Los bioestimulantes indujeron mayores valores de peso seco y longitud de tallo ($p < 0.01$). El contenido de clorofila unidades SPAD y prolina resultaron significativos con el factor frecuencia de riego ($p < 0.01$ para clorofila y $p < 0.05$ para prolina), indicando la presencia de estrés. La actividad de las enzimas antioxidantes GPX y SOD resultó significativa en la interacción bioestimulante y frecuencia de riego ($p < 0.05$), incrementando su actividad, reduciendo el estrés oxidativo. El uso de bioestimulantes demostró mejorar la tolerancia al estrés hídrico al tener efectos positivos en el crecimiento y el control del estrés oxidativo. Los resultados indican que las mejores fuentes de algas marinas para superar los daños por estrés oxidativo fueron Fertikelp y EA 1000-13.

Palabras clave: especies reactivas del oxígeno (ROS), cultivo sin suelo, solución nutritiva, sustrato, respuesta antioxidante, osmorregulación, déficit de riego, metabolismo del nitrógeno, bioreguladores.

Abstract

Water availability is the most critical factor for plant growth and development. The application of biostimulants from seaweed extracts can improve crop resistance to water deficit and reduce its negative impact on crop yield. An experiment was conducted to evaluate the effect of four biostimulants: Fertimar (2.5 g·l⁻¹), Fertimar SC (5 ml·l⁻¹), EA 1000-13 (5 ml·l⁻¹), and Fertikelp (5 ml·l⁻¹), formulated from seaweed, on the growth, yield, and oxidative stress of pepper plants subjected to two irrigation regimes: 1) continuous irrigation, 2) irrigation every three days (water stress). To measure the effect of oxidative stress, the activities of the enzymes nitrate reductase (NR), catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), and guaiacol peroxidase (GPX) were evaluated. The proline and the relative content of chlorophyll in leaves were determined. The growth variables evaluated (dry weight of leaves, stems, and fruits) were significant ($p < 0.05$). Biostimulants induced higher values of plant dry weight and stem length. The content of chlorophyll SPAD units and proline were significant with the irrigation frequency factor ($p < 0.01$ for chlorophyll and $p < 0.05$ for proline), indicating the presence of stress. Meanwhile, there was a slight increase in NR activity, which influences the activity of the antioxidant enzymes GPX and SOD. This was significant in the interaction between biostimulant and irrigation frequency ($p < 0.05$), increasing their activity, reducing oxidative stress. The use of biostimulants was shown to improve tolerance to water stress by having positive effects on growth and the control of oxidative stress. The results indicate that the best seaweed sources for overcoming oxidative stress damage were Fertikelp and EA 1000-13.

Key words: reactive oxygen species (ROS), soilless culture, nutrient solution, growing medium, antioxidant response, osmoregulation, water deficit, nitrogen metabolism, bioregulators.

Introducción

El cambio climático en el siglo XXI ha incrementado el estrés hídrico que restringe el crecimiento y la producción de las plantas como el pimiento. El pimiento es uno de los cultivos más importantes por sus beneficios nutricionales y medicinales (Iqbal *et al.*, 2023)

Sun *et al.* (2020), reportaron que el estrés hídrico inhibe el crecimiento de las plantas y la fotosíntesis; incrementa el contenido de las especies reactivas del oxígeno (ROS), la permeabilidad de la membrana plasmática, enzimas antioxidantes y otras enzimas no antioxidantes.

El estrés hídrico induce el incremento de especies reactivas del oxígeno (ROS), las cuales pueden causar daño oxidativo severo, afectando el aparato fotosintético y comprometiendo el funcionamiento celular (Foyer & Noctor, 2005). Además de afectar las proteínas, las ROS pueden provocar la oxidación de otras moléculas como lípidos, terpenoides, carbohidratos y ácidos nucleicos (Foyer & Noctor, 2005; Moller *et al.*, 2007). Para contrarrestar estos efectos, las plantas activan mecanismos de defensa antioxidantes que desempeñan un rol clave en su protección frente al estrés oxidativo. Dichos medios de defensa incluyen mecanismos enzimáticos como la superóxido dismutasa (SOD), la dehidroascorbato reductasa (DHAR), la glutatión reductasa (GR), la ascorbato peroxidasa (APX), la catalasa (CAT) y la guayacol peroxidasa (GPX) (Caverzan *et al.*, 2012). En los sistemas vegetales, las enzimas y los metabolitos redox actúan en forma sinérgica en la eliminación de las ROS; por ejemplo, tanto la APX como la GPX catalizan la conversión de H₂O₂ en agua, y la CAT convierte H₂O₂ en oxígeno y agua (Bela *et al.*, 2022).

Las plantas se adaptan al déficit hídrico disminuyendo la pérdida de agua, reduciendo la conductancia estomática y manteniendo la captación de agua. El ajuste osmótico es un mecanismo bioquímico que ayuda a las plantas a aclimatarse a condiciones secas y salinas. El ajuste osmótico incrementa la concentración de solutos a nivel celular haciendo más negativo el potencial osmótico mejorando el grado de hidratación celular, manteniendo la turgencia y está asociado a funciones protectoras de estructuras proteicas, enzimáticas y la membrana celular (Sanders & Arndt, 2012).

Dentro de estos solutos se encuentra el aminoácido prolina que se acumula en las plantas que experimentan falta de riego, lo que le permite a la planta aumentar su osmolaridad celular durante la limitación hídrica (Verslues & Sharma, 2010). Muchas especies de plantas acumulan solutos compatibles como la prolina en respuesta a condiciones adversas como la sequía y la salinidad (Bojórquez-Quintal *et al.*, 2014).

Campobenedetto *et al.* (2021) evaluaron la aplicación del bioestimulante foliar ERANTHIS® fabricado de algas marinas (*Ascophyllum nodosum* y

Laminaria digitata) y extractos de levadura en plantas de tomate bajo estrés hídrico leve, observaron que las plantas tratadas con el bioestimulante presentaron menores niveles de ácido abscísico (ABA), malondialdehído (MDA) y prolina que se correlaciona con menores niveles de enzimas depuradoras de ROS en comparación de las plantas no tratadas.

