

Evaluación de la propagación asexual por esquejes en *Sesuvium verrucosum* Raf. (Aizoaceae)

Marcos Alfonso Lastiri-Hernández
Dioselina Álvarez-Bernal[§]

Instituto Politécnico Nacional-CIIDIR-Unidad Michoacán. Justo Sierra núm. 28 oriente, Jiquilpan, Michoacán, México. CP. 59510. Tel. (353) 5330218. (marcos.lastiri5@gmail.com).

[§]Autora para correspondencia: dalvarezb@ipn.mx.

Resumen

La sequía y la salinidad son condiciones de algunos suelos que limitan la producción agrícola a nivel mundial. Para combatir estos efectos, se ha hecho énfasis en una técnica llamada fitodesalinización, la cual consiste en el uso de especies halófitas con la capacidad para extraer cantidades importantes de sodio (Na^+) del medio afectado. Sin embargo, ésta es una práctica agrícola que demanda una gran cantidad de material vegetal por hectárea, lo cual dificulta su implementación en los sistemas productivos con problemas de salinidad. El objetivo de este trabajo fue determinar la capacidad de enraizamiento de los esquejes de la especie halófito *S. verrucosum* y analizar los cambios de magnitud en sus parámetros biométricos, a partir de diferentes concentraciones en el tratamiento hormonal, en un periodo de 90 días. Para el desarrollo del experimento se utilizó un diseño experimental completamente al azar y se consideraron dos factores: las concentraciones del ácido indol butírico (AIB) (0, 800, 1 200, 1 600, 2 000 y 4 000 mg L^{-1}) y la posición de los esquejes (basal-intermedia e intermedia-apical). Los resultados obtenidos demostraron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos. Los esquejes de la porción intermedia-apical fueron los que obtuvieron el mayor porcentaje de enraizamiento, número de raíces, peso fresco y seco, tanto de la raíz como de la parte aérea de la planta, diámetro del tallo y altura de la planta, principalmente a una concentración de 2 000 mg L^{-1} . A través de este método, es posible implementar la fitodesalinización de manera extensiva.

Palabras clave: enraizamiento, fitorreguladores, propagación vegetativa, raíces adventicias.

Recibido: julio de 2020

Aceptado: septiembre de 2020

Introducción

La sequía y la salinidad son condiciones de algunos suelos que limitan la producción agrícola a nivel mundial, debido a que producen una serie de efectos morfológicos, fisiológicos y bioquímicos que afectan negativamente el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Munns y Tester, 2008). A nivel mundial, la sequía y la salinidad tienen influencia en al menos 75 países (Qadir *et al.*, 1997).

En México, los niveles de afectación por efectos de la salinidad abarcan alrededor de un millón de hectárea (Serrato *et al.*, 2002), por lo que se espera que la productividad y los rendimientos de los cultivos sean afectados en más de 50% para la segunda mitad del siglo (Reyes *et al.*, 2014).

Para combatir los efectos de la salinidad y rehabilitar los suelos que han sido afectados, diversos estudios han propuesto la implementación de la fitodesalinización; ésta es una práctica agrícola sostenible, que consiste en el uso de diversas especies halófitas que tienen la capacidad de extraer cantidades importantes de sodio (Na^+) del medio afectado y removerlo por medio de la absorción de las raíces de las plantas y su traslocación hacia los tallos y hojas (Nouri *et al.*, 2017).

La relevancia de esta práctica reside en la capacidad que presentan estas especies para desalinizar los suelos salinos de una manera relativamente económica, presentar un nivel bajo de perturbación en los suelos donde se implementa y brindar un ingreso adicional a los agricultores al término de su cultivo, ya que pueden ser aprovechadas como forrajes, biocombustibles, medicamentos y alimentos para el hombre (Nikalje *et al.*, 2018).

Sin embargo, al ser la fitodesalinización una práctica que demanda una gran cantidad de material vegetal por hectárea (McSorley *et al.*, 2016), por tener que tomar plantas de su hábitat para trasladarlas a los sitios que se pretenden remediar, la implementación de esta práctica puede suscitar una explotación intensiva de las especies, al punto de poner en riesgo su acervo genético ante la ausencia de protocolos que aseguren su producción de forma sostenible.

De ahí surge la necesidad de buscar nuevas alternativas que permitan la propagación masiva del material vegetal, a bajo costo para los agricultores, en el menor tiempo posible; lo anterior, debe de ser hecho, sin perder de vista la homogeneidad en la calidad de las plantas, el flujo de abastecimiento y la disponibilidad continua en el ámbito agrícola.

De acuerdo con Veras *et al.* (2018), una alternativa eficaz para lograr solventar la escasez de semillas y material vegetal es la propagación vegetativa o asexual, la cual se basa en el principio de totipotencia (Cabahug *et al.*, 2018), lo que significa que cada célula de las plantas contiene la información genética necesaria para formar nuevos individuos con características idénticas a las de la planta madre.

Ésta puede efectuarse a través de esquejes a partir del tallo, ya que además de acortar el periodo de propagación, hacer eficiente su manejo y reducir los costos de producción, permite mantener las características genéticas de la planta progenitora y transmitirla de generación en generación (Ramos-Hernández *et al.*, 2013). Sobre todo, puede ser una estrategia óptima para especies de enraizamiento tardío (Tosta *et al.*, 2012).

