



Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

EFECTO DEL ÁCIDO SALICÍLICO EN EL INCREMENTO DE BIOMASA Y AZÚCARES REDUCTORES EN *Agave cupreata* Y *Agave salmiana*

EFFECT OF SALICYLIC ACID ON INCREASE OF BIOMASS AND REDUCING SUGARS IN *Agave* *cupreata* AND *Agave salmiana*

García-Núñez, H.G., A.M. Arzate-Fernández, A.M. Roque-Otero, M. Rubí-Arriaga, A. Domínguez-López
EFECTO DEL ÁCIDO SALICÍLICO EN EL INCREMENTO DE BIOMASA Y AZÚCARES REDUCTORES EN
Agave cupreata Y *Agave salmiana*
EFFECT OF SALICYLIC ACID ON INCREASE OF BIOMASS AND REDUCING SUGARS IN *Agave cupreata*
AND *Agave salmiana*

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 61: 329-342 México. Enero 2026

DOI: 10.18387/polibotanica.61.19



Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0
Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Efecto del ácido salicílico en el incremento de biomasa y azúcares reductores en *Agave cupreata* y *Agave salmiana*

Effect of salicylic acid on increase of biomass and reducing sugars in *Agave cupreata* and *Agave salmiana*

Hilda Guadalupe García
Núñez, Amaury Martín Arzate-
Fernández, Ana María Roque-
Otero, Martín Rubí-Arriaga,
Aurelio Domínguez-López

EFFECTO DEL ÁCIDO
SALICÍLICO EN EL
INCREMENTO DE
BIOMASA Y AZÚCARES
REDUCTORES EN *Agave*
cupreata Y *Agave salmiana*

EFFECT OF SALICYLIC
ACID ON INCREASE OF
BIOMASS AND REDUCING
SUGARS IN *Agave cupreata*
AND *Agave salmiana*

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 61: 329-342. Enero 2026

DOI:
10.18387/polibotanica.61.19

Hilda Guadalupe García-Núñez <https://orcid.org/0000-0002-3758-8114>

Amaury Martín Arzate-Fernández / amaury1963@yahoo.com.mx 

<https://orcid.org/0000-0001-8603-0099>

Ana María Roque-Otero

Martín Rubí-Arriaga

Aurelio Domínguez-López

Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento,
Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México,
Km 11.5 Carretera Toluca- Ixtlahuaca, 50200, Toluca, Estado de México
C.P. 50200 Toluca, México

RESUMEN: El agave es una planta suculenta rica en azúcares naturales lo que la hace ideal para la producción de bebidas espirituosas, entre las que destaca el tequila, mezcal, bacanora y pulque. La principal materia prima para producir estas bebidas son las piñas o tallos que contienen azúcares fermentables. La cantidad y tipo de azúcares contenidos en el tallo determina la calidad del alcohol producido en estas plantas. La producción del agave es limitada debido a que, su ciclo reproductivo es muy largo (7-35 años) y dependiendo de la especie, dichas piñas se cosechan cuando alcanzan la madurez óptima. Ante esta problemática, es importante buscar estrategias eficientes y ecológicas para acelerar el crecimiento y biomasa de estas plantas, en este sentido se ha reportado que el ácido salicílico (AS) es una hormona vegetal que juega un papel muy importante en la regulación del crecimiento y desarrollo de las plantas. Además, participa en algunos mecanismos que influyen en el incremento de la biomasa. Por lo que, su aplicación podría potenciar el metabolismo del agave. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de AS en el crecimiento, incremento de biomasa y azúcares reductores en plantas de *Agave cupreata* y *A. salmiana*, cultivadas en un sistema semi-hidropónico bajo condiciones de invernadero, donde todas las plantas se evaluaron plantas en igualdad de condiciones de nutrición. Después de 8 meses de cultivo, se colectaron tanto las hojas, tallos como la raíz de las plantas para evaluar el efecto del AS en las características morfológicas, así como la cantidad de materia orgánica seca y cuantificación de azúcares reductores. El AS tuvo un efecto diferencial en las dos especies de agave evaluadas; en el tallo de *A. cupreata* se observó un incremento significativo en la materia orgánica seca cuando se aplicó 1 μ M, mientras que en *A. salmiana* mostró una alta concentración de materia seca orgánica en la raíz cuando se aplicó 3.6 μ M de AS. El incremento significativo de azúcares reductores (72 g/100 g) se presentó en el tallo y hojas de *Agave salmiana* con 1 μ M de AS, siendo la hoja la que mostró el mayor incremento de biomasa en ambas especies de agave. El crecimiento, la biomasa y la concentración de azúcares reductores disminuyeron como un efecto negativo con la concentración más alta de AS (7.2 μ M). En este estudio, la aplicación de bajas concentraciones de ácido salicílico demostró influir positivamente en el incremento de la biomasa y en la cantidad de azúcares reductores de las plantas de agave, mientras que en concentraciones altas el AS produce un efecto inhibitorio de estas variables. Por otra parte, la producción de plantas de agave bajo condiciones de invernadero en sistemas semi-hidropónicos, es una estrategia que puede ayudar a las plantas a potenciar su velocidad de crecimiento e incrementar su biomasa lo cual implica, la obtención de azúcares reductores en menos tiempo, al hacer más eficiente la

fotosíntesis, además, optimiza el ahorro del agua en el riego, como una estrategia ecológica que ayuda a cuidar este recurso natural. Este estudio constituye el primer reporte de la aplicación de AS en plantas con metabolismo CAM.

Palabras clave: Agave, Biomasa, Ácido salicílico, Azúcares.

