



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

**APLICACIÓN DE ÁCIDO SALICÍLICO PARA
INCREMENTAR EL RENDIMIENTO DEL GRANO EN
EL CULTIVO DE MAÍZ**

CESAR JACIER TUCUCH HAAS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2016

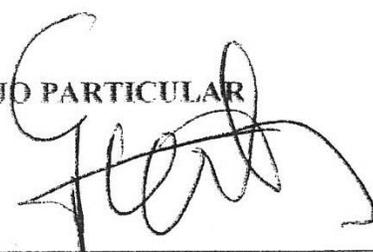
La presente tesis titulada: “**Aplicación de ácido salicílico para incrementar el rendimiento del grano en el cultivo de maíz**”, realizada por el alumno: **Cesar Jacier Tucuch Haas**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

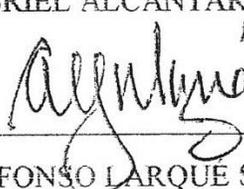
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



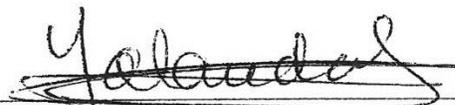
DR. GABRIEL ALCÁNTAR GONZÁLEZ

ASESOR



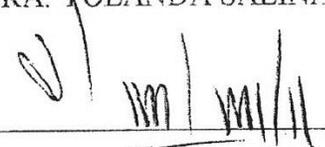
DR. ALFONSO LARQUE SAAVEDRA

ASESOR



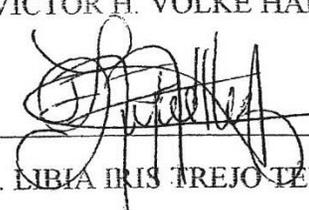
DRA. YOLANDA SALINAS MORENO

ASESOR



DR. VICTOR H. VÖLKE HALLER

ASESOR



DRA. NIBIA IRIS TREJO TELLEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2016

APLICACIÓN DE ÁCIDO SALICÍLICO PARA INCREMENTAR EL RENDIMIENTO DEL GRANO EN EL CULTIVO DE MAÍZ

Cesar Jacier Tucuch Haas, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2016.

RESUMEN.

El maíz es el alimento básico de la población mexicana. Se estima que el 59 % de la energía consumida por los mexicanos es obtenida de esta gramínea. El aumento de la población en México en los primeros tres lustros, ha traído consigo un incremento en la demanda de este grano, a tal grado que, actualmente se importa el 19 % del total consumido. Bajo este contexto y dado que el ácido salicílico (AS) actúa como una hormona vegetal, regulando diversos procesos fisiológicos y bioquímicos, que desencadenan una cascada de respuestas benéficas en diversas especies de plantas; concentraciones de 0.01, 0.1 y 1 μM de AS se probaron, para medir su efecto en una variedad local de maíz (Xmejen-nal) del estado de Yucatán, cuando se aplica al dosel en etapa de plántula. Parámetros de crecimiento de raíz y vástago de plántulas de maíz, en condiciones controladas y a campo abierto, bajo un diseño completamente al azar fueron evaluadas; también, el estatus nutrimental y producción de grano en plantas adultas, en dos experimentos, dispuestas en bloques al azar a campo abierto. Se midieron además la fotosíntesis, transpiración y conductancia estomática en uno de los experimentos establecidos en campo y fenoles totales en el grano de ambos experimentos. Los resultados señalan que 1 μM de AS favorece significativamente la longitud de la raíz, la biomasa seca total, el rendimiento del grano y los contenidos de N, P, K en el follaje y el grano. Además favorece en 28 % la fotosíntesis y en 17 % la concentración de fenoles en el grano.

Palabras clave: gramínea, *Zea mays*, raíz, biomasa, estatus nutrimental y fenoles

APPLICATION OF SALICYLIC ACID TO INCREASE THE YIELD OF THE GRAIN IN THE MAIZE CULTIVATION

Cesar Jacier Tucuch Haas, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2016.

ABSTRACT

Maize is the staple of the Mexican population. It is estimated that 59 % of the energy consumed by Mexicans, is obtained from this gramineous. The population growth in Mexico in the first three decades has brought an increase in demand for this grain, insomuch that currently Mexico imports 19 % of its total consumption. In this context and given that salicylic acid (SA) acts as a plant hormone regulating various physiological and biochemical processes, which triggers a cascade of beneficial responses in various plant species; concentrations of 0.01, 0.1 and 1 μM of SA were tested to measure their effect in a local variety of maize (Xmejen-nal) from the state of Yucatan, when applied to the canopy in seedling stage. Root and stem growth parameters of maize seedlings in controlled conditions and in the open field under a completely random design were evaluated; furthermore, the nutritional status and grain production in adult plants, in two experiments, arranged in random blocks in open field. Photosynthesis, stomatal conductance and transpiration were measured in one of the experiments established to open field and, total phenols in grain were also measured in both experiments. The results indicate that 1 μM of SA contributes significantly to the root length, total dry biomass, grain yield and the contents of N, P, K in the foliage and grain. It also promotes photosynthesis by 28 % and 17 % phenol concentration in the grain.

Keywords: gramineous, *Zea mays*, root, biomass, nutritional status and phenols.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la vida, la salud y la fortaleza que me brinda día a día para seguir mis metas; por las bendiciones recibidas y por permitirme disfrutar lo maravilloso de la vida y escalar un peldaño más en mi vida profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado durante el periodo de mi formación académica.

Al Colegio de Postgraduados (COLPOS) por abrirme las puertas y acogerme entre sus muros de sabiduría.

AL Dr. Gabriel Alcántar González consejero y amigo, por su apoyo incondicional y sugerencias durante mi formación académica y desarrollo del trabajo de investigación. Además por sus valiosos conocimientos, tiempo y entusiasmo compartido.

Al Dr. Alfonso Larqué Saavedra profesor y amigo, por sus acertadas sugerencias y entusiasmo en el trabajo de investigación; por sus valiosos consejos, tiempo y conocimientos compartidos y; por permitirme formar parte de su grupo de investigación y persuadirme a realizar los estudios de doctorado.

Dr. Hugo Volke Haller por su amistad incondicional, sus conocimientos compartidos, su apoyo en los análisis estadísticos del presente trabajo y sugerencias en los escritos.

Dra. Libia I. Trejo Téllez por su amistad incondicional, sus conocimientos compartidos, su valioso apoyo brindado en la realización de los análisis nutrimentales y sugerencias en los escritos.

Dra. Yolanda Salinas Moreno por su amistad incondicional, sus conocimientos compartidos, su apoyo brindado en la determinación de los compuestos fenólicos y sugerencias en los escritos.

A todos los doctores del Colegio de Postgraduados que de alguna u otra forma contribuyeron con sus conocimientos en mi formación, en especial a los del área de nutrición vegetal: **Dr. Manuel Sandoval Villa, Dr. Prometeo Sánchez García, Dra. María De las Nieves Mendoza y Juan Luis Tirado Torres (q.e.p.d).**

A todo el personal del posgrado en edafología: administrativos, laboratoristas, encargados de invernadero, etc., por las facilidades brindadas, en especial a la secretaria **Luara**, por su amistad, confianza, por estar siempre al pendiente de la documentación del expediente y eficiencia en los trámites administrativos.

A todos mis compañeros de cursos y del colegio, por los momentos difíciles y gratos que compartimos y en especial a mis amigos (as); **Azareel Angulo Castro, Angélica Sánchez Ruíz, Aranzazu Barrena Alba, Salvador Ríos Pérez, Brigsania Galindez Almazan, Daniel Torres Nava, Deisy Pineda Mendoza, Apolinar González, David Moreno y Faustino Hernández**, por su amistad y por formar parte de mi familia en esta travesía de la vida.

A todo el personal que labora en el colegio y a todas las personas que me faltaron, que en algún momento interactuaron conmigo.

DEDICATORIA

A MIS PADRES:

Guadalupe del C. Tucuch Alvarado

y

María Estela Haas Colli

Porque con el fruto de su amor me brindaron la oportunidad de estar en este mundo. Por sus apoyos incondicionales y consejos valiosos que me permitieron superar momentos difíciles y de desesperación; por inculcarme el respeto, la humildad, la gratitud y el perdón; y por ser la guía hacia el camino del bien y la fortaleza para superar obstáculos y alcanzar mis metas.

A MIS HERMANOS:

Jorge Ismael

Alejandro del Carmen

José Guadalupe

Julio Esteban

Por la confianza, ánimos y apoyo que me brindaron en esta etapa importante de mi vida. Y por los buenos momentos que compartimos juntos y los malos que hemos superado.

A MIS SOBRINAS (O):

Estefani del Carmen

Leamsi Anaí

Deyli Alejandra

Berenice Guadalupe

Carlo Valente

Que son el futuro de la familia y del país. Para que les sirva de estímulo y crezca en ellos el deseo de superarse en la vida.

A todas las personas que influyeron en mí para escalar un peldaño más en mi vida profesional.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. Planteamiento del problema.....	1
2. Objetivos.....	2
2.1 Objetivo general.....	2
2.2 Objetivos específicos.....	2
3. Hipótesis.....	2
3.1 Hipótesis general.....	2
3.2 Hipótesis específicas.....	2
4. Revisión de literatura.....	3
4.1 Situación actual del maíz en México.....	3
4.2 El ácido salicílico.....	4
4.3 Efectos fisiológicos y bioquímicos del ácido salicílico en las plantas.....	4
4.4 El ácido salicílico en la bioproduktividad de las plantas.....	5
4.4.1 Sistema radical.....	6
4.4.2 Vástago.....	6
4.4.3 Rendimiento y calidad en cultivos agrícolas.....	7
4.5 Efecto del ácido salicílico en la tolerancia a estrés ambiental.....	8
4.5.1 Estrés biótico.....	9
4.5.2 Estrés abiótico.....	10
4.6 Efecto del ácido salicílico en las gramíneas.....	12
4.7 Efecto del ácido salicílico en el cultivo de maíz.....	13
5. Literatura citada.....	14
CAPITULO I. PHOTOSYNTHESIS, TRANSPIRATION, STOMATAL CONDUCTANCE AND CHLOROPHYLL CONTENT IN A MAYA LANDRACE OF MAIZE TREATED WITH SALICYLIC ACID	23
Abstract.....	23
Resumen.....	23
1.1 Introduction.....	24
1.2 Materials and methods.....	25
1.3 Results and discussion.....	26
1.4 Conclusion.....	29
1.5 References.....	29
CAPITULO II. EFECTO DEL ÁCIDO SALICÍLICO SOBRE EL CRECIMIENTO DE RAÍZ DE PLÁNTULAS DE MAÍZ	33
Resumen.....	33
Abstract.....	33
2.1 Introducción.....	34
2.2 Materiales y métodos.....	36
2.3 Resultados y discusión.....	38
2.4 Conclusión.....	42
2.5 Literatura citada.....	42

CAPITULO III. EFECTO DEL ÁCIDO SALICÍLICO EN EL CRECIMIENTO, ESTATUS NUTRIMENTAL Y RENDIMIENTO EN MAÍZ (<i>Zea mays</i>)	45
Resumen.....	45
Abstract.....	46
3.1 Introducción.....	46
3.2 Materiales y métodos.....	49
3.3 Resultados y discusión.....	50
3.4 Conclusión.....	57
3.5 Literatura citada.....	57
CAPITULO IV. ASPERSIÓN FOLIAR DE ÁCIDO SALICÍLICO INCREMENTA LA CONCENTRACIÓN DE FENOLES EN EL GRANO DE MAÍZ	63
Resumen.....	63
Abstract.....	63
4.1 Introducción.....	64
4.2 Materiales y métodos.....	65
4.3 Resultados y discusión.....	66
4.4 Conclusión.....	68
4.5 Literatura citada.....	68
CONCLUSIONES GENERALES	71
ANEXOS	72

LISTA DE CUADROS

	Página
CAPITULO II	
Cuadro 1. Aspersiones con diferentes concentraciones de ácido salicílico, en el diámetro, altura y biomasa fresca total de plántulas de maíz, cultivadas en cuarto de crecimiento (CC) o a cielo abierto (CA).....	41
CAPITULO III	
Cuadro 1. Efecto de la aplicación de ácido salicílico al dosel de plantas de maíz, en la altura de planta, diámetro del tallo y biomasa seca aérea de dos experimentos.....	51
Cuadro 2. Efecto sobre la mazorca y grano del cultivo de maíz (Xmejen-nal), con aspersiones foliares de AS en etapa de plántula, analizados a los 140 días después del trasplante, en dos experimentos.....	52
Cuadro 3. Correlación entre el rendimiento del grano y variables de la mazorca de los dos experimentos en estudio.....	54
Cuadro 4. Contenido promedio de N, P y K en la biomasa seca aérea y grano, de dos experimentos, en el cultivo de maíz (var. Xmejen-nal) tratadas con ácido salicílico.....	55
Cuadro 5. Correlación de los contenidos de N, P y K del tejido y grano, entre la biomasa seca aérea y el peso del grano de los dos experimentos.....	56

LISTA DE FIGURAS

	Página
INTRODUCCIÓN GENRAL	
Figura 1. Principales países productores de maíz. Elaborado con datos de la FAOSTAD para un periodo de 10 años (2005-2014).....	3
CAPITULO I	
Fig. 1. Effect of spraying different concentrations of SA on seedlings of maize <i>xmejen-nal</i> on photosynthesis, stomatal conductance and transpiration. The measurements were taken from the tenth exposed leaf with ligule, 35 days after the last application of treatments. Each point is the average of 10 plants $\pm e. e$	32
CAPITULO II	
Figura 1. Efecto de diferentes concentraciones de ácido salicílico asperjado a plántulas de maíz en la longitud, peso fresco y volumen de la raíz. Cada bloque es la media de 7 individuos. Medias con letras diferentes significan que son significativamente.....	39
CAPITULO IV	
Figura 1. Concentración de fenoles totales en el grano de maíz proveniente de plantas asperjadas con diferentes concentraciones de ácido salicílico, en fase de plántula. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).....	67

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Planteamiento del problema

El crecimiento actual de la población mexicana implica una mayor demanda de alimentos, principalmente el maíz como componente básico en la dieta alimenticia. Lo anterior ha llevado a los expertos en el tema a una búsqueda intensiva de estrategias que garanticen el incremento en los rendimientos de este cereal. Muchas de las tecnologías desarrolladas recientemente han sido exitosas; aunque, no todas han sido capaces de cubrir la demanda nacional. En los años recientes se ha estimado un déficit en la oferta de maíz del 19 %; por lo que es urgente desarrollar nuevas tecnologías que favorezcan la producción de este grano, para asegurar la alimentación de nuestro país y de aquellos en los que es su dieta principal.

Numerosos trabajos dan constancia de la efectividad del ácido salicílico (AS) como una molécula señal, reguladora endógena de diversos procesos fisiológicos y bioquímicos, que desencadena una cascada de respuestas, en la protección contra daños causados por factores de tipo biótico y abiótico, favoreciendo el desarrollo, crecimiento y rendimiento de diversas familias de plantas. En gramíneas, particularmente el maíz, se ha demostrado su capacidad para aliviar el estrés producido por salinidad, sequía, frío, metales pesados (Cd, As, Pb y B) y patógenos; y también su contribución en la acumulación de la biomasa radical y aérea. Estos beneficios dan la pauta para considerar a este compuesto como un regulador potencial para favorecer la producción de este grano.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Evaluar la aplicación de ácido salicílico en diferentes concentraciones, para incrementar la biomasa seca total, el contenido nutrimental y el rendimiento del grano de maíz.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar cómo es afectada la raíz y el vástago cuando se suministra AS.
- Evaluar la acumulación de N, P, K en la planta y el grano con aspersiones de AS.
- Establecer si hay efectos fisiológicos en la planta por acción del AS.
- Conocer el afecto del AS en el rendimiento y contenido de fenoles del grano.

3. Hipótesis

3.1 Hipótesis general

- Aplicaciones exógenas de ácido salicílico (AS) en diferentes concentraciones, incrementan la biomasa seca total, el contenido nutrimental y el rendimiento del grano de maíz.

3.2 Hipótesis específicas

- La raíz y el vástago del cultivo de maíz son afectadas por la aplicación de AS.
- La concentración de AS aplicada de manera exógena, influye en el estatus nutrimental de la planta y el grano.
- La aspersión de diferentes concentraciones de AS afectan el rendimiento y el contenido de fenoles del grano.

4. Revisión de literatura

4.1 Situación actual del maíz en México

En el presente siglo (XXI), el maíz se ha manifestado como la especie de mayor producción en el mundo y se ha convertido en la planta alimenticia más importante del planeta (Perales, 2009). En algunos países de América, es el alimento básico de la población (Morris y López, 2012), y particularmente en México es el cereal de mayor importancia, puesto que es la principal fuente de calorías en la dieta de los mexicanos (García, 2002), aportando aproximadamente 59 % de la energía del total consumida (Sierra *et al.*, 2004). Sin embargo, a pesar de todo lo expuesto con anterioridad y además de ser considerado México centro de origen y domesticación del maíz (Barros, 2009; Carrillo, 2009), los volúmenes de producción, de los últimos 10 años, lo ubican en el quinto lugar a nivel mundial, en la producción de este grano (Figura 1).