La propagación vegetativa asexual a través de esquejes, por lo general se apoya de reguladores de crecimiento con la finalidad de estimular el enraizamiento de los recortes para su correcto desarrollo, debido a su influencia en la división celular y alargamiento (Figura 1). Tal es el caso del ácido indolbutírico (AIB), una auxina sintética que ha demostrado ser eficaz para estimular la producción y el crecimiento celular, además de intervenir en diferentes actividades de la planta, como son: el crecimiento del tallo, la formación de raíces, la inhibición de las yemas laterales, la abscisión de hojas y frutos, así como la activación de las células del cámbium (Akwatulira *et al.*, 2011).

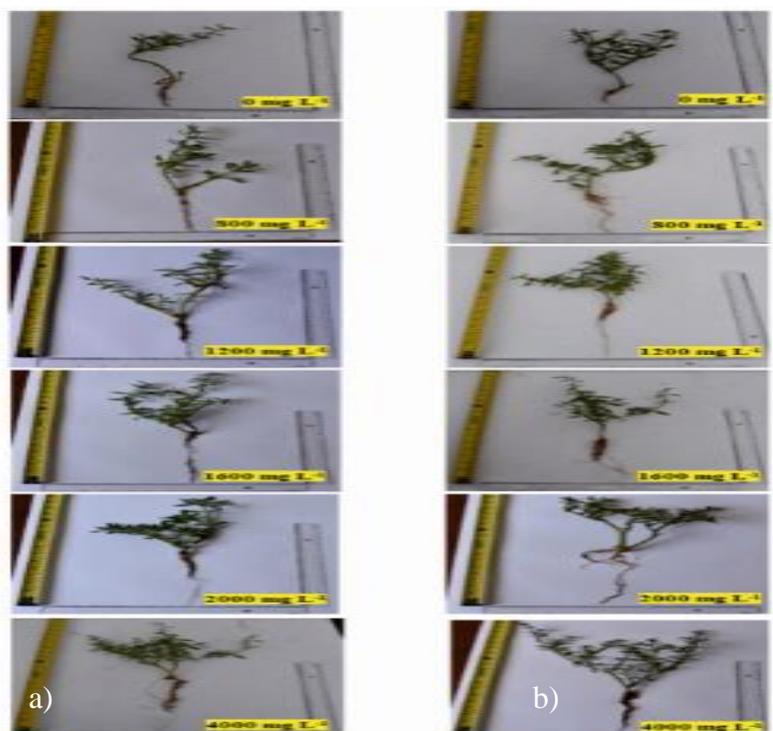


Figura 1. Imágenes de las porciones basal-intermedia e intermedia-apical (a); y de los esquejes de *S. verrucosum* (b) a los 90 días de la aplicación del IBA.

De acuerdo con diversos estudios, el AIB es posiblemente el mejor regulador de crecimiento para uso general, debido a que no es tóxico para las plantas en un amplio rango de niveles de concentración, presenta una mayor estabilidad contra la degradación y el metabolismo y suele ser aún más efectivo que otros reguladores del crecimiento como el ácido indolacético IAA (Ludwig-Müller, 2000).

Si bien es cierto que, la propagación vegetativa asexual ha sido implementada en numerosas especies de gran relevancia comercial, como: *Annona diversifolia* Saff. (Annonaceae) (Orozco-Castillo y González-Esquínca, 2017), *Punica granatum* L. (Lythraceae) (Singh, 2014), *Stevia rebaudiana* Bertoni (Asteraceae) (López-Medina *et al.*, 2016), *Vanilla planifolia* (Orchidaceae) (Azofeifa-Bolaños *et al.*, 2018), hasta el momento no existen protocolos operativos de enraizamiento que guíen de forma eficaz la producción de las especies halófitas suculentas.

Lo anterior puede deberse a que la concentración óptima de AIB varía de acuerdo con las especies y el nivel endógeno de fitohormonas que se hallan presentes en las plantas madre durante la realización de los esquejes (Cabahug *et al.*, 2018). Recientemente, se reportó que, en el municipio de Villamar, Michoacán, México, crece una especie halófito nativa perenne con enorme potencial fitodesalinizador llamada *Sesuvium verrucosum* al bioacumular 0.96 t ha^{-1} de Na^+ (Lastiri-Hernández *et al.*, 2020), una dicotiledónea de la familia Aizoaceae con fotosíntesis C_3 , la cual posee una amplia plasticidad fenotípica debido a la formación de cambios sucesivos que ha desarrollado esta especie en su sistema ontogenético, como son los patrones de engrosamiento secundario y la formación del floema interno, mismos que le permiten contar con una mayor resistencia mecánica, flexibilidad y sobre todo, una mayor capacidad de almacenamiento de agua y cationes, principalmente Na^+ (Elbar, 2015).

Sin embargo, ante la ausencia de investigaciones y de un protocolo operativo que coadyuve a establecer las bases para el correcto desarrollo de la halófito *S. verrucosum*; a través, de esquejes, el objetivo de este trabajo fue determinar la capacidad de enraizamiento y analizar los cambios de magnitud en sus parámetros biométricos, a partir de diferentes concentraciones en el tratamiento hormonal.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en condiciones de invernadero durante el periodo de julio-septiembre de 2019, el cual se encuentra ubicado en el municipio de Jiquilpan de Juárez, Michoacán, México, a una altitud de 1 560 msnm y coordenadas $19^\circ 59' 57.6456''$ latitud norte y $-102^\circ 42' 24.0336''$ longitud oeste. En promedio, las condiciones de temperatura y humedad relativa en el invernadero fueron $36/10 \text{ }^\circ\text{C}$ (día/noche) y 60% ($\pm 10\%$), respectivamente.