ABSTRACT: Agave is a succulent plant rich in natural sugars, making it ideal for the production of spirits, most notably tequila, mezcal, bacanora, and pulque. The main raw material for producing these beverages is the stem, or heart of the agave, which contain fermentable sugars. The quantity and type of sugars in the stem determine the quality of the alcohol produced. Agave production is limited because its reproductive cycle is very long (7-35 years), and depending on the species, the stems are harvested when they reach optimal maturity. Given this limitation, it is important to seek efficient and ecological strategies to accelerate the growth and biomass of these plants. In this regard, salicylic acid (SA) has been reported as a plant hormone that plays a crucial role in regulating plant growth and development. Furthermore, it participates in some mechanisms that influence biomass increase. Therefore, its application could enhance agave metabolism. The objective of this study was to evaluate the effect of different concentrations of salicylic acid (AS) on the growth, biomass increase, and reducing sugars in *Agave cupreata* and *A. salmiana* plants cultivated in a semi-hydroponic system under greenhouse conditions, where all plants were evaluated under identical nutritional conditions. After 8 months of cultivation, leaves, stems, and roots were collected to assess the effect of AS on morphological characteristics, as well as the amount of dry organic matter and reducing sugars. AS had a differential effect on the two agave species evaluated; in the stem of *A. cupreata*, a significant increase in dry organic matter was observed when 1 μM was applied, while in *A. salmiana*, a high concentration of dry organic matter was observed in the root when 3.6 μM of AS was applied. A significant increase in reducing sugars (72 g/100 g) was observed in the stem and leaves of *Agave salmiana* with 1 μM of salicylic acid (SA), with the leaves showing the greatest increase in biomass in both agave species. Growth, biomass, and reducing sugar concentration decreased negatively with the highest SA concentration (7.2 μM). In this study, the application of low concentrations of salicylic acid positively influenced the increase in biomass and reducing sugar content of agave plants, while at high concentrations, SA had an inhibitory effect on these variables. Furthermore, the production of agave plants under greenhouse conditions in semi-hydroponic systems is a strategy that can help plants accelerate their growth rate and increase their biomass. This translates to faster production of reducing sugars by making photosynthesis more efficient. Additionally, it optimizes water conservation during irrigation, serving as an environmentally friendly strategy to help protect this natural resource. This study constitutes the first report of the application of SA and semi-hydroponic systems in plants with CAM metabolism.

Key words: Agave, Biomass, Salicylic Acid, Sugars.

INTRODUCCIÓN

En México, los agaves tienen una amplia importancia económica, agroecológica y cultural debido a sus múltiples usos (Mendoza-García, 2007), dentro de los cuales destaca la variedad de bebidas alcohólicas hechas a partir de la fermentación del azúcar en el agave y su destilación. La demanda de la producción del agave se ha centrado en la fabricación y preparación de bebidas como el tequila, mezcal, bacanora y el pulque. La principal materia prima para producir estas bebidas es la piña o tallo que contiene azúcares fermentables. El tipo y la cantidad de azúcares contenidos en el tallo determinan el volumen y calidad del alcohol, así como los compuestos que confieren las características sensoriales del producto, lo cual puede medirse en °Brix. Los grados Brix son una unidad indicadora del grado de concentración de azúcar y se expresa como: gramos de azúcar en 100 gramos de solución. En la madurez óptima un agave alcanza de 24 a 28 °Brix aproximadamente, este parámetro varía dependiendo de la etapa de crecimiento y especie de agave. La producción de esta especie se limita a su ciclo productivo que es muy largo, algunas especies alcanzan su madurez hasta los 7 ó 35 años. Debido a esta situación, los productores

utilizan agaves de diferentes edades para complementar la demanda de mezcal y pulque. Esta práctica deriva en una diferencia de contenido de azúcares acumulados en el tallo acaule de las plantas, aunado al incremento de los costos de producción. Ante esta problemática es importante generar estrategias que permitan potenciar el crecimiento, desarrollo y biomasa del agave para incrementar el contenido de azúcares reductores en un ciclo productivo más corto. En este sentido, se ha reportado que el ácido salicílico (AS) es un regulador del crecimiento y su aplicación puede potenciar el incremento de la biomasa y azúcares reductores (Larqué-Saavedra & Martín-Mex, 2007). Así mismo, se ha reportado que, al aplicar AS, se observó un incremento radical en el tamaño de las plantas y en consecuencia un aumento en la productividad del cultivo (Martín-Mex *et al.*, 2013). En un estudio, Arrazola-Cárdenas *et al.* (2020), utilizaron diferentes frecuencias entre los riegos y varias concentraciones de solución nutritiva para mejorar la calidad del cultivo de trigo y obtuvieron resultados exitosos. En otro estudio reportado por Sánchez-Mendoza y Bautista-Cruz (2022) en donde aplicaron fertilizantes de liberación lenta y fitohormonas en el crecimiento de *Agave angustifolia* Haw, obtuvieron un incremento de la biomasa. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de AS en el crecimiento, en el incremento de biomasa y azúcares reductores en plantas de *Agave cupreata* y *A. salmiana*, cultivadas en un sistema semi-hidropónico bajo condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Establecimiento de los sistemas semi-hidropónicos

Se construyeron cuatro sistemas semi-hidropónicos, para cada uno se utilizaron tubos de PVC hidráulico (19 mm de diámetro) los cuales fueron cortados y unidos en forma de un cubo para sostener en la parte superior a seis tubos (75 mm), con un espacio de 8 cm entre cada uno de los tubos, cada tubo en la parte superior con cuatro perforaciones de un diámetro de 10 cm en los cuales se colocaron las plántulas de *Agave cupreata* y *A. salmiana*, cada sistema con capacidad para 40 plantas (Figura 1). En la parte superior se colocó un despachador con seis mangueras, por las cuales circuló la solución nutritiva (en ppm, mg/L: N=166.01, P=31.35, K=277.38, Ca=182.06, Mg=49.08, S=110.89, Fe=1.33, Cu=0.00065, Mn=0.201 y Zn= 0.03), pH 5.8-6.0, C.E. 1.5-2.5 dS/m según lo reportado por (Castañeda-Cervantes & Arzate-Fernández, 2025) en un contenedor de 40 L y dentro de éste una bomba sumergible de agua con una capacidad de 300 L/h y 65 w, para recircular el agua al sistema y una bomba de aire con una capacidad de 60 L. Se utilizó un DATA LOG GSP-8 para el monitoreo de temperatura y humedad en el invernadero, el cual registró una temperatura promedio de 15.3° C, una máxima de 43.8° C, y una mínima de -2.9° C, y una humedad promedio de 75.2%, en un período de 12 meses.



Figura 1. Sistema semi-hidropónico de PVC con capacidad para 40 plantas.

Figure 1. Semi-hydroponic PVC system with capacity for 40 plants.