Los bioestimulantes actúan sobre la expresión de genes que regulan el transporte de nutrientes y la tolerancia al estrés biótico y abiótico (Ali *et al.*, 2021). El efecto bioestimulante de las algas marinas promueve la germinación, crecimiento y rendimiento de las plantas, aumento de los niveles de clorofila y floración. También aumenta el éxito de propagación de plantas *in vitro* estimula la resistencia de las plantas contra plagas y enfermedades (Halper *et al.*, 2015; Carrillo *et al.*, 2020). La aplicación de extractos de algas marinas en pimiento (Pal *et al.*, 2024), maíz (Trivedi *et al.*, 2018), trigo (Alharbi *et al.*, 2022) y tomate (Krid *et al.*, 2023), puede mejorar la resistencia a la falta de agua y reducir el impacto negativo en el rendimiento.

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de cuatro productos elaborados a base de algas marinas en plantas de pimiento sometidas a estrés hídrico y determinar su eficiencia para reducir los daños por estrés oxidativo.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, (latitud 12° 05' 06" Sur, longitud 76°56'53" Oeste), a 243 msnm, el ensayo se llevó a cabo entre el verano-otoño del año 2020. Las plantas fueron cultivadas bajo las siguientes condiciones climáticas: radiación solar 171.97 watt m⁻², rango de temperatura: 25.9 °C máx. y 17.1 °C mín; promedio de temperaturas: 23.7 °C diurna, 21.5 °C nocturna; humedad relativa promedio: máx. 94.0%, mín. 68.7%; evaporación 2.7 mm; precipitación 2.6 mm, datos proporcionados por la estación meteorológica Alexander Von Humboldt de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Bioensayo

Se evaluó la variedad de pimiento (*Capsicum annuum* L.) 2290 F1, de la empresa Erma Zaden, de crecimiento determinado, por su resistencia a virus, buenas características del fruto y buen rendimiento. Las semillas fueron sembradas en vasos de poliuretano expandido de 6 onzas conteniendo arena de cantera lavada y tamizada, la siembra fue realizada en febrero del 2020. Después de la germinación, las plántulas fueron regadas por tres días con agua y luego con solución nutritiva; se usó como base la solución hidropónica La Molina (Valderrama *et al.*, 2020)

El transplante se dio a los 30 días después de la siembra, las plantas fueron colocadas en macetas plásticas de 20 cm de diámetro por 15.5 cm de alto, en un sustrato de arena de cantera con partículas de 0.5 a

1 mm de diámetro. A los 30 días del trasplante, las plantas cultivadas con los tratamientos Control y Estrés Hídrico fueron regadas con solución nutritiva diariamente y cada tres días, respectivamente. En cada riego las plantas recibieron 200 ml de solución nutritiva. Las plantas del tratamiento Control recibieron durante el ensayo 63 riegos, haciendo un volumen total de 12 600 ml/planta; las plantas del tratamiento de Estrés Hídrico recibieron 45 riegos, haciendo un volumen total de 9 000 ml/planta.

Las plantas fueron regadas con una solución nutritiva con las siguientes concentraciones ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$): N 170, P 40, K 250, Ca 160, Mg 40, S 98, Fe 1.5, Mn 1.0, B 1.0, Zn 0.20, Cu 0.15 y Mo 0.1. La solución nutritiva fue ajustada según la fenología del cultivo. Durante la etapa de floración, se incrementaron las concentraciones de fósforo y potasio a 45 y 300 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ respectivamente. En la etapa de fructificación, el potasio aumento a 350 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Los valores de pH variaron entre 6.0 y 6.5, y la conductividad eléctrica entre 2.0 y 2.2 dS m^{-1} .

Se evaluaron cuatro productos foliares a base de algas marinas: Fertimar (*Lessonia* sp.), Fertimar SC (*Lessonia* sp. y *Macrocystis* sp.), EA 1000-13 (extracción glicólico-alcalina de *Macrocystis* sp.) y Fertikelp (extracción glicólico-alcanina neutralizada de *Macrocystis* sp.); los cuales fueron aplicados via foliar en tres momentos o etapas de crecimiento: 1) al inicio del estrés hídrico (30 días después del trasplante), 2) a los 45 días después del trasplante y 3) a los 60 días después del trasplante. Estos bioestimulantes están compuestos de macronutrientes, micronutrientes, aminoácidos, hormonas, betainas, vitaminas y carbohidratos según la información proporcionada por el fabricante PSW S.A.

Los tratamientos con bioestimulantes fueron los siguientes:

Sin estrés hídrico: 1) Control (sin aplicaciones), 2) Fertimar (2.5 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$), 3) Fertimar SC (5 $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$), 4) EA 1000-13 (5 $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$) y Fertikelp (5 $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$). Estas concentraciones fueron recomendadas por la empresa productora de los bioestimulantes.

Con estrés hídrico: 1) Control (sin aplicaciones), 2) Fertimar (2.5 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$), 3) Fertimar SC (5 $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$), 4) EA 1000-13 (5 $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$) y Fertikelp (5 $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$).

Siendo un total de 10 tratamientos con cinco repeticiones.

Análisis del crecimiento y rendimiento

A los seis meses (al final del experimento), se evaluó el crecimiento y rendimiento de las plantas, para ello, se evaluaron las siguientes variables: peso seco (g) de hojas, tallos, raíces y frutos; longitud (cm) de tallo. Los pesos secos se obtuvieron secando las muestras en una estufa a 70 °C por 72 horas.

Contenido relativo de clorofila

El contenido relativo de clorofila, fue medido con el equipo Minolta SPAD 502 Plus, en unidades SPAD. Se seleccionaron hojas enteras y sanas a dos tercios del

follaje de la planta, las mediciones fueron tomadas en las primeras horas de la mañana.

Determinación del contenido de prolina

El contenido de prolina se determinó según el método propuesto por Bates *et al.* (1973). Se extrajeron muestras de hojas (1 g) con ácido sulfosalicílico (3 % v/v), las cuales fueron filtradas con papel filtro Whatman #1. Las soluciones extraídas (2 ml) fueron hervidas por una hora agregando ácido acético glacial (2 ml) y ninhidrina (2 ml); luego se agregó tolueno frío (4 ml). La concentración de prolina fue medida con el espectrofotómetro a 520 nm y fue calculado como $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ de peso seco. Se usó como estándar L-prolina.

Actividad enzimática

Para evaluar el efecto del estrés hídrico, se determinó el contenido relativo de clorofila, actividad de la enzima nitrato reductasa (NR) y la actividad de enzimas antioxidantes (superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y guayacol peroxidasa (GPX)).

DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD LA NITRATO REDUCTASA (NR)

Para la determinación de la actividad de la enzima nitrato reductasa (NR, EC: 1.7.1.1) se utilizó el método recomendado por Neyra & Hageman (1974). Se obtuvieron muestras de 0.5 g de la tercera hoja superior, las cuales fueron cortadas en finos pedazos y se colocaron en 5 ml de solución incubadora a pH 7.5 en oscuridad por 60 minutos a 30 °C. A 2 ml de esta solución se agregó 1 ml de reactivo de nitritos (Sulfanilamida al 1 % en HCl 1.5 M y N-(1-naftil) etilen diamino dihidrocloruro) y 2 ml con agua destilada. Posteriormente se leyó a 540 nm, para obtener la curva de nitritos, para lo cual se utilizó una solución de 10 ppm N como NaNO_2 .

Enzimas antioxidantes

Para determinar el efecto del estrés hídrico, se evaluó la actividad de las enzimas superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y guayacol peroxidasa (GPX).

PREPARACIÓN DE EXTRACTO ENZIMÁTICO

Se pesó 3 g de tejido foliar apical, el cual fue pulverizado con nitrógeno líquido. El polvo resultante se resuspendió en 10 ml de buffer de extracción (buffer fosfato salino 25mM, pH 7.8, 0.8 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ de polivinilpirrolidona (PVPP) y EDTA 1mM), se centrifugó a 12 000 g durante 20 minutos a 4 °C. El sobrenadante se utilizó directamente para todos los ensayos.

DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD LA SUPERÓXIDO DISMUTASA (SOD)

Para la determinación de la enzima superóxido dismutasa (SOD, EC 1.15.1.1) se agregó 2.9 ml de buffer fosfato de sodio (50 mM, pH 7.8. metionina 13 mM, nitroazul de tetrazolio 75 μM , EDTA 10 μM , riboflavina 2 μM) a 0.1 ml de extracto enzimático. Las mezclas se iluminaron con luz durante 10 minutos y se determinó la absorbancia a 560 nm y 25 °C (Xing *et al.*, 2011).

DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD CATALASA (CAT)

Para la determinación de la actividad de la enzima catalasa (CAT, EC 1.11.1.6), se agregó 2 ml de buffer fosfato de sodio (50 mM, pH 7.0), 0.5 ml de H₂O₂ (40 mM) y 0.5 ml de extracto enzimático. Se medirá la disminución de la absorbancia a 240 nm y 25 °C (Xing *et al.*, 2011).

DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD LA GUAYACOL PEROXIDASA (GPX)

Para la determinación de guayacol peroxidasa (GPX, EC 1.11.1.7), se incubaron 0.5 ml de extracto enzimático en 2 ml de sustrato tamponado (fosfato de sodio 100 mM, pH 6.4 y guayacol 8 mM) durante 5 minutos a 30°C y luego se midió el aumento de absorbancia a 460 nm cada 30 segundos durante 120 segundos después de agregar 1 ml de H₂O₂ (24 mM). La actividad de POD se expresa como U/g PF, donde U = 0.01*ΔAbs_{470nm} por minuto.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías (2 frecuencias de riego y 4 bioestimulantes + sin aplicación). La prueba de normalidad y distribución se comprobó con la prueba Shapiro-Wilk y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey al 0.05%. El número total de plantas fue 50. Los datos fueron analizados con el programa estadístico SAS V. 9.2.

Resultados y discusión

Durante el experimento, se observó pérdida de turgencia en las plantas sometidas a los tratamientos de riego restringido, sobre todo en horas de altas temperaturas y radiación, a diferencia de las plantas con riego continuo. La información sobre el crecimiento de las plantas de pimiento sometidas a estrés hídrico se

presenta en la Tabla 1. El factor bioestimulante influyó significativamente en la longitud del tallo y en los pesos secos de hojas, tallos y frutos. Entre bioestimulantes evaluados, Fertimar SC favoreció el incremento de materia seca en hojas y frutos; en el caso de la longitud y peso seco de tallo, el más favorable fue EA-1000-13, con respecto a los otros bioestimulantes.

A pesar de que hubo diferencias significativas en los factores independientes, no se observó en la interacción de los factores. Esto sugiere que los bioestimulantes favorecerían en la acumulación de biomasa bajo condiciones de estrés, observándose una tendencia positiva con Fertimar SC para peso seco de hojas, frutos y total; en contraste con el tratamiento sin aplicaciones que presentó los valores más bajos (Tabla 1).

Estos resultados coinciden con lo reportado por Maraei *et al.* (2019), en el cual aplicaron extractos foliares de algas en pimiento y resultó en un mayor crecimiento vegetativo de las plantas; y la longitud, diámetro y rendimiento de los frutos, principalmente en concentraciones aplicadas de 1 g·l⁻¹, diferente a la concentración aplicada (2.5 g·l⁻¹) en el ensayo del bioestimulante sólido de Fertimar en condiciones no estresantes. De manera similar, Melo *et al.* (2020), reportaron que la aplicación foliar de 0.5% de extractos de algas marinas mejoró el crecimiento y el rendimiento en plantas de pimiento cultivadas en invernadero.

En otros cultivos también se ha evidenciado efectos similares en trigo, los efectos del estrés por sequía, en el peso fresco y seco, disminuyó considerablemente con la aplicación de extracto acuoso de algas de las especies *Corallina elongate* y *Sargassum latifolium* (Alharbi *et al.*, 2022).

Tabla 1. Efecto de la aplicación de bioestimulantes a base de algas marinas sobre el crecimiento en plantas de pimiento sometidas a estrés hídrico.

	Longitud de tallo (cm)	Peso Seco Hojas (g)	Peso Seco Tallo (g)	Peso Seco Frutos (g)	Peso Seco Total (g)
Efecto Principal					
Frecuencia Riego	*	*	NS	NS	NS
Riego continuo	53.75a	4.58a	5.08	8.80	18.04
Riego cada tres días (estrés hídrico)	48.42b	4.10b	4.62	8.11	18.57
D.S.M.	3.48	0.37	0.52	1.07	1.17
Bioestimulante	**	**	*	*	NS
Sin aplicaciones	44.44b	3.58b	4.22b	6.71b	17.34
Fertimar	50.18ab	4.38b	4.93ab	8.90a	17.54
Fertimar SC	52.85a	5.23a	4.79ab	9.45a	19.13
EA 1000-13	57.61a	4.33b	5.64a	8.86a	18.57
Fertikelp	50.34ab	4.21b	4.68ab	8.37ab	18.92
D.S.M.	7.78	0.82	1.16	1.69	2.63
Interacciones					
Frecuencia Riego x Bioestimulante	NS	NS	NS	NS	NS

^z Promedios con las mismas letras, dentro de las columnas, son iguales de acuerdo con la Prueba de Tukey a P ≤ 0.05 y P ≤ 0.01. NS: no significativo; * significativo a P ≤ 0.05, ** altamente sinficativo a P ≤ 0.01. D.S.M.: Diferencia significativa mínima.