Material vegetal

El material vegetal (plantas madre) utilizado para el desarrollo del experimento fue extraído de una zona geotérmica conocida como Los Negritos, perteneciente al municipio de Villamar, Michoacán, México, a una altitud de 1 540 msnm, en las coordenadas $20^\circ 03' 47.2248''$ latitud norte y $-102^\circ 36' 52.776''$ longitud oeste. El tipo de vegetación de esta zona es secundaria.

Las plantas fueron extraídas a principios del mes de junio de 2019, en la época del inicio de las lluvias, cuando tenían aproximadamente ocho meses de edad y mostraban una etapa fenológica vegetativa. Se realizó una extracción de 20 plantas de la zona, se midió su altura con un flexómetro de la marca Truper® y se contaron los tallos de cada una de ellas. Las plantas también fueron pesadas con una báscula de la marca Ohaus Compass™ CX y se midieron sus tallos con un calibrador digital Vernier 14388 de la marca Truper®, posteriormente fueron colocadas en bolsas de poliestireno negras con capacidad de 10 kg para ser llevadas al invernadero.

Las halófitas mostraron un peso fresco inicial de $38.67 \pm 4.13 \text{ g}$, una altura promedio de $23.86 \pm 3.65 \text{ cm}$, un diámetro de tallo promedio a nivel del suelo de $6.42 \pm 1.79 \text{ mm}$ y un número de tallos promedio de 6.36.

Manejo agronómico previo

Quince días antes de iniciar el experimento, las plantas madre fueron regadas con agua corriente con la finalidad de mantener la turgencia en las células. También se aplicó a cada bolsa con plantas, una dosis de fertilización con el propósito de favorecer la aparición de rebrotes vigorosos.

Al no existir estudios sobre dosis de fertilización de NPK que maximicen el rendimiento del follaje de esta especie se utilizó la fórmula de fertilización (300-150-80) propuesta por Montoya-García *et al.* (2018) para una especie suculenta (*Portulaca oleracea*) que comparte el mismo hábitat. Los fertilizantes aplicados fueron fosfato Diamónico (DAP), urea y triple 17-17-17 [0.38 g de DAP (100%) + 1.19 g de urea (100%) + 1.17 g de triple 17-17-17 (100%)].

Análisis fisicoquímico del sustrato

El sustrato utilizado para el desarrollo del experimento fue una mezcla de suelo y estiércol bovino, el cual fue colocado en bolsas de poliestireno negras con capacidad de 1 kg, las cuales fueron llenadas con 750 g de suelo y 150 g de estiércol seco, en una relación (5:1), respectivamente.

Las bolsas no se perforaron para evitar el lavado de los cationes. El estiércol fue adquirido de un establo ubicado en el municipio de Jiquilpan, Michoacán, en las coordenadas 20° 00' 01.5804" latitud norte y -102° 42' 25.1424" longitud oeste.

El suelo utilizado como sustrato presentó las siguientes características: Vertisol con una textura arcillosa (31.16% arenas, 46.48 % arcilla, % 22.36 limo); una conductividad eléctrica E_{Ce} de 1.45 dS m⁻¹, un pH de 8.17, un porcentaje de humedad de 12.5%, 2.6% de materia orgánica (% de MO), una densidad aparente (DA) de 1.02, un porcentaje de porosidad de 59.7, una capacidad de retención de agua (CRA) del 39.4%, una relación de adsorción de sodio (SAR) de 5.78 (mmolc L⁻¹)^{1/2}, una capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 45.7 cmolc kg⁻¹ y un porcentaje de sodio intercambiable (ESP) de 13.21, así como 0.21% de nitrógeno total, 8.65 mg kg⁻¹ de fósforo disponible, 2.10 mmolc L⁻¹ de carbonatos, 9.26 mmolc L⁻¹ de bicarbonatos, 3.17 mmolc L⁻¹ de cloruros y 3.04 mmolc L⁻¹ de Sulfatos.

La porción de estiércol bovino mostró una conductividad eléctrica E_{Ce} de 5.82 dS m⁻¹, un pH de 8.68, un porcentaje de humedad de 46.28%, 21.7% de materia orgánica (% de MO), una densidad aparente (DA) de 0.525, un porcentaje de porosidad de 76.92, una capacidad de retención de agua (CRA) del 60.98%, carbono orgánico total de 35.9 mg kg⁻¹ y nitrógeno total de 5.7 g kg⁻¹.

Características químicas y microbiológicas del agua de riego

La aplicación de los riegos se realizó con agua corriente. Las características químicas del agua fueron: E_{Ce} de 0.58 dS m⁻¹, el pH de 8.1 y una dureza de 262 mmolc L⁻¹. Los sólidos disueltos totales (SDT) de 155 ppm, Ca²⁺ de 1.2 mmolc L⁻¹, Mg²⁺ de 2.1 mmolc L⁻¹, Na⁺ de 1.75 mmolc L⁻¹, K⁺ de 0.3 mmolc L⁻¹, CO₃⁻² de 0.48 mmolc L⁻¹, HCO₃⁻ de 8.6 mmolc L⁻¹, SO₄⁻² de 0.153 mmolc L⁻¹ y una relación de adsorción de sodio (RAS) de 1.36.

Las características microbiológicas del agua de riego fueron: coliformes totales de 17 NMP/100 ml, coliformes fecales de 3 NMP/100 ml y *Escherichia coli* de 3 NMP/100 ml.

Manejo de los utensilios

Las navajas, tijeras y contenedores utilizados fueron desinfectados por inmersión en una solución de cloro a 20% durante 10 min. Los cortes realizados a los tallos de las plantas madre se hicieron en bisel, con un ángulo de 45° justo por debajo de los nudos. La porción basal-intermedia se consideró desde la parte inferior de los tallos de las plantas hasta la parte media de los mismos, mientras que, la porción intermedia-apical se consideró desde la parte media restante de los tallos hasta el ápice de cada uno de ellos.