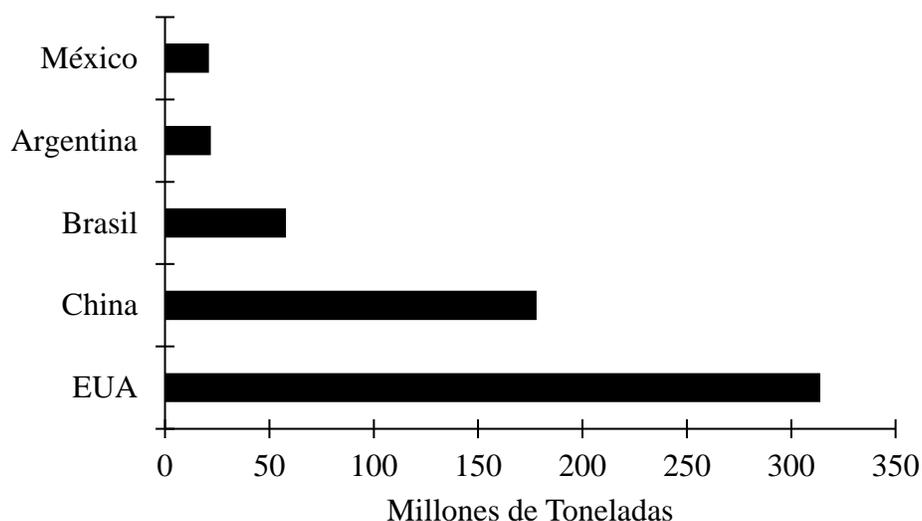


Figura 1. Principales países productores de maíz. Elaborado con datos de la FAOSTAD para un periodo de 10 años (2005-2014).

Se estima que en los últimos años, la demanda de maíz en México (25.970 millones de toneladas) ha superado el volumen de producción (21.815 MT Millones de toneladas) en un 19 % (FAOSTAT, 2016; SAGARPA, 2016). Si bien es cierto que el empleo de tecnologías como el uso de pesticidas y fertilizantes, sistemas de riego, creación de nuevas variedades, etc., están siendo empleadas como respuesta a la demanda, contribuyendo con 0.47 % en el incremento de la producción y 0.67 % el rendimiento anual (FAOSTAT, 2016); también es cierto que la creciente población en el territorio nacional, que cada vez demanda más este grano, y la disminución anual del 0.19 % de áreas cosechadas (FAOSTAT, 2016), no han permitido alcanzar la autosuficiencia en la producción, llevando de nuevo a la búsqueda de técnicas que garanticen elevar los rendimientos.

4.2 El ácido salicílico

El ácido salicílico (AS) es una molécula de naturaleza fenólica, producto del metabolismo secundario, compuesta de un anillo aromático unido a un grupo hidroxilo o su derivado funcional. Se distribuye de forma natural en numerosas especies de plantas (Raskin, 1992, 1992a) y se sintetiza a partir de la fenilalanina vía ácido cinámico y benzoico (Métraux, 2002; Hayat *et al.*, 2010). Actualmente se le considera una hormona vegetal (Raskin, 1992), debido a que regula diversos procesos fisiológicos y bioquímicos (Hayat *et al.*, 2010; Rivas-San Vicente y Plascencia, 2011) y favorece el crecimiento, desarrollo, maduración y defensa de las plantas (Miura y Tada, 2014).

4.3 Efectos fisiológicos y bioquímicos del ácido salicílico en las plantas

El AS participa en importantes procesos fisiológicos y bioquímicos en las plantas (Hayat *et al.*, 2007); en la fotosíntesis, regula la actividad enzimática de la Rubisco (Wang *et al.*, 2010)

y controla el transporte de electrones del fotosistema II (Janda *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2010); en la transpiración y conductancia estomática (Fahad y Bano, 2012), interviene sobre el control de los potenciales osmótico y de agua (Khan *et al.*, 2013) y en la absorción de iones (Fahad y Bano, 2012; Gunes *et al.*, 2007), incrementa la masa radicular permitiendo una mayor área de exploración en el suelo (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 1998; Echeverría-Machado *et al.*, 2007; Larqué-Saavedra *et al.*, 2010; Tucuch *et al.*, 2015).

Bioquímicamente se le ha involucrado, al AS, en procesos de óxido-reducción (Mateo *et al.*, 2006), mediante el control de la actividad de enzimas oxidativas como la catalasa (CAT), Guayacol peroxidasa (POD), superóxido dismutasa (SOD) y prolina oxidasa (PO) (Wang *et al.*, 2010; Ghasemzade y Jaafar, 2013; Fahad y Bano, 2012). Además, participa en la síntesis de la nitrato reductasa mediante la movilización de NO_3^- intracelular y protección de esta misma en ausencia de NO_3^- (Wang *et al.*, 2010); acumulación de azúcares, proteínas, ácidos abscísico (ABA) e indolacético (IAA) y prolina (Shakirova *et al.*, 2003; Fahad y Bano, 2012); y producción de metabolitos secundarios (Bennet y Wallsgrove, 1994), como la capsaicina (Sandoval-Rangel *et al.*, 2011), bacosida A (Largia *et al.*, 2015), witaferina A (Piñeros-Castro *et al.*, 2009), flavonoides (Pacheco *et al.*, 2013) y fenoles totales (Rodrigues-Brandao *et al.*, 2014; Burbano y Garcés, 2007), los cuales juegan un papel importante en la pigmentación, crecimiento, reproducción y adaptación a condiciones de estrés biótico y abiótico en las plantas (Farah y Marino, 2006; Lattazio *et al.*, 2006).

4.4 El ácido salicílico en la bioproduktividad de las plantas

Diversos trabajos llevados a cabo bajo condiciones protegidas y campo abierto, dan constancia de la sensibilidad de las plantas angiospermas y gimnospermas al suministro de bajas concentraciones de AS, para favorecer la bioproduktividad (Larqué-Saavedra y Martín-

Mex, 2007; Martín-Mex *et al.*, 2013), reflejada en un mayor crecimiento y desarrollo radical y aéreo en las plantas, y rendimiento y calidad de frutos (Larqué-Saavedra *et al.*, 2010; Elwan y El-Hamahmy, 2009; Sánchez-Chávez *et al.*, 2011; Martín-Mex *et al.*, 2012; Martín-Mex *et al.*, 2013).

4.4.1 Sistema radical

En la raíz, órgano de vital importancia para los vegetales, por ser el medio de conexión con el agua y los nutrientes del suelo, el AS, incrementa el nivel de división celular del meristemo apical, el tamaño de la cofia y las raíces laterales (Echeverría-Machado *et al.*, 2007; Shakirova *et al.*, 2003), ejerciendo cambios positivos en la morfología, longitud, área, volumen, perímetro y peso fresco y seco de la raíz, tal como se ha reportado en plantas de *Glycine max* L. (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 1998), *Pinus patula* (San-Miguel *et al.*, 2003), *Crysanthemum morifolium* (Villanueva-Cohuo *et al.*, 2009), *Catharanthus roseus* (Echeverría-Machado *et al.*, 2007), *Lycopersicon esculentum* (Larqué-Saavedra *et al.*, 2010) y *Triticum aestivum* L. (Tucuch *et al.*, 2015), cuando se suministra el AS en un rango de 10 fM a 1µM, los cuales demuestran la sensibilidad de la raíz a este compuesto.

4.4.2 Vástago

Diversos trabajos ponen de manifiesto que el AS, aparte de contribuir en procesos fisiológicos y bioquímicos e incrementar la masa radicular, también influye de manera significativa sobre la biomasa aérea. En plantas ornamentales como *Petunia hybrida* y *Crysanthemum morifolium*, favorece el área foliar, la producción de materia seca, la altura de planta, el diámetro del tallo y el número de flores (Villanueva-Cohuo *et al.*, 2009; Martín-Mex *et al.*, 2010). En hortalizas como *Capsicum annuum* y *Lycopersicon esculentum*,

incrementa el rendimiento de frutos y la materia seca y fresca (Elwan y El-Hamahmy, 2009; Larqué-Saavedra *et al.*, 2010). En frutales como *Carica papaya*, aumenta la altura, diámetro del tallo y número de frutos (Martín-Mex *et al.*, 2012); mientras que en cereales como *Oryza sativa* y *Triticum aestivum* se ha encontrado una mayor altura de planta (Anwar *et al.*, 2013), biomasa seca y fresca (Hayat *et al.*, 2005; Tucuch *et al.*, 2015) y rendimiento de grano (Tavares *et al.*, 2014; López *et al.*, 1998). Concentraciones inferiores a un micromol son suficientes para que las plantas expresen su sensibilidad en la producción de biomasa aérea; sin embargo, mayores respuestas se han observado con 1 μM de AS con incrementos de hasta 72.3 % (Elwan y El-Hamahmy, 2009).

4.4.3. Rendimiento y calidad en los cultivos agrícolas

Entre algunos de los aspectos relevantes atribuidos a este compuesto, se tiene su capacidad para promover un mayor rendimiento, calidad y vida de anaquel a flores, frutos y granos de algunos cultivos de interés agrícola. En plantas ornamentales se reportan mayor número de flores y precocidad en la floración de *Petunia hybrida* con aspersiones de 1 μM de AS (Martín-Méx *et al.*, 2010). En hortalizas se señalan incrementos de 17 y 28 % con 0.1 y 0.2 mM de AS respectivamente, en frutos de chile jalapeño (Sánchez-Chávez *et al.*, 2011); y hasta 23, 32, 33 y 82 % para chile habanero (Martín *et al.*, 2004 y 2005), jitomate (Javaheri *et al.*, 2012), pepino (Martín-Mex, *et al.*, 2013) y pimiento (Elwan y El-Hamahmy 2009) respectivamente, con 1 μM de AS. En frutales, 0.01 μM favorece un 21.9 % el rendimiento de frutos en papaya; mientras que en cereales se reportan valores, de rendimiento de grano, por encima del control de hasta 17 % con 100 μM de AS en trigo (López *et al.*, 1998) y 60 % con 1 μM de AS en arroz (Tavares *et al.*, 2014).

Con respecto a la calidad, se reportan mayor diámetro de flores en plantas ornamentales (Villanueva-Cohuo *et al.*, 2009) e incrementos en el color, la firmeza, los sólidos solubles totales, vitaminas C, licopeno y grados brix en frutas y hortalizas (Elwan y El-Hamahmy 2009; Karlidag *et al.*, 2009; Javaheri *et al.*, 2012). Por otra parte, el AS, presenta un alto potencial en el control de las pérdidas posteriores a la cosecha de los cultivos hortícolas (Asghari y Aghdam, 2010). Evidencias como menor pérdida de peso, mayor firmeza y color, reducción en la producción de etileno y menor daños por hongos, en fresa (Babalar *et al.*, 2007; Shafiee *et al.*, 2010); además, de la disminución del oscurecimiento interno en piña (Lu *et al.*, 2011), en trabajos postcosecha, dan constancia de la participación de AS en la activación de una mayor vida de anaquel.

4.5. Efecto del AS en la tolerancia a estrés ambiental

Las plantas, organismos sésiles, están obligadas a discriminar entre los diferentes retos que les plantea su entorno y responder a ellos; estas respuestas, a su ambiente biótico y abiótico, les permiten una mejor distribución de sus recursos para crecer, reproducirse y defenderse (Vivanco *et al.*, 2005). Gran parte de las reacciones de defensa se reflejan en una diversidad bioquímica, en la que participa el AS (Fragnière *et al.*, 2011). El AS, está implicado en la resistencia a plagas y enfermedades inducidas a nivel local y sistémica (Pieterse y Van Loon, 1999; He *et al.*, 2007), y desempeña un papel importante en la protección frente a los perjuicios ocasionados por sequía, baja y alta temperaturas, metales pesados y salinidad (Miura y Tada, 2014; Ghani *et al.*, 2015).

4.5.1 Estrés biótico

El primer reporte de la participación de los salicilatos en la resistencia a enfermedades en las plantas, fue hecho por White en 1979, quien al inyectar AS y AAS (ácido acetilsalicílico) en tabaco, redujo drásticamente el nivel de daño causado por el virus del mosaico del tabaco (TMV) (Raskin (1992, 1992a). Más adelante, Delaney y colaboradores (1994), utilizando especies transgénicas de tabaco y *Arabidopsis thaliana*, que expresan la enzima salicilato hidroxilasa, los cuales no acumulan AS, demostraron la esencialidad de este compuesto para la expresión de la resistencia a las enfermedades (virus, hongos y bacterias). Además, estudios en plantas de *Phaseolus vulgaris* L. expuestas al ataque de *Tetranychus uticae* Koch, en la que encontraron un incremento de nueve veces la concentración de AS en las hojas atacadas por esta plaga, manifiestan también su intervención contra daños causados por plagas (He *et al.*, 2007).

En la actualidad, numerosos trabajos dan constancia y sustento de la actividad del AS como un agente señalizador de respuesta al estrés biótico en las plantas (Vlot *et al.*, 2009). Estudios sobre efecto del AS en la eliminación de la infección de VYP (virus Y de la papa) y PLRV (virus del enrollamiento de las hojas de la papa) en plántulas de papa, multiplicadas de ápices caulinares y cultivadas *in vitro* en presencia o ausencia de AS durante 30 días y sometidas a termoterapia (40 °C/8 h y 32 °C/16 h durante 30 días), arrojó un 50 % de plántulas libres de virus y de supervivencia, con respecto al control (González y Huaste, 2011). Por otra parte, plántulas de arroz inoculadas con *Magnaporthe grisea* y asperjadas con AS, manifestaron una reducción del 69 y 74 % en los daños causados por este patógeno con 8 mM de AS y 53 y 61% con 10 mM de AS (Daw *et al.*, 2008). Además, el suministro de AS vía riego, a razón

de 40 y 80 mg mL⁻¹, a garbanzo infectado con *Fusarium oxiesporum*, redujo en un 23 y 43 % las lesiones por este hongo.

El AS juega un papel esencial en la ruta de transducción de señales que conduce a la activación de genes que codifican no solo para proteínas PR, sino también para el establecimiento de la respuesta hipersensible (RH), considerada como una muerte celular programada que se desarrolla para delimitar el área de infección de un patógeno, así como en la resistencia sistémica adquirida (RSA) (Rangel *et al.*, 2010; Vlot *et al.*, 2009), el cual podría ser el principal mecanismo de acción en la tolerancia a patógenos. Entre otros mecanismos, el AS inhibe la actividad de la catalasa, induciendo un aumento en la concentración de H₂O₂ (peróxido de hidrógeno), lo que favorece la síntesis de proteínas-PR (Chen *et al.*, 1993; Lopez-Delgado *et al.*, 2004), e interactúa con el ácido jasmónico y etileno, activando múltiples mecanismos de resistencia (Pieterse y Van Loon., 1999; Vlot *et al.*, 2009; An y Mou, 2011).

4.5.2 Estrés abiótico

El estrés abiótico induce numerosos efectos adversos en las plantas, alterando procesos bioquímicos, fisiológicos y moleculares que eventualmente causan una severa reducción en el crecimiento, desarrollo y productividad de estas (Khan *et al.*, 2015). Para contrarrestar tales daños, los vegetales emplean una variedad de fitoquímicos como defensas (Vivanco *et al.*, 2005). El AS es una de ellos (Miura y Tada, 2014; Khan *et al.*, 2015) donde participa en el control de la actividad de las enzimas superóxido dismutasa (SOD), peroxidasa (POD) y catalasa (CAT), responsables de la concentración de especies reactivas de oxígeno (ROS), que se presentan ante cualquier situación de estrés abiótico, (Mora y López, 2006; Fahad y Bano, 2012; Chen *et al.*, 2013; Al-Mureish *et al.*, 2014), principalmente, el peróxido de

hidrogeno (H_2O_2) (Hao *et al.*, 2014), que a baja concentración mejora la capacidad antioxidante de las plantas y estimula la síntesis de compuestos de protección, lo que lleva a una mayor tolerancia al estrés abiótico, y que por el contrario, altas concentraciones causa estrés oxidativo (Hara *et al.*, 2012).

Entre otros beneficios, el AS disminuye los daños en la actividad de la rubisco y mantiene a niveles normales los parámetros del donante y aceptor del PII en la fotosíntesis (Wang *et al.*, 2010); estimula la producción de prolina mediante el aumento de la actividad de γ -glutamyl quinasa y disminución de prolina oxidasa, favoreciendo la producción de prolina y los potenciales osmótico y de agua; y restringe la formación de etileno a niveles óptimos mediante la inhibición de la 1-aminociclopropano ácido carboxílico (AAC) sintetasa (AAS) (Khan *et al.*, 2013), evitando la senescencia ante situaciones de estrés por altas temperaturas. A bajas temperaturas, incrementa el índice y la densidad estomática del lado abaxial de las hojas (Benavides-Mendoza *et al.*, 2004) y controla la actividad de la Rubisco y contenido de clorofila (Yordanova y Popova, 2007).

