

Morfometría de *Salicornia bigelovii* (Torr.) bajo tratamientos de lombricomposta cultivada en un sistema tipo chinampa

Morphometrics of *Salicornia bigelovii* (Torr.) under vermicompost treatments cultivated in a chinampa-type system

Maura Fabiola Espinosa-Loredo¹ , Alejandra Nieto-Garibay^{1*} , Enrique Troyo-Diéguez¹ , Gregorio Lucero-Vega² , Marco Antonio Monroy-Ceseña² , Luis Bermúdez-Humaran³ 

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. Instituto Politécnico Nacional 195 Playa Palo de Santa Rita Sur, CP. 23050. La Paz, Baja California Sur, México.

²Universidad Autónoma de Baja California Sur, Carretera Sur KM 5.5, Fracc. El Calandrio, CP. 23085. La Paz, Baja California Sur, México.

³INRAE, Université Paris-Saclay, AgroParisTech, Micalis Institute, Jouy-en-Josas, 78352 Rue de la Manufacture, 78350 Jouy-en-Josas, Francia.

*Autor de correspondencia: anieto04@cibnor.mx

Artículo científico

Recibido: 16 de marzo 2026

Aceptado: 05 de agosto 2026

RESUMEN. Se estableció un experimento con el cultivo de *Salicornia bigelovii* (Torr.) en La Paz, Baja California Sur, con el objetivo de innovar la producción agro-acuícola marina mediante un sistema similar al de chinampa, para incrementar la productividad del agua. El protocolo se desarrolló en placas con sustrato para promover la absorción por capilaridad a través de malla antiáfidos, montadas en una estructura dividida en 15 bandejas hidropónicas, con aplicación de lombricomposta (Lc) como biofertilizante al 25, 50, 75 y 100% (25Lc, 50Lc, 75Lc y 100Lc) sobre sustrato arenoso y el control (100SA). El sistema hidropónico marino consistió en módulos flotantes instalados en un estanque con agua de mar, adaptados para densidades hasta de 750 plantas x estructura de 2.7 m². El rendimiento promedio se estimó para biomasa fresca por planta; las variables respuesta fueron el porcentaje de emergencia, longitud de parte aérea (LPA), grosor de tallo (GT), número de ramificaciones (NR), biomasa fresca (BF), biomasa seca (BS), clorofila 'a', clorofila 'b' y clorofila total. Los resultados indican que la Lombricomposta generó un efecto positivo sobre los pigmentos fotosintéticos. Las dosis altas de lombricomposta (75Lc y 100Lc) promovieron un aumento significativo en clorofila "a" y clorofila total, comparados con el control con sustrato de arena (100SA). Se observó un efecto significativo con Lc sobre la mayoría de variables morfológicas y de biomasa. Se detectaron diferencias altamente significativas en longitud de parte aérea, grosor de tallo y biomasa total ($p < 0.001$), reflejando una clara respuesta fisiológica de las plantas a Lc.

Palabras clave: Recurso costero, halófito, biomasa, hidroponía, agricultura hidrosalina.

ABSTRACT. An experiment was set up with the cultivation of the halophyte *Salicornia bigelovii* (Torr.) in La Paz, Baja California Sur, with the aim of innovating marine agro-aquaculture production using a system similar to that of chinampa, to increase water productivity in arid and coastal areas, using the floating root method. The protocol was developed on substrate plates to promote capillary absorption through anti-aphid mesh, mounted on a structure divided into 15 hydroponic trays, with the application of vermicompost as a biofertilizer at 25, 50, 75, and 100% (25Lc, 50Lc, 75Lc, and 100Lc) on sandy substrate and the control (100SA). The marine hydroponic system consisted of floating modules installed in a seawater pond, adapted for densities of up to 750 plants per 2.7 m² structure. Average yield was estimated for fresh biomass per plant; the response variables were emergence percentage, aerial part length (APL), stem thickness (ST), number of branches (NB), fresh biomass (FB), dry biomass (DB), chlorophyll 'a', chlorophyll 'b', and total chlorophyll. The results indicate that Lc has a positive effect on photosynthetic pigments. Higher levels (75Lc and 100Lc) promoted a significant increase in chlorophyll 'a' and total chlorophyll compared to the control with sand substrate (100SA). Significant differences were found in shoot length, stem diameter, and total biomass production ($p < 0.001$), indicating that the incorporation of Lc promoted a positive physiological response in the plants.

Keywords: Coastal resources, halophyte, biomass, hydroponics, hydrosaline agriculture.

Como citar: Espinosa-Loredo MF, Nieto-Garibay A, Troyo-Diéguez E, Lucero-Vega G, Monroy-Ceseña MA, Bermúdez-Humaran L (2026) Morfometría de *Salicornia bigelovii* (Torr.) bajo tratamientos de lombricomposta cultivada en un sistema tipo chinampa. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. VI: e5263. DOI: 10.19136/era.a13nVI.5263.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático y la sobreexplotación de los recursos hídricos han favorecido el incremento del nivel del mar y la salinización del suelo. Por este motivo, la disponibilidad de agua dulce ha disminuido de forma considerable (Cruz-Falcón *et al.* 2023), lo que significa un desafío para la producción agrícola y la seguridad alimentaria en el mundo (Garza-Torres *et al.* 2020). Ante esta situación, es necesario impulsar sistemas de producción agrícola más sostenibles que reduzcan la dependencia del agua dulce, sin competir con cultivos tradicionales por este recurso que es cada vez más escaso (Cortés-Jiménez *et al.* 2009). La especie *Salicornia bigelovii* (Torr.), de la familia Amaranthaceae, es reconocida por su adaptación a ambientes árido-salinos y por su necesidad de agua salobre o marina para completar su ciclo de vida (Beltrán *et al.* 2017, Turland *et al.* 2018), lo que la clasifica como halófito obligada (Méndez-Santos *et al.* 2024, Rueda-Puente *et al.* 2011).