Los esquejes fueron limpiados y colocados en un recipiente con agua destilada, para evitar su deshidratación. Esta actividad se realizó en las horas de la mañana, con la finalidad de disminuir la transpiración. Los esquejes de cada porción (basal-intermedia e intermedia-apical) se pesaron con una báscula de la marca Ohaus Compass™ CX y se midió su tallo con un calibrador digital Vernier 14388 de la marca Truper®.

El número de esquejes obtenidos de las plantas madre fueron en promedio 12.7. Los esquejes tuvieron un peso fresco inicial de 4.49 ± 0.34 g, una longitud de 9.56 ± 2.73 cm y un diámetro de tallo promedio de 4.82 ± 0.09 mm en la parte basal-intermedia; mientras que, en la parte intermedia-apical, los esquejes tuvieron un peso fresco inicial de 4.21 ± 0.27 g, una longitud de 9.19 ± 2.49 cm y un diámetro de tallo promedio de 4.67 ± 0.07 mm.

Tratamientos

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar y se consideraron dos factores: las concentraciones del IBA y la posición los esquejes tomados de cada tallo. El primer factor constó de seis niveles (0, 800, 1 200, 1 600, 2 000 y 4 000 mg L⁻¹), el segundo factor constó de dos niveles (basal-intermedia e intermedia-apical), dando un total de 12 tratamientos y doce repeticiones. Cada unidad experimental estuvo conformada por un solo esqueje, lo que significó la evaluación de 144 unidades experimentales.

Una vez plantados los esquejes en el sustrato preparado, a una profundidad de 2 ± 0.5 cm, estos fueron llevados al 70% de la capacidad de contenedor y regados de forma periódica, los riegos se realizaron con un aspersor manual durante 90 días (tiempo que duró el experimento). Se aplicó la misma cantidad de agua que se evaporó en un tanque evaporímetro (30 cm de diámetro por 10 cm de altura) instalado en el invernadero.

Regulador de crecimiento

El regulador de crecimiento utilizado fue el ácido indol-3-butírico (4-(1 H-indol-3-yl) butyric acid) de la marca comercial RADIX® 10 000-Intercontinental, con un nivel de pureza de 1% como ingrediente activo y 99% de ingredientes inertes. Éste se disolvió en agua destilada adicionando hidróxido de potasio (KOH 1N), hasta obtener una dilución completa con ajuste de pH a 8. Su aplicación se hizo sumergiendo aproximadamente 1 cm de la base de cada esqueje durante 1 h en la solución, de acuerdo con la concentración de cada tratamiento.

Fertilización

Quince días después de haber iniciado el experimento, a cada unidad experimental se le aplicaron 0.4 g de urea (46-00-00) semanalmente, hasta la semana seis (día 43), con el propósito de favorecer su crecimiento y estimular la división celular.

Variables evaluadas

Las variables evaluadas en cada porción (basal-intermedia e intermedia-apical) al término del experimento fueron: la altura de la planta, el diámetro del tallo, la longitud de raíz principal, el número de raíces, el porcentaje de enraizamiento y el peso fresco y seco tanto de la raíz como de la parte aérea. La altura de la planta se midió con un flexómetro de la marca Truper[®], el diámetro del tallo y la longitud de raíz se midió con un calibrador digital Vernier 14388 de la marca Truper[®], el número de raíces se cuantificó a partir de las raíces mayores a 1 mm de longitud.

El porcentaje de enraizamiento se determinó contando el número de esquejes (enraizados), dividido por el total de esquejes establecidos inicialmente y multiplicado por 100. Las plantas fueron lavadas con agua destilada, las raíces y la parte aérea (tallos y hojas) fueron separadas y cuantificadas por su peso fresco (g); posteriormente, las muestras fueron secadas en un horno a 70 °C durante 48 h para evaluar su peso seco (g).

Análisis de los datos

Los datos obtenidos de las variables evaluadas fueron sometidos a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk ($p \leq 0.05$) y la prueba de Levene para homogeneidad de varianza. Las variables que cumplieron con ambas pruebas se les aplicaron el análisis de varianza (Anova) y la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$).

Las variables que no cumplieron con las pruebas de homogeneidad de varianza o normalidad, fueron transformadas a logaritmo natural (ln) hasta observar normalidad y homocedasticidad, posteriormente se calculó el Anova y la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$).

Los datos que no cumplieron con ambas pruebas se sometieron a un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis y la sumatoria de rangos de Wilcoxon, de acuerdo con la metodología de Siegel (1974). Para todos los casos se trabajó con el programa estadístico Statistical Analysis System (SAS) Versión 9.1 (SAS Institute, 2004).

Resultados y discusión

El Cuadro 1 muestra los efectos de la auxina AIB en la raíz de los esquejes de *S. verrucosum*, después de ser expuestas a diferentes concentraciones durante un periodo de 90 días. Los tratamientos evaluados, tanto en las porciones basal-intermedia como intermedia-apical de los esquejes de *S. verrucosum*, mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en todas las variables evaluadas respecto a su propio control, principalmente cuando los esquejes fueron sometidos a elevadas concentraciones de AIB. A 2 000 y 4 000 mg L⁻¹ de concentración de AIB, no logró observarse diferencia alguna.

Cuadro 1. Efectos de la auxina AIB en la raíz de los esquejes de *S. verrucosum* a los 90 días de su aplicación.