Origen y germinación de la semilla

En el presente estudio se utilizaron semillas de *Agave cupreata* y *A. salmiana*, colectadas en el Estado de Guerrero en 2021 y almacenadas en el banco de semillas del Laboratorio de Biología Molecular Vegetal de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Para la germinación de las semillas se preparó un sustrato a base de turba, agrolita y fibra de coco en una proporción 1:1:1, se homogenizó y esterilizó en una autoclave a 120 °C durante 20 min a una presión de 1.1 kg/cm². Posteriormente, se colocó una capa de 5 cm de altura del sustrato en una charola germinadora de 25x40 cm., y se colocaron las semillas previamente desinfectadas en hipoclorito de sodio al 5% v/v durante 3 min (Rodríguez-García *et al.* 2020), y encima del sustrato, sobre las semillas, se colocó una capa delgada de ocoxal de pino, y finalmente se regó con suficiente agua para que el sustrato estuviera húmedo.

Trasplante de las plántulas a los sistemas semi-hidropónicos

A partir de la cuarta semana de germinación, apareció la primera hoja o penca en las plántulas de agave, estas fueron desinfectadas durante 10 min en agua con ozono, posteriormente fueron transferidas a vasos de plástico biodegradable con una capacidad de 200 mL, los cuales fueron perforados 5 mm de diámetro en la base y se introdujo un hilo-estambre de 15 cm que ayudó a absorber el agua por capilaridad, cada vaso se llenó con sustrato a base de 100% tepojal con un

diámetro de partícula de 2 mm, enseguida fueron establecidos en un sistema semi-hidropónico para el crecimiento y endurecimiento de las plantas.

Riego de las plantas y tratamientos

En cada sistema semi-hidropónico se colocaron 24 plantas creciendo con las mismas características físicas (edad, vigor), además todas con el mismo sustrato, solución nutritiva y la misma frecuencia de riegos tres veces al día (por la mañana, en la tarde y por la noche, cada riego durante 15 min de lunes a sábado) durante 2 meses. Después de este período se establecieron los tratamientos con tres concentraciones de Ácido salicílico (1.0, 3.6 y 7.2 μM) y el testigo (0.0 μM), empleando sólo agua para el tratamiento control, según la técnica descrita por (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 1998). Los tratamientos se aplicaron durante 6 meses consecutivos directamente en el contenedor del sistema semi-hidropónico.

Análisis de las variables físicas

Después de completarse un período de 15 meses las plantas fueron extraídas de los sistemas semi-hidropónicos y se registraron los siguientes datos: número hojas, longitud y ancho de la hoja. Se midió el diámetro del tallo con un Vernier digital (Truper, CALDI- 6MP). Posteriormente, las plantas fueron seccionadas en tres partes: hoja, tallo y raíz para los análisis de biomasa y determinación de azúcares reductores en laboratorio.

Análisis de biomasa

Se obtuvieron los pesos frescos de hoja, tallo y raíz de cada planta, con una balanza analítica (Sartorius, BP221S), después, cada una de estas muestras se colocaron en una incubadora (Felisa, Modelo FE133A) a una temperatura de 65 °C durante 72 h para eliminar la humedad. Posteriormente, las muestras se pesaron para determinar la cantidad de biomasa seca y finalmente fueron molidas hasta su pulverización con un molino eléctrico (General Electric, modelo 5XBG00G), con una criba de 20 micras. La materia orgánica seca de las hojas y tallo se depositó en un crisol de porcelana a peso constante, el cual previamente se colocó en una mufla a 550 °C durante una hora, posteriormente el crisol se puso en un desecador y se dejó enfriar a temperatura ambiente, se determinó el peso del crisol en balanza analítica y se registraron los datos como la variable A. Después se tomó una muestra representativa de 5 g previamente seca, se colocó en el crisol y se determinó el peso en la balanza analítica y se registró el dato, como la variable B. Enseguida se incineraron las muestras utilizando un mechero hasta que no emitiera humo y las paredes del crisol estuvieron blancas, entonces se introdujo el crisol, con la muestra calcinada, a la mufla a 550 °C durante 24 h; pasado el tiempo, se pasó el crisol al desecador y se dejó enfriar hasta temperatura ambiente, por último se determinó el peso del crisol con la muestra calcinada y se registró el valor como la variable C.

Ecuación:

$$\text{Cenizas \%} = \frac{C - A}{B - A} \times 100$$

Donde:

A= Peso del crisol vacío en gramos

B= Peso del crisol y la muestra seca en gramos

C= Peso del crisol y la muestra calcinada en gramos

Cuantificación de azúcares reductores

Se cuantificó la concentración de azúcares reductores por el Método DNS de Miller con algunas modificaciones. Se seleccionaron al azar muestras de hoja y de tallo de las plantas de 15 meses de edad, establecidas en los sistemas semi-hidropónicos. Las muestras se lavaron con agua corriente. En un matraz de 500 mL se disolvieron 4.8 g de NaOH (hidróxido de sodio) y se agregaron 120 mL de agua destilada, posteriormente se colocó sobre un agitador orbital, y se adicionaron 90 g de Na-K₂H₂O₄ (tartrato de sodio y potasio), finalmente se aforó hasta 240 mL con agua destilada y se homogenizó la solución. Enseguida se añadieron 3 g de DNS (ácido 3,5-

dinitrosalisílico), se agregaron 140 mL de agua destilada, se dejó en agitación 12 h, por último, se filtró la solución y se almacenó en un frasco ámbar a 4 °C. Para evaluar la concentración de azúcares reductores, se determinó una curva patrón de calibración de absorbancia en función de la concentración. Para esto, se prepararon soluciones de 0-5 mg/L, utilizando glucosa como estándar, se agregó 0.5 g de muestra y se aforó a 10 mL y se centrifugó a 10,000 rpm durante 10 minutos para obtener la muestra deseada. A cada una de las muestras se aplicó el método DNS, cuya reacción se llevó a cabo en tubos de cristal de 10 mL, a los cuales se adicionaron 0.5 mL de muestra y 0.5 mL del reactivo DNS, se colocaron a ebullición durante 5 min, se enfriaron con hielo y se les añadió 5 mL de agua destilada, se homogenizó la muestra. A cada una de las muestras se les tomó una lectura de las absorbancias a una longitud de onda 540 nm en el espectrofotómetro (Genesys 10 vis) y el mismo procedimiento se realizó para el blanco para lo cual se utilizó agua destilada.