La tolerancia a la salinidad en las halófitas es un rasgo complejo que implica muchos cambios fisiológicos y anatómicos en sus tejidos, que va desde la producción de solutos compatibles para mitigar el estrés osmótico, la compartimentación de iones tóxicos y la excreción mediante glándulas salinas especializadas (Meng *et al.* 2018). En México, su distribución natural se concentra principalmente en las costas del noroeste, como Baja California, Baja California Sur y Sonora (Rodríguez-Álvarez *et al.* 2022), creciendo en marismas, estuarios y suelos costeros inundables (Zhang *et al.* 2015). Debido a su adaptación a condiciones adversas, *S. bigelovii* puede cultivarse en regiones donde la disponibilidad de agua dulce es limitada y el suelo no es apto para la agricultura convencional. Mientras que, Lu *et al.* (2010) y Martin (2024) mencionan que *S. bigelovii* posee un alto contenido de minerales, fibra y compuestos nutraceuticos en su fracción aérea, superando en varios aspectos a hortalizas tradicionales como espinaca o acelga (Lyra *et al.* 2022). En relación con la agroecología, las halófitas como *S. bigelovii* representan una alternativa con beneficios ambientales y productivos. Su cultivo favorece la recuperación del suelo afectado por salinidad mediante la absorción de sales, además de disminuir la demanda sobre las reservas de agua dulce al utilizar agua salobre o marina (Rueda-Puente *et al.* 2011, Holguín *et al.* 2020). Además, este tipo de producción es sostenible debido a que contribuye a disminuir el impacto ambiental y a generar beneficios y oportunidades de empleo en estas regiones (Ventura y Sagi 2013, Cárdenas-Pérez *et al.* 2021). Estudios realizados en México han demostrado que *S. bigelovii* posee un importante potencial como cultivo económicamente viable para sistemas de producción en zonas áridas (Zapata-Sifuentes *et al.* 2021). Por este motivo, es fundamental evaluar su desempeño agronómico y productivo con el fin de promover su adopción como una alternativa innovadora frente a problemas como el cambio climático, la salinización del suelo y la creciente escasez de agua dulce (Castagnino y Marina 2021). Asimismo, la presente investigación propone un sistema experimental inspirado en el funcionamiento de las chinampas, el cual integra una estructura flotante, biofertilizante orgánico como nutriente y suministro continuo de agua de mar absorbida por capilaridad. Este sistema genera condiciones favorables para una óptima producción de biomasa y establece un vínculo entre el conocimiento tradicional de la agricultura mesoamericana y las propuestas innovadoras de la acuicultura marina, contribuyendo al desarrollo de sistemas agrícolas más resilientes, capaces de responder a los desafíos de la seguridad alimentaria en las zonas costeras (Rey-Hernández y Bobbink 2022). El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad productiva de un sistema acuícola marino similar a una chinampa para el cultivo de

Salicornia bigelovii bajo condiciones de raíz flotante. El experimento se centró en determinar el potencial del cultivo de *S. bigelovii* y su viabilidad como alternativa sostenible para la producción agrícola en ambientes con alta salinidad con limitada disponibilidad de agua dulce mediante el análisis de parámetros morfométricos y fisiológicos, así como la producción de biomasa aérea en sustrato enriquecido con lombricomposta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), durante el periodo primavera-verano de 2025, específicamente en los estanques litorales que se encuentran en la zona costera (Figura 1). El CIBNOR se encuentra ubicado al norte de la ciudad de La Paz, Baja California Sur, México. El sitio experimental se localiza en terrenos costeros de la zona de “El Comitán”, aproximadamente 17 km al oeste de la ciudad de La Paz (24°08' LN, 110°24' LO). La Paz, Baja California Sur, presenta principalmente un clima muy seco y cálido/semicálido, con una temperatura media anual de 23°C y lluvias escasas concentradas de julio a diciembre (185 mm anuales). Las temperaturas máximas en verano superan frecuentemente los 40°C, mientras que los inviernos son templados con temperaturas mínimas que pueden rondar los 10°C. Esta región se caracteriza por un clima árido cálido, con precipitaciones escasas e irregulares y altas temperaturas durante el verano, condiciones representativas de las zonas costeras áridas del noroeste de México (CONAGUA 2024).

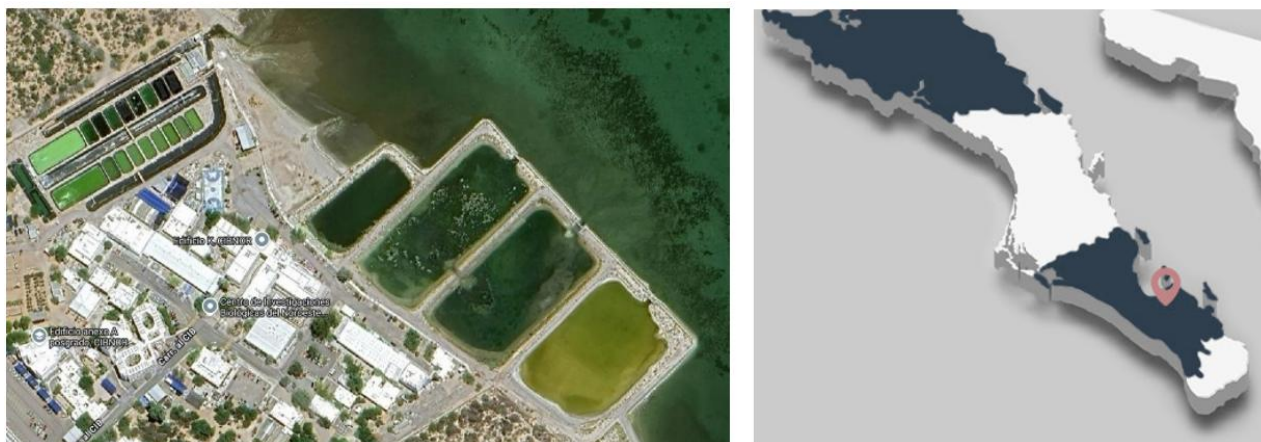


Figura 1. Estanques litorales donde se estableció el cultivo en chinampa y el CIBNOR en la península de Baja California Sur.

Especie evaluada

El experimento se realizó con la especie halófila *S. bigelovii* comúnmente llamado espárrago marino. Las semillas fueron recolectadas de poblaciones silvestres ubicadas en zonas costeras cercanas a los estanques litorales del CIBNOR, seleccionadas por su uniformidad morfológica y ausencia de daño visible. La recolección se realizó en los meses de septiembre y octubre de 2024. El material se mantuvo en refrigeración en el laboratorio de Fisiotecnia Vegetal hasta el momento de la siembra.