Porción	Tratamientos	Concentración (mg L ⁻¹)	Enraizamiento (%)	Peso fresco de la raíz (g)	Peso seco de la raíz (g)	Longitud de la raíz (cm)	Número de raíces
Intermedia-apical	Control	0	66.66 d	1.145 ±0.17 g	0.178 ±0.03 g	13.87 ±1.14 f	31.68 ±3.45 f
	AIB	800	66.66 d	1.613 ±0.22 fe	0.242 ±0.03 f	16.84 ±1.27 d	46.35 ±4.12 e
	AIB	1 200	75 c	2.185 ±0.28 c	0.327 ±0.03 d	19.91 ±1.16 c	55.41 ±3.03 d
	AIB	1 600	83.33 b	2.674 ±0.16 b	0.409 ±0.02 b	22.96 ±1.06 b	64.26 ±4.51 c
	AIB	2 000	91.67 a	3.139 ±0.19 a	0.493± 0.02 a	25.58 ±1.25 a	72.95 ±3.77 b
	AIB	4 000	91.67 a	3.261 ±0.25 a	0.511 ±0.03 a	26.25 ±1.17 a	78.52 ±5.07 ab
Basal-intermedia	Control	0	41.66 f	0.805 ±0.12 h	0.142 ±0.02 h	12.69 ±1.25 f	23.17 ±4.28 g
	AIB	800	58.33 e	1.127 ± 0.09 g	0.191 ±0.01 g	15.35 ±1.15 e	35.78 ±5.19 f
	AIB	1 200	66.66 d	1.443 ±0.07 f	0.246 ±0.01 f	17.98 ±1.21 d	46.12 ±4.93 e
	AIB	1 600	75 c	1.69 ±0.09 e	0.298 ±0.02 e	20.63 ±1.09 c	56.65 ± 5.32 d
	AIB	2 000	75 c	1.912 ±0.1 d	0.345 ±0.01 dc	22.37 ±0.98 b	66.81 ±3.45 c
	AIB	4 000	83.33 b	2.016 ±0.13 dc	0.362 ±0.02 c	23.34 ±1.05 b	73.03 ±4.79 bc

En cada columna, letras iguales no difieren significativamente entre sí según prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), los valores indican la media \pm SE (n= 12).

Estos resultados sugieren que, a concentraciones más elevadas a las establecidas en el presente estudio podrían desencadenarse efectos fitotóxicos en los esquejes de *S. verrucosum*, lo que llevaría a una reducción en la calidad del sistema radicular adventicio (Delgado *et al.*, 2008). Además, se encontró que la porción intermedia-apical logró mayores porcentajes de enraizamiento que la porción basal-intermedia, al variar en 25%, 8.33%, 8.33%, 8.33%, 16.67% y 8.33% entre los tratamientos evaluados a 0, 800, 1 200, 1 600, 2 000 y 4 000 mg L⁻¹ de AIB, respectivamente (Cuadro 1). De ahí que la capacidad de enraizamiento de los esquejes de *S. verrucosum* disminuya drásticamente en dirección basípeta.

De igual forma, se encontró que la porción intermedia-apical logró una mayor fitomasa que la porción basal-intermedia, al lograr incrementos de 29.69% y 20.22% en el peso fresco y seco de la raíz, en los tratamientos utilizados como control, 30.13% y 21.07% entre los tratamientos evaluados a 800 mg L⁻¹, 33.95% y 24.77% entre los tratamientos evaluados a 1 200 mg L⁻¹, 36.79% y 27.13% entre los tratamientos evaluados a 1 600 mg L⁻¹, 39.08% y 30.02% entre los tratamientos evaluados a 2 000 mg L⁻¹ y de 38.17% y 29.15% entre los tratamientos evaluados a 4 000 mg L⁻¹ de AIB, respectivamente (Cuadro 1).

Con relación a la longitud de las raíces, se encontró que la porción intermedia-apical logró mayores incrementos, en comparación con la porción basal-intermedia, al variar en 8.5%, 8.84%, 9.69%, 10.14%, 12.54% y 11.08% entre los tratamientos evaluados a 0, 800, 1 200, 1 600, 2 000 y 4 000 mg L⁻¹ de AIB, respectivamente.

Por otra parte, se observó que la porción intermedia-apical logró un mayor incremento en el número de raíces, en comparación con la porción basal-intermedia, al variar en 26.88%, 22.80%, 16.76%, 13.54%, 8.41% y 6.99% entre los tratamientos evaluados a 0, 800, 1 200, 1 600, 2 000 y 4 000 mg L⁻¹ de AIB, respectivamente. Sin embargo, a 4 000 mg L⁻¹ de AIB, no lograron observarse diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre estas dos porciones.

El hecho de que los esquejes de la porción intermedia-apical mostraran un mayor incremento en el porcentaje de enraizamiento, peso fresco y seco de la raíz, así como en el número de raíces respecto a la porción basal-intermedia, pudiera explicarse por las altas concentraciones de auxinas endógenas que se acumulan en esta porción del tallo (Mustafa y Khan, 2016), las cuales facilitan las vías de la biosíntesis y una amplia variedad de procesos de desarrollo, entre los que se encuentran: el inicio de los primordios foliares, el fototropismo, la división celular y la diferenciación de los tejidos vasculares, mismos que en su conjunto, promueven la producción de raíces adventicias (Vanneste y Friml, 2009). Lo anterior, se traduce en una mejor absorción del sistema radical, en beneficio del vigor obtenido en la parte aérea de los esquejes (López-Acosta *et al.*, 2008) situación que, se vio reflejada a través del número, longitud y producción de la fitomasa de las raíces conforme se incrementaron los niveles de concentración de AIB.