Pal *et al.* (2024) observaron que plantas de pimiento tratadas con algas marinas mejoraron el contenido relativo de agua 16% y el verdor de las hojas en 19%, con una menor pérdida de electrolitos (15%) a una conductividad eléctrica del agua de 12 dS m⁻¹, en comparación de las plantas no tratadas. Por otro lado, Trivardi *et al.* (2018) reportaron que la aplicación foliar de extracto de alga marina del género *Kappaphycus alvarezii* en plantas de maíz durante la etapa de llenado de grano, aumento el rendimiento en un 14% y 23%, en condiciones de estrés hídrico moderado y severo respectivamente. Así mismo, Krid *et al.* (2023) demostraron que la aplicación foliar de extractos de algas marinas de la especie *Jania rubens* en plantas de tomate cultivadas bajo condiciones salinas (50 mM de NaCl), favoreció el crecimiento, resaltando el potencial de las algas marinas en la mitigación del estrés salino.

El contenido de clorofila fue altamente significativo entre los dos tratamientos de frecuencia de riego, hubo una disminución en el contenido de clorofila en plantas sometidas a estrés hídrico (Tabla 2). Sin embargo, no hubo diferencias significativas en el factor bioestimulante (aunque el mejor valor fue para Fertimar SC) ni en la interacción de los factores, lo que indicaría que la aplicación de los bioestimulantes no tuvo mayor efecto en la concentración de clorofila. Cualquier condición de estrés afecta el aparato fotosintético, esto incluye a los pigmentos fotosintéticos, cadena transportadora de electrones, procesos de asimilación de CO₂ y enzimas, como consecuencia reduce la fotosíntesis, el crecimiento y la producción de biomasa (Ashraf & Harris, 2013). Los valores SPAD obtenidos en las plantas de pimiento fluctuaron entre 60.08 y 62.91 (Tabla 2). Da Silva-Costa *et al.* (2018) reportaron valores SPAD de 58.55 en plantas de pimiento sometidas a diferentes niveles de nitrógeno. El estrés hídrico, y otros tipos de estrés abiótico, disminuyen, también, el contenido de clorofila por un efecto inhibitorio en su síntesis (Jiang *et al.*, 2017). En plantas de trigo también se reportó una disminución en el contenido de clorofila a, clorofila b y carotenoides como respuesta al estrés hídrico a las que fueron sometidas (Alharbi *et al.*, 2022).

Un medidor de clorofila como el SPAD, mide el verdor de las hojas y puede reportar el contenido indirecto de clorofila que se puede relacionar con el contenido de nitrógeno de la planta (Vishwakarma *et al.*, 2023). Plantas con una nutrición adecuada de nitrógeno, magnesio, hierro y manganeso, tienen un mayor contenido de clorofila (valores SPAD) y se correlaciona con una mayor tasa fotosintética (Son *et al.*, 2016). Krid *et al.* (2023), observaron un aumento del contenido de clorofila, azúcares solubles totales y aminoácidos libres totales en plantas tratadas con algas en comparación a plantas no tratadas. En nuestros resultados, no se observó un incremento significativo del contenido de clorofila al aplicar diferentes

bioestimulantes pero se observó un ligero incremento en los valores SPAD (Tabla 2).

Por otro lado, el contenido de prolina para el efecto principal frecuencia de riego, con valores de 1.664 μmol·g⁻¹ PF para riego continuo y 2.643 μmol·g⁻¹ PF para estrés hídrico. El estrés hídrico provocó un incremento significativo en el contenido de prolina en las hojas (Tabla 2), coincidiendo con los resultados observados por Gunes *et al.* (1996), también en pimiento. La prolina es un aminoácido que puede acumularse en bajas concentraciones en condiciones óptimas (Escalante-Magaña *et al.*, 2019), induce a la disminución de las especies reactivas del oxígeno (ROS), estabiliza las estructuras subcelulares (Kishor *et al.*, 2005) y aumenta su concentración bajo condiciones de estrés (Verslues & Sharma, 2010). También regula el ajuste osmótico a nivel celular, protegiendo macromoléculas intracelulares de la deshidratación y eliminando radicales hidroxilo (Weisany *et al.*, 2012). Condiciones de estrés aumenta la actividad de las enzimas delta-1-pirrolina-5-carboxilato sintetasa (P5CS) y la delta-1-pirrolina-5-carboxilato reductasa (P5CR), importantes para la síntesis de prolina (Bandurska *et al.*, 2017, Kandpal, *et al.*, 1981). Pal *et al.* (2024), observaron un mayor contenido de prolina (79%) en plantas de pimiento tratadas con 5 g·l⁻¹ de algas marinas inoculadas con hongos micorrízicos arbusculares sobre plantas no inoculadas.

Tabla 2. Efecto de la aplicación de bioestimulantes a base de algas marinas en el contenido de clorofilas (SPAD) y prolina (μmol g⁻¹ PF) en plantas de pimiento sometidas a estrés hídrico.

	Clorofilas (SPAD)	Prolina (μmol·g ⁻¹ PF)
Efecto Principal		
Frecuencia Riego	**	*
Riego continuo	62.91a	1.664b
Riego cada tres días (estrés hídrico)	60.63b	2.643a
D.S.M.	1.614	0.739
Bioestimulante	NS	NS
Sin aplicaciones	60.08	2.247
Fertimar	62.49	2.138
Fertimar SC	62.88	1.982
EA 1000-13	61.39	1.570
Fertikelp	61.99	2.829
D.S.M.	3.606	1.659
Interacciones		
Frecuencia Riego x Bioestimulante	NS	NS

^z Promedios con las mismas letras, dentro de las columnas, son iguales de acuerdo con la Prueba de Tukey a P ≤ 0.05.

NS: no significativo; *: significativo a P ≤ 0.05, ** altamente significativo a P ≤ 0.01.

D.S.M. diferencia significativa mínima.