Diseño experimental, tratamientos y manejo de cultivo

El experimento se diseñó con un arreglo completamente al azar con tres repeticiones independientes por tratamiento. El tamaño de la parcela experimental fue de 2.7 m². Como factor de variación se utilizaron cuatro niveles cada uno con diferentes proporciones de lombricomposta en combinación con arena de mar, incluyendo un grupo control al 100% de arena. Las mezclas de los tratamientos consistieron en mezclas de lombricomposta con suelo arenoso en proporciones de 25%, 50%, 75% y 100% (Figura 2). La lombricomposta utilizada estaba certificada bajo la norma NOM-021-SEMARNAT-2000, suministrada por la empresa Organic Farm®. El experimento se desarrolló en una estructura acuícola marina bajo condiciones semi-controladas, con una superficie total de 2.7 m², construida con tubos de PVC de 10 cm (4 pulgadas) y malla antiáfidos como soporte para asegurar la estabilidad del sistema. Sobre la estructura se colocaron 15 bandejas de poliestireno (28 cm × 54 cm × 4.2 cm) adaptadas a 50 cavidades cada una, donde se depositaron 6.5 kg de la mezcla en total por cada bandeja. La unidad experimental correspondió a cada bandeja de cultivo sometida a un tratamiento específico de lombricomposta. Se utilizó agua de mar como fuente de riego en absorción por capilaridad. En cada bandeja se distribuyeron 2.5 g de semillas (3750 semillas) de *S. bigelovii*, esparcidas al voleo. El cultivo se estableció a pequeña escala en el segundo estanque litoral del CIBNOR, donde la estructura flotante tipo chinampa se colocó en el primer cuadrante del estanque. Para su instalación se empleó un sistema de polea con cuerda de piola de 2 cm de diámetro, lo que permitió arrastrar la estructura sobre la superficie del estanque y facilitar la absorción capilar de agua de mar por las raíces (Figura 2).

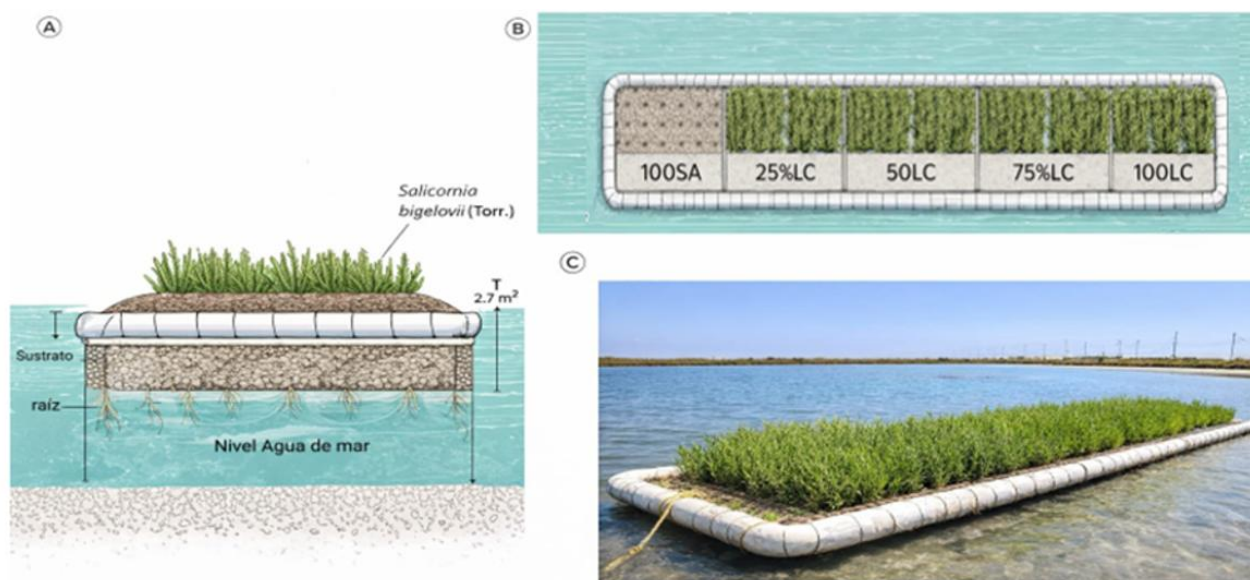


Figura 2. Diseño experimental del cultivo de *Salicornia bigelovii* en una estructura flotante tipo chinampa con riego por capilaridad desde agua de mar. A) disposición corrida en la plataforma; B) unidades experimentales y tratamientos (Control 100SA, 25LC, 50LC, 75LC y 100LC) tres repeticiones; C) sistema instalado en campo.

Variables de respuesta evaluadas

Se evaluaron variables de emergencia, morfométricas, fisiológicas y de rendimiento en plántulas de *S. bigelovii*. Las plántulas se midieron a los 90 días después de la emergencia, en ese momento, presentaron una longitud promedio inicial de 20 cm (considerando únicamente la parte aérea). A

partir de esta altura, se realizaron las mediciones de las variables evaluadas (Figura 3). Las variables morfológicas incluyeron longitud de la parte aérea (LPA), grosor del tallo (GT) y número de ramificaciones (NR). La LPA se determinó mediante medición directa con regla graduada (cm) desde el cuello radicular hasta el ápice foliar; el GT se midió con un vernier digital (GENERAL modelo 142, Japón) a 2 cm de la base del tallo (mm); y el NR se obtuvo por conteo directo, asegurando una distribución uniforme de las ramificaciones y hojas filamentosas. Asimismo, se cuantificaron los parámetros de biomasa fresca (BF) y biomasa seca (BS) utilizando una balanza analítica de precisión (Mettler Toledo, modelo AG204, Suiza). La BS se obtuvo tras un proceso de secado en horno de convección a 70 °C durante 40 h en el Laboratorio de Fisiotécnica. Se analizaron pigmentos fotosintéticos mediante la determinación de los contenidos de clorofilas a, b y totales, a través de extracción y cuantificación espectrofotométrica con un espectrofotómetro de UV/Visible (Pye Unicam SP6-550, UK). La producción total de biomasa fresca se calculó con base en 661 plantas cosechadas, obteniéndose un peso promedio de 22.389 g por planta.



Figura 3. Plantas de *S. bigelovii* en estructura acuícola marina tipo chinampa flotando en estanque listas para medición de variables de respuesta, con tratamientos de lombricomposta de 25%, 50%, 75% y 100%.