Aunado a esto, el mayor porcentaje de enraizamiento, formación y tamaño del sistema radicular en los esquejes de la porción intermedia- apical, puede atribuirse a diversos factores, entre los que destacan: a) el proceso de fotosíntesis en las hojas, como principal órgano sintetizador de carbohidratos para la planta; b) la formación de hojas jóvenes, como fuente de fotoasimilados, responsables de la producción de auxinas y cofactores que son esenciales en el proceso de la división celular; c) el transporte polar de auxinas, responsable de que las auxinas sean sintetizadas en el meristemo apical y translocadas hacia la parte basal de las plantas; d) la porosidad del sustrato y la profundidad del trasplante de los esquejes, ambos, responsables de la penetración de las raíces, la movilización y translocación de nutrientes. Así como, un adecuado balance hídrico dentro de los esquejes; y e) las condiciones fisicoquímicas del sustrato para garantizar las condiciones adecuadas de aireación y retención de humedad (Akwatulira *et al.*, 2011; López-Medina *et al.*, 2016; Ferriani *et al.*, 2018).

El Cuadro 2 muestra los efectos de la auxina AIB en la parte aérea de los esquejes de *S. verrucosum*, después de ser expuestas a diferentes concentraciones durante un periodo de 90 días. Los tratamientos evaluados, tanto en las porciones basal-intermedia como intermedia-apical de los

esquejes de *S. verrucosum*, mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en todas las variables evaluadas respecto a su propio control, principalmente cuando los esquejes fueron sometidos a elevadas concentraciones de AIB.

Cuadro 2. Efectos de la auxina AIB en la parte aérea de los esquejes de *S. verrucosum* a los 90 días de su aplicación.

Porción	Tratamientos	Concentración (mg L ⁻¹)	Peso fresco parte aérea (g)	Peso seco parte aérea (g)	Diámetro del tallo (cm)	Altura total (cm)
Intermedia-apical	Control	0	14.659 ±1.39 fe	1.759 ±0.19 h	0.513 ±0.09 f	17.02 ±0.76 g
	AIB	800	18.795 ±1.52 d	2.312 ±0.27g	0.538 ±0.06 d	19.35 ±0.93 e
	AIB	1 200	24.963 ±1.63 c	3.291 ±0.24 e	0.562 ±0.07 c	21.52 ±0.69 d
	AIB	1 600	31.892 ±1.41 b	4.165 ±0.21 c	0.581 ±0.08 b	23.88 ±1.04 c
	AIB	2 000	39.486 ±1.71 a	4.928 ±0.23 b	0.607 ±0.05 a	26.01 ±0.85 b
	AIB	4 000	40.709 ±1.83 a	5.274 ±0.3 ab	0.612 ±0.07 a	27.63 ±1.23 ab
Basal-intermedia	Control	0	10.226 ±1.35 b	1.371 ±0.18 i	0.502 ±0.07 g	16.24 ±0.83 g
	AIB	800	12.897 ±1.22 f	1.768 ±0.2 h	0.523 ±0.05 e	18.31 ±1.02 f
	AIB	1 200	16.459 ±1.44 e	2.424 ±0.26 g	0.54 ±0.06 d	20.19 ±0.71 e
	AIB	1 600	20.086 ±1.87 d	2.973 ±0.17 f	0.556 ±0.04 c	22.34 ±0.95 d
	AIB	2 000	23.673 ±1.62 c	3.312 ±0.18 e	0.578 ±0.06 b	24.22 ±0.68 c
	AIB	4 000	24.514 ±2.16 c	3.646 ±0.23	0.585 ±0.07 b	25.81 ±1.12 bc

En cada columna, letras iguales no difieren significativamente entre sí según prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), los valores indican la media ± SE (n= 12).

La parte aérea de los esquejes tanto de las porciones basal-intermedia como intermedia-apical no mostraron diferencias significativas en los niveles de concentración de 2 000 y 4 000 mg L⁻¹ de AIB. En cuanto al peso fresco y seco de la parte aérea, se encontró que la porción intermedia-apical fue mayor que la porción basal-intermedia, al lograr incrementos de 30.24% y 22.05%, respectivamente, entre los tratamientos utilizados como control, 31.38% y 23.52% entre los tratamientos evaluados a 800 mg L⁻¹, 34.06% y 26.34% entre los tratamientos evaluados a 1 200 mg L⁻¹, 37.01% y 28.61% entre los tratamientos evaluados a 1 600 mg L⁻¹, 40.04% y 32.79% entre los tratamientos evaluados a 2000 mg L⁻¹ y de 39.78% y 30.86% entre los tratamientos evaluados a 4 000 mg L⁻¹ de AIB.

Respecto al diámetro del tallo, se encontró que la porción intermedia-apical logró mayores incrementos, en comparación con la porción basal-intermedia, al variar en 2.14%, 2.78%, 3.91%, 4.30%, 4.77% y 4.41% entre los tratamientos evaluados a 0, 800, 1 200, 1 600, 2 000 y 4 000 mg L⁻¹ de AIB, respectivamente.

En lo que respecta a la altura total de los esquejes, se observó que la porción intermedia-apical fue mayor que la porción basal-intermedia, al lograr incrementos de 4.58%, 5.37%, 6.18%, 6.49%, 6.88% y 6.58% entre los tratamientos evaluados a 0, 800, 1 200, 1 600, 2 000 y 4 000 mg L⁻¹ de AIB, respectivamente. A diferencia del nivel de concentración de 4 000 mg L⁻¹, donde no se apreció diferencia significativa ($p \leq 0.05$) alguna entre ambas porciones (Cuadro 2).