En condiciones de salinidad, el AS aumenta el contenido de azúcar, proteínas, prolina, ácidos abscísico (ABA) e indolacético (IAA) e incrementa la tasa fotosintética, conductancia estomática y transpiración (Khan *et al.*, 2013). Influye en la concentración de sustancias de absorción de UV y H_2O_2 ; está implicado en la acumulación de iones, favoreciendo al Co, Mn, Cu, Fe, K, N y Mg e inhibiendo al Na, Cl, Ni, Pb y Zn; y por el contrario reduce la peroxidación lipídica, permeabilidad de la membrana y clorofila a/b (Gunes *et al.*, 2007; Fahad y Bano, 2012). En condiciones de sequía, favorece la acumulación de carotenoides, antocianinas, clorofila, azúcares y minerales (Bideshki y Arvin, 2010; El Tayeb y Ahmed 2010). Beneficia el contenido de agua en la hoja, reduce la peroxidación de lípidos, impide

la pérdida de electrolitos y aumenta el contenido de citocininas, flavonoides y proteínas (Kabiri *et al.*, 2014).

El AS también disminuye los daños causados por cadmio (Cd) (Choudhury y Panda, 2004; Fatima *et al.*, 2014; Matewally *et al.*, 2003), arsénico (As) (Sing *et al.*, 2015), plomo (Pb) (Chen *et al.*, 2007), boro (B) (El-Feky *et al.*, 2014) y Aluminio (Al) (Surapu *et al.*, 2015). Además, incrementa la concentración de antioxidantes no enzimáticos (ascorbato y cisteína) y reduce el peróxido de hidrogeno (H₂O₂), la peroxidación de lípidos, la fuga de electrolitos y la prolina. Por otro lado, se ha obtenido una mayor retención de malondialdehído, viabilidad de la membrana y protección de daños al ADN (Surapu *et al.*, 2014).

Esta cascada de respuestas conllevan a una mayor altura y peso seco y fresco de vástago (Benavides-Mendoza *et al.*, 2004; Korkmaz, 2005; Hayat *et al.*, 2009); número de hojas y área foliar (Ghani *et al.*, 2015); longitud, peso seco y fresco de raíz (Chen *et al.*, 2007; El Tayeb y Ahmed 2010); y biomasa seca y fresca total (Bideshki y Arvin, 2010; Gunes *et al.*, 2005), lo que beneficia el rendimiento agronómicos de las plantas.

La utilidad del AS radica en la concentración aplicada. Bajas concentraciones, en una rango de 0.1 a 0.5 mM, alivian la sensibilidad de las plantas al estrés abiótico y altas concentraciones inducen a altos niveles de estrés oxidativo, suprimiendo la tolerancia (Yuan y Lin, 2008; Miura y Tada, 2014).

4.6. Efecto del ácido salicílico en las gramíneas

En algunas gramíneas de importancia agrícola como el trigo, arroz y cebada, el AS incrementa el vigor y la altura del vástago (Anwar *et al.*, 2013); la longitud, peso seco y fresco de la raíz (Deef, 2007) e incrementa la biomasa seca y fresca aérea total (Hayat *et al.*,

2005; Tucuch *et al.*, 2015). También, participa en la protección contra daños causados por salinidad (Fayez y Bazaid., 2014; Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2014), sequía (Habibi, 2012; Farzane *et al.*, 2014), frío (Mutlu *et al.*, 2013) y metales pesados como cadmio (Cd) (Choudhury y Panda, 2004; Fatima *et al.*, 2014; Matewally *et al.*, 2003), arsénico (As) (Sing *et al.*, 2015), plomo (Pb) (Chen *et al.*, 2007) y boro (B) (El-Feky *et al.*, 2014), exhibiendo una mayor biomasa. Además induce la aparición de proteínas (PR), relacionadas con la patogénesis en plantas, responsables de la resistencia sistemática adquirida y estimula la actividad de las enzimas peroxidasa, β -1,3-glucanasa y catalasa; participando en la defensa contra el ataque de plagas y enfermedades (Shi *et al.*, 1999; Mutlu *et al.*, 2013). Particularmente en arroz y trigo, favorece el rendimiento del grano (Tavares *et al.*, 2014; López *et al.*, 1998).

Entre otros beneficios, se le ha involucrado en procesos fotosintéticos, de transpiración y conductancia estomática (Khan *et al.*, 2003); acumulación de clorofila (a y b), carbohidratos, proteínas y ácidos abscísico (ABA) e indolacético (IAA) (Fahad y Bano, 2012; El-FeKi *et al.*, 2014); y actividad de la superóxido dismininutasa (SOD), peroxidasa (POD) y ascorbato peroxidasa (APX) (Fahad y Bano, 2012).

4.7. Efecto del ácido salicílico en el cultivo de maíz

Particularmente en el maíz, aplicaciones foliares de AS en etapa de plántula, aceleran la actividad de la enzima Rubisco, aumentan la actividad fotosintética e incrementan el contenido de clorofila a y b, carotenoides y carbohidratos. Así mismo, favorece la longitud, el peso fresco y seco de la raíz; la altura y área foliar del vástago y biomasa seca y fresca aérea (Khan *et al.*, 2003; Khodary, 2004). Entre otros efectos, beneficia la acumulación de N, K, Mg, Fe, Mg y Cu en el tejido vegetal (Gunes *et al.* 2007; Fahad y Bano, 2012) y

participa en la protección contra daños causados por sequía, salinidad y elementos tóxicos (Gunes *et al.*, 2005). En las hojas, favorece la composición de los vasos del xilema, la anatomía Kranz, las células mesofílicas, los tejidos epidérmicos, las láminas foliares y el desarrollo de cloroplasto (Cárcamo *et al.*, 2012) y proporciona mayor contenido relativo de agua y estabilidad a la membrana (Rao *et al.*, 2012).

5. Literatura citada

- Al-Mureish, K., N. A. R. M. Othman y A. M. A. Al-Hakimi. 2014. Salicylic acid-mediated alleviation of cadmium toxicity in maize leaves. *J. Plant Sci.* 2: 276-281.
- An, C. and Z. Mou. 2011. Salicylic acid and its function in plant immunity. *J. Integr. Plant Biol.* 53: 412-428.
- Anwar S., M. Iqbal, S. H. Raza and N. Iqbal. 2013. Efficacy of seed preconditioning with salicylic and ascorbic acid in increasing vigor of rice (*Oryza sativa* L.) Seedling. *Pak. J. Bot.* 45: 157-162.
- Asghari, M. and M. S. Aghdam. 2010. Impact of salicylic acid on post-harvest physiology of horticultural crops. *Food Sci. Technol.* 21: 502-509.
- Babalar M., M. Asghari, A. Talaei y A. Khosroshahi. 2007. Effect of pre-and postharvest salicylic acid treatment on ethylene production, fungal decay and overall quality of selva strawberry fruit. *Food Cehem.* 105: 449-453.
- Barros, C., 2009. Maíz alimentación y cultura. 56-59 p.
- Benavides-Mendoza, A. A. M. Salazar-Torres, F. Ramírez-Godina, V. Robledo-Torres, H. Ramírez-Rodríguez y M. Ratikanta. 2004. Tratamiento de semilla de chile con ácidos salicílico y sulfosalicílico y respuestas de las plántulas al frío. *Terra Latinoamericana.* 22: 41-47.
- Bennet, R. N. and R. M. Wallsgrove. 1994. Secondary metabolites in plant defence mechanisms. *New Phytol.* 127: 617-633.
- Bideshki, A., y M. J. Arvin. 2010. Effect of salicylic acid (SA) and drought stress on growth, bulb yield and allicin content of garlic (*Allium sativum*) in field. *Plant Ecophysiology.* 2: 73-79.

- Burbano, C. y F. Garcés. 2007. Control del virus de la hoja amarilla de la caña de azúcar (SCYLV) mediante técnicas de cultivo de tejidos en la variedad CR74-250. *Rev. Tecnol. ESPOL*. 20: 0257-1749.
- Cárcamo, H. J. R. M. Bustos, F. E. Fernández y E. I. Bastías. 2012. Mitigating effect of salicylic acid in the anatomy of the leaf of *Zea mays* L. lluteño ecotype from the Lluta Valley (Arica-Chile) under NaCl stress. *IDESIA*. 30: 55-63.
- Carrillo, T. C., 2009. El origen del maíz. *Ciencias*. 4-13 p.
- Chen, J., C. Zhu, L. Li, Z. Sun and X. Pan. 2007. Effects of exogenous salicylic acid on growth and H₂O₂ metabolizing enzymes in rice seedlings under lead stress. *J. Environ. sci.* 19: 44-49.
- Chen, Z. H., H. Silvaand y D. F. Klessing. 1993. Active oxygen species in the induccion of plant systemic acquired by salicylic acid. *Sciencie*. 262: 1883-1886.
- Chen, Z. L., X. M. Li y L. H. Zhang. 2013. Effect of salicylic acid pretreatment on drought stress responses of Zoysiagrass (*Zoysia japonica*). *Russian Journal of Plant Physiology*. 61: 619-625.
- Choudhury S. y S. P. Panda. 2004. Role of salicylic acid in regulating cadmium induced oxidative stress in *Oryza sativa* L. roots. *Bulg. J. Plant Physiol*. 30: 95-110.
- Daw, B. D., L. H. Zhang y Z. Z. Wang. 2008. Salicylic acid enhances antifungal resistance to *Magnaporthe grisea* in rice plants. *Australasian Plant Pathology*. 37: 637-644.
- Deef, H. E. 2007. Influence of salicylic acid on stress tolerance during seed germination of *Triticum aestivum* and *Hordeum vulgare*. *Advan. Biol. Res.* 1: 40-48.
- Delaney, T. P., S. Uknes, B. Vernooij, L. Friedrich, K. Weymann, D. Negrotto, T. Gaffney, M. Gut-Rella, H. Kessmann, E. Ward y J. Ryals. 1994. A central role of salicylic acid in plant disease resistance. *Science*. 266: 1247-1249.
- Echevarría-Machado, I., R. M. Escobedo-G.M and A. Larqué-Saavedra. 2007. Responses of transformed *Catharanthus roseus* roots to femtomolar concentrations of salicylic acid. *Plant physiol. Biochem.* 45: 501-507.
- El Tayeb, M. A. and A. N. Ahmed. 2010. Response of wheat cultivars to drought and Salicylic acid. *Am-Euras. J. Agron.* 3: 01-07.
- El-Feky, S. S., F. A. El-Shintinawy and E. M. Shaker. 2014. Role of CaCl₂ and salicylic acid on metabolic catabolic and productivity of boron stressed bayley (*Hordium vulgare* L.). *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 3: 368-380.

- Elwan, M.W. M and M. A. M. El-Hamahmy. 2009. Improved productivity and quality associated with salicylic acid application in greenhouse pepper. *Sci. Hortic.* 122: 521-526.
- Fahad, S. and Bano A. 2012. Effect of salicylic acid on physiological and biochemical characterization of maize grown in saline area. *Pak. J. Bot.* 44: 1433-1438.
- FAOSTAT. 2016. Producción de maíz. [En línea] Disponible: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/S>. (Revisado 20 de marzo de 2016).
- Farah A. and C. D. Marino. 2006. Phenolic compounds in coffee. *Braz. J. Plant Physiol.* 18: 23-36.
- Farzane, M. H., R. Monem, S. M. Mirtaheri and S. F. Kashani. 2014. Effect of Salicylic acid on germination and growth seedling of 10 variety barley (*Hordeum vulgare* L.) under drought stress. *Int. J. of Biosci.* 5: 445-448.
- Fatima, R. N., F. Javed and A. Wahid. 2014. Salicylic acid modifies growth performance and nutrient status of rice (*Oryza sativa*) under cadmium Stress. *Int. J. Agric & Biol.* 16: 1083-1090.
- Fayez, K. A. and S. A. Bazaid. 2014. Improving drought and salinity tolerance in barley by application of salicylic acid and potassium nitrate. *J. Saudi Soc. Agri. Sci.* 13: 45-55.
- Fragnière, C., M. Serrano, E. Abou-Mansour, JP. Métraux, F. L'Haridon. 2011. Salicylic acid and its location in response to biotic and abiotic stress. *FEBS Letters.* 585: 1847-1852.
- García S. J. A., 2002. Política arancelaria y protección del mercado del maíz en México. *Momento económico.* 123: 12-25.
- Ghani, A., I. Khan, I. Ahmed, I. Mustafa, Abd-Ur-Rehman y N. Muhammad. 2015. Amelioration of lead toxicity in *Pisum sativum* (L.) by foliar application of salicylic acid. *J. Environ. Anal. Toxicol.* 5: 292.
- González, P. R. A. y M. Huarte. Efecto del ácido salicílico en la eliminación de PLRV y PVY en plantas de papa. *Rev. Latinoamericano de la Papa.* 16: 58-67.
- Gunes, A., A. Inal, M. Alpaslan, F. Eraslan, E. G. Bagci and N. Cicek. 2007. Salicylic acid changes on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) grown under salinity. *J. Plant Physiol.* 164: 728-736.
- Gutiérrez-Coronado, M. A., C. Trejo-López and A. Larqué-Saavedra. 1998. Effects of salicylic acid on the growth of roots and shoots in soybean. *Plant Physiol. Biochem.* 36: 563-565.

- Habibi, G. 2012. Exogenous salicylic acid alleviates oxidative damage of barley plants under drought stress. *Acta Biol. Szegediensis*. 56: 57-63.
- Hara, M., J. Furukawa, A. Sato, T. Mizoguchi y K. Miura. 2012. Abiotic stress and role of salicylic acid in plants. In P. Ahmad y M. N. V. Prasad (eds.), *Abiotic Stress responses in plant: metabolism, productivity and sustainability*. Springer publishers, Dortdrecht, The Netherlands.
- Hayat, Q., S. Hayat, M. Irfan and A. Ahmad. 2010. Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: A review. *Environ. Exp. Bot.* 68: 14-25.
- Hayat, S., A. Masood, Y. Mohammad, Q. Fariduddin y A. Ahmad. 2009. Growth of indian mustard (*Brassica juncea* L.) in response to salicylic acid under high-temperature stress. *Braz. J. Plant Physiol.* 21: 187-195.
- Hayat, S., B. Ali y A. Ahmad. 2007. Salicylic acid: biosynthesis, metabolism and physiological role in plants. In Hayat, S. y A. Ahmad (eds). *Salicylic acid: A plant Hormone*. Springer publishers, Dortdrecht, The Netherlands.
- Hayat, S., Q. Fariduddin, B. Ali and A. Ahmad. 2005. Effect of salicylic acid on growth and enzyme activities of wheat seedlings. *Acta Agron. Hung.* 53: 433-437.
- He, W., H. Li, X. Li, M. Li y Y. Chen, 2007. *Tetranychus urticae* Koch induced accumulation of salicylic acid in frijole leaves. *Pestic. Biochem. Phys.* 88: 78-81.
- Janda K., E. Hideg, G. Szalai, L. Kovács y T. Janda. 2012. Salicylic acid may indirectly influence the photosynthetic electron transport. *J. Plant Physiol.* 169: 971-978.
- Javaheri, M., K. Mashayekhi, A. Dadkhah and F. T. Zaker. 2012. Effects of salicylic acid on yield quality characters of tomato fruit (*Lycopersicum esculentum* Mill). *Int. J Agr. Crop Sci.* 4: 1184-1187.
- Kabiri, R., F. Nasibi y H. Farahbakhsh. 2014. Effect of exogenous salicylic acid on some physiological parameters and alleviation of drought stress in *Nigella sativa* plant under Hydroponic culture. *Plant Protect. Sci.* 50: 43-51.
- Karlidag, H., E. Yildirim y M. Turan. 2009. Exogenous application of salicylic acid affect quality and yield of strawberry grown under antifrost heated greenhouse conditions. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 172: 270-276.
- Khan, M. I. R., M. Fatma, T. S. Per, N. A. Anjum and N. A. Khan. 2015. Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Front. Plant Sci.* 6: 1-17.
- Khan, M., N. Iqbal, A. Masood, T. S. Per y N. A. Khan. 2013. Salicylic acid alleviates adverse effects of heat stress on photosynthesis through changes in proline production and ethylene formation. *Plant Signaling & Behavior*. 8: 1-11.