Aunque el factor bioestimulante no resultó estadísticamente significativo, la Figura 1 muestra una tendencia interesante en el contenido de prolina en

hojas. En particular el tratamiento con EA 1000-13 tuvo un mejor efecto al contrarrestar el efecto del estrés hídrico al tener una menor concentración de prolina lo cual podría ser beneficioso para las plantas de pimiento a diferencia de los bioestimulantes Fertimar SC y Fertikelp. Esto se debe a una disminución de la concentración de prolina indicaría un equilibrio en el estatus hídrico de la planta. Resultados similares los obtuvo Zuzunaga-Rosas *et al.* (2022), logrando la disminución del contenido de prolina bajo condiciones de estrés salino, aplicando BALOX™ un bioestimulante comercial, coincidiendo con una disminución del estrés oxidativo.

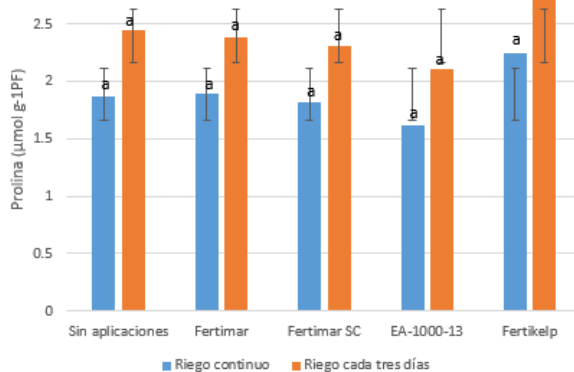


Figura 1. Interacción de los factores frecuencia de riego y bioestimulantes sobre el contenido de prolina ($\mu\text{mol g}^{-1}$ PF) en plantas pimiento. Datos promedio para cinco repeticiones (\pm EE). Las letras en la figura representan las diferencias significativas a $p < 0.05$.

Los niveles de concentración de prolina en las plantas de pimiento sin estrés fluctuaron entre 246 y 362 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ de peso seco; mientras que, en plantas estresadas, luego de haber sido sometidas al estrés por 14 días, fluctuaron entre 383 y 391 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ de peso seco (Escalante-Magaña *et al.*, 2019). Los valores de prolina que obtuvimos en el ensayo fluctuaron entre 1.12 y 2.57 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ de peso fresco en plantas no estresadas; mientras que, en plantas estresadas, fluctuaron entre 1.64 y 3.38 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ de peso fresco (Figura 1). La prolina elimina las especies reactivas del oxígeno (ROS) y ayuda a estabilizar las estructuras subcelulares (Kishor *et al.*, 2005).

La enzima nitrato reductasa (NR) es clave para la asimilación del nitrógeno en forma de nitrato (NO_3^-) y éste es el principal sustrato para la señalización en la forma de óxido nítrico (NO) (Chamizo-Ampudia *et al.*, 2017). El NO es un compuesto que controla diversos procesos fisiológicos en las plantas durante el estrés, mejora el sistema de defensa antioxidante activando enzimas antioxidantes como la SOD, CAT y APOX (Kour *et al.*, 2023)

En este estudio se encontró que el estrés hídrico aumentó la actividad enzimática de las enzimas

evaluadas, siendo significativo la actividad de la enzima SOD para el efecto principal frecuencia de riego (Tabla 3). La actividad enzimática de las enzimas NR, GPX y CAT fueron altamente significativas teniendo como efecto principal el factor bioestimulante. Es importante destacar que las enzimas SOD y GPX, que tienen una distribución más amplia a nivel celular y apoplasto, mostrando una mayor sensibilidad al estrés hídrico que la CAT (Sofó *et al.*, 2015). La CAT se encuentra localizada en los peroxisomas donde ocurre la fotorrespiración y suele a incrementarse ante un estrés más severo. El aumento de fotorrespiración mitiga el exceso de energía en la cadena transportadora de electrones que puede conducir a la inhibición de la fotosíntesis. Al incrementar la fotorrespiración también se incrementa la actividad de la CAT debido a la oxidación del glicolato en el peroxisoma, que conduce a la producción de H_2O_2 . Bajo condiciones de estrés leve, otras enzimas antioxidantes como GPX y SOD se encargan de la eliminación de las ROS (Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

Del mismo modo, aunque el efecto del factor bioestimulante no resultó significativo, las Figuras 2, 3 y 4 muestran las tendencias de las interacciones de los factores en la actividad enzimática de la GPX, la CAT y la SOD, respectivamente. En la Figura 2 se puede apreciar que la actividad de GPX aumenta bajo condiciones de estrés hídrico mostrando mejores resultados con Fertikelp y EA 1000-13, lo que se relaciona con la disminución de la actividad de la CAT para los mismos tratamientos (Figura 3). En la Figura 4 se muestra que la actividad de la enzima SOD también aumenta bajo condiciones de estrés hídrico para los tratamientos con Fertikelp y Fertimar

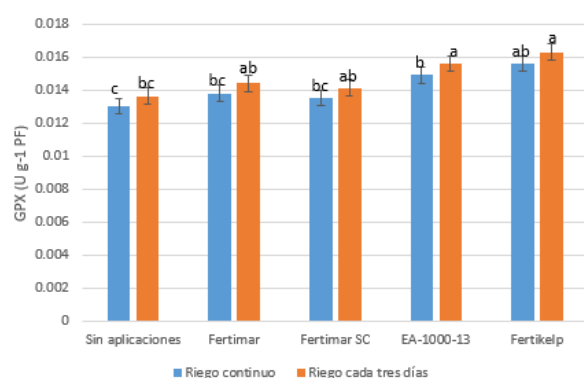


Figura 2. Interacción de los factores frecuencia de riego y bioestimulantes sobre la actividad de la enzima GPX ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ PF) en plantas de pimiento. Datos promedio para cinco repeticiones (\pm EE). Las letras en la figura representan las diferencias significativas a $p < 0.05$.

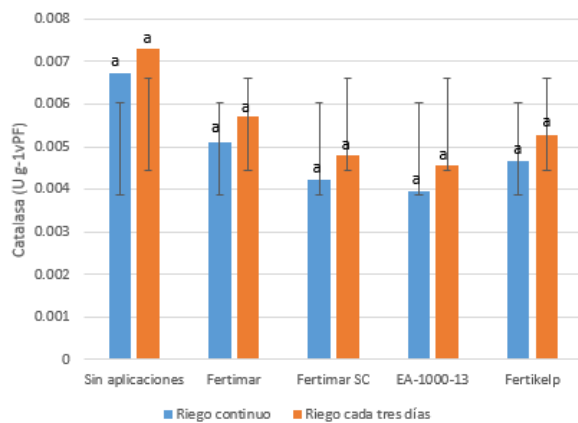


Figura 3. Interacción de los factores frecuencia de riego y bioestimulantes sobre la actividad de la enzima CAT ($U \cdot g^{-1} PF$) en plantas de pimienta. Datos promedio para cinco repeticiones ($\pm EE$). Las letras en la figura representan las diferencias significativas a $p < 0.05$.