Medición de la emergencia

Durante la fase inicial del cultivo se evaluaron indicadores fisiológicos de establecimiento, específicamente, se evaluó el porcentaje de emergencia y el Tiempo Medio de Emergencia (TME). La emergencia se definió como el número de plántulas visibles respecto al total de semillas sembradas (3 750 semillas) y se calculó conforme a la fórmula: Emergencia (%) = (plántulas emergidas / semillas sembradas) × 100. El experimento se desarrolló en condiciones semicontroladas utilizando bandejas de poliestireno y tres tratamientos con distintas proporciones de sustrato arenoso (SA) y lombricomposta (Lc), siguiendo los lineamientos de evaluación fisiológica de semillas establecidos por ISTA (2026) para ambientes salinos. La aparición de plántulas se registró el 15 de marzo, correspondiente a 12 días posteriores a la siembra, lo que permitió determinar el TME para cada tratamiento. La emergencia se clasificó cada semilla como emergida y no emergida. De esta forma, se expresó como la cantidad de plántulas emergidas con respecto al total de semillas sembradas ($p = \text{plántulas emergidas/semillas sembradas}$). Para comparar la probabilidad de emergencia entre el tratamiento control y los tratamientos con lombricomposta, para obtener el resultado se calculó el momio (Odds = $p / (1-p)$) y la razón de momios (Odds Ratio = OR), utilizando el tratamiento control como referencia de acuerdo con la metodología de Cerda *et al.* (2013). Las diferencias entre tratamientos se analizaron mediante la prueba de chi cuadrado para tablas de doble entrada con dos categorías de respuesta y dos grupos de comparación (control y tratamiento), y el intervalo de confianza de 95% del OR se obtuvo mediante el logaritmo estándar. Se consideró un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Medición de parámetros de clorofila

La cuantificación del contenido de clorofila en *S. bigelovii* se realizó al final del experimento, tras 90 días de crecimiento después de la emergencia, evaluando la parte aérea de las ramificaciones secundarias en cada tratamiento y en el control. El contenido de clorofila a, b y total se determinó con un medido portátil de clorofila y un espectrofotómetro UV/ Visible (Pye Unicam SP 550, Reino Unido), siguiendo el procedimiento descrito por Rodríguez-Álvarez *et al.* (2022). Para el procedimiento se tomaron 0.1g de biomasa fresca, y se colocó en 5 mL de acetona al 80% (v/v) y se mantuvo en oscuridad total por 72 horas para favorecer la extracción de los pigmentos. La cantidad de biomasa empleada fue equivalente a un tercio del tejido vegetal. Transcurrido el tiempo de extracción, las lecturas de absorbancia se registraron a 663, 645, 665 y 649 nm en el espectrofotómetro, y el contenido de clorofilas se calculó con las ecuaciones propuestas por Strain y Svec (1966): Chl a (mg mL^{-1}) = $11.64 \times A_{663} - 2.16 \times A_{645}$; Chl b (mg mL^{-1}) = $20.97 \times A_{645} - 3.94 \times A_{663}$; Chl total (mg mL^{-1}) = $6.45 \times A_{665} - 17.71 \times A_{649}$.

Medición morfométrica

La evaluación morfométrica incluyó la medición de altura de planta (cm), número de ramificaciones, así como la biomasa fresca y seca al final del experimento. Las mediciones se realizaron con calibrador vernier, cinta métrica, báscula de precisión y balanza analítica. Se establecieron condiciones para el crecimiento de 50 plantas por tratamiento. La altura se midió semanalmente desde las 2 hasta las 12 semanas posteriores a la emergencia (15-90 días después de la siembra). La cosecha se realizó cuando las plantas alcanzaron más de 20 cm de altura, etapa asociada con mayor concentración de nutrientes y compuestos funcionales (Ventura y Sagi 2013). Posteriormente, las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Fisiotecnia vegetal del CIBNOR, donde se determinó la morfometría, biomasa fresca y seca, y composición química proximal para evaluar su potencial como alimento funcional.

Análisis estadístico

Derivado del diseño experimental completamente al azar, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) unifactorial para evaluar el efecto de las diferentes concentraciones de lombricomposta sobre las variables de crecimiento y los parámetros de clorofila del cultivo. La variable independiente fue la concentración de lombricomposta, mientras que las variables dependientes correspondieron a los rasgos de crecimiento y contenido de clorofila evaluados. Las comparaciones múltiples se realizaron mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software PAST Pro.

RESULTADOS

Debido a la ausencia de variabilidad en los tratamientos suplementados con lombricomposta, no fue posible aplicar ANOVA paramétrico. Sin embargo, el análisis descriptivo evidenció un incremento consistente en el porcentaje de emergencia (20%) respecto al control (8.13%), lo que representó un aumento del 146%.

En el tratamiento control (100SA) se registró un total de 61 plántulas emergidas (14 + 21 + 26) de un total de 750 semillas sembradas, lo que representa una proporción de emergencia de 0.0813 en el tratamiento control. En contraste, en el tratamiento con lombricomposta, considerando todos los niveles evaluados, se obtuvo un total de 600 plántulas emergidas (50 × 12) a partir de 3000 semillas sembradas con una proporción de emergencia (Lc) de 0.20. A partir de estas proporciones se calcularon los momios (odds) de emergencia para cada tratamiento. En el control, los momios fueron de 0.0885 [0.0813/(1-0.0813)], mientras que en lombricomposta fueron de 0.25 [0.20/(1-0.20)]. La razón de momios fue de 2.82 (0.25/0.0885), lo que indica que la probabilidad relativa de emergencia fue aproximadamente 2.8 veces mayor en el tratamiento con lombricomposta en comparación con el control (Tabla 1). La incorporación de lombricomposta incrementó significativamente la emergencia de plántulas en comparación con el tratamiento control. En el control (100SA) emergieron 61 de 750 semillas sembradas, lo que correspondió a una proporción de 8.13%. En contraste, los tratamientos con lombricomposta presentaron 600 plántulas emergidas de 3 000 semillas, alcanzando una proporción de 20.0%. El análisis de momios mostró valores de 0.0885 para el control y 0.25 para lombricomposta. La razón de momios indicó que la probabilidad de emergencia fue 2.82 veces mayor en presencia de lombricomposta respecto al control (OR = 2.82; IC 95%: 2.14–3.72; $p < 0.0001$). La incorporación de lombricomposta incrementó significativamente el porcentaje de emergencia ($p < 0.0001$), aumentando 2.8 veces la probabilidad de establecimiento respecto al control, sin observarse respuesta dosis-dependiente entre los niveles evaluados.