Diseño experimental

El manejo estadístico de la información consistió en un análisis de regresión completamente al azar, para el cual se tomaron siete plantas por tratamiento incluyendo al control, de la cuales se realizaron tres repeticiones para ambas especies, la variable independiente fue la concentración del ácido salicílico (AS) y las variables dependientes fueron aquellas respuestas relacionadas con las características fenológicas (número de hojas, longitud, ancho de la hoja, diámetro del tallo y materia seca) y una variable química (azúcares reductores). Los datos obtenidos se analizaron por medio del programa estadístico Stathgraphics Plus Versión 5.0. En aquellas variables donde se presentó diferencia significativa, se realizó una prueba de comparación de medias (método DMS) con un nivel de significancia del 95%. No se realizaron pruebas adicionales con los datos que no presentaron diferencias significativas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de las variables físicas

Número de hojas

Los resultados de la evaluación del efecto del Ácido salicílico, en el número, la longitud y ancho de hoja así como en el diámetro del tallo de las plantas de *A. cupreata* y *A. salmiana*, mostraron lo siguiente: en ambas especies de agave, se observó la formación completa de la primera hoja a partir de la cuarta semana, después de la germinación. En la figura 2A, se puede observar la gráfica de las medias respecto al número de hojas en *A. cupreata* donde, la primera barra corresponde al tratamiento control en el cual se registraron 10 hojas por planta, mientras que, en los tres tratamientos con 1.0, 3.6 y 7.2 μM de AS se registraron 11 hojas por planta, lo que indica que no hubo diferencias significativas entre las concentraciones aplicadas para promover la diferenciación celular en las hojas de esta especie. Sin embargo, en *A. salmiana* (Figura 2B), si hubo diferencias significativas, ya que el control mostró una media de 8.0 hojas por planta y para los tratamientos con 1.0, 3.6 y 7.2 μM de AS, registraron una media de 9.3, 9.5 y 7.8 hojas, respectivamente, donde con la concentración de 3.6 μM se observó el mayor número de hojas en comparación con el testigo, por lo que el AS mostró tener un efecto favorable para diferenciación celular en nuevas hojas en la planta que cuando se aplicó 1.0 y 3.6 μM , pero la concentración de 7.2 μM no favoreció el número de hojas en esta especie, incluso fue ligeramente menor al control el cual registró 8.2 hojas. Sin embargo, al comparar el efecto del AS en el número de hojas en ambas especies, *A. cupreata* registró una media de 11 hojas por planta y el testigo 10.2, mientras que *A. salmiana* registró 8.9 hojas por planta en promedio y su testigo 8.2, esto indica que el AS estimula de manera positiva en el desarrollo de hojas en la planta según la especie, teniendo una mejor respuesta en *A. salmiana*. Esto se debe a que el ácido salicílico es una hormona vegetal que regula el crecimiento, desarrollo, así como la respuesta al estrés oxidativo en las plantas, incluyendo el agave. Cuando el AS se encuentra dentro de la planta se encarga de bajar los niveles

de estrés, se activan los mecanismos fisiológicos y las rutas metabólicas relacionadas con la fotosíntesis (Ogunsiji *et al.*, 2023; Abdi *et al.*, 2023). Los azúcares son los productos más importantes de la fotosíntesis y la planta los distribuye de manera eficiente en toda su estructura para la formación de órganos, tales como la hoja. Es importante destacar que, si los azúcares se dirigen a las hojas jóvenes, estas crecen más rápido, es decir, entre mayor cantidad de azúcares mayor es el crecimiento de las hojas. De aquí la importancia de que el AS esté presente, pero en concentraciones adecuadas, para no inhibir su actividad. Por otra parte, a la planta le favorece tener hojas sanas y grandes, ya que de esta manera se mantiene activa la fotosíntesis y se reduce el estrés oxidativo en plantas como el agave.

Longitud y ancho de hoja

Por otra parte, en la figura 2C se puede observar el efecto del AS en la longitud (barras de color naranja) y el ancho de hoja (barras de color amarillo). En *A. cupreata* se encontró que la longitud de hoja fue mayor (11 cm) cuando se aplica una concentración de 1.0 μM de AS, comparada con el tratamiento control (8.69 cm), esto sugiere que el AS tiene un efecto positivo en la elongación de hojas. En esta especie, también se observó que el ancho de la hoja fue ligeramente mayor cuando se aplicó 1.0 μM y 3.6 μM (11.7 cm y 10.2 cm, respectivamente) con respecto al control (4.86 cm), por lo tanto, no hubo diferencias significativas para esta variable entre los tratamientos, pero sí con respecto al control. Para el caso de *A. salmiana* (Figura 2D), al aplicar 1.0 y 3.6 μM de AS la longitud de las hojas fue ligeramente mayor con 7.77 cm y 7.78 cm, respectivamente, comparado con el control (3.80 cm), sin embargo, para el ancho de hoja tampoco hubo diferencias significativas en esta especie. Así mismo se observó que, cuando se aplica una concentración de 7.2 μM de AS hay un menor ancho de hoja, lo cual indica que, esta concentración no favorece la elongación celular en la especie, sin embargo, no existen reportes en la literatura que muestren el efecto reportado en el presente trabajo. Aunque, Anchondo-Aguilar *et al.*, (2011) demostraron que bajas concentraciones de AS favorecen la altura y el número de hojas en *Fragaria annassa*. Por otra parte, Martin-Mex *et al.* (2012) han señalado que el AS también influye positivamente en la producción de frutos en *Carica papaya* ya que, al aplicar concentraciones de 0.01 μM incrementaron significativamente la altura y el grosor de la planta, así como el número y peso de los frutos. Estos resultados coinciden con los estudios reportados por Khoshbakht & Asgharei (2015) donde bajas concentraciones de AS influyeron en el incremento de la tasa fotosintética y en el crecimiento foliar en cítricos.