- Khan, W., B. Prithviraj and D. Smith. 2003. Photosynthetic response of corn and soybean to foliar application of salicylates. *J. Plant Physiol.*, 160: 485-492.
- Khodary, S. E. A. 2004. Effect of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt stressed maize plants. *Int. J. Agri. Biol.* 6: 5-8.
- Korkmaz A., Inclusion of acetyl Salicylic acid and Methyl jasmonate into the priming solution improves low-temperature Germination and emergence of sweet pepper. *Hort Sci.* 40: 197-200.
- Largia, M. J. V., G. Pothiraj, J. Shilpha and M. Ramesh. 2015. Methyl jasmonate and salicylic acid synergism enhances bacoside a content in shoot cultures of *Bacopa monnieri* (L.). *Plant Cell Tiss Organ Cult.* 122: 9-20.
- Larqué-Saavedra A., R. Martín-Mex, A. Nexticapan-Garcéz, S. Vergara-Yoisura and M. Gutiérrez-Rendón. 2010. Efecto del ácido salicílico en el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 16: 183-187.
- Larqué-Saavedra, A. y Martín-Mex, R. 2007. Effects of salicylic acid on the bioproductivity of the plants. In Hayat S. y A. Ahmad (Eds), *Salicylic acid, a plant hormone*. Springer publishers, Dordrech, The Netherlands.
- Lattanzio, V., V. M. T. Lattanzio and A. Cardinali. 2006. Role of phenolics in the resistance mechanisms of plants against fungal pathogens and insects. *Phytochemistry: Adv. Res.* 661: 23-67.
- López T., R., V. Camacho R. y M. A. Gutiérrez C. 1998. Aplicación de ácido salicílico para incrementar el rendimiento agronómico en tres variedades de trigo. *Terra Latinoamericana.* 16: 43-48.
- López-Delgado, H., M. E. Mora-Herrera, H. A. Zavaleta-Mancera, M. Cadena-Hinojosa y I. M. Scott. 2004. Salicylic acid enhances heat tolerance and potato virus X (PVX) elimination during thermotherapy of potato microplants. *Amer. J. Potato Res.* 81: 171-176.
- Lu X., D. Sun, Y. Li, W. Shi y G. Sun. 2011. Pre-and post-harvest salicylic acid treatments alleviate internal browning and maintain quality of winter pineapple fruit. *Scientia Horticulturae.* 130: 97-101.
- Martín-Mex, R., A. Nexticapan-Garcés, L. Vega-Merino, A. Baak-Polanco y A., Larqué-Saavedra. 2005. Efecto del ácido salicílico en la floración y productividad de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Segunda Convención Mundial del Chile. Zacatecas, Zacatecas, México.* p. 325-326.

- Martín-Mex, R., A. Nexticapan-Garcéz and A. Larqué Saavedra. 2013. Potential benefits of salicylic acid in food production. In Hayat S., A. Ahmad and M. N. Alyemeni (Eds). Salicylic acid. Springer publishers, Dordrech, The Netherlands.
- Martín-Mex, R., A. Nexticapan-Garcéz, R. Herrera-Tuz, S. Vergara-Yoisura y A. Larqué-Saavedra. 2012. Efecto positivo de aplicaciones de ácido salicílico en la productividad e papaya (*Carica papaya*). Rev. Mex. Cienc. Agric. 18: 1637-1643.
- Martín-Mex, R., R. López-Gutiérrez, J. Medina-Arceo, J. Cruz-Campos, A. Nexticapan-Garcés, F. González-Rodríguez y A. Larqué-Saavedra. 2004. Incremento en la productividad de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) por aspersiones de ácido salicílico. Primera Convención Mundial del chile. León, Guanajuato, México. p. 326.
- Martín-Mex, R., S. Vergara-Yoisura, A. Nexticapán-Garcés y A. Larqué-Saavedra. 2010. Bajas concentraciones de ácido salicílico incrementa el número de flores en *Petunia hybrida*. Agrociencia. 44: 773-778.
- Mateo, A., D. Funck, P. Mühlböck, B. Kular, P. M. Mullineaux y S. Karpinski. 2006. Controlled levels of salicylic acid are required for optimal photosynthesis and redox homeostasis. J. Exp. Bot. 57: 1795-1807.
- Métraux, JP. 2002. Recent breakthroughs in the study of salicylic acid biosynthesis. Trends Plant Sci. 1: 1-3.
- Metwally A., I. Finkemeier, M. Georgi and K. J. Dietz. 2003. Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. Plant Physiol. 132: 272-281.
- Miura, K. y Y. Tada. 2014. Regulation of water, salinity and cold stress responses by salicylic acid. Front. Plant Sci. 5: 1-12.
- Mora H., M. E. y H. A. López D. 2006. Tolerancia a baja temperatura inducida por ácidos salicílico y peróxido de hidrógeno en microplantas de papa. Rev. Fitotec. Mex. 29: 81-85.
- Morris, M. L. y P. M. López, 2012. Impactos del Mejoramiento del maíz en América Latina 1966-1997. CIMMYT. México D.F. 45 p.
- Mutlu, S., Ö. Karadagöglu, Ö. Atici y B. Nalbantoglu. 2013. Protective role of salicylic acid applied before cold stress on antioxidative system and protein patterns in barley apoplast. Biol. Plant. 57: 507-513.
- Pacheco, A. C., C. da Silva C., E. S. da Silva F. and A. Alemán C. 2013. Salicylic acid-induced changes to growth, flowering and flavonoids production in marigold plants. Glob. J. of Med. Plant Res. 7: 3158-3163.
- Perales, R. H., 2009. Maíz riqueza de México. Ciencias. 46-55 p

- Pieterse, C. M. J. y L. C. Van Loon. 1999. Salicylic acid-independent plant defense pathways. *Trends plant sci.* 4: 52-58.
- Piñeros-Castro, Y., A. Otálvaro-Álvarez y M. Velásquez-Lozano. 2009. Efecto de la aplicación de elicitores sobre la producción de 4B-hidroxiwithanólido E, en raíces transformadas de *Physalis peruviana* L. *Universitas Scientiarum.* 14: 23-28.
- Pirasteh-Anosheh, H., G. Ranjbar, Y. Emam and M. Ashraf. 2014. Salicylic-acid-induced recovery ability in salt-stressed *Hordeum vulgare* plants. *Turk. J. Bot.* 38: 112-121.
- Rangel, S. G., M. E. Castro, P. E. Beltran, C. H. Reyes y P. E. García. 2010. El ácido salicílico y su participación en la resistencia a patógenos en plantas. *Biologicas.* 12: 90-95.
- Rao, S. R., A. Quayyum, A. Razzaq, M. Ahmad, I. Mahmood y A. Sher. 2012. Role of foliar application of salicylic acid and L-tryptophan in drought tolerance of maize. *J. Anim. Plant.* 22: 768-772.
- Raskin, I. 1992. Role of salicylic acid in plants. *Annu. Rev. Plant physiol. Plant Mol. Biol.* 43:439-463.
- Raskin, I. 1992a. Salicylate, a new plant hormone. *Plant Physiol.* 99: 799-803.
- Rivas-San Vicente M. and J Plasencia. 2011. Salicylic acid beyond: its role in plant growth and development. *J. Exp. Bot.* 1: 1-18.
- Rodrigues-Brandao, I., A. Moraes K., A. Millech E., M. Conceicao L., L. Amarate, J. A. Peters and E. J. Bolacel B. 2014. Salicylic acid on antioxidant activity and betacyanin in production from leaves of *Alternanthera tenella*. *Cienc. Rural.* 44: 1893-1898.
- SAGARPA. 2016. Estudio de gran visión y factibilidad económica y financiera para el desarrollo de infraestructura de almacenamiento y distribución de granos y oleaginosas para el mediano y largo plazo a nivel nacional. [En línea] disponible en: http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/documentos/estudios_promercado/granos.pdf. (Revisado 20 de marzo de 2016).
- Saikia, R., T. Singh, R. Kumar, J. Srivastava, A. K. Srivastava, K. Singh y D. K. Arora. Role of salicylic acid in systemic resistance induced by *Pseudomonas fluorescens* against *Fusarium oxysporum* f. sp. *Ciceri* in chickpea. *Microbiol. Res.* 158: 203-213.
- San Miguel, R., M. Gutiérrez, A. Larqué-Saavedra. 2003. Salicylic acid increases the biomass accumulation of *Pinus patula*. *Southern Journal of Applied Forestry.* 27: 52-54.
- Sánchez-Chávez, E., R. Barrera-Tovar, E. Muñoz-Márquez, D. L. Ojeda-Barrios y A. Anchondo-Nájera. 2011. Efecto del ácido salicílico sobre biomasa, actividad fotosintética, contenido nutricional del chile jalapeño. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 17: 63-66.

- Sandoval-Rangel, A., A Benavides-Mendoza, M. A. Alvarado-Vázquez, R. Foroughbakhch-Pournavab, M. A. Núñez-González y V. Robledo-Torres. 2011. Influencia de ácidos orgánicos sobre el crecimiento, perfil bromatológico y metabolitos secundarios en chile piquín. *Terra Latinoamericana*. 29: 395-401.
- Shafiee M., T.S. Taghavi y M. Babalar. 2010. Addition of salicylic acid to nutrient solution combined with postharvest treatments (hot water, salicylic acid and calcium dipping) improved postharvest fruit quality of strawberry. *Sci. Hortic*. 124: 40-45.
- Shakirova, F. M., A. R. Sakhabutdinova, M. V. Bezrukova, R. A. Fatkhutdinova and D. R. Fatkhutdinova. 2003. Changes in the hormonal status of wheat seedlings induced by salicylic acid and salinity. *Plant Sci*. 164: 317-322.
- Shi, S., M. Pan, T. Lu, H. Chen, M. Zhu and J. Liu. 1999. Analysis of salicylic acid induced proteins in rice. *Tsinghua Sci. Technol*. 4: 519-523.
- Sierra, M. M., E. L. Becerra, A. C. Palafox, S. F. Barron, O.R. Cano, A. M. Zambada, A. E. R. Sandoval, J. M. Romero. 2004. Caracterización de híbridos de maíz (*Zea Mays* L.) con Alta calidad de proteína por su rendimiento y tolerancia a pudrición de mazorca en el sureste de México. *Rev. Mex. Fitopatol*. 22: 268-276.
- Singh, A. P., G. Dixit, S. Misha, S. Dwivedi, M. Tiwari, S. Mallick, V. Pandey, P. K. Trivedi, D. Chakrabarty and R. D. Tripathi. 2015. Salicylic acid modulates arsenic toxicity by reducing its root to shoot translocation in rice (*Oryza sativa* L.). *Front. Plant Sci*. 6: 1-28.
- Surapu, V., A. Ediga y B. Meriga. 2015. Salicylic acid alleviates aluminum toxicity in tomato Seedlings (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Through activation of antioxidant defense system and proline biosynthesis. *Advances in Bioscience and Biotechnology*. 5: 777-789.
- Tavares L. C., C. Araújo R., S. de Olivera, A. Pich B., and F. Amaral V. 2014. Treatment of rice seeds with salicylic acid: seed physiological quality and yield. *J. Seed Sci*. 36: 356-356.
- Tucuch H., C. J., G. Alcántar G. y A. Larqué S. 2015. Efecto del ácido salicílico en el crecimiento de la raíz y biomasa total de plántulas de trigo. *Terra Latinoamericana*. 33: 63-68.
- Villanueva-Couoh E., G. Alcántar-González, P. Sánchez-García, M. Soria-Fregoso y A. Larqué-Saavedra. 2009. Efecto del ácido Salicílico y dimetilsulfóxido en la floración de *Chrysanthemum morifolium* (Ramat) Kitamura en Yucatán. *Rev. Chapingo Ser. Hortic*. 15: 25-31.
- Vivanco, J. M., E. Cosío, V. M. Loyola-Vargas y H. E. Flores. 2005. Mecanismos químicos de defensa en las plantas. *Investigación y ciencia*. 1: 68-75.

- Vlot, A. C., D. A. Dempsey y D. F. Klessing. 2009. Salicylic acid, a multifaceted, hormone to combat disease. *Annu. Rev. Phytopathol.* 47: 177-206.
- Wang, L., L. Fan, W. Loescher, W. Duan, G. Liu, J. Cheng, H. Luo, S. L. 2010. Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under heat stress and accelerates recovery in grapevine leaves. *BMC Plant Biology.* 10: 34.
- Yordanova R. y L. Popova. 2007. Effect of exogenous treatment with salicylic acid on photosynthetic activity and antioxidant capacity of chilled wheat plants. *Gen. Appl. Plant Physiol.* 33: 155-170.
- Yuan, H. y H. Lin. 2008. Role of salicylic acid in plant abiotic stress. *Z. Naturforsch.* 63: 313-320.

**CAPITULO I. PHOTOSYNTHESIS, TRANSPIRATION, STOMATAL
CONDUCTANCE AND CHLOROPHYLL CONTENT IN A MAYA LANDRACE
OF MAIZE TREATED WITH SALICYLIC ACID**

**FOTOSÍNTESIS, TRANSPIRACIÓN, CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA Y
CONTENIDO DE CLOROFILA EN UNA VARIEDAD NATIVA MAYA DE MAÍZ
TRATADO CON ÁCIDO SALICÍLICO**

Abstract

Solutions of 0.1 and 1 μ M of Salicylic Acid (SA) were sprayed on 7-day-old seedlings of the maya landrace maize, *xmejen-nal*. On exposure of the tenth complete leaf with ligule, photosynthesis, transpiration, stomatal conductance and chlorophyll were measured. The results showed that at 15:00 h a significant increase of 28% on photosynthesis was stimulated by 1.0 μ M SA and a 13% by 0.1 μ M SA. The other variables estimated were not significantly altered. The results are discussed in relation to the productivity of these plants due to the effect of this plant growth regulator.

Key words: photosynthesis, stomatal conductance, transpiration, salicylic acid, maize.

Resumen

Se asperjaron soluciones de 0.1 o 1 μ M de Ácido Salicílico (AS) a plántulas de siete días de la raza local de maíz, *xmejen-nal*, cuando expusieron la décima hoja completa con lígula se cuantificaron la fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática y clorofila. Los resultados señalan que a las 15:00 h un significativo incremento de 28 % sobre la fotosíntesis fue estimulado con 1.0 μ M de AS y un 13 % por 0.1 μ M de AS. Las otras variables estimadas

no fueron alteradas significativamente. Los resultados son discutidos en relación a la productividad de las plantas por el efecto de este regulador del crecimiento.

Palabras clave: fotosíntesis, conductancia estomática, transpiración, ácido salicílico, maíz.

1.1 Introduction

Several recent studies have shown that applications of salicylic acid (SA) affect physiological processes in numerous agronomical important plant species (Hayat, *et al.*, 2013; Vazirimehr & Rigi, 2014). Effects have been published as a result of the application of SA such as increase in root and aerial biomass and yield, participation in resistance to biotic and abiotic stress, induction of flowering precocity (Villanueva-Couoh *et al.*, 2009; Martin-Mex *et al.*, 2013; Martin-Mex *et al.*, 2012; Hayat *et al.*, 2010; Joseph *et al.*, 2010; Rivas-San Vicente & Plasencia, 2011; Fahad & Bano, 2012) and increased content of chlorophyll and flavonoids (Vazirimehr & Rigi, 2014).

A number of publications have also reported that SA increased the photosynthesis rate in species such as *Brassica juncea* (Fariduddin *et al.*, 2003), *Zingiber officinale* R. (Ghansenzadhe & Jaafar, 2013); *Triticum aestivum* (750 μ M to 1 mM) (Arfan *et al.*, 2007) and *Capsicum annuum* L. (100 to 200 μ M) (Sánchez-Chávez *et al.*, 2011). However in species such as *Hordeum vulgare*, it was found that 100 μ M to 1 mM of SA reduces the photosynthesis rate (Pancheva *et al.*, 1996), and in *Nicotina tabacum* L., applications of 2 mM of SA reduce the photochemical yield (Janda *et al.*, 2012).

In a study by Khodary (2004), maize developed under saline and non-saline conditions sprayed with 10 mM of SA during the seedling stage a significant increase in photosynthesis was observed however in the same plant species, it has been reported that stomatal

conductance and transpiration are not affected by this compound when the seedlings are sprayed with 0.01 to 1 mM of SA (Khan *et al.*, 2003).

Due to the importance of this crop plant in the Mexican tropics the present study was carried out in Yucatan peninsula with seedlings of a short-cycle landrace maize *xmejen-nal*, in order to evaluate the effect applications at low concentrations of SA (1 and 0.1 μ M), on photosynthesis, stomatal conductance, transpiration, chlorophyll content given the importance of these processes on the productivity of this plant species.

1.2 Materials and methods

The present experiment was established in field condition in the Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Seeds of a local important landrace of maize, denominated *xmejen-nal* were provided by a local peasant for the present study and the seeds were sown directly in the soil at intervals of 0.30 m, with 0.50 m between furrows.

Two concentrations of salicylic acid (SA) (1 and 0.1 μ M) and a water control were the treatments to be evaluated. SA solutions were prepared following the methodology described by Gutiérrez-Coronado *et al.* (1998). Once the seedlings presented the first exposed leaf, the SA solutions or water were sprayed to the shoots manually at dawn for a period of seven days.