Según Vercruyssen *et al.* (2011), la arquitectura de las raíces proporciona un anclaje importante para las plantas y permiten sintetizar hormonas que influyen en el desarrollo de los brotes, estos factores, Pudieron haber propiciado que la porción intermedia-apical lograra un mayor incremento en la fitomasa de la parte aérea, así como una mejor actividad energética.

Además, la efectividad en el porcentaje de enraizamiento a partir de la concentración de 800 mg L⁻¹ de AIB, tanto en las porciones basal-intermedia como intermedia-apical de los esquejes de *S. verrucosum*, confirmó el bajo requerimiento de auxinas exógenas que se necesitan para detonar su enraizamiento; esto demuestra que la especie es de fácil enraizamiento. Lo anterior, podría explicarse por los procesos que tienen lugar durante el enraizamiento, como son: la acumulación de metabolitos en el sitio de aplicación de las auxinas, la síntesis de nuevas proteínas y la división de las células vasculares del cambium (Mehta *et al.*, 2018). De acuerdo con Veras *et al.* (2018), a partir de la aplicación exógena de AIB, se estimula la formación de traqueidas por diferenciación de las células del callo, principalmente en el xilema, lo que a su vez conduce a una mayor producción y formación de raíces adventicias.

Sin embargo, a partir de la concentración de 2 000 mg L⁻¹ de AIB tanto en la porción basal-intermedia como intermedia-apical de los esquejes de *S. verrucosum*, no se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en cuanto al incremento en las variables estudiadas (biomasa de raíz y parte aérea, longitud de raíz, número de raíces, diámetro del tallo y altura de las plantas), lo cual obedece a la velocidad de enraizado y a los brotes que fueron originados como respuesta a la concentración de AIB, ya que la dosis óptima depende de cada especie (Carranza *et al.*, 2012).

A esto, se debe agregar que varios estudios han indicado que la existencia de las bacterias endofíticas, presentes en la especie *S. verrucosum*, promueven el crecimiento de estas plantas y su fisiología, al alterar sus procesos de regulación en la presión osmótica, los cambios en las respuestas de los estomas, el ajuste en la morfología del tamaño de la raíz, la modificación de la acumulación de nitrógeno y el metabolismo, la producción de hormonas como auxinas, giberelinas y zeatina, así como la absorción y traslocación de ciertos minerales (El-Awady *et al.*, 2015).

Conclusiones

Los resultados de esta investigación demostraron que el uso de IBA para tratar esquejes de la especie *S. verrucosum*, mejoraron la tasa de enraizamiento y la magnitud de los parámetros biométricos, tanto en la porción intermedia-apical como en la porción basal-intermedia.

También, se encontró que con el uso del suelo arcilloso y estiércol en una proporción (5:1), se beneficia la propagación masiva de *S. verrucosum*; al presentar una elevada tasa de crecimiento y supervivencia que se potencializa con la ayuda del AIB, principalmente a 2 000 mg L⁻¹.

Por tanto, a través de este método de propagación, se puede contribuir a salvaguardar los sectores más vulnerables, sobre todo, en las regiones con sistemas poco productivos, dadas las condiciones de salinidad elevada en las que se hallan inmersas.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (SIP-IPN-20196677). Los autores agradecen al M. O. E, por su asistencia técnica en el laboratorio; el primer autor agradece a CONACYT por la beca otorgada para realizar estudios de doctorado.

Literatura citada

- Akwatulira, F.; Gwali, S.; Okullo, J. B. L.; Ssegawa, P.; Tumwebaze, S. B.; Mbwambo, J. R. and Muchugi, A. 2011. Influence of rooting media and indole-3-butyric acid (IBA) concentration on rooting and shoot formation of *Warburgia ugandensis* stem cuttings. *Afr. J. Plant Sci.* 5(8):421-429.
- Azofeifa-Bolaños, J. B.; Rivera-Coto, G.; Paniagua-Vásquez, A. and Cordero-Solórzano, R. 2018. Respuestas morfogénicas de plantas in vitro y esquejes de *Vanilla planifolia* (Orchidaceae) durante el desarrollo inicial del cultivo en invernadero y en sistemas agroforestales. *Cuadernos de Investigación UNED.* 10(2):368-378.
- Cabahug, R. A. M.; Nam, S. Y.; Lim, K. B.; Jeon, J. K. and Hwang, Y. J. 2018. Propagation Techniques for Ornamental Succulents. 26(3):90-101.
- Carranza, P. M.; Cruz, I. O.; Nieto, R. E.; Saucedo, A. S.; Cevallos, F. O.; Escobar, T. A.; Reyes, C. X. and Morante, C. J. 2012. Propagación de *Tabebuia donnell-smithii* Rose (Guayacán blanco) utilizando hormonas de enraizamiento. *Ciencia y Tecnología.* 5(2):17-26.
- Delgado, M. F.; Cuba, M.; Hechenleitner, P. and Thiers, O. 2008. Propagación vegetativa de taique (*Desfontainia spinosa*) y tepa (*Laureliopsis philippiana*) con fines ornamentales. *Bosque (Valdivia).* 29(2):120-126.
- El-Awady, M. A.; Hassan, M. M. and Al-Sodany, Y. M. 2015. Isolation and characterization of salt tolerant endophytic and rhizospheric plant growth-promoting bacteria (PGPB) associated with the halophyte plant (*Sesuvium verrucosum*) grown in KSA. *Inter. J. Appl. Sci. Biotechnol.* 3(3):552-560.
- Elbar, O. H. A. 2015. Development of the successive cambia in *Sesuvium verrucosum* Raf (Aizoaceae). *Annals Agric. Sci.* 60(2):203-208.
- Ferriani, A. P.; Deschamps, C.; Do-Amaral, W. and Da-Silva, L. E. 2018. Propagation of three native Brazilian Piper species by cuttings and indole butyric acid. *Rev. Colomb. Cienc. Hortíc.* 12(2):491-499.
- Lastiri-Hernández, M. A.; Álvarez-Bernal, D.; Ochoa-Estrada, S. and Contreras-Ramos, S. M. 2020. Potential of *Bacopa monnieri* (L.) Wettst and *Sesuvium verrucosum* Raf. as an agronomic management alternative to recover the productivity of saline soils. *Inter. J. Phytoremediation.* 22(4):343-352.
- López-Acosta, F. J.; Guío-Tenjo, N. R.; Fischer, G. and Miranda-Lasprilla, D. 2008. Propagación de Uchuva (*Physalis peruviana* L.) mediante diferentes tipos de esquejes y sustratos. *Rev. Facultad Nacional de Agronomía-Medellín.* 61(1):4347-4357.