Tabla 1. Resultado del análisis de razón de momios (OR) de la emergencia de plántulas entre el tratamiento control (100SA) y lombricomposta.

Tratamiento	Semillas sembradas (n)	Plántulas emergidas (n)	Emergencia (%)	Momios (odds)	OR (IC 95 %)	p
Control (100SA)	750	61	8.13	0.0885	1.00	—
Lombricomposta	3000	600	20.00	0.25	2.82 (2.14–3.72)	<0.0001

Emergencia (%) = (plántulas emergidas / semillas sembradas) × 100. Momios (odds) = $p / (1 - p)$. OR = razón de momios respecto al tratamiento control. IC = intervalo de confianza al 95 %.

El contenido de clorofila a mostró diferencias significativas entre tratamientos ($F_{4,10} = 7.72$, $p = 0.004$), evidenciando un efecto claro de la proporción de lombricomposta. Los tratamientos con 50%, 75% y 100% de lombricomposta presentaron valores significativamente mayores en comparación con el control 100SA, mientras que 25Lc mostró una respuesta intermedia, sin diferir estadísticamente ni del control ni de las dosis superiores. El mayor contenido se registró en 100Lc ($164.53 \pm 33.08 \mu\text{g g}^{-1}$), y el menor en el control ($67.66 \pm 21.77 \mu\text{g g}^{-1}$). El tamaño del efecto obtenido fue alto ($w^2 = 0.64$), esto significa que el tratamiento explicó alrededor del 64% de la variación observada en esta variable. De esta forma, el coeficiente de correlación intraclass presentó un valor elevado de ICC = 0.69, evidenciando una influencia positiva del tratamiento. En este contexto, el factor de Bayes (BF = 15) mostró una evidencia robusta de que las diferencias entre medias fueron reales, respaldando los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico. Por otro lado, la clorofila b no mostró diferencias significativas entre tratamientos (Tukey, $p > 0.05$), lo que representa menor respuesta a las distintas concentraciones de lombricomposta. Se observó un incremento en el contenido de clorofila conforme aumentó la concentración de lombricomposta, alcanzando el valor más alto en el tratamiento 75Lc ($59.20 \pm 15.39 \mu\text{g g}^{-1}$), la variabilidad registrada

dentro de los tratamientos ($CV = 67.78\%$), limitó la capacidad de análisis para detectar diferencias estadísticas. En relación con este resultado, el tamaño del efecto fue reducido y el factor de Bayes no presentó evidencia suficiente para descartar la hipótesis de igualdad entre medias, lo que significa que el contenido de clorofilas b permaneció estable bajo las condiciones estimadas.

Se encontraron diferencias significativas en el contenido de clorofila total entre los tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$). La tendencia fue semejante a la encontrada para clorofila a, destacando el tratamiento 75Lc ($196.27 \pm 6.38 \mu\text{g g}^{-1}$) y 100Lc ($217.64 \pm 37.29 \mu\text{g g}^{-1}$) que presentaron los valores más elevados y difirieron del control ($100.51 \pm 44.01 \mu\text{g g}^{-1}$), mientras que 25Lc y 50Lc se ubicaron en un nivel intermedio sin diferir estadísticamente de los extremos. El valor de $w^2 (= 0.24)$ indicó que la lombricomposta representa una proporción importante de la variación observada en el contenido total de pigmentos fotosintéticos. En este contexto, el incremento en clorofila a fue la principal causa del aumento en la clorofila total, lo que evidencia la respuesta fisiológica de *S. bigelovii* a la incorporación de lombricomposta (Tabla 2).

Tabla 2. Concentración de clorofila a, b y total en $\mu\text{g/g}^{-1}$, en *S. bigelovii* con tratamientos de lombricomposta

Tratamiento	Clorofila a ($\mu\text{g/g}^{-1}$)	Clorofila b ($\mu\text{g/g}^{-1}$)	Clorofila total ($\mu\text{g/g}^{-1}$)
100SA	67.66 ± 21.77^b	32.85 ± 22.26^a	100.51 ± 44.01^b
25Lc	108.59 ± 8.96^{ab}	36.78 ± 1.79^a	145.37 ± 10.67^{ab}
50Lc	140.24 ± 29.81^a	43.77 ± 7.91^a	184.01 ± 37.39^{ab}
75Lc	137.07 ± 11.31^a	59.20 ± 15.39^a	196.27 ± 6.38^a
100Lc	164.53 ± 33.08^a	53.10 ± 4.60^a	217.64 ± 37.29^a

Valores expresados como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

La longitud de la parte aérea presentó diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F_{4,10} = 660.8$, $p = 4.55 \times 10^{-12}$). El tamaño del efecto fue extremadamente grande ($\omega^2 = 0.9943$), indicando que el 99.43 % de la variación total fue explicada por la proporción de lombricomposta. Asimismo, el coeficiente de correlación intraclase fue muy elevado ($ICC = 0.995$), evidenciando una fuerte estructuración de los datos por efecto del tratamiento. El factor de Bayes ($BF = 1.21 \times 10^9$) aportó evidencia decisiva a favor de diferencias reales entre medias. La prueba de Tukey mostró diferencias significativas entre todos los tratamientos ($p < 0.05$), estableciendo un gradiente claramente dosis-dependiente. El control (100SA) presentó la menor longitud (7.93 ± 0.38 cm), mientras que el mayor crecimiento se registró en 75Lc (34.20 ± 0.89 cm). Los tratamientos 25Lc, 50Lc y 100Lc mostraron incrementos progresivos y estadísticamente distintos entre sí, confirmando una respuesta altamente sensible al incremento en la proporción de lombricomposta.

El grosor de tallo presentó diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F_{4,10} = 312.7$, $p = 1.87 \times 10^{-10}$). El tamaño del efecto fue extremadamente grande ($\omega^2 = 0.9881$), indicando que el 98.81 % de la variación total fue explicada por la proporción de lombricomposta. El coeficiente de correlación intraclase fue muy elevado ($ICC = 0.990$), evidenciando una estructuración casi total de la variabilidad por efecto del tratamiento. El factor de Bayes ($BF = 4.29 \times 10^7$) aportó evidencia decisiva a favor de diferencias reales entre medias. La prueba de Tukey mostró diferencias

significativas entre el control y todos los tratamientos con lombricomposta ($p < 0.001$), así como incrementos progresivos entre 25Lc y 50Lc. Sin embargo, no se detectaron diferencias significativas entre 75Lc (8.07 ± 0.15 mm) y 100Lc (8.03 ± 0.25 mm), lo que indica que, probablemente, el incremento en grosor alcanzó un punto de estabilización a partir del 75% de lombricomposta.