Once the experiment was established, 20 days after sowing (das), the plants were fertilized with a commercial fertilizer (17N, 17P, 17K), 20 g per plant. The soil was maintained in good conditions of humidity throughout the whole study period.

In order to determine photosynthesis, stomatal conductance and transpiration of the plants, an LI6400 portable photosynthesis system (LI-COR, NE, USA) was used; this was adjusted

for a constant supply of $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol air}^{-1}$ and 6 cm^2 of surface to be analyzed. A portable chlorophyll fluorometer (SPAD-502, Minolta) was used to monitor chlorophyll. Forty seven days after sowing, the measurements were taken in the tenth fully exposed leaf with ligulae at 06:00, 09:00, 11:00, 13:00, 15:00 and 17:00 h. Chlorophyll content was determined at 13:00 h.

A randomized block experimental design with ten replicates was employed; the experimental unit was one plant per block. The results were analyzed using analysis of variance, and when statistical differences were detected, comparison of means was carried out using Tukey's test ($P \leq 0.05$) with the SAS statistical package.

1.3 Results and discussion

The patterns of photosynthesis, stomatal conductance and transpiration of the control plants are shown in Fig. 1. As can be appreciated the highest mean values for these three variables were: $42.5 \mu\text{moles CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for photosynthesis, $0.421 \mu\text{moles m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in stomatal conductance and $11.5 \text{ mmoles H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ of transpiration, values which are similar to those previously reported for this species (Escalante *et al.*, 2008). The statistical analysis of the values obtained showed significant differences between AS treatments and water control at 15:00 hrs, with an increase of 28% in the treatment with $1 \mu\text{M SA}$ and 13% in the treatment with $0.1 \mu\text{M SA}$. This increased on photosynthesis by SA might be due to an increase in the activity of the enzyme Rubisco, as has been proposed by Khodary (2004) in maize and Wang *et al.* (2010) for grapevines.

The analysis of the other measurements taken at different time intervals was no significantly different. However, it was noted that $1 \mu\text{M SA}$ treatment increased photosynthesis by 1.2%,

3.6% and 4.2% at 6.00, 9:00 and 11:00 h, respectively, in comparison with those of the control plants. The treatment with 0.1 μM also increased photosynthesis by 3.4% and 13% at 13:00 and 15:00 hrs, compared to the control treatment.

The results presented above agree with those published that exogenous applications of low concentrations of SA increase the photosynthesis rate. in other plant species (Joseph *et al.*, 2010, Hayat *et al.*, 2010, Rivas-San Vicente & Plasencia, 2011; and Vazirimehr & Rigi, 2014) In Jalapeno peppers, for example, applications of 100 or 200 μM of SA administered via the irrigation water system increased the photosynthesis rate by 26% and 17%, respectively, (Sánchez-Chávez *et al.*, 2011). In *Brassica juncea* an increase of 9.8% was reported in photosynthesis with the application of 10 μM of SA (Fariduddin *et al.*, 2003). In soybean, an increase of 11% was registered in photosynthesis with the application of 10 μM of SA and the application of 0.01 and 10 μM SA on maize resulted in increases of 46% and 13 % respectively, In barley, however, it was reported that applications of 0.1 and 1 mM SA decreases photosynthesis. (Khan *et al.*, 2003 and Khodary, 2004).

The values obtained of stomatal conductance of the AS treatments and the control followed the same pattern as photosynthesis; however, no significant differences were found at any of the times evaluated. Transpiration and stomatal conductance presented similar behavior patterns, even at a temperature of 37 °C. The results obtained in this study are similar to those reported in the study by Khan and collaborators (2003) who found no significant differences for these two variables. On reviewing the pattern registered, it can be appreciated that, at 11:00 h, the control and the 0.1 μM SA treatment reached their maximum value of stomatal conductance, following the same behavior pattern of the radiation. It must be noted, however, that stomatal conductance of the maize plants decreased slightly, whereas the value

of photosynthesis was not affected at all by the treatment with 0.1 μM SA. The behavior pattern of stomatal conductance suggests that SA regulates the movement of stomata in conditions of high radiation, thereby preventing water loss this coincides with previous reports by Larqué-Saavedra (1978).

No significant differences among treatments were found in chlorophyll content of the leaves. However, an increase of 5% and 1% with 1 and 01 μM , respectively, was noted. This behavior corroborates the findings reported by Khan *et al.* (2003) in maize seedlings, but differs from the results obtained by Khodary (2004) who reported an increase in chlorophyll content in maize seedlings treated with 10 mM SA. Or in *Helianthus annuus* (Cag *et al.*, 2009). However on the other hand it has been reported that the chlorophyll content decreased in barley, wheat and mustard when they were treated with different concentrations of SA (Arfan *et al.*, 2007; Fariduddin *et al.*, 2003 and Pancheva *et al.*, 1996), these inconsistent results might be due to the concentration, applied. We know now that low concentrations are key to produce the positive effects.

The results of this study confirm that SA has an effect in photosynthesis (Hayat *et al.*, 2010, Rivas-San Vicente & Plasencia, 2011) and that could explain at least part of a possible response as to why there is an increase in productivity as a result of SA applications in different species such as peppers (Elwan & El-Hamahmy, 2009), Jalapeño peppers (Sánchez-Chavez *et al.*, 2011), Habanero peppers (Martín *et al.*, 2013), tomatoes (Javaheri *et al.*, 2012), European cucumber (Martin-Mex, *et al.*, 2013) and papaya (Martín-Mex *et al.*, 2012). Work must be carried out with this maize material as to learn if seed production can be enhanced by the SA treatments which is the proposal of the applied used of this plant hormone.

1.4 Conclusion

Foliar applications of 1.0 and 0.1 μM of SA sprayed on seedlings of maize have a significant effect on photosynthesis, with an increase of 28% and 13%, respectively, at 15 h. However, this was not the case with stomatal conductance, transpiration and chlorophyll content.

1.5 References

- Arfan M., H. R. Athar y M. Ashraf. 2007. Does exogenous application of salicylic acid through the rooting medium modulate growth and photosynthetic capacity in two differently adapted spring wheat cultivars under salt stress?. *J. Plant Physiol.* 164: 687-694.
- Cag S., G. Cevahir-öz, M. Sarsag y N. Gören-Saglam. 2009. Effect of salicylic acid on pigment, protein content and peroxidase activity in excised sunflower cotyledons. *Pak. J. Bot.* 41: 2297-2303.
- Elwan M.W. M y M. A. M. El-Hamahmy. 2009. Improved productivity and quality associated with salicylic acid application in greenhouse pepper. *Sci. Hortic.* 122: 521-526.
- Escalante C. L., R. Trejo. C., O. Esquivel A., J. G. Arreola A., A. Flores H. 2008. Comparación de tasas fotosintéticas en algunas plantas cultivadas y malezas. *Rev. Chapingo Ser. Zonas Áridas.* 7: 165-172.
- Fahad S. y Bano A. 2012. Effect of salicylic acid on physiological and biochemical characterization of maize grown in saline area. *Pak. J. Bot.* 44: 1433-1438.
- Fariduddin Q., S. Hayat y A. Ahmad. 2003. Salicylic acid influences net photosynthetic rate, carboxylation efficiency, nitrate reductase activity, and seed yield in *Brassica juncea*. *Photosynthetica* 41: 281-284.
- Ghasemzadeh A. y H. Z. E. Jaafar. 2013. Interactive effect of salicylic acid on some physiological features and antioxidant enzymes activity in ginger (*Zingiber officinale* R.). *Molecules.* 18: 5965-5979.
- González M. S., H. Perales V. y M Salcedo A. 2008. La fluorescencia de la clorofila a como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *REB.* 27: 119-129.
- Gutiérrez-Coronado M. A., C. Trejo-López y A. Larqué-Saavedra. 1998. Effects of salicylic acid on the growth of roots and shoots in soybean. *Plant Physiol. Biochem.* 36: 563-565.

- Hayat, Q., S. Hayat, M. Irfan y A. Ahmad. 2010. Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: A review. *Environ. Exp Bot.* 68: 14-25.
- Hayat S., A. Ahmad y M. N. Alyemeni. 2013. *Salicylic acid*. Springer publishers, Dordrech, The Netherlands.
- Hernández-González O., S. Vergara Y., A. Larqué-Saavedra. 2014. Photosynthesis, transpiration, stomatal conductance, chlorophyll conten in *Brosimum alicastrum*. *Bothalia J.* 44: 165-176.
- Janda K., E. Hideg, G. Szalai, L. Kovács y T. Janda. 2012. Salicylic acid may indirectly influence the photosynthetic electron transport. *J Plant Physiol.* 169: 971-978.
- Javaheri M., K. Mashayekhi, A. Dadkhah y F. T. Zaker. 2012. Effects of salicylic acid on yield quality characters of tomato fruit (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Int. J Agr. Crop Sci.* 4: 1184-1187.
- Joseph B., D. Jini y S. Sujatha. 2010. Insight into role of exogenous salicylic acid on plants grown under salt environment. *Asian J. Crop Sci.* 2: 226-235.
- Khan I. R., N. Iqbal, A. Masood, T. S. Per y N. A. Khan. 2013. Salicylic acid alleviates adverse effects of heat stress on photosynthesis through changes in proline production and ethylene formation. *Plant Signaling & Behavior.* 8: 1-10.
- Khan W., B. Prithviraj y D.L. Smith. 2003. Photosynthetic responses of corn and soybean to foliar application of salicylates. *Plant Physiol.* 160: 485-492.
- Khodary S.E.A. 2004. Effect of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt stressed maize palnts. *Int. J. Agri. Biol.* 6: 5-8.
- Larque-Saavedra, A. 1978. The antitranspirant effect of acetylsalicylic acid on *Phaseolus vulgaris* L. *Physiol. Plant.* 43: 126-128.
- Martín, M.R., G.A Nexticapan, M.L. Vega, P.A. Baak y A., Larqué, 2005. Efecto del ácido salicílico en la floración y productividad de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). Segunda Convención Mundial del chile. México. 325p.
- Martín, M.R., G.R. López, A.J. Medina, C.J. Cruz, R.F. González y A., Larqué, 2004. Incremento en la productividad de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) por aspersiones de ácido salicílico. Primera Convención Mundial del chile. México. 326p.
- Martín-Mex R., A. Nexticapan-Garcéz y A. Larqué Saavedra. 2013. Potential benefits of salicylic acid in food production. In Hayat S., A. Ahmad y M. N. Alyemeni (Eds). *Salicylic acid*. Springer publishers, Dordrech, The Netherlands.

- Martín-Mex R., A. Nexticapan-Garcéz, R. Herrera-Tuz, S. Vergara-Yoisura y A. Larqué-Saavedra. 2012. Efecto positivo de aplicaciones de ácido salicílico en el productividad e papaya (*Carica papaya*). Rev. Mex. Cienc. Agric 18: 1637-1643.
- Pancheva, T. V., L. P. Popova y A. N. Uzunova. 1996. Effects of salicylic acid on growth and photosynthesis in barley plants. J. Plant Physiol. 149: 54-64.
- Rivas-San Vicente M. y J Plasencia. 2011. Salicylic acid beyond its role in plant growth and development. J Exp. Bot. 1: 1-18.
- Sánchez-Chávez E., R. Barrera-Tovar, E. Muñoz-Márquez, D. L. Ojeda-Barrios y A. Anchondo-Nájera. 2011. Efecto del ácido salicílico sobre biomasa, actividad fotosintética, contenido nutricional del chile jalapeño. Rev. Chapingo Ser. Hortic. 17: 63-66.
- Sánchez-Espino P., A. Larqué-Saavedra, T. Nava-Sánchez y C. Trejo. 2000. Respuesta de plantas de maíz y frijol al enriquecimiento de dióxido de carbono. Agrociencia. 34: 311-320.
- Vazirimehr R. M. y K. Rigi. 2014. Effect of salicylic acid in agriculture. Int. J. Plant Anim. Environ. Sci. 4: 291-296.
- Villanueva-Couoh E., G. Alcántar-González, P. Sánchez-García, M. Soria-Fregoso y A. Larqué Saavedra. 2009. Efecto del ácido Salicílico y dimetilsulfóxido en la floración de *Chrysanthemum morifolium* (Ramat) Kitamura en Yucatán. Rev. Chapingo Ser. Hortic. 15: 25-31.
- Wang L., L. Fan, W. Loescher, W. Duan, G. Liu, J. Cheng, H. Luo, S. Li. 2010. Salicylic alleviates decreases in photosynthesis under heat stress and accelerates recovery in grapevine leaves. BMC Plant Biol. 10:1-10.

Figure

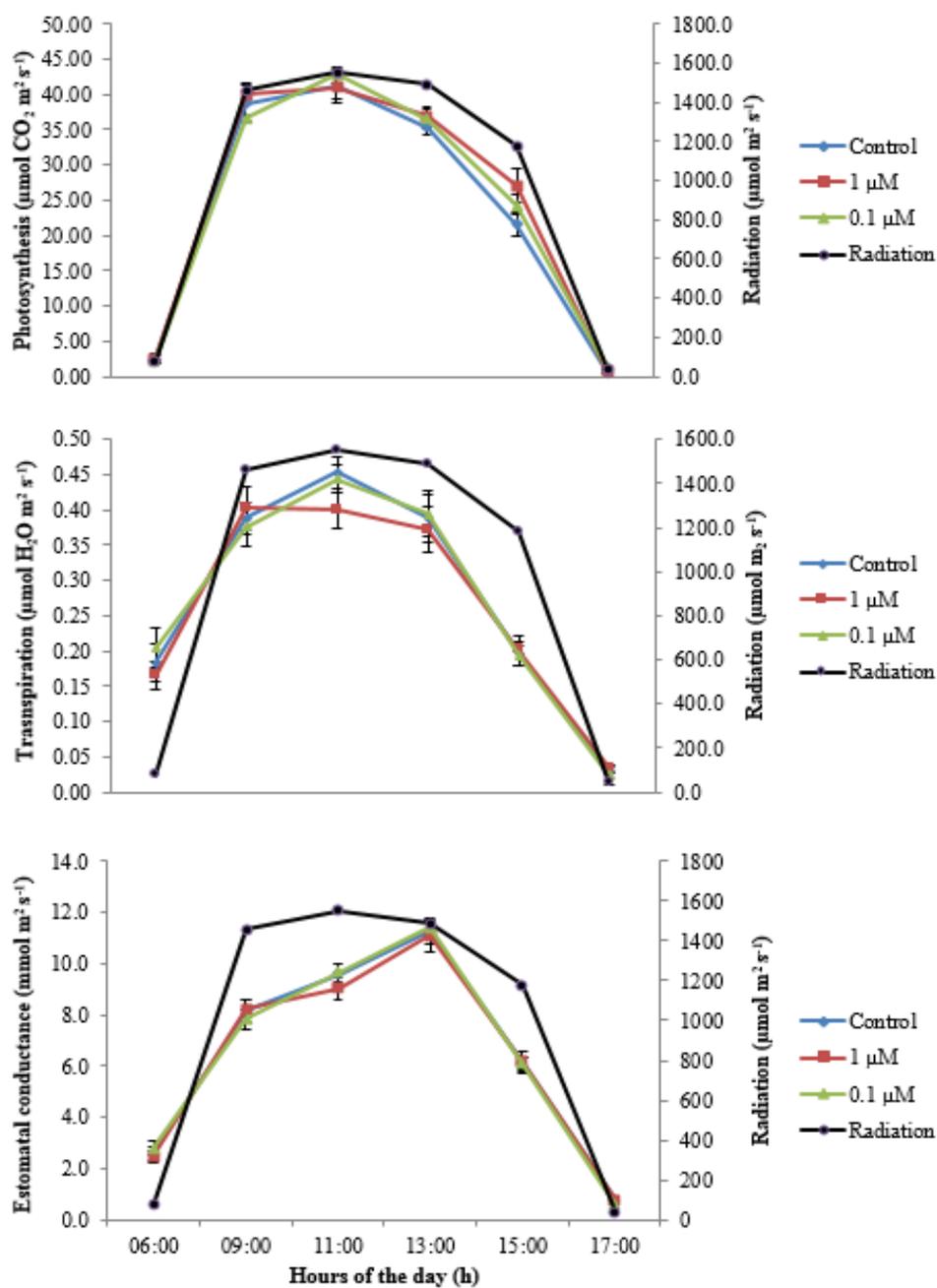


Fig. 1. Effect of spraying different concentrations of SA on seedlings of maize *xmejen-nal* on photosynthesis, stomatal conductance and transpiration. The measurements were taken from the tenth exposed leaf with ligule, 35 days after the last application of treatments. Each point is the average of 10 plants $\pm e. e.$

CAPITULO II. EFECTO DEL ÁCIDO SALICÍLICO SOBRE EL CRECIMIENTO DE RAÍZ DE PLÁNTULAS DE MAÍZ

EFFECT OF SALICYLIC ACID ON THE GROWTH OF ROOTS OF MAIZE SEEDLINGS

Resumen

Se presentan los resultados obtenidos en plántulas de maíz (*Zea mays*), de dos experimentos independientes en los que se evaluó el efecto en el crecimiento de la raíz y del vástago por la aplicación foliar de concentraciones de ácido salicílico (AS) (0.01, 0.1 y 1 μM). Las plántulas dispuestas completamente al azar con siete repeticiones se cultivaron en vasos de unicel y en tubos de PVC, con agrolita como sustrato, en dos condiciones ambientales. En el experimento en cuarto de crecimiento el tratamiento con 1 μM de AS incrementó significativamente la longitud de la raíz en 30.6% y el de 0.1 μM de AS su volumen en 24.7% en comparación con el control. En el experimento en condiciones de cielo abierto el tratamiento con 0.1 μM de AS incrementó significativamente la longitud de raíz en 18% y en 35% su peso fresco en comparación con el control. Esta concentración también incrementó significativamente la biomasa fresca total de las plántulas hasta 42%.