- López-Medina, E.; Gil-Rivero, A. E. y López-Zavaleta, A. 2016. Enraizamiento de esquejes de *Stevia rebaudiana* Bertoni (Asteraceae) “estevia”, aplicando dosis creciente de ácido indolbutírico. *Arnaldoa*. 23(2):569-576.
- Ludwig-Müller, J. 2000. Indole-3-butyric acid in plant growth and development. *Plant Growth Regulation*. 32(2-3):219-230.
- McSorley, K. A.; Rutter, A.; Cumming, R. and Zeeb, B. A. 2016. Chloride accumulation vs chloride excretion: Phytoextraction potential of three halophytic grass species growing in a salinized landfill. *Sci. Total Environ*. 572(1):1132-1137.
- Mehta, S. K.; Singh, K. K. and Harsana, A. S. 2018. Effect of IBA concentration and time of planting on rooting in pomegranate (*Punica granatum*) cuttings. *J. Medicinal Plants Studies*. 6(1):250-253.
- Montoya-García, C. O.; Volke-Haller, V. H.; Trinidad-Santos, A. and Villanueva-Verduzco, C. 2018. Concentración nutrimental de la verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) en respuesta a la fertilización con NPK. *Agrociencia*. 52(2):241-254.
- Munns, R. and Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Rev. Plant Biol*. 59(1):651-681.
- Mustafa, G. and Khan, M. S. 2016. Differential role of indolebutyric acid in sugarcane root development. *Sugar Tech*. 18(1):55-60.
- Nikalje, G. C.; Srivastava, A. K.; Pandey, G. K. and Suprasanna, P. 2018. Halophytes in biosaline agriculture: Mechanism, utilization, and value addition. *Land Degradation & Development*. 29(4):1081-1095.
- Nouri, H.; Borujeni, S. C.; Nirola, R.; Hassanli, A.; Beecham, S.; Alaghmand, S. and Mulcahy, D. 2017. Application of green remediation on soil salinity treatment: a review on halophytoremediation. *Process Safety and Environmental Protection*. 107(1):94-107.
- Qadir, M.; Qureshi, R. H. and Ahmad, N. 1997. Nutrient availability in a calcareous saline sodic soil during vegetative bioremediation. *Arid Land Research and Management*. 11(4):343-352.
- Ramos-Hernández, L.; Arozarena-Daza, N. J.; Lescaille-Acosta, J.; García-Cisneros, F.; Tamayo-Aguilar, Y.; Castañeda-Hidalgo, E. y Rodríguez-Ortiz, G. 2013. Dosis de pectimorf® para enraizamiento de esquejes de guayaba var. Enana Roja Cubana. *Rev. Mex. Cienc. Agríc*. 6(Pub. Esp):1093-1105.
- Reyes, J. J.; Murillo, B.; Nieto, A.; Troyo, E.; Reynaldo, I. M.; Rueda, E. O. y Cuervo, J. L. 2014. Crecimiento y desarrollo de variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) en condiciones de salinidad. *Terra Latinoam*. 32(1):35-45.
- SAS Institute Inc. 2004. Statistical Analysis System (SAS), version 9.4. SAS Institute Inc Cary N. C., USA.
- Siegel, S. 1974. Estadística no paramétrica, aplicada a las ciencias de la conducta. (Ed.). Trillas. México, DF.
- Singh, K. K. 2014. Effect of IBA concentrations on the rooting of pomegranate (*Punica granatum* L.) cv. Ganesh hardwood cuttings under mist house condition. *Plant Archives*. 14(2):1111-1114.
- Tosta, M. S.; Oliveira, C. V. F.; Oliveira de Freitas, R. M.; Nascimento Porto, V. C.; Nogueira, N. W. and Aquino, F. T. P. 2012. Ácido indolbutírico na propagação vegetativa de umbu-cajazeira (*Spondias* sp.). *Semina: Ciências Agrárias*. 33(1):2727-2740.
- Vanneste, S. and Friml, J. 2009. Auxin: a trigger for change in plant development. *Cell*. 136(6):1005-1016.

- Veras, M. L.; Mendonca, R.; Silva, S. M.; Figueredo, L. F.; Araujo, V. L.; Pereira, W. E. and Andrade, R. 2018. Propagation of Umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.), a native plant to Brazilian semi-arid regions, using ethephon and indolebutyric acid (IBA). *Austr. J. Crop Sci.* 12(4):602-609.
- Vercruyssen, L.; Gonzalez, N.; Werner, T.; Schmülling, T. and Inzé, D. 2011. Combining enhanced root and shoot growth reveals cross talk between pathways that control plant organ size in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 155(3):1339-1352.