El número de ramificaciones presentó diferencias significativas entre tratamientos ($F_{4,10} = 6.00$, $p = 0.0099$). El valor de w^2 (0.5714) evidenció que la concentración de lombricomposta representa el 57.14% de la variación en esta variable. El coeficiente de correlación de intraclase (ICC = 0.625) representó a su vez una influencia importante en el tratamiento. De esta forma, el factor de Bayes (BF = 7.249) respaldó la presencia de diferencias entre las medias de los tratamientos. La prueba de Tukey reveló que únicamente el tratamiento 75Lc (6.33 ± 0.58) presentó un número de ramificaciones significativamente mayor que el control 100SA (3.00 ± 1.00). Los tratamientos 25Lc, 50Lc y 100Lc presentaron los valores intermedios, sin diferencias estadísticas significativas respecto al control ni del tratamiento 75Lc. Esto significa que la respuesta de la variable no fue proporcional al incremento de la lombricomposta. Sin embargo, el mayor número de ramificaciones se observó en el tratamiento 75Lc, lo que sugiere que esta concentración favoreció la ramificación (Tabla 3).

Tabla 3. Respuesta morfométrica de *S. bigelovii* a distintas concentraciones de lombricomposta

Tratamiento	Longitud (cm)	Grosor de tallo (mm)	Ramificaciones secundarias
100SA	7.93 ± 0.38^e	4.00 ± 0.10^d	3.00 ± 1.00^b
25Lc	25.00 ± 0.79^d	4.97 ± 0.15^c	4.33 ± 0.58^{ab}
50Lc	28.13 ± 0.65^c	5.53 ± 0.21^b	5.00 ± 1.00^{ab}
100Lc	30.33 ± 0.60^b	8.07 ± 0.15^a	5.00 ± 1.00^{ab}
75Lc	34.20 ± 0.89^a	8.03 ± 0.25^a	6.33 ± 0.58^a

Media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Diferencias significativas según Tukey ($p \leq 0.05$).

La producción total de biomasa fresca fue de 14.779 kg dentro del área experimental de 2.7 m², lo que es equivalente a un rendimiento de 5.48 kg m⁻² o 54.8 t ha⁻¹. En relación con la biomasa seca, se obtuvo 1.526 kg, correspondientes a 0.565 kg m⁻², que es igual a un rendimiento de 5.65 t ha⁻¹. La biomasa fresca presentó diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F_{4,10} = 502.3$, $p = 1.78 \times 10^{-11}$). El valor de w^2 (0.9926) evidenció que la concentración de lombricomposta representa el 99.26% de la variación en la biomasa fresca. Este resultado está relacionado con el coeficiente de correlación de intraclase (ICC = 0.994), que evidenció una marcada influencia del tratamiento sobre esta variable. En este contexto, el factor de Bayes (BF = 3.55×10^8) respaldó la presencia de diferencias entre las medias. La comparación de medias mediante la prueba de Tukey indicó que el tratamiento 75Lc produjo la mayor cantidad de biomasa fresca (1669.60 ± 62.02 g planta⁻¹), superando significativamente el resto de los tratamientos ($p < 0.001$). Los tratamientos 50Lc (1221.63 ± 36.53 g planta⁻¹) y 100Lc (1257.87 ± 59.76 g planta⁻¹) no difirieron entre sí ($p = 0.8573$), pero sí fueron significativamente mayores que 25Lc y el control. La menor producción de biomasa fresca se observó en el control 100SA (212.50 ± 10.52 g planta⁻¹), con valores significativamente menores que los registrados en todos los tratamientos que recibieron lombricomposta.

La biomasa seca presentó diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F_{4,10} = 495.4$, $p = 1.91 \times 10^{-11}$). El efecto del tratamiento fue altamente significativo ($\omega^2 = 0.9925$), indicando que el 99.25% de la variación total fue explicada por la proporción de lombricomposta. El coeficiente de correlación intraclase fue muy elevado ($ICC = 0.994$), evidenciando una estructuración casi total de la variabilidad atribuible al tratamiento. El factor de Bayes ($BF = 3.34 \times 10^8$) proporcionó evidencia decisiva a favor de diferencias reales entre medias. La prueba de Tukey mostró que el tratamiento 75Lc presentó la mayor biomasa seca (172.53 ± 6.31 g planta⁻¹), siendo significativamente superior a todos los demás tratamientos ($p < 0.001$). Los tratamientos 50Lc (124.98 ± 5.18 g planta⁻¹) y 100Lc (129.77 ± 5.65 g planta⁻¹) no difirieron entre sí ($p = 0.725$), pero sí fueron significativamente mayores que 25Lc y el control. El tratamiento 100SA presentó el valor más bajo (21.27 ± 1.12 g planta⁻¹). El patrón fue consistente con el observado en biomasa fresca, evidenciando que el incremento productivo no estuvo asociado únicamente a mayor contenido hídrico, sino a una acumulación real de materia estructural (Tabla 4).

Tabla 4. Biomasa seca y fresca de planta *S. bigelovii*.

Tratamiento	Biomasa fresca (g planta ⁻¹)	Biomasa seca (g planta ⁻¹)
100SA	212.50 ± 10.52^d	21.27 ± 1.12^d
25Lc	571.53 ± 36.62^c	59.98 ± 3.21^c
50Lc	1221.63 ± 36.53^b	124.98 ± 5.18^b
100Lc	1257.87 ± 59.76^b	129.77 ± 5.65^b
75Lc	1669.60 ± 62.02^a	172.53 ± 6.31^a

Media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Diferencias significativas según Tukey ($p \leq 0.05$).