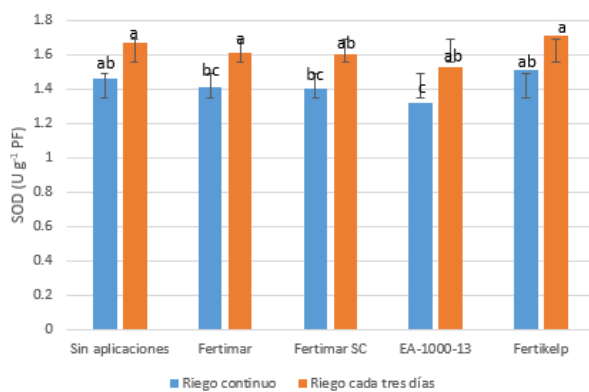


Figura 4. Interacción de los factores frecuencia de riego y bioestimulantes sobre la actividad de la enzima SOD ($U \cdot g^{-1} PF$) en plantas de pimienta. Datos promedio para cinco repeticiones ($\pm EE$). Las letras en la figura representan las diferencias significativas a $p < 0.05$.

Según Yildiztekin *et al.* (2018), la aplicación de extractos de algas pardas combinadas ácido húmico en plantas de pimienta sometidas a estrés salino promovió el crecimiento vegetativo y el incremento de la actividad de las enzimas antioxidantes SOD, peroxidasas y CAT. En plantas de tomate estresadas tratadas con extractos de algas, mejoró significativamente las actividades de las enzimas SOD, GPX y glutatión S-transferasa (Krid *et al.*, 2023). La enzima GPX cumple un rol central al convertir el peróxido de hidrógeno en agua y oxida el ascorbato y fenoles (incluidos los flavonoides) (Van Doorm & Ketsa, 2014). Según Bela *et al.* (2022), esta enzima proporciona un mecanismo para la desintoxicación de peróxidos a nivel celular, protegiéndolas del daño causado por los radicales libres que se forman por la descomposición del peróxido de hidrógeno. Resultados

similares fueron reportados por Lofti *et al.* (2010) quienes encontraron un aumento de la enzima GPX aumentó en hojas y raíces de árboles de nuez sometidos a estrés hídrico.

En nuestro estudio, la aplicación de los cuatro bioestimulantes evaluados provocaron una disminución significativa de la actividad enzimática de la CAT. Por otro lado, la aplicación de Fertimar SC, EA 1000-13 y Fertikelp incrementaron significativamente la actividad de la enzima NR y; mientras que, la aplicación de los bioestimulantes EA 1000-13 y Fertikelp incrementaron significativamente la actividad de la enzima GPX y la actividad de la SOD se incrementó con Fertikelp (Tabla 3). En la interacción bioestimulante y frecuencia de riego, se obtuvo un efecto significativo con Fertikelp en la actividad de GPX ($0.0177 U \cdot g^{-1} PF$ con estrés hídrico versus $0.0135 U \cdot g^{-1} PF$ del control (sin aplicaciones) del estrés hídrico) y SOD ($1.907 U \cdot g^{-1} PF$ con estrés hídrico versus $1.299 U \cdot g^{-1} PF$ del control (sin aplicaciones) sin estrés hídrico). Fertikelp y EA 1000-13, tuvieron efecto positivo sobre el estrés oxidativo, ambos provenientes de *Macrocyctis* sp pero con diferente método de extracción.

Esto sugiere que estos bioestimulantes ayudarían a amortiguar el estrés oxidativo cuando las plantas de pimienta fueron sometidas a condiciones de déficit hídrico. El rol de algas como fuente activa de los bioestimulantes puede ser determinante en la modulación del estrés abiótico. Alharbi *et al.* (2022), observaron mayor actividad enzimática en las enzimas antioxidantes cuando las plantas de trigo fueron sometidas a estrés hídrico, pero la aplicación del extracto del alga *Cystoseira elongata* mostró una disminución significativa de la actividad antioxidante. Trivardi *et al.* (2018) observaron menor grado de estrés oxidativo en plantas de maíz tratadas con algas *Kappaphycus alvarezii*. Por otro lado, Heidari & Golpayegani (2012), observaron un aumento significativo en las enzimas CAT y GPX en plantas de albahaca sometidas a estrés hídrico equivalente al 40% de la capacidad de campo.

Conclusiones

Nuestros resultados indican que las condiciones de estrés hídrico que recibieron las plantas de pimienta provocaron la reducción del contenido de clorofila, un incremento en la concentración de prolina y el aumento de la actividad enzimática antioxidante, lo que demuestra una inducción del estrés oxidativo por falta de riego. La aplicación de bioestimulantes a base de algas marinas tuvo efectos positivos sobre el crecimiento por inducir tolerancia al estrés hídrico, regulando el ajuste osmótico mediante la disminución del contenido de prolina. Los bioestimulantes probados tienen un efecto positivo sobre la enzima NR y también, en la actividad de las enzimas antioxidantes GPX y SOD como primera línea de defensa reduciendo el

estrés oxidativo. Los resultados indican que las mejores fuentes de bioestimulantes para superar el daño por estrés oxidativo fueron Fertikelp y EA 1000-13.

Tabla 3. Efecto de la aplicación de bioestimulantes a base de algas marinas en la actividad enzimática en plantas de pimiento sometidas a estrés hídrico.

	NR ($\mu\text{mol}\cdot\text{NO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	GPX ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{PF}$)	CAT ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{PF}$)	SOD ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{PF}$)
Efecto Principal				
Frecuencia Riego	NS	NS	NS	**
Riego continuo	7.134	0.0138	0.00464	1.318b
Riego cada tres días (estrés hídrico)	8.611	0.0151	0.00582	1.724a
D.S.M.	1.954	0.0015	0.0013	0.179
Bioestimulante	**	**	**	NS
Sin aplicaciones	3.025b	0.0012c	0.0088a	1.606
Fertimar	7.105b	0.0137bc	0.0056b	1.501
Fertimar SC	10.872a	0.0131bc	0.0038b	1.484
EA 1000-13	8.886a	0.0159ab	0.0033b	1.324
Fertikelp	9.476a	0.0174a	0.0047b	1.693
D.S.M.	4.366	0.0033	0.0028	0.4036
Interacciones				
Frecuencia Riego x Bioestimulante	NS	*	NS	*

^z Promedios con las mismas letras, dentro de las columnas, son iguales de acuerdo con la Prueba de Tukey a $P \leq 0.05$.