Diámetro de tallo

El efecto del AS sobre el diámetro del tallo se puede observar en la figura 1E, en donde para *A. cupreata* se observó que al aplicar una concentración de 1.0 μM de AS el tallo fue mayor (43.2 mm) comparando con el tallo del testigo (40.9 mm), mientras que cuando se aplicó 7.2 μM de AS el diámetro fue menor (38.8 mm) comparando con el tallo del tratamiento testigo (40.9 mm). Por otra parte, en *A. salmiana*, cuando se aplicó 3.6 μM de AS el diámetro del tallo fue mayor (39 cm) comparado con el control, pero cuando se aplicó 7.2 μM el diámetro del tallo registró un valor menor comparado, sin embargo, no hubo una diferencia significativa entre estos tratamientos. Estos resultados son importantes, ya que se observó un incremento del tallo en poco tiempo, esto quiere decir que, el AS pudo promover la elongación del tallo. Esto se debe a que el AS induce la expresión de genes relacionados con la síntesis de celulosa y hemicelulosa, componentes clave de la pared celular, además, el AS aumenta la actividad enzimática de la enzima fenilalanina amonio liasa (PAL), lo que conduce a un aumento en la síntesis de lignina, un componente importante de la pared celular. Debido a esto, el AS puede promover o inhibir el crecimiento celular, dependiendo de la concentración. En concentraciones bajas el AS puede estimular el crecimiento celular y aumentar la biomasa. Tal como sucedió en este estudio con la aplicación de concentraciones bajas en las plantas de agave. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, el efecto del AS en el incremento de la biomasa puede variar dependiendo de la especie de la planta así como de las condiciones ambientales. En cambio, altas concentraciones pueden inhibir el crecimiento actuando como regulador negativo. Tal como se observó en los resultados del presente estudio. Esto tiene una gran influencia positiva, ya que se ha reportado

que el AS activa genes relacionados con la síntesis de la RuBisCO (Ribulosa 15, Bifosfato, Carboxilasa, Oxigenasa) y sus subunidades LSU y SSU. Esto significa que las plantas tratadas con AS pueden producir mayor cantidad de la enzima en los cloroplastos lo que favorece la apertura estomática y optimiza el intercambio gaseoso en el mesófilo de la hoja. Al aumentar la concentración interna de CO_2 , la RuBisCO tiene mayor sustrato disponible para catalizar la carboxilasa, aumentando su eficiencia. Finalmente, como la RuBisCO es muy sensible al estrés oxidativo por calor, sequía o salinidad, el ácido salicílico activa enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), y peroxidasa (POD) que reducen especies reactivas de oxígeno (ROS). Esto protege la estructura y la función de la RuBisCO, evitando su degradación o su desactivación, esto implica que la producción de azúcares está segura para el tallo del agave, donde se acumulan los azúcares en forma de jugos, que servirán para la elaboración de bebidas como el mezcal y el pulque, favoreciendo la calidad y la cantidad de alcohol. Resultados similares han sido reportados por Tucuch *et al.* (2017) donde en plántulas de trigo los valores del diámetro del tallo estuvieron por encima del control al aplicar $1.0 \mu\text{M}$ de AS. Estos resultados también coinciden con los reportes de Hayat y Ahmad (2007) donde demostraron que la aplicación de AS en bajas concentraciones favorecieron el incremento de la bioproduktividad, sobre todo en el tamaño del área foliar, así como la longitud y densidad de las raíces, bajo condiciones de invernadero. Estos resultados coinciden con los estudios realizados por Khodary (2004) quien reportó que aplicaciones de 10 mM de AS en *Zea mays* aceleraron la actividad de la enzima RuBisCO, aumentando la actividad fotosintética; permitiendo un incremento en el contenido de clorofila a y b, de carotenoides y de carbohidratos; provocando un aumento también en la longitud, peso fresco y seco de la raíz; altura, biomasa seca y fresca de la parte aérea de la planta. En este estudio al analizar y comparar los resultados del efecto del AS sobre estas variables se puede decir que, la especie de *A. salmiana* respondió favorablemente en el crecimiento, número, longitud y ancho de las hojas, así como el incremento del diámetro de tallo, por lo tanto, la concentración de $3.6 \mu\text{M}$ influye positivamente en las tres variables evaluadas.

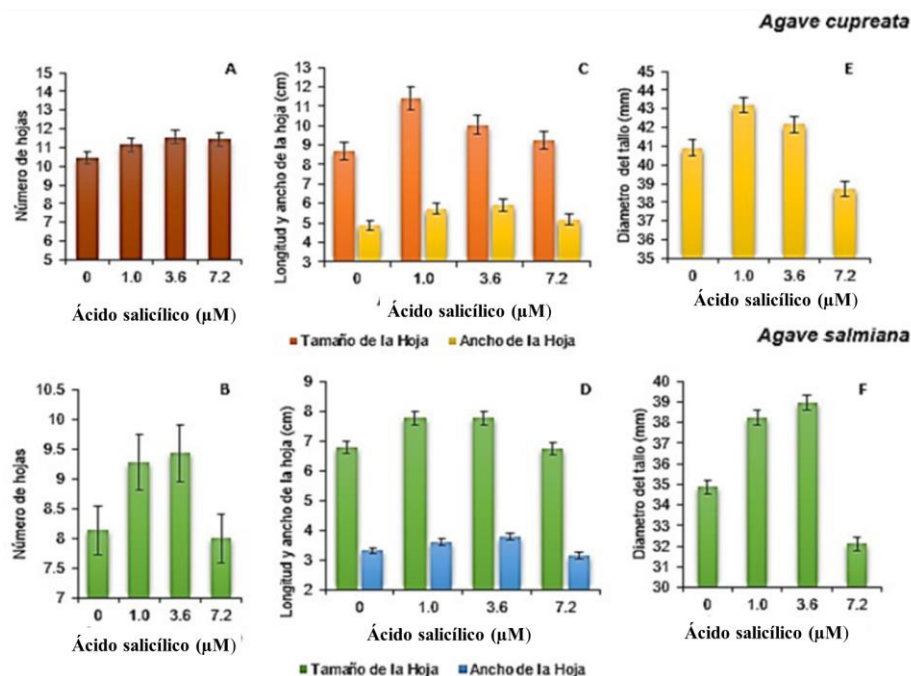


Figura 2. Efecto del Ácido salicílico en el número, la longitud y ancho de hoja, y el efecto en el diámetro del tallo de las plantas de *A. cupreata* y *A. salmiana*, de 15 meses de edad.