DISCUSIÓN

La lombricomposta mejoró significativamente la emergencia de plántulas, elevando la probabilidad de establecimiento 2.8 veces respecto al control ($OR = 2.82$; IC 95%: 2.14-3.72). Este efecto temprano reflejó mejoras en las condiciones físicas, químicas y biológicas del sustrato, favoreciendo la germinación y el crecimiento radicular inicial, lo que coincide con lo reportado por los autores Shafique y Singh (2021) y Nava-Pérez *et al.* (2019). Aunque la respuesta de emergencia no mostró un patrón claramente dosis-dependiente, las variables morfológicas y productivas sí incrementaron progresivamente hasta alcanzar un máximo en el tratamiento con 75% de lombricomposta, sugiriendo que el crecimiento posterior al establecimiento depende de la proporción óptima de materia orgánica en el sustrato (López-López *et al.* 2018, David-Santoya *et al.* 2018). El incremento significativo en el contenido de clorofila a y clorofila total en *S. bigelovii* con mayores proporciones de lombricomposta sugiere una mejora en la capacidad fotosintética, asociada a una mayor disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno y magnesio, componentes fundamentales de la molécula de clorofila, lo que coincide con lo reportado por Taiz *et al.* (2015).

Los incrementos observados en longitud de tallo, grosor y número de ramificaciones coincidieron con aumentos significativos en biomasa fresca y seca. La coherencia entre biomasa fresca y seca confirma que el aumento productivo se debió a la acumulación real de materia estructural. Estos

resultados coinciden con los estudios de Romero-Figueroa *et al.* (2013) y Pérez-Álvarez *et al.* (2024), quienes señalaron que una mayor actividad fotosintética está relacionada con mejor absorción de nutrientes. El tratamiento con 75% de lombricomposta alcanzo el mayor rendimiento y presentó diferencias significativas respecto de los demás tratamientos. En este sentido, también se demostró que al incrementar la concentración de lombricomposta al 100% no presentó mejoras en comparación con el tratamiento al 50%, lo que significa que en las condiciones evaluadas hay una concentración que favorece el equilibrio entre la disponibilidad de nutrientes y la retención de humedad en el sustrato. Estos resultados coinciden con los estudios realizados en cultivos con mezclas intermedias de lombricomposta que mejoraron el crecimiento y obtuvieron una mayor productividad (De-la-Cruz-Lázaro *et al.* 2009). Asimismo, estos resultados indican que la incorporación de lombricomposta favorece el establecimiento inicial del cultivo de *S. bigelovii*, y también su desarrollo morfológico durante el crecimiento, y fisiológico en cuanto a los pigmentos fotosintéticos. Estos hallazgos respaldan el uso de la estructura tipo chinampa como una alternativa agronómica viable para incrementar la productividad en suelos salinos.

CONCLUSIONES

La aplicación de lombricomposta optimizó el contenido de clorofila a y clorofila total, lo que refleja una mejora en el potencial fotosintético de *S. bigelovii*. Este efecto puede asociarse a una mayor disponibilidad de nutrientes y a la mejora de las propiedades físicas y químicas del sustrato. Pero la respuesta de la clorofila b fue menor, los resultados reflejan mejor respuesta fisiológica de las plantas. La incorporación de lombricomposta también favoreció el establecimiento y crecimiento del cultivo. Se observó además una mayor emergencia que en el tratamiento control y este efecto se demostró posteriormente en incrementos de la longitud de la parte aérea, el grosor de tallo, el número de ramificaciones y la producción de biomasa fresca y seca. En relación con las propiedades evaluadas, el tratamiento con 75% lombricomposta presentó los mejores resultados de crecimiento y acumulación de biomasa, mientras que el uso exclusivo de lombricomposta no presentó una ventaja adicional. En conjunto, estos hallazgos muestran que la lombricomposta constituye una alternativa agronómica viable para mejorar el rendimiento de *S. bigelovii* en suelo salino.

AGRADECIMIENTOS

Al personal técnico del Laboratorio de Fisiotecnia Vegetal Dra. Carmen Mercado Guido, Magdalena López García, del Campo experimental Pedro Luna García, Saúl E. Briseño Ruiz, Adrián Jordán Castro, Raymundo Ceseña Núñez, del Laboratorio de espectrofotometría de absorción atómica Francisca Griselda Gallegos Simental, del laboratorio de química proximal Sindi Areli Juan Antúnez por sus enseñanzas en las técnicas de cada determinación en los laboratorios. A la SECIHTI por el otorgamiento de la beca de doctorado en el uso, manejo y preservación de los recursos naturales con número 506088.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Beltrán BCE, Arce ME, Bianciotti O, López Ahumada GA, Vargas JM, Hernández-Montiel LG, Rueda-Puente EO (2017) *Salicornia bigelovii* (TORR.): Un sistema modelo para incorporarse como cultivo agrícola en zonas árido-desérticos. *Biotecnia* 19: 46-50. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v19i0.413>
- Cárdenas-Pérez S, Piernik A, Chanona Pérez JJ, Nicusor M (2021) An overview of the emerging trends of the *Salicornia* L. genus as sustainable crop. *Environmental and Experimental Botany* 191: 104606. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104606>
- Castagnino AM, Marina JA (2021) Espárrago de mar (*Salicornia* spp.), una alternativa productiva valiosa como alimento y con potencial agroindustrial. *Horticultura Argentina* 41(104): 95-125.
- Cerda J, Vera C, Rada G (2013) Odds ratio: Aspectos teóricos y prácticos. *Revista Médica de Chile* 141(10): 1329-1335. <https://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872013001000014>
- CONAGUA (2024) Estadísticas del agua en México 2023. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México. 301p.
- Cortés-Jiménez JM, Troyo-Diéguez E, Murillo-Amador B, García-Hernández JL, Garatuza-Páyan J, Sang-Suh L (2009) Water quality parameters of the Yaqui valley aquifer. *Revista Terra Latinoamericana* 27(2): 133-141.
- Cruz-Falcón A, Murillo-Jiménez JM, Fraga-Palomino HC (2023) Evolución de la intrusión marina y relaciones iónicas en el acuífero de La Paz, BCS, México. *Terra Latinoamericana* 41: 6-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1636>
- David-Santoya JJE, Gómez-Álvarez R, Jarquín-Sánchez A, Villanueva-López G (2018) Caracterización de vermicompostas y su efecto en la germinación y crecimiento de *Capsicum chinense* Jacquin. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 5(14): 181-190. <https://doi.org/10.19136/era.a5n14.1465>
- De-la-Cruz-Lázaro E, Estrada-Botello MA, Robledo-Torres V, Osorio-Osorio R, Márquez-Hernández C, Sánchez-Hernández R (2009) Producción de tomate en invernadero con composta y vermicomposta como sustrato. *Universidad y Ciencia* 25(1): 59-67.
- Garza-Torres R, Troyo-Diéguez E, Nieto-Garibay A, Lucero-Vega G, Magallón-Barajas FJ, García-Galindo E, Fimbres-Acedo YE, Murillo-Amador B (2020) Environmental and management considerations for adopting the halophyte *Salicornia bigelovii* Torr. as a sustainable seawater-irrigated crop. *Sustainability* 12(2): 707. <https://doi.org/10.3390/su12020707>
- Holguín R, Medina D, Ghasemi M, Rueda-Puente EO (2020) Salt tolerant plants as a valuable resource for sustainable food production in arid and saline coastal zones. *Acta Biológica Colombiana* 26(1): 116-126. <https://doi.org/10.15446/abc.v26n1.82412>
- ISTA (2026) International Rules for Seed Testing, Chapter 2: Sampling. International Seed Testing Association (ISTA), Wallisellen, Switzerland. pp. 3-46. <https://doi.org/10.15258/istarules.2026.02>