NS: no significativo; *: significativo a ≤ 0.05 , **: altamente significativo a $P \leq 0.01$.

D.S.M. diferencia significativa mínima.

Literatura citada

- Alharbi K., Amin M.A., Ismail M.A., Ibrahim M.T.S., Hassan S.E.D., Fouda A., Eid, A.M. & Said, H.A. 2022. Alleviate the drought stress on *Triticum aestivum* L. using the algal extracts of *Sargassum latifolium* and *Corallina elongate* Versus the commercial algal products. *Life*. 12 (1757): 1-15. <https://doi.org/10.3390/life12111757>
- Ali O., Ramsubhag A., & Jayaraman J, 2021. Biostimulants properties of seaweed extracts in plants: implications towards sustainable crop production. *Plants* 10:531. <https://doi.org/10.3390/<>
- Ashraf M., & Harris P.J.C. 2013. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica* 51: 163–190. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6>
- Bandurska H.Z., Niedziela J., Pietrowska-Borek M., Nuc K., Chadzinikolau T. & Radzikowska-Kujawska, D. 2017. Regulation of proline biosynthesis and resistance to drought stress in two barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes of different origin. *Plant Physiology and Biochemistry* 118: 427-437. DOI: 10.1016/j.plaphy.2017.07.006
- Bates L.S., Waldren R.P. & Teare, I.D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil*, 39: 205-207. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00018060>
- Bela K., Riyazuddin R., & Csiszar J. 2022. Plant glutathione peroxidases: Non-Heme peroxidases with large functional flexibility as a core component of ROS-processing mechanisms and signalling. *Antioxidants* 11: 1624. <https://doi.org/10.3390/antiox11081624>
- Bojórquez-Quintal E., Velarde-Buendía A., Ku-González A., Carillo-Pech M., Ortega-Camacho D., Echevarría-Machado I., Pottosin I., & Martínez-Estévez M. 2014. Mechanisms of salt tolerance in habanero pepper plants (*Capsicum chinense* Jacq.): Proline accumulation, ions dynamics and sodium root-shoot partition and compartmentation. *Frontiers in Plant Science* 5: 1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00605>
- Campobenedetto C., Agliassa C., Mannino G., Vigliante L., Contartese V., Secchi F. & Berteau C. 2021. A biostimulant based on seaweed (*Ascophyllum nodosum* and *Laminaria digitate*) and yeast extracts mitigates water stress effects on tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE11060557>.
- Carrillo P., Ciarmiello L.F., Woodrow P.G., Corrado P.C., & Roupheal, Y. 2020. Enhancing sustainability by improving plant salt tolerance through macro- and micro-algal biostimulants. *Biology*, 9 (9): 253. <https://doi.org/10.3390/biology9090253>
- Caverzan A., Passaia, G., Rosa S.B., Ribeiro C.W., Lazzarotto F. & Margis-Pinheiro M. 2012. Plant responses to stresses: role of ascorbate peroxidase in the antioxidant protection. *Genet. Mol. Biol.* 35: 1011-1019. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572012000600016>
- Chamizo-Ampudia A., Sanz-Luque E., Llamas A., Galvan A. & Fernández E. 2017. Nitrate reductase regulates plant nitric oxide homeostasis. *Trends in Plant Sciences* 22(2):163-174. <https://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2016.12.001>.
- Da Silva-Costa F., Suassuna de Lima A., Dourado-Magalhães I., Garófalo-Chaves, L.H. & Carvalho-Guerra, H.O. 2018. Fruit production and SPAD index of pepper (*Capsicum annuum* L.) under nitrogen fertilizer doses. *Australian Journal of Crop Science*. 12 (1): 11-15. DOI:10.21475/ajcs.18.12.01.pne453