Figure 2. Effect of salicylic acid on the number, length and width of leaf, and the effect on stem diameter of 15-month-old *A. cupreata* and *A. salmiana* plants.

Efecto del ácido salicílico sobre el contenido de materia seca orgánica y azúcares reductores

Los resultados de la evaluación del efecto del AS sobre el contenido de materia seca orgánica y de azúcares reductores en *A. cupreata* mostraron diferencias significativas (Figura 3), indicando que con 1.0 μM de AS el contenido de materia orgánica se incrementó a (23 g/100 g) en el tallo, no así para la hoja y raíz, ya que se obtuvieron valores de 10 y 11 g/100 g, respectivamente, sin embargo, cuando se aplicó el AS a una concentración de 7.2 μM la materia orgánica seca disminuyó en el tallo y hoja, lo cual coincide con los resultados obtenidos de la formación de hojas y tamaño del tallo, donde el efecto fue negativo para la planta. Para el caso de la materia seca orgánica en *A. salmiana* (Figura 3B), en el tratamiento con 3.6 μM de AS, se obtuvo un valor de 23 g/100 g para la raíz, en cambio para el tallo y la hoja fue de 9 y 11 g/100 g, respectivamente, muy similar a los valores del tratamiento control de ambos órganos de la planta, sin embargo, se esperaba encontrar valores altos de materia seca orgánica cuando se aplicó 1.0 μM y coincidir con los valores registrados respecto al número de hoja y longitud de tallo. Esto se debe a que el AS favoreció la formación de las raíces laterales y el alargamiento de la raíz principal, lo que mejora la absorción del agua y nutrientes. Así como también, el AS promueve la traslocación de azúcares a las raíces aumentando el desarrollo celular. Esto también obedece a que el AS interactúa con otras fitohormonas como las auxinas y las citoquininas que coordinan la división celular, el crecimiento de raíces y brotes. Estos resultados coinciden con Gutiérrez-Coronado *et al.* (1998) quienes reportaron que, en soya la aplicación de bajas concentraciones de AS favoreció significativamente el crecimiento de la raíz.

También, se observó que los valores más bajos de materia seca para raíz, tallo y hoja se obtuvieron con 7.2 μM de AS, lo cual tiene una correspondencia a lo encontrado para el crecimiento de estos órganos en esta especie evaluada. En cuanto a los resultados de azúcares reductores en *A. cupreata* (Figura 3C), se pudo observar que la mayor concentración de azúcares fue superior en las hojas (56 g/100 g) que en el tallo y la raíz (8 y 2 g/100 g), respectivamente cuando se aplicó 1.0 μM de AS, y que estos disminuyeron con 7.2 μM de AS. En el caso de *A. salmiana* (Figura 3D), también la mayor concentración de azúcares se obtuvo con 1.0 μM de AS, donde el tallo y la hoja registraron una concentración de 76 g/100 g, comparado con el tratamiento control el cual alcanzó 30 g/100 g. Mientras que, la raíz alcanzó una concentración de 18 g/100 g. Estos resultados coinciden con los estudios reportados por González-Díaz *et al.* (2020) quienes mencionan que los azúcares, tales como los fructanos representan más del 80% del peso seco de las plantas de agave, incluyendo inulinas, fructooligosacáridos y estos dependen de la especie del agave y la edad de la planta. Además, los fructanos pueden localizarse en órganos superficiales como las hojas. También en el presente estudio, se reveló claramente que la concentración de 7.2 μM de AS no tiene un efecto potencializador en el crecimiento de la planta, ni en el contenido de materia seca orgánica y tampoco en la concentración de los azúcares reductores.

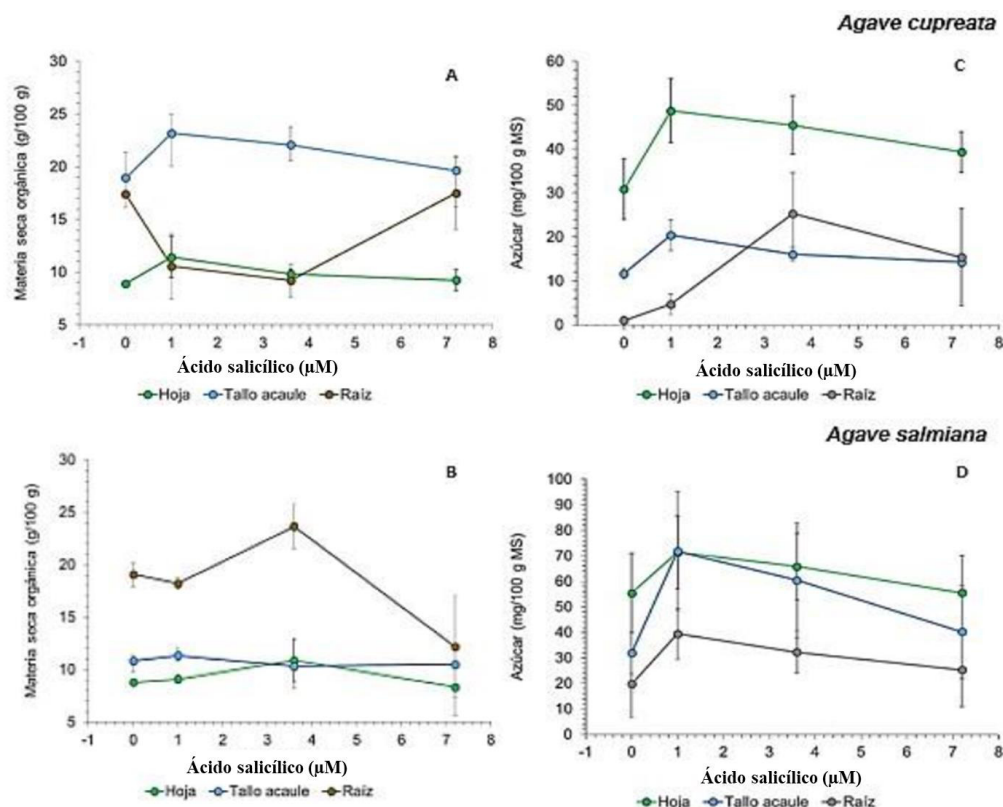


Figura 3. Efecto del ácido salicílico sobre el contenido de la materia seca orgánica y azúcar en plantas de *A. cupreata* (A y C) y *A. salmiana* (B y D) de 15 meses de edad. Las barras representan la DMS ($p \leq 0.05$).