- López-López B, Gálvez P, Calleja B, Méndez J, Ríos Camey JM (2018) Sustratos orgánicos en la germinación y crecimiento de *Pinus ayacahuite var. veitchii* (Roetzl) Shaw en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(49): 110-124. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.156>
- Lu D, Zhang M, Wang S, Cai J (2010) Caracterización nutricional y cambios en la calidad de *Salicornia bigelovii* Torr. durante el almacenamiento. *Ciencia y Tecnología de los Alimentos* 43(3): 519-524.
- Lyra DA, Raman A, Hozayen A, Zaaboul R, Aboud-Zaid F, El Naggar A, Mansoor S, Mahmoudi H, Ammar K (2022) Evaluation of *Salicornia bigelovii* germplasm for food use in Egypt and the United Arab Emirates based on agronomic traits and nutritional composition. *Plants* 11: 2653. <https://doi.org/10.3390/plants11192653>
- Martin A (2024) Caracterización preliminar bromatológica de la *Salicornia bigelovii* en las salinas “El Real” y “Las Tunas”. *Revista Internacional de Biotecnología y Ciencias de la Vida* 9(4): 2-11.
- Méndez-Santos IE, Rifa Téllez JC, Gómez Calderín ME (2024) Apuntes taxonómicos y nomenclaturales básicos para investigaciones aplicadas con representantes cubanos de Salicornioideae. *Agrisost* 30: 1-5. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14610364>
- Meng X, Zhou J, Sui N (2018) Mechanisms of salt tolerance in halophytes: Current understanding and recent advances. *Open Life Science* 18(13): 149-152. <https://doi.org/10.1515/biol-2018-0020>
- Nava-Pérez E, Valenzuela-Quirón W, Rodríguez-Quiroz G (2019) El vermicompost como sustrato en germinación de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Agrociencia* 53(6): 869-879.
- Pérez-Álvarez S, Ochoa-Chaparro EH, Anchondo-Páez JC, Escobedo-Bonilla CM, Rascón Solano J, Magallanes-Tapia MA, Uranga-Valencia LP, Hernández Campos R, Sánchez E (2024) Nitrogen assimilation, biomass, and yield in response to application of algal extracts, *Rhizobium* sp., and *Trichoderma asperellum* as biofertilizers in hybrid maize. *Nitrogen* 5: 1031-1047. <https://doi.org/10.3390/nitrogen5040066>
- Rey-Hernández C, Bobbink I (2022) Chinampas agriculture and settlement patterns: The contemporary relevance of Aztec floating gardens. *Blue Papers* 1(2): 90-99. <https://doi.org/10.58981/bluepapers.2022.2.09>
- Romero-Figueroa JC, Rodríguez-Mendoza M, Gutiérrez-Castorena M, Sánchez-Escudero J (2013) Vermicompost como sustrato en la producción de menta (*Menta piperita* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4 (SPE 5): 889-899.
- Rodríguez-Álvarez M, Murillo-Amador B, Nieto-Garibay A, Aguilar-Trujillo JG, Abasolo-Pacheco F, Mazón-Suastegui JM (2022) *Natrum muriaticum* modifica variables de respuesta productiva en *Salicornia bigelovii* (Torr.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13: 161-172. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3271>
- Rueda-Puente EO, Beltrán F, Ruíz F, Valdez R, García J, Ávila N, Partida L, Murillo B (2011) Opciones de manejo sostenible del suelo en zonas áridas: Aprovechamiento de la halófito *Salicornia bigelovii* (Torr.) y uso de biofertilizantes en la agricultura moderna. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13(2): 157-167.
- Shafique I, Singh D (2021) Efficiency of cow dung based vermi-compost on seed germination and plant growth parameters of *Tagetes erecta* (Marigold). *Elyon* 7(1): e05895. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05895>

- Strain H, Svec W (1966) Extraction, Separation, Estimation, and Isolation of the Chlorophylls. The Chlorophylls Academic Press: 21-66. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-3289-8.50008-4>.
- Taiz L, Zeiger E, Moller M, Murphy A (2015) Plant physiology and development. 6° edition. Sinauer Associates, Inc., Oxford University Press. 761p.
- Turland NJ, Wiersema JH, Barrie FR, Greuter W, Hawksworth DL, Herendeen PS, Knapp S, Kusber WH, Li DZ, Marhold K, May TW, McNeill J, Monro AM, Prado J, Price MJ, Smith GF (2018) International code of nomenclature for algae, fungi, and plants (Shenzhen Code). Koeltz Botanical Books. 274p. <https://doi.org/10.12705/Code.2018>
- Ventura Y, Sagi M (2013) Cultivo de halófitas: el caso de *Salicornia* y *Sarcocornia*. Botánica Ambiental y Experimental 92: 144-153. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.07.010>
- Zapata-Sifuentes G, Preciado P, Guillen-Enriquez RR, Sánchez-Bernal F, Holguín- Peña R, Borbón-Morales C, Rueda-Puente EO (2021) Lipid and yield evaluation in *Salicornia bigelovii* by the influence of chitosan-IBA in conditions of the Sonora Desert. Agronomy 11(3): 428. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030428>
- Zhang H, Irving LJ, McGill C, Matthew C, Zhou D, Kemp P (2015) Salt tolerance during seed germination and early seedling stages of 12 halophytes. Plant and Soil 388: 229-241. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2322-3>