- Escalante-Magaña C., Aguilar-Caamal L., Echevarría-Machado I., Medina-Lara F., Sánchez-Cach L. & Martínez-Estévez M. 2019. Contribution of Glycine Betaine and Proline to Water Deficit Tolerance in Pepper Plants. *HortScience*. 54 (6): 1044-1054. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13955-19>
- Foyer C.H., & Noctor G. 2005. Oxidant and antioxidant signalling in plants: a re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. *Plant Cell Env.* 28:1056-1071. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01327>
- Gunes A., Inal, A. & Alpaslan M. 1996. Effect of salinity on stomata resistance, proline, and mineral composition of pepper. *J. Plant Nutrition* 19: 389-396. <https://doi.org/10.1080/01904169609365129>
- Hasanuzzaman M., Bhuyan M.H., Zulfiqar F., Raza A., Mohsin S.M., Mahmud J. A., Fujita M. & Fotopoulos V. 2020. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9(8), 681. doi.org/10.3390/antiox9080681
- Heidari M. & Golpayegani A. 2012. Effects of water stress and inoculation with plant promoting rhizobacteria (PGPR) on antioxidant status and photosynthetic pigments in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Saudi Societ of Agricultural Sciences* 11(1):57-61. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2011.09.001>
- Iqbal B., Hussain F., Khan M.S., Iqbal T., Shah W., Ali B., Syaad K.M. & Erasli S. 2023. Physiology of gamma-aminobutyric acid treated *Capsicum annuum* L. (sweet pepper) under induce drought stress. *PLoS ONE* 18(8):e0289900. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289900>
- Jiang C., Johkan M., Hohjo M., Tsukagoshi S. & Maruo T. 2017. A correlation analysis on chlorophyll content and SPAD value in tomato leaves. *HortResearch*, 71, 37-42. <https://doi.org/10.20776/S18808824-71-P37>
- Kandpal R.P., Vaidyanathan C.S., Kumar M.U., Sastry K.S. & Rao N. A. 1981. Alterations in the activities of the enzymes of proline metabolism in Ragi (*Eleusine coracana*) leaves during water stress. *J. Biosciences* 3 (4): 361-370. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02702623>
- Kishor P.B., Sangam S., Amrutha R.N., Laxmi P.S., Naidu K.R., Rao K.R. & Sreenivasulu N. 2005. Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: Its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Current of Science* 88 (3): 423-438. [doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02952](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02952)
- Kour J., Khanna K., Singh A.D., Dhiman S., Devi K., Sharma N., Madaan I., Kapoor N., Madaan I., Kaor N., Sirhind g. & Bhardwaj R. 2023. Nitric oxide as a modulator oxidative stress and antioxidative metabolism in plants. *En Khan M.I.R, Iqbal N., Poór P., Ferrante A., Singh V.P., Tripathi D.K. & Fotopoulos V. (Eds), Plant gasotransmitters and molecules with hormonal activity: Nitric oxide in developing plant stress resilience:91-124.* <https://doi.org/10.1016/B978-0323-91209-9.00011-7>.
- Krid A., Hallabi M., Ennoury A., Nhhala N., Nhiri M. & Zerrouk M. 2023. The potential of seaweed extracts as a biostimulant for improving salt stress tolerance of *Solanum lycopersicum* L. *South African Journal of Botany* 161 (3): 305-316. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.08.020>
- Lofti N., Vahdati K., Hassani D., Kholdebarin B. & Amiri R. 2010. Peroxidase, guaiacol peroxidase and ascorbate peroxidase activity accumulation in leaves and roots of walnut trees in response to drought stress. *Acta Horticulturae* 861: 309-316. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.861.42>
- Marai R., Eliwa N. & Aly A. 2019. Use of some biostimulants to improve the growth and chemical constituents of sweet pepper. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences* 13(1): 553-561. <https://doi.org/10.5219/1131>
- Melo P., Abreu C., Bhacevandziev K., Araujo G. & Pereira L. 2020. Biostimulant Effect of marine macroalgae bioextract on pepper grown in greenhouse. *Applied Sciences*. 10 (4052): 1-12. <https://doi.org/10.3390/app10114052>
- Moller I.M., Jensen P.E. & Hansson A. 2007. Oxidative modifications to cellular components in plants. *Ann. Rev. Plant Biol.* 58:459-481. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.58.032806.103946>
- Neyra C. & Hageman R. 1974. Dependence of Nitrite Reduction on Electron Transport Chloroplasts. *Plant Physiology*, 54(4), 480-483. [doi: 10.1104/pp.54.4.480](https://doi.org/10.1104/pp.54.4.480)
- Pal S.C., Hossain B., Mallick D., Bushra F., Abdullah R., Dash P.K. & Das D. 2024. Combined use of seaweed extract and arbuscular mycorrhizal fungi for alleviating salt stress in bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *Scientia Horticulturae* 325: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112597>
- Sanders G.J. & Arndt S.K. 2012. Osmotic adjustment under drought conditions. *En: Aroca R. (Eds). Plant responses to drought stress: 199-229.* <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0-8>.
- Sofa A.; Scopa A.; Nuzzaci M.; Vitti A. 2015. Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses. *International J. Molecular Sciences* 16, 13561-13578. [doi: 10.3390/ijms160613561](https://doi.org/10.3390/ijms160613561)
- Son K.H., Jeon Y.M. & Oh M.M. 2016. Application of Supplementary White and Pulsed Light-emitting Diodes to Lettuce Grown in a Plant Factory with Artificial Lighting. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 57(6): 560-572. DOI: 10.1007/s13580-016-0068-y
- Sun Y., Wang C., Chen H.Y.H & Ruan H. 2020. Responses of plant to water stress: a meta-analysis. *Frontiers in Plant Science* 11(978):1-8. DOI:10.3389/fpls.2020.00978.
- Trivedi K., Vijay-Anand K.G., Vaghela P. & Gosh A. 2018. Differential growth, yield and biochemical responses of maize to the exogenous application of *Kappaphycus alvarezii* seaweed extract, at grain-filling stage under normal and drought conditions. *Algal Research* 35: 236-244. DOI:10.1016/J.ALGAL.2018.08.027
- Valderrama A., Christian-Jacinto C. & Rodríguez-Delfín, A. 2020. Factorial design for preparing chitosan nanoparticles and its use for loading and controlled release of indole-3-acetic acid with effect on hydroponic lettuce crops. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 26: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101640>
- Van Doorn W.G. & Ketsa S. 2014. Cross reactivity between ascorbate peroxidase and phenol (guaiacol) peroxidase. *Postharvest Biology and Technology* 95: 64-69. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.04.002>

- Verslues P.E. & Sharma S. 2010. Proline Metabolism and Its Implications for Plant-Environment Interaction. The Arabidopsis Book. American Society of Plant Biologists. 23 p. <https://doi.org/10.1199/tab.0140>
- Vishwakarma M., Kulhare P.S. & Tagore G.S. 2023. Estimation of chlorophyll using SPAD meter. International Journal of Environment and Climate Change 13(11): 1901-1912. DOI: 10.9734/IJECC/2023/v13i113348.
- Weisany W., Sohrabi Y., Heidari G., Siosemardeh A. & Ghassemi-Golezani K. 2012. Changes in antioxidant enzymes activity and plant performance by salinity stress and zinc application in soybean (*Glycine max* L.). Plant Omics 5: 60-67.
- Xing Y., Li X., Xu Q., Yun J., Lu Y. & Tang Y. 2011. Effects of chitosan coating enriched with cinnamon oil on qualitative properties of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). Food Chemistry, 124(4), 1443–1450. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.07.105
- Yildiztekin M., Tuna A., Kaya C. 2018. Physiological effects of the brown seaweed *Ascophyllum nodosum* and humic substances on plant growth, enzyme activities of certain pepper plants grown under salt stress. Acta Biol Hung. 69 (3): 325-335. doi: 10.1556/018.68.2018.3.8.
- Zuzunaga-Rosas J., Tofei A.M., Boscaiu M., Moreno-Ramón H., Ibáñez-Asensio S. & Vicente O. (2022) Effect of a biostimulant based on polyphenols and glycine betaine on tomato plants responses to salt stress. Agronomy 12(9):2142. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092142>.

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina \ Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral. Av. La Molina s/n Lima – Perú.

² karen.chambilla.m@gmail.com. ORCID: 0009-0003-2054-3117.

³ milichang@lamolina.edu.pe . ORCID: 0000-0002-1854-6728.

⁴ delfin@lamolina.edu.pe. ORCID: 0000-0002-8515-4257.

⁵ PSW S.A. Av. Manuel Valle Mza. D19. Lote 1. Lurín. Lima - Perú.

⁶ sabinah@gmail.com. ORCID: 0000-0001-6895-6859.

⁷ juancarlos.bisbal@pswsa.com. ORCID: 0009-0008-5200-3584.