Figure 3. Effect of salicylic acid on organic dry matter and sugar content in 15-month-old *A. cupreata* (A and C) and *A. salmiana* (B and D) plants. Bars represent DMD ($p \leq 0.05$).

Los resultados de la concentración de azúcares en las plantas de *A. cupreata* y *A. salmiana*, con respecto a la edad de las plantas y la concentración de AS, se observan en la figura 4. Para el caso de *A. cupreata*, a los 145 días de edad de la planta, se observó el mayor porcentaje de azúcares reductores 85 mg/100 g a una concentración de 3.0 µM de AS. En *A. salmiana*, el máximo nivel de azúcar se observó a una edad de 135 días de las plantas y con 2 µM de AS, lo que refleja la capacidad de esta especie de almacenar carbohidratos a temprana edad, específicamente fructanos, ya que las plantas de *A. tequilana* almacenan fructanos como principal carbohidrato de reserva según lo reportado por López *et al.* (2003); González-Díaz *et al.* (2020). Estos resultados coinciden con un estudio realizado por Medallo-Mojica y López-Pérez (2013) quienes reportaron que en plantas de *Agave tequilana* Weber var. azul extraídas a una edad de 2 a 7 años, las cuales mostraron que conforme aumenta la edad de la planta en campo, los fructanos almacenados se vuelven moléculas más complejas y muestran un incremento gradual. Esto sugiere que, en este estudio, si se hubiera continuado con las aplicaciones de AS podría haber aumentado el grado de polimerización de los fructanos. Por lo tanto, se podrán cosechar los tallos de agave en periodos relativamente más cortos. Además, el efecto del AS se comportó de forma diferenciada para cada uno de los tratamientos según la especie en estudio. Por otra parte, los resultados indican que este tipo de plantas con metabolismo CAM responden favorablemente a este regulador de crecimiento, incluso aplicado en bajas concentraciones, pero en niveles altos puede producir un efecto inhibitorio.

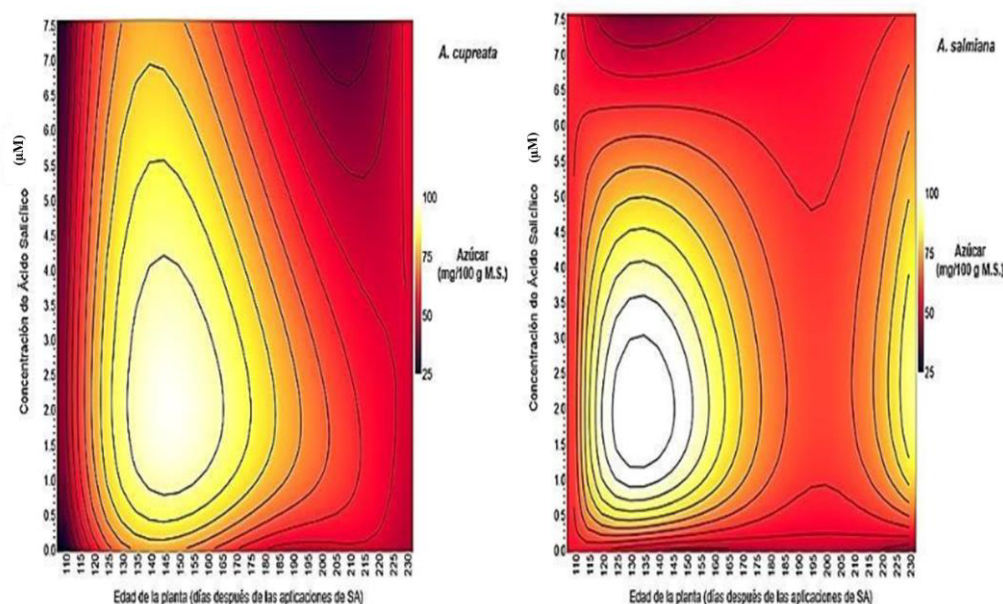


Figura 4. Iso-concentración de azúcares según la dosis de ácido salicílico y la edad de las plantas de *A. cupreata* (imagen izquierda) y *A. salmiana* (imagen derecha) de 15 meses de edad.

Figure 4. Iso-concentration of sugars according to the dose of salicylic acid and the age of 15-month-old *A. cupreata* (left image) and *A. salmiana* (right image) plants.

La producción de plantas de agave en sistemas semi-hidropónicos bajo condiciones de invernadero con aplicación de AS, podría ser una estrategia eficiente para potenciar la velocidad de crecimiento en las plantas al incrementar su biomasa, lo que implica la obtención de azúcares reductores en menos tiempo y ahorro de agua en el riego, lo cual lo hace un sistema eficiente y ecológico que ayuda a capturar más luz solar y dióxido de carbono, y esto también podría contribuir a disminuir el impacto del calentamiento global.

CONCLUSIONES

El ácido salicílico (AS) aplicado en bajas concentraciones tiene un efecto favorable sobre la reducción del estrés oxidativo, lo que favorece el crecimiento de la hoja, tallo y raíz de las plantas de agave, según la especie en estudio.

Altas concentraciones de ácido salicílico tienen un efecto negativo y ralentizan el crecimiento de las plantas de *A. cupreata* y *A. salmiana*.

La aplicación de AS en una concentración moderada tiene una influencia positiva sobre la activación permanente de la RuBisCO, la cual favorece la acumulación de los azúcares reductores en *A. cupreata* y *A. salmiana*, mientras que la aplicación en altas concentraciones de AS impide la acumulación de azúcares reductores en ambas especies estudiadas.