Palabras clave: Biomasa, gramíneas, *Zea mays*, ácido salicílico, plántulas, raíz.

Abstract

Results are shown on the effect of concentrations of Salicylic acid (SA) (0.01, 0.1 and 1 μM) on the growth of roots and shoots of seedlings of maize (*Zea mays*) from two independent experiments. Seven replicate seedlings samples were arranged in a totally random experimental design were grown on agrolita in unicel containers or in PVC tubes in two

environmental conditions. The experiment run in a growth room showed that 1 μM SA significantly increased in 30% the length of the roots while 0.1 μM increased its volume by 24.7% in comparison with those of the water control. In the experiment run in the open the 0.1 μM SA treatment significantly increased the length of the roots in 18% and its fresh weight by 35% in comparison with the control treatment. Also this concentration significantly increased the total fresh weight biomass of the seedlings by 42%.

Key words: Biomass, graminaceae, *Zea mays*, salicylic acid, seedlings, root

2.1 Introducción

El ácido salicílico (AS) es un compuesto fenólico que se encuentra de forma natural en numerosas especies vegetales y en la actualidad es considerada como una hormona vegetal (Raskin, 1992, 1992a). Aplicaciones de bajas concentraciones de AS principalmente en etapa de plántula, regulan diversos procesos fisiológicos y bioquímicos que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas (Larqué-Saavedra y Martín-Mex, 2007; Hayat *et al.*, 2010). Estudios realizados en una gran variedad de plantas, han demostrado que el AS incrementa la respuesta al control de patógenos e induce resistencia a enfermedades (Rivas-San Vicente y Plasencia, 2011) y al estrés (térmico, hídrico y salino) (Rivas-San Vicente y Plasencia, 2011) (Joseph *et al.*, 2010); acelera la floración (Martín-Mex, *et al.*, 2012); regula la fotosíntesis y la respiración (Joseph *et al.*, 2010; Hayat *et al.*, 2010); e incrementa la biomasa aérea (Villanueva-Couoh *et al.*, 2009) y de raíz (Martín-Mex, *et al.*, 2013).

En una revisión hecha por Vazirimehr y Rigi (2014) de trabajos publicados con diferentes cultivos de interés agrícola (maíz, trigo, soya, pepino y tomate), encontraron que el AS estimula e incrementa el contenido de clorofila, flavonoides, minerales, área foliar y peso

seco de la planta y de igual manera regula la tasa de fotosíntesis, contenido de agua en las hojas y funciones de la membrana. El AS afecta el crecimiento de la raíz (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 1998) induciendo cambios en la longitud, peso, perímetro, área (Villanueva-Cohuo *et al.*, 2009; Larqué-Saavedra *et al.*, 2010) y morfología de la raíz (Echeverría-Machado *et al.*, 2007). Esta cascada de respuestas pueden ser las responsables del incremento en el rendimiento de frutos encontrada en *Lycopersicon esculentum* Mill. (Larqué-Saavedra *et al.*, 2010), *Capsicum annuum* (Elwan y El-Hamahmy, 2009; Sánchez-chávez *et al.*, 2011), *Carica papaya* (Martín-Mex *et al.*, 2012) *Capsicum chinense* y *Cucumis sativus* (Martín-Mex *et al.*, 2013), por citar algunos ejemplos.

Por otro lado, especialmente en gramíneas se ha reportado que al embeber semillas de trigo en una solución de 0.01 mM de AS se incrementa la actividad de la nitrato reductasa, el número de hojas y materia seca y fresca por planta (Hayat *et al.*, 2005); mientras que con 0.5 mM de AS se presenta una mayor acumulación de proteínas, azúcares y minerales en la planta bajo condiciones de estrés por sequía (El Tayeb y Ahmed, 2010). En este mismo contexto Tucuch *et al.* (2015) mencionan que con 1 μ M de AS asperjado al dosel en etapa de plántula, hay un aumento significativo en el peso fresco de la raíz, altura de la planta y biomasa fresca total y López-Tejeda *et al.* (1998) encontraron que al aplicar AS (0.1 mM) de forma foliar al inicio de la fecundación, el rendimiento en la producción de semillas es elevado hasta 15%. En maíz algunos trabajos realizados bajo condiciones de estrés salino y no salino, sugieren que esta molécula participa en la resistencia al estrés por salinidad, induce el incremento de la biomasa fresca y seca total (Gunes *et al.*, 2007; Khodary, 2004) y estimula una mayor tasa fotosintética (Tucuch-Haas *et al.*, 2015).

El maíz es uno de los alimentos básicos de la población mexicana (Morris y López, 2012), estimándose que el 59% de la energía que se requiere en la vida cotidiana son obtenidas de este grano (Sierra *et al.*, 2004). En los últimos años del presente siglo, el aumento de la población ha traído consigo el incremento en la demanda de este cereal, de tal forma que los rendimientos no son suficientes, importándose aproximadamente 30.5% del total que se consume en el país (Morris y López, 2012), lo que ha llevado a la búsqueda de nuevas alternativas que contribuyan en la producción.

Con los antecedentes antes mencionados y por la importancia del cultivo, el presente estudio se realizó con plántulas de una raza de maíz de la península de Yucatán, con el objeto de evaluar el efecto de aspersiones de bajas concentraciones de AS sobre el tamaño de la raíz.

2.2 Materiales y métodos

Para la presente investigación se utilizaron semillas de maíz criollo conocida localmente como Xmejen-naal (Nal-tel x Tuxpeño) proporcionada por un agricultor del estado. Se establecieron dos experimentos independientes en esta gramínea con el objeto de evaluar el efecto de aspersiones, con bajas concentraciones, de ácido salicílico (AS) al dosel de las plántulas en el tamaño de la raíz.

Ambos experimentos se desarrollaron durante el mes de septiembre del 2013 en el Centro de Investigación Científica de Yucatán, el primer experimento se llevó a cabo en un cuarto de crecimiento vegetal, con un fotoperiodo de 12 h luz/12 oscuridad, con un flujo fotónico de $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y temperatura de $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Las semillas germinaron y las plántulas crecieron en agrolita contenidas en vasos de unicel con capacidad de 1 L. El segundo experimento se estableció en condiciones de cielo abierto con una temperatura promedio de

28 °C y precipitación de 13 mm. Las semillas se germinaron y las plántulas crecieron en agrolita contenida en tubos de PVC de 4 cm de diámetro y 23 cm de longitud. Las plántulas de ambos experimentos fueron regadas por las mañanas con 20 mL planta⁻¹ día⁻¹ de agua destilada.

Las concentraciones de AS analizadas fueron 0.01, 0.1 y 1 µM de AS y un control al que solo se le aplicó agua, es preciso mencionar que bajo condiciones de campo para el tratamiento 0.01 µM, no se obtuvieron datos. Para la preparación de las soluciones de AS se siguió la metodología descrita por Gutiérrez-Coronado y colaboradores (1998).

Las aspersiones se hicieron al dosel de las plántulas cuando estas presentaron la primera hoja completa con lígula, durante cinco días consecutivos entre las 8-9 h. Cinco o diez días posteriores a la última aplicación de AS, las plántulas de ambos experimentos, fueron cosechadas para realizar las mediciones de la raíz y del vástago. La medición de longitud de la raíz y altura de la planta se realizó con una regla milimétrica; el peso fresco de la raíz y la biomasa fresca total, con una balanza analítica (Sartorius, BP221S); el volumen de la raíz con una probeta graduada, utilizando el método por desplazamiento; y por último el diámetro del tallo con un vernier digital (Truper, CALDI-6MP).

En ambos experimentos se empleó un diseño estadístico completamente al azar con siete repeticiones por tratamiento, cada repetición constó de una planta. Los resultados se analizaron mediante ANOVA y cuando se detectaron diferencias estadísticas, se realizó la comparación de medias por el método de Tukey ($P= 0.05$) con el paquete estadístico SAS.

2.3 Resultados y discusión

Los datos de la longitud, peso fresco y volumen de la raíz de ambos experimentos se presentan en la Figura 1. Como se puede apreciar el AS favoreció el incremento de la longitud en ambos casos en comparación con el control. En condiciones controladas (cuarto de crecimiento), la concentración 1 μM de AS incrementó significativamente la longitud en 30.6% respecto al control, en tanto que el tratamiento de 0.1 μM de AS aumento la longitud en 19.3% y con el tratamiento de 0.01 μM de AS no se detectó efecto alguno. Por otra parte, el tratamiento de 1 μM de AS favoreció en 7.4% el peso fresco de la raíz en comparación con el control, aunque tal diferencia no fue significativa. El volumen de la raíz, de las plántulas tratadas con 0.1 μM de AS se incrementó 24.7% y con 1 μM de AS 14.9%, respecto al control.

En condiciones de cielo abierto el AS incremento la longitud de la raíz significativamente en 18% cuando se asperjo 0.1 μM de AS y de un 10%, aunque no significativo, con el tratamiento de 1 μM de AS en comparación con el control. El peso fresco de la raíz (Figura 1) se incrementó significativamente hasta en 35% con 0.1 μM de AS en comparación con el control, mientras que con 1 μM de AS lo favoreció en 19%, que no fue significativo. No se encontraron diferencias significativas en el volumen de la raíz en ninguno de los tratamientos de AS aunque el patrón de estimulación por el efecto del AS en comparación con el control se mantuvo. Valores de 15.5 y 13% de incremento sobre el control por el efecto de 1 μM y 0.1 μM de AS fueron registrados.

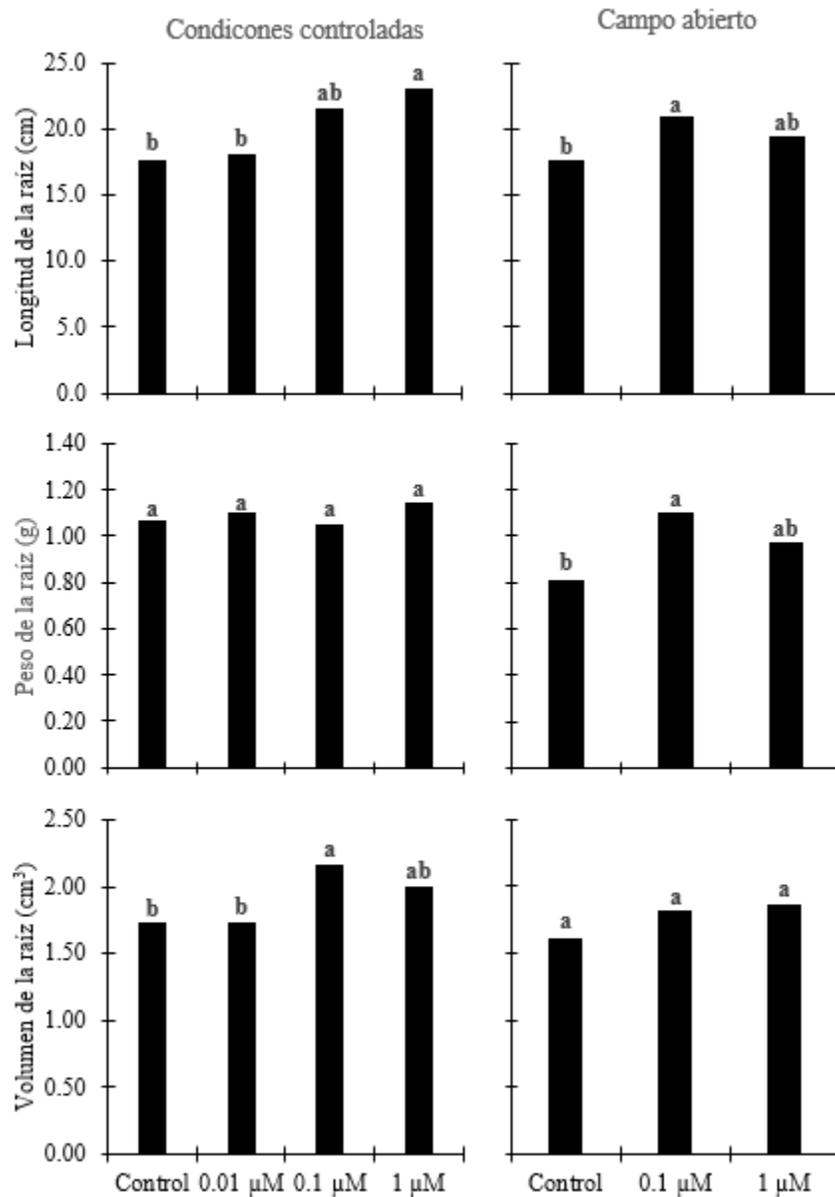


Figura 1. Efecto de diferentes concentraciones de ácido salicílico asperjado a plántulas de maíz en la longitud, peso fresco y volumen de la raíz. Cada bloque es la media de 7 individuos. Medias con letras diferentes significan que son significativamente diferentes.

Se puede apreciar en las gráficas el efecto que ejerce el AS en el crecimiento de la raíz en esta gramínea a pesar que las respuestas de los bioensayos nos señala un patrón ligeramente diferente en la curva dosis respuesta. El efecto encontrado en el presente estudio, en ambos experimentos, concuerda con lo ya reportado en otras especies como en *Glycine max* (L.)

(Gutiérrez-Coronado *et al.*, 1998), *Lycopersicum esculentum* (Larqué-Saavedra *et al.*, 2010), *Triticum aestivum* (Arfan *et al.*, 2007), *Zea mays* bajo condiciones de estrés salino (Khodary, 2004), *Catharanthus roseus* (Echeverría-Machado *et al.*, 2007) y *Chrysanthemum morifolium* (Villanueva-Couoh *et al.*, 2009).

Aunque se desconoce el mecanismo de acción de cómo es que el AS aplicado en el dosel de las plántulas estimula el desarrollo de las raíces, datos publicados señalan que el AS promueve la división celular del meristemo apical de la raíz (Shakirova *et al.*, 2003) así como el aumento del tamaño de la cofia y la aparición de raíces laterales (Echeverría-Machado *et al.*, 2007), lo que pudo ocurrir en el presente experimento.

Otras variables que fueron estimadas en el dosel de las plántulas, en los dos experimentos reseñados en párrafos anteriores se presentan en el Cuadro 1. Se puede apreciar que la altura de la planta se incrementa en 22.1% con el tratamiento de 1.0 μM de AS en tanto que con 0.1 μM de AS dicho incremento fue de 23% respecto al control. De manera semejante el diámetro del tallo se estimuló en 12.3% y en 19% en comparación con el control con los tratamientos 1.0 y 0.1 μM de AS respectivamente, diferencias sin embargo, que no fueron significativas. A diferencia de las variables anteriores, el peso fresco de la biomasa de las plántulas presentó un incremento significativo destacándose la concentración 0.1 μM de AS con un aumento de hasta 42% en el experimento desarrollado en condiciones de campo. Este efecto no fue detectado en el experimento desarrollado en el cuarto de crecimiento.

Los resultados del efecto del AS en el dosel de las plantas reportadas en el presente estudio coinciden con lo publicado por Khodary (2004), quien reporta diferencias significativas en estas mismas variables para maíz desarrollado en condiciones de salinidad en respuesta a aplicaciones de 10^{-2}M de AS. El mismo efecto se ha reportado en otras especies como *Carica*

papaya (Matin-Mex *et al.*, 2012), *Lycopersicum esculentum* (Larqué-Saavedra *et al.*, 2010) y *Chrysanthemum morifolium* (Villanueva-Couoh *et al.*, 2009), en los que se reportan incrementos en la altura y diámetro del tallo. Sin embargo debe de sealarse que nuestros datos difieren de lo publicado por Khan y colaboradores (2003), quienes reportan que no encontraron diferencias significativas en altura y biomasa fresca total en maíz asperjado con 1.0 y 0.01 mM de AS en plantas crecidas en suelo en condiciones de invernadero.

Cuadro 1. Aspersiones con diferentes concentraciones de ácido salicílico, en el diámetro, altura y biomasa fresca total de plántulas de maíz, cultivadas en cuarto de crecimiento (CC) o en cielo abierto (CA).

Tratamientos	Altura de planta (cm)		Diámetro del tallo (mm)		Biomasa fresca total (g) (raíz y parte aérea)	
	C. C	C. A	C. C	C. A	C. C	C. A
Control	13.7 a	32.0 a	2.34 a	1.94 a	1.70 ab	1.83 b
0.01�M	14.3 a		2.26 a		1.50 b	
0.1�M	14.5 a	39.4 a	2.26 a	2.31 a	1.58 ab	2.60 a
1�M	12.9 a	39.1 a	2.31 a	2.18 a	1.77 a	2.27 ab

Valores con la misma letra dentro de columnas son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $p= 0.05$. Cada valor es la media de 7 individuos. Las determinaciones fueron realizadas 14 días después de la siembra en las plántulas crecidas en CC y 20 días para las plántulas crecidas en CA.

Los resultados del presente estudio principalmente los relacionados con el efecto en longitud y volumen de la raíz, órgano de vital importancia para todo organismo vegetal, apoyan la propuesta de que aplicaciones foliares de AS, en etapa de plántula, favorecerían una mayor absorción de iones del suelo debido a que el área de exploración de la planta es mayor, planteamiento que fue publicado por Larqué-Saavedra y Martín-Mex (2007), quienes mencionan que uno de los mecanismos por el cual se incrementa la bioproduktividad con AS, es a través de la modificación de la raíz. De manera semejante está sustentada por los datos publicados por Gunes y colaboradores (2007), El Tayeb y Ahmed (2010); Sánchez-Chávez y colaboradores. (2011) y Fahad y Bano (2012) quienes han reportado incrementos en el contenido de iones esenciales en los tejidos de plantas tratadas con AS.

Estos resultados confirman la importancia de esta molécula como un regulador de crecimiento vegetal y pone en evidencia su uso potencial para incrementar la bioproductividad de las gramíneas, tal como lo ha sugerido Larqué-Saavedra y Martín-Mex (2007).

2.4 Conclusión

Aspersiones de bajas concentraciones de ácido salicílico a plántulas de maíz incrementan el tamaño de sus raíces, independientemente de las condiciones de cultivo.

2.5 Literatura citada

- Arfan, M.; Athar, H. R. and Ashraf, M. 2007. Does exogenous application of salicylic acid through the rooting medium modulate growth and photosynthetic capacity in two differently adapted spring wheat cultivars under salt stress?. *J Plant Physiol.* 164: 687-694.
- Echevarría-Machado, I.; Escobedo, R. M. and Larqué-Saavedra, A. 2007. Responses of transformed *Catharanthus roseus* roots to femtomolar concentrations of salicylic acid. *Plant Physiol. Biochem.* 45: 501-507.
- El Tayeb, M. A. and Ahmed, A. N. 2010. Response of wheat cultivars to drought and Salicylic acid. *Am-Euras. J Agron.* 3: 01-07.
- Elwan, M.W. M and El-Hamahmy, M. A. M. 2009. Improved productivity and quality associated with salicylic acid application in greenhouse pepper. *Sci. Hortic.* 122: 521-526.
- Fahad, S. and Bano, A. 2012. Effect of salicylic acid on physiological a biochemical characterization of maize grown in saline área. *Pak. J Bot.* 44: 1433-1438.
- Gunes, A; Inal, A; Alpaslan, M; Eraslan, F; Bagci, E. G. and Cicek, N. 2007. Salicylic acid changes on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) grown under salinity. *J Plant Physiol.* 164: 728-736.
- Gutiérrez-Coronado, M. A.; Trejo-López, C. and Larqué-Saavedra, A. 1998. Effects of salicylic acid on the growth of roots and shoots in soybean. *Plant Physiol. Biochem.* 36: 563-565.

- Hayat, S.; Fariduddin, Q.; Ali, B. and Ahmad, A. 2005. Effect of salicylic acid on growth and enzyme activities of wheat seedlings. *Acta Agron. Hung.* 53: 433-437.
- Hayat, Q.; Hayat, S.; Irfan, M. and Ahmad, A. 2010. Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: A review. *Environ. Exp. Bot.* 68: 14-25.
- Joseph, B.; Jini, D. and Sujatha, S. 2010. Insight into role of exogenous salicylic acid on plants grown under salt environment. *Asian J Crop Sci.* 2: 226-235.
- Khan, W.; Prithviraj, B. and Smith, D. L. 2003. Photosynthetic responses of corn and soybean to foliar application of salicylates. *J Plant Physiol.* 160: 485-492.
- Khodary, S. E. A. 2004. Effect of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt stressed maize plants. *Int. J Agr. Biol.* 6: 5-8.
- Larqué-Saavedra, A.; Martín-Mex, R.; Nexticapan-Garcéz, A.; Vergara-Yoisura, S. y Gutiérrez-Rendón, M. 2010. Efecto del ácido salicílico en el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Rev. Chapingo Serie Hortic.* 16: 183-187.
- Larqué-Saavedra, A. y Martín-Mex, R. 2007. Effects of salicylic acid on the bioproductivity of the plants. In Hayat S. y A. Ahmad (Eds), *Salicylic acid, a plant hormone*. Springer publishers, Dordrech, The Netherlands.
- López-Tejeda, R.; Camacho, V. R. y Gutiérrez, C. M. A. 1998. Aplicación de ácido salicílico para incrementar el rendimiento agronómico en tres variedades de trigo. *Terra Latinoamericana.* 16: 43-48.
- Martín-Mex, R.; Nexticapan-Garcéz, A. y Larqué-Saavedra, A. 2013. Potential benefits of salicylic acid in food production. En Hayat S.; Ahmad A. y Alyemeni, M. N. (Eds). *Salicylic acid*. Springer publishers, Dordrech, The Netherlands.
- Martín-Mex, R.; Nexticapan-Garcéz, A.; Herrera-Tuz, R.; Vergara-Yoisura, S. y Larqué-Saavedra, A. 2012. Efecto positivo de aplicaciones de ácido salicílico en la productividad de papaya (*Carica papaya*). *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 18: 1637-1643.
- Morris, M. L. y López, P. M. 2012. Impactos del Mejoramiento del maíz en América Latina 1966-1997. CIMMYT. México D.F. 45 p.
- Raskin, I. 1992. Salicylate, a new plant hormone. *Plant Physiol.* 99: 799-803.
- Raskin, I. 1992a. Role of salicylic acid in plants. *Annu. Rev. Plant phys. Plant Mol. Biol.* 43:439-463.
- Rivas-San Vicente, M. y Plasencia, J. 2011. Salicylic acid beyond: its role in plant growth and development. *J Exp. Bot.* 1: 1-18.

- Sánchez-Chávez, E.; Barrera-Tovar, R.; Muñoz-Márquez, E.; Ojeda-Barrios, D. L. y Anchondo-Nájera, A. 2011. Efecto del ácido salicílico sobre biomasa, actividad fotosintética, contenido nutricional del chile jalapeño. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 17: 63-66.
- Shakirova, F.M.; Sakhabutdinova, A. R.; Bezrukova, M. V.; Fatkhutdinova, R. A. y Fatkhutdinova, D. R. 2003. Changes in the hormonal status of wheat seedlings induced by salicylic acid and salinity. *Plant Sci.* 164: 317-322.
- Sierra, M. M.; Becerra, E. L.; Palafox, A. C.; Barron, S. F; Cano, O.R.; Zambada, A. M.; Sandoval, A. E. R. y Romero, J. M. 2004. Caracterización de híbridos de maíz (*Zea Mays* L.) con Alta calidad de proteína por su rendimiento y tolerancia a pudrición de mazorca en el sureste de México. *Rev. Mex. Fitopatol.* 22: 268-276.
- Tucuch, H. C. J., Alcántar, G. G.y Larqué, S. A. 2015. Efecto del ácido salicílico en el crecimiento de la raíz y biomasa total de plántulas de trigo. *Terra Latinoamericana.* 33: 63-68.
- Tucuch-Haas, C; Alcántar-González, G.; Volke-Haller, H.; Salinas-Moreno, Y.; Trejo-Téllez, L. and Larqué-Saavedra, A. 2015. Photosynthesis, transpiration, stomatal conductance and chlorophyll content in a maya landrace of maize treated with salicylic acid. *Wulfenia J.* 22: 375-381.
- Vazirimehr, R. M. y Rigi, K. 2014. Effect of salicylic acid in agriculture. *Int. J. Plant Anim. Environ. Sci.* 4: 291-296.
- Villanueva-Couoh, E.; Alcántar-González, G.; Sánchez-García, P.; Soria-Fregoso, M. y Larqué-Saavedra, A. 2009. Efecto del ácido Salicílico y dimetilsulfóxido en la floración de *Chrysanthemum morifolium* (Ramat) Kitamura en Yucatán. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 15: 25-3

**CAPITULO III. EFECTO DEL ÁCIDO SALICÍLICO EN EL CRECIMIENTO,
ESTATUS NUTRIMENTAL Y RENDIMIENTO EN MAÍZ (*Zea mays*)
EFFECT OF SALICYLIC ACID ON GROWTH, NUTRITIONAL STATUS AND
PERFORMANCE ON CORN (*Zea mays*)**

Resumen

El ácido salicílico (AS) participa en diversos procesos fisiológicos y bioquímicos en algunas especies de plantas, favoreciendo el rendimiento. En el cultivo de maíz (*Zea mays*), aunque se sabe que también son favorecidos estos procesos, se conoce muy poco sobre los efectos causados en la bioproductividad. Por esta razón el efecto de AS aplicado a las hojas se evaluó en parámetros de crecimiento, estatus nutrimental y en la producción de grano de maíz, de la variedad local Xmejen-nal del estado de Yucatán, México. La evaluación se realizó en dos experimentos independientes, con arreglo de bloques al azar, en condiciones de campo y dos concentraciones de AS (0.1 y 1 μ M). Un testigo, con agua destilada, se incluyó como control. Las soluciones se asperjaron a plántulas de 7 días de edad, diariamente durante una semana. Al momento de la cosecha se recabaron datos de altura y diámetro de la planta; biomasa seca aérea; diámetro, longitud y peso de la mazorca; así como el rendimiento del grano (g planta^{-1}); además de la estimación del contenido de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) en tejido aéreo y grano. AS en concentración 1 μ M, incrementó significativamente la producción del grano por planta, la biomasa seca total y el contenido de N, P y K.

Palabras clave: gramínea, *Zea mays*, biomasa, mazorca, nitrógeno, fósforo y potasio.

Abstract

Salicylic acid (SA) participates in various physiological and biochemical processes in some plant species, favoring performance. In the cultivation of maize (*Zea mays*), although it is known that these processes are also favored, very little is known about the effects on bio-productivity. For this reason, the effect of SA, applied to leaves, was evaluated on parameters of growth, nutritional status and grain production of maize, of the local variety Xmejen-nal of the state of Yucatan, Mexico. The evaluation was conducted in two independent experiments, with a block randomized arrangement, under field conditions and two levels of SA (0.1 and 1 μM). A witness, with distilled water, was included as control. The solutions were sprayed to seedlings of 7 days old, daily for a week. At the time of harvest, were collected the height and diameter data of the plant; aerial dry biomass; diameter, length and weight of the cob; and grain yield (g plant^{-1}); in addition to estimating the content of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) in aerial tissue and grain. SA in concentration 1 μM , significantly increased grain yield per plant, total dry biomass and content of N, P and K.

Keywords: grass, *Zea mays*, biomass, corn, nitrogen, phosphorus and potassium.

3.1 Introducción

El ácido salicílico (AS) es un compuesto fenólico producto del metabolismo secundario (Hayat *et al.*, 2010) en los tejidos vegetales (Raskin, 1992), participa como un regulador de crecimiento en las plantas e incrementa el rendimiento de los cultivos, cuando se suministra de manera exógena y en bajas concentraciones (Rivas-San Vicente y Plasencia, 2011). Ese compuesto beneficia positivamente la longitud (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 1998), peso, perímetro, área (Larqué-Saavedra *et al.*, 2010) y modifica la morfología de la raíz

(Echevarría-Machado *et al.*, 2007), incrementa la biomasa fresca y seca del tallo (Villanueva-Couoh *et al.*, 2009) y los nutrimentos en el tejido (Khan *et al.*, 2010).

La participación de AS se ha documentado en procesos fisiológicos como el cierre estomático (Larqué-Saavedra, 1978), mejoramiento de la carboxilación y la actividad de la nitrato reductasa (Fariduddin *et al.*, 2003), incremento de la actividad fotosintética (Arfan *et al.*, 2007; Sánchez-Chávez *et al.*, 2011) y reducción del rendimiento fotoquímico operacional (Janda *et al.*, 2012). Además, interviene como estimulador en la producción de metabolitos secundarios (Bennet y Wallsgrove, 1994), como la capsaicina (Sandoval-Rangel *et al.*, 2011), bacosida A (Largia *et al.*, 2015), witaferina A (Piñeros-Castro *et al.*, 2009), flavonoides (Pacheco *et al.*, 2013), y fenoles totales (Burbano y Garcés, 2007; Rodrigues-Brandao *et al.*, 2014).

Aplicaciones de bajas concentraciones de AS incrementa el rendimiento y calidad de frutos en cultivos de interés agrícola, como *Capsicum annum*, *Capsicum chinense*, *Solanum lycopersicum*, *Cucumis sativus* y *Carica papaya* (Martín-Mex *et al.*, 2013).

En gramíneas de gran interés agrícola como el arroz (*Oryza sativa*), trigo (*Triticum aestivum*) y cebada (*Hordeum vulgare*), el AS participa en distintos procesos tales como: la protección contra daños causados por cadmio (Cd) (Fatima *et al.*, 2014), arsénico (As) (Singh *et al.*, 2015), plomo (Pb) (Chen *et al.*, 2007) y boro (B) (El-Feky *et al.*, 2014). Además induce la aparición de proteínas relacionadas con la patogénesis en plantas (PR), responsables de la resistencia sistemática adquirida; estimula la actividad de las enzimas peroxidasa (EC 1.11.1.7), β -1,3-glucanasa (EC 3.2.1.58) y catalasa (EC 1.11.1.6) (Shi *et al.*, 1999; Mutlu *et al.*, 2013); reduce los efectos adversos causados por salinidad (Fayez y Bazaid, 2014;

Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2014), sequía (Habibi, 2012; Farzane *et al.*, 2014) y frío (Mutlu *et al.*, 2013); y favorece la acumulación de iones tales como magnesio (Mg) ,Calcio (Ca) y potasio (K) (El Tayeb y Ahmed, 2010). De igual manera, incrementa el vigor y la altura en plántulas (Anwar *et al.*, 2013), la longitud, peso seco y fresco de la raíz (Deef, 2007), biomasa seca y fresca aérea (Hayat *et al.*, 2005; Tucuch *et al.*, 2015), contenido de clorofila (a y b) y carbohidratos, (El-FeKy *et al.*, 2014) y favorece el rendimiento del grano en arroz y trigo (López *et al.*, 1998; Tavares *et al.*, 2014).

En maíz, aplicaciones foliares de AS en etapa de plántula, aceleran la actividad de la enzima Rubisco; aumentan la actividad fotosintética; incrementan el contenido clorofila a y b, carotenoides y carbohidratos; la longitud, peso fresco y seco de la raíz; la altura, biomasa seca y fresca de la parte aérea de la planta y área foliar, bajo condiciones de salinidad (Khodary, 2004). Además favorecen la acumulación de N, K, Mg, Fe, Mg y Cu en el tejido vegetal en estas mismas condiciones de estrés salino (Gunes *et al.*, 2007; Fahad y Bano, 2012).

La participación del AS en procesos fisiológicos y bioquímicos en las plantas, particularmente en gramíneas, sugiere que este compuesto puede inducir un mayor rendimiento de grano en el cultivo de maíz. Para verificar esta hipótesis, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto en el rendimiento del grano y sus componentes en el cultivo de maíz, con bajas concentraciones de AS, suministradas de manera foliar en etapa de plántulas.

3.2 Materiales y métodos

Para analizar el efecto del AS en el crecimiento, rendimiento del grano, contenido de N, P y K en tejido (parte aérea) y grano de plantas de maíz, se establecieron dos experimentos, a cielo abierto, en los terrenos del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). El primero se estableció el 30 de agosto de 2013 y el segundo el 19 de enero de 2014. Para ambos experimentos se emplearon semillas de maíz criollo local Xmejen-nal (Nal-tel x Tuxpeño), de gran importancia en el estado de Yucatán. Las siembras se realizaron de forma directa al suelo, en camas de 1 m de ancho x 10 m de largo, con distanciamientos entre plantas de 0.30 m y entre hileras de 0.50 m.

Los tratamientos fueron concentraciones de 0.1 y 1 μM de AS más un testigo (agua destilada), las cuales se prepararon según la metodología descrita por Gutiérrez-Coronado *et al.* (1998). La aplicación se realizó al dosel de las plántulas hasta punto de roció durante una semana con intervalos de aplicación de 24 h, a las 8:00 h, iniciando 7 días después de la siembra (dds). Después de la última aspersion de AS, las plantas se dejaron crecer libremente realizando solamente deshierbes, riegos para mantener el suelo húmedo a capacidad de campo y una aplicación de fertilizantes con 17N, 17P, 17K, 20 g planta⁻¹ a los 20 dds.