En este estudio, el AS favoreció la presencia de azúcares en el tallo del agave en un corto tiempo, lo cual indica que puede ser una opción para acelerar la obtención de alcoholes utilizados para la generación de bebidas fermentadas a partir de plantas de *A. salmiana* y *A. cupreata*.

Es posible el crecimiento de plantas de este género en sistemas semi-hidropónicos bajo condiciones de invernadero como una estrategia ecológica y sustentable de cultivo.

Este estudio puede aplicarse a otros casos de plantas de metabolismo CAM.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada con el número 781824

Financiamiento: Con recursos propios

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declaran que no hay conflicto de intereses entre ellos

Cumplimiento de normas éticas. No aplica

Disponibilidad de los datos: Los datos están disponibles con el Dr. Amaury Martín Arzate Fernández (autor para correspondencia: amaury1963@yahoo.com.mx, con previa solicitud)

Declaración de contribución del autor (CRediT). H.G. García-Núñez – Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Redacción, revisión y edición Investigación, A.M. Roque-Otero- Metodología, Validación, Redacción del borrador original, Análisis formal, Investigación, A.M. Arzate-Fernández- Conceptualización, Administración del proyecto, Redacción, revisión. A. Domínguez-López – Conceptualización, Investigación, Recursos, metodología, y revisión, Martín Rubí-Arriaga– Investigación y revisión.

LITERATURA CITADA

- Abdi, N., Van Biljon, A., Steyn, C., & Labuschgne, M. T. (2022). Salicylic Acid Improves Growth and Physiological Attributes and Salt Tolerance Differentially in Two Bread Wheat Cultivars. *Plants*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/plants11141853>
- Anchondo-Aguilar, A., Núñez-Barrios, A., Ruiz Anchondo, T., Martínez-Tellez, J., Vergara Yoisura, S., & Larqué-Saavedra, A. (2011). Effect of salicylic acid in bioproductivity of strawberry (*Fragaria ananassa*) cv Aronosa. In *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (2)2. 293-298. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263119711010>
- Castañeda Cervantes, C., & Arzate Fernández, A. M. (2025). Efecto de 6-bencilamino purina en dos especies de agave como estrategia de propagación en un sistema semi-hidropónico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 28(2), 1–7. <https://doi.org/10.56369/tsaes.5812>
- González-Díaz, R. L., Rodríguez-Gómez, F., & Cortés-Romero, C. (2020). Fructan exohydrolases y its importance in the metabolism of fructans in *Agave tequilana* Weber var. azul. *Revista Colombiana de Química*, 49(3), 3–12. <https://doi.org/10.15446/rcq.v49n3.84882>
- Gutiérrez-Coronado, M. A., Trejo-López, C., & Larqué-Saavedra, A. (1998). Effects of salicylic acid on the growth of roots and shoots in soybean. *Plant Physiology and Biochemistry*, 36(8), 563–565. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(98\)80003-X](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(98)80003-X)
- Hayat, S., & Ahmad, A. (2007). *Salicylic acid a plant hormone*. Springer. India. www.springer.com. ISBN-13 978-1-4020-5184-0 (e-book)
- Khodary, S. E. A. (2004). Effect of Salicylic Acid on the Growth, Photosynthesis and Carbohydrate Metabolism in Salt Stressed Maize Plants. *International Journal of & Biology*. <http://www.ijab.org>
- Khoshbakht, D., & Asgharei, M. R. (2015). Influence of foliar-applied salicylic acid on growth, gas-exchange characteristics, and chlorophyll fluorescence in citrus under saline conditions. *Photosynthetica*, 53(3), 410–418. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0109-2>
- Larqué-Saavedra, A., & Martin-Mex, R. (2007). *Chapter 2 Effects of Salicytic Acid on the Bioproductivity of plants*.

Recibido:
18/julio/2025

Aceptado:
8/diciembre/2025

- López, M. G., Mancilla-Margalli, N. A., & Mendoza-Díaz, G. (2003). Molecular Structures of Fructans from *Agave tequilana* Weber var. *azul*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(27), 7835–7840. <https://doi.org/10.1021/jf030383v>
- Martín-Mex, R., Nexticapan-Garcéz, Á., Herrera-Tuz, R., Vergara-Yoisura, S., & Larqué-Saavedra, A. (2012). Positive effect of salicylic acid application on productivity of papaya (*Carica papaya*). In *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (Vol. 3).
- Martín-Mex, R., Nexticapan-Garcéz, A., & Larqué-Saavedra, A. (2013). Potential Benefits of Salicylic Acid in Food Production. In *Salicylic acid* (pp. 299–313). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6428-6_13
- Medallo-Mojica, Erika., & López-Pérez, M. G. (2013). Análisis comparativo entre jarabe de agave azul (*Agave tequilana* Weber var. *azul*) y otros jarabes naturales. *Agrociencia*, 47 (Análisis comparativo entres jarabe de agave azul () *Agave tequilana* Weber var. *azul*) y otros jarabes naturales), 233–244. www.redalyc.org/articulo.oa?id=30226978003
- Mendoza-García, J. A. (2007). *Los agaves de México*. <https://www.researchgate.net/publication/26549731>
- Ogunsiji, E., Umebese, C., Stabentheiner, E., Iwala, E., Odjegba, V., & Oluwajobi, A. (2023). Salicylic Acid Enhances Growth, Photosynthetic Performance and Antioxidant Defense Activity Under Salt Stress in Two Mungbean [*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek] Variety. *Plant Signaling & Behavior*, 18 (1). <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2217605>
- Rodríguez-García, M. F., Huerta-Espino, J., Villaseñor-Mir, H. E., Rivas-Valencia, P., González-González, M., Hortelano-Santa Rosa, R., Robles-Yerena, L., & Aranda-Ocampo, S. (2020). Chemical treatment to wheat seed to reduce the incidence of bacteria. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology*, 38(2). <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2001-5>
- Tucuch-Hass, C., Alcántar-González, G., Trejo-Téllez, L.I., Volke-Haller, H., Salinas-Moreno, Y., & Larqué-Saavedra, A. (2017). Effect of Salicylic Acid on Growth, nutritional Status, and performance of Maize (*Zea mays*). *Agrociencia*, 51(7), 771-781. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?scrip=sci_arttext&pid=S1405-31952017000700771&Ing=es&tIng=es.