A los 140 dds (final del experimento) se recabaron datos de altura de planta, medida de la base del tallo hasta el ápice terminal; diámetro de tallo, tomado a los 10 cm del suelo; peso seco de la biomasa total; longitud, diámetro, peso de la mazorca y rendimiento del grano por planta. Para tales mediciones se empleó una balanza analítica (Sartorius, BL3100), flexómetro y vernier digital (Truper, CALDI-6MP). Para determinar los contenidos de N, P y K en tejido y grano, se tomó la parte aérea de las plantas y 100 g de grano, de cada

tratamiento; se colocaron en un horno (Binder, FED720) a 70 °C hasta alcanzar peso constante y se molieron para el análisis en laboratorio. La concentración de N se determinó por el método micro-Kjeldahl y el P y K mediante lecturas de extractos provenientes de digestión húmeda diácida de acuerdo a lo descrito por Alcántar y Sandoval (1999), en un equipo de espectroscopia de emisión atómica de inducción por plasma (ICP-OES, Agilent 725-OES, Australia). Una vez obtenidas las concentraciones de cada elemento en tejido y grano, se consideraron estas y los pesos de biomasa seca aérea y de los granos de maíz, para la estimación de los contenidos totales.

El diseño estadístico fue de bloques al azar con 20 repeticiones y una planta como unidad experimental. Los datos reportados son los registrados de cuatro plantas en el experimento uno y de 10 plantas del experimento dos. Los resultados de ambos experimentos se analizaron mediante ANDEVA y las medias se compararon con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) usando SAS. De igual manera se correlacionaron los datos de rendimiento con las variables de la mazorca, así como con el contenido nutrimental utilizando SAS.

3.3 Resultados y discusión

La temperatura media durante el experimento 1 fluctuó de 21 a 28 °C, los valores mayores se presentaron al inicio del cultivo y los menores al final. Al contrario, en el experimento 2 las temperaturas menores se registraron al inicio del experimento y las mayores al final, en un intervalo de 20 a 25 °C. Las lluvias todo el ciclo completo de desarrollo del maíz en promedio fue de 5 mm día⁻¹, en el experimento 1; mientras que en el experimento 2, fueron escasas permaneciendo la mayor parte del tiempo con riegos de auxilio.

Los resultados de altura de planta, diámetro del tallo y peso seco de la biomasa seca total de ambos experimentos, se presentan en el Cuadro 1. En las variables altura de planta y diámetro de tallo se observan medias más altas con la adición de cualquiera de las concentraciones de AS en comparación con el testigo, empero, solo en los resultados del experimento 1 las diferencias registradas entre la concentración de 1 μM y el testigo fueron significativas; superando en 14.3 y 41.2 % en altura y diámetro respectivamente, al testigo. Por otra parte, la biomasa seca total se incrementó de manera significativa en ambos experimentos con 1 μM de AS en comparación con el testigo, superándolo en aproximadamente 48 % en promedio.

Cuadro 1. Efecto de la aplicación de ácido salicílico al dosel de plantas de maíz, en la altura de planta, diámetro del tallo y biomasa seca aérea de dos experimentos.

Tratamiento		AP (cm)	DT (mm)	BT (g planta ⁻¹)
Exp. 1	Control	213.50 b	16.03 b	218.4 b
	0.1 μM	224.50 ab	17.69 b	279.0 b
	1.0 μM	244.00 a	22.65 a	368.50 a
Exp. 2	Control	206.22 a	19.98 a	229.03 b
	0.1 μM	205.77 a	20.04 a	242.65 b
	1.0 μM	218.40 a	20.28 a	347.49 a

A P: altura de planta; DT: diámetro del tallo; BT.: biomasa seca total. Medias con la misma letra en cada columna para cada experimento, no son significativamente diferentes (Tukey, ≤ 0.05).

Los resultados obtenidos muestran el efecto del AS para estimular el crecimiento, desarrollo y acumulación de biomasa de las plantas de maíz, que coinciden con los patrones de repuestas ya publicados por Farahbakhsh y Saiid (2011) y Singh *et al.*, (2015a) en trabajos realizados bajo condiciones de salinidad y con los de Zamaninejad *et al.* (2013) en sequía, para esta misma especie. Son también congruentes con los reportados en otras plantas de interés agronómico como *Triticum aestivum* (Sayede y Mujahed, 2016; Tucuch *et al.*, 2015), *Carica*

papaya (Matín-Mex *et al.*, 2012), *Cucumis sativus* (Singh y Chaturvedi, 2012), *Capsicum annuum* (Qados, 2015) y *Coriandrum sativum* (Hesami *et al.*, 2012).

La longitud de la mazorca de las plantas asperjadas con AS (Cuadro 2) es significativamente diferente al control, independientemente de la concentración asperjada, de AS en ambos experimentos. En promedio la concentración de 1 μM de AS superó aproximadamente en un 29 % al control y la de 0.1 μM de AS en 21 %. En cuanto al resto de las variables estimadas de la mazorca y en particular la producción de grano (Cuadro 2), ambos tratamientos de AS superaron al control, sin embargo, solo el tratamiento de 1 μM de AS fue significativamente superior. Los valores de longitud, ancho y grosor del grano no mostraron diferencias significativas en ninguno de los dos experimentos evaluados para ninguno de los tratamientos.

Cuadro 2. Efecto sobre la mazorca y grano del cultivo de maíz (Xmejen-nal), con aspersiones foliares de AS en etapa de plántula, analizados a los 140 días después del trasplante, en dos experimentos.

Trat.	LM (cm)	DM (mm)	PM (g)	NG (#)	RG (g planta ⁻¹)	LG (cm)	AG (cm)	GG (cm)
Exp. 1 Control	13.0 b	36.4 b	79.4 b	240.0 b	57.5 b	0.87 a	0.82 a	0.50 a
Exp. 1 0.1 μM	15.7 a	43.7 ab	141.8 ab	362.5 ab	109.2 ab	1.02 a	0.87 a	0.44 a
Exp. 1 1 μM	18.0 a	44.9 a	164.5 a	374.5 a	120.2 a	1.04 a	0.91 a	0.48 a
Exp. 2 Control	14.6 b	38.6 b	106.9 b	134.5 b	62.6 b	1.02 a	0.97 a	0.65 a
Exp. 2 0.1 μM	17.8 a	42.1 ab	134.8 ab	192.8 b	90.9 ab	1.02 a	0.98 a	0.50 a
Exp. 2 1 μM	17.5 a	45.0 a	185.9 a	349.3 a	140.1 a	1.12 a	0.97 a	0.60 a

L M: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; PM: peso de mazorca; NG: número de granos; LG: longitud de grano; AG: ancho de grano; GG: grosor de grano; RG: rendimiento de grano por mazorca. Medias con la misma letra en cada columna para cada experimento no son significativamente diferentes (Tukey, ≤ 0.05).

Los resultados del presente estudio coinciden con los reportados por El-Wahed y colaboradores (2006) quienes encontraron que la aplicación foliar de concentraciones de 1,

2 ó 3 mM de AS a los 45 días después de la siembra a plantas de maíz, incrementa la longitud y el diámetro de la mazorca, afectando positivamente el rendimiento del grano hasta un 25.7 %. De igual manera ratifican lo reportado por Zamaninejad *et al.* (2013) quienes observaron el mismo patrón de incremento en rendimiento de grano con aproximadamente 59 % por encima del testigo, al asperjar 1 mM de AS a plantas que presentaban entre 10 y 12 hojas expuestas bajo condiciones de sequía.

Por otra parte, valores de longitud y diámetro de la mazorca, y rendimiento del grano reportados en una caracterización morfológica, realizada por Chávez-Servia *et al.* (2004) para la misma variedad de maíz aquí evaluada, son coincidentes con los de las plantas control e inferiores a los tratadas con AS, lo que de igual manera apoya la respuesta del cultivo de maíz al AS.

Los datos del Cuadro 3 muestran que el rendimiento del grano presenta una correlación altamente significativa y positiva con todas las variables de la mazorca, a excepción del grosor del grano que tuvo un comportamiento negativo en los dos experimentos y no fue significativa en el experimento 1; así mismo el ancho del grano que no fue significativa en el experimento 2. Similares respuestas fueron reportadas por El-Wahed *et al.* (2006) y Zamaninejad *et al.* (2013) al correlacionar el rendimiento del grano con algunas variables de la mazorca como la longitud y diámetro, en plantas de maíz tratadas con AS, lo que indica que el incremento del rendimiento del grano, está ligado al efecto que el AS ejerce sobre la mazorca.

En el Cuadro 4, se presentan los resultados de los contenidos de N, P y K en la biomasa seca aérea y en el grano de ambos experimentos. Se puede apreciar que, en ambos experimentos, el tratamiento 1 μ M de AS favoreció significativamente la acumulación de estos tres

elementos, además siguió una misma tendencia de comportamiento, tanto en la biomasa seca aérea como en el grano. En la biomasa seca aérea, se encontraron incrementos promedio de 75, 85 y 67 % y en grano de 59, 129 y 116 % para N, P y K respectivamente, para los dos experimentos.

Cuadro 3. Correlación entre el rendimiento del grano y variables de la mazorca de los dos experimentos en estudio.

	DM	PM	NG	LG	AG	GG	RG
Experimento 1							
LM	0.560**	0.672*	0.687*	0.522**	0.252ns	0.087ns	0.666**
DM		0.940**	0.730**	0.861**	0.652**	-0.156ns	0.938**
PM			0.698**	0.865**	0.658**	0.014ns	0.989**
NG				0.549**	0.107ns	-0.453*	0.722**
LG					0.783**	-0.165ns	0.899**
AG						0.168ns	0.896**
GG							-0.029ns
Experimento 2							
LM	0.553**	0.642**	0.543**	0.399*	0.183ns	0.463*	0.582**
DM		0.901**	0.843**	0.793**	0.342ns	-0.815**	0.910**
PM			0.922**	0.778**	0.235ns	-0.743**	0.975**
NG				0.764**	0.098ns	-0.798**	0.970**
LG					0.388ns	-0.615**	0.800**
AG						0.120ns	0.205ns
GG							-0.789**

LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; PM: peso de mazorca; NG: número de granos; LG: longitud de grano; AG: ancho de grano; GG: grosor de grano; RG: rendimiento de grano por mazorca. *P > 0.05; **P > 0.01 y ns= no significativo.

Por otra parte con 0.1 μ M de AS no hubo consistencia en el comportamiento del efecto entre experimentos. En el experimento 1 el AS afectó significativamente en la biomasa seca aérea, el contenido de N y K con incrementos de 37.5 y 59.0 % respectivamente; En el experimento 2 sin embargo los resultados de estas variables no fueron significativas. En el grano, las

concentraciones de N y P fueron significativamente diferentes en el experimento 1, con valores por encima del control de 79 y 29 % respectivamente; y para K en ambos experimentos los valores fueron superiores al 29 %.

Cuadro 4. Contenido promedio de N, P y K en la biomasa seca aérea y grano, de dos experimentos, en el cultivo de maíz (var. Xmejen-nal) tratadas con ácido salicílico.

Experimento	Tratamiento	NF	PF	KF	NG	PG	KG
		----- g planta ⁻¹ -----			----- g mazorca ⁻¹ -----		
1	Control	1.41 c	0.13 b	0.64 c	1.02 c	0.14 c	0.06 b
	0.1 µM	1.94 b	0.13 b	1.02 b	1.83 b	0.31 b	0.14 a
	1.0 µM	2.79 a	0.26 a	1.34 a	2.09 a	0.39 a	0.14 a
2	Control	2.01 b	0.24 b	1.04 b	2.20 b	0.23 b	0.08 c
	0.1 µM	2.25 b	0.23 b	0.84 ab	1.65 c	0.30 b	0.12 b
	1.0 µM	3.10 a	0.42 a	1.31 a	2.58 a	0.42 a	0.16 a

NF: nitrógeno foliar; PF: fósforo foliar; KF: potasio foliar; NG: nitrógeno en grano; PG: fósforo en grano y KG: potasio en grano. Medias con la misma letra en cada columna para cada experimento no son significativamente diferentes (Tukey, ≤ 0.05).

Vazirimehr y Rigi (2014) en una revisión realizada para varios cultivos de interés agrícola tratadas con AS, bajo condiciones de salinidad, encontraron que el contenido de total de iones en las plantas tratadas fue superior con respecto a las que no se les suministro AS; y Gunes *et al.* (2005) reportan incrementos en el contenido de N, P, K, Mg y Mn bajo diferentes condiciones de estrés, en el cultivo de maíz, datos que son congruentes con los resultados de la presente investigación.

Los datos encontrados en el presente estudio podrían explicarse por efecto reportado de que el AS promueve mayor desarrollo en las raíces, para esta misma especie y variedad, permitiendo aumentar el área de exploración en el suelo y por ende la tasa de absorción de nutrimentos (Tucuch-Haas *et al.*, 2016).

Al correlacionar los contenidos de N, P y K con el rendimiento del grano y biomasa seca aérea (Cuadro 5), los valores encontrados fueron significativamente diferentes en la mayoría

de los casos a excepción del P que no lo fue en la biomasa seca aérea, lo que supone que existe una mayor absorción de estos elementos y que contribuyen a incrementar la biomasa seca aérea y el rendimiento del grano.

Cuadro 5. Correlación de los contenidos de N, P y K del tejido y grano, entre la biomasa seca aérea y el peso del grano de los dos experimentos.

	NF	NG	PF	PG	KF	KG
BA	0.563**	0.744**	0.322 ns	0.559**	0.696**	0.430*
RG	0.465*	0.750**	0.348*	0.661**	0.618**	0.612**

BA: biomasa seca aérea; RG: rendimiento de grano; NF: nitrógeno foliar; NG: nitrógeno en grano; PF: fósforo foliar; PG: fosforo en grano; KF: potasio foliar y KG: potasio en grano. * $P > 0.05$; ** $P > 0.01$; ns: no significativo.

Es preciso destacar que para esta misma especie, se ha documentado que existe mayor tasa fotosintética al aplicar AS al dosel del cultivo en etapa de plántula (Khodary, 2004), lo que también estaría contribuyendo en favorecer el rendimiento del grano y la biomasa seca aérea.

Los resultados, del efecto del AS, encontrados en este cultivo de importancia económica, permite ratificar el impacto que este regulador del crecimiento tiene sobre la producción de las gramíneas tal y como lo han señalado López *et al.* (1998) y Tavares *et al.*, (2014); y dan mayor sustento de su utilidad en la bioproductividad de otras especies como *Capsicum annuum* (Elwan y El-Hamahmy, 2009), *Capsicum chinense* (Martín-Mex *et al.*, 2004; Martín *et al.*, 2005), *Solanum lycopersicum* (Javaheri *et al.*, 2012) y *Carica papaya* (Martín-Mex *et al.*, 2012).

3.4 Conclusión

El ácido salicílico incrementa la producción de biomasa seca total, el rendimiento del grano y el contenido de N, P y K en tejido y grano, en el cultivo de maíz, cuando se asperja 1 μ M al dosel en etapa de plántula.

3.5 Literatura citada

- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo. México. Chapingo, México. 156 p.
- Anwar, S., M. Iqbal, S. H. Raza and N. Iqbal. 2013. Efficacy of seed preconditioning with salicylic and ascorbic acid in increasing vigor of rice (*Oryza sativa* L.) Seedling. Pak. J. Bot. 45: 157-162.
- Arfan, M., H. R. Athar and M. Ashraf. 2007. Does exogenous application of salicylic acid through the rooting medium modulate growth and photosynthetic capacity in two differently adapted spring wheat cultivars under salt stress?. J. Plant Physiol. 164: 687-694.
- Bennet, R. N. and R. M. Wallsgrave. 1994. Secondary metabolites in plant defense mechanisms. New Phytol. 127: 617-633.
- Burbano, C. y F. Garcés. 2007. Control del virus de la hoja amarilla de la caña de azúcar (SCYLV) mediante técnicas de cultivo de tejidos en la variedad CR74-250. Rev. Tecnol. ESPOL 20: 0257-1749.
- Chávez-Servia, J. L., T. C. Camacho-Villa y L. A. Burgos-May. 2004. Patrones de variabilidad genotípica de maíz y su potencial para mejorar la producción en Yucatán. Memoria del foro-taller Problemática campesina, retos y perspectivas de la investigación y el servicio para el mejoramiento de la milpa en Yucatán. Mérida Yucatán. pp. 22-30.
- Chen, J., C. Zhu, L. Li, Z. Sun and X. Pan. 2007. Effects of exogenous salicylic acid on growth and H₂O₂ metabolizing enzymes in rice seedlings under lead stress. J. Environ. sci. 19: 44-49.
- Deef, H. E. 2007. Influence of salicylic acid on stress tolerance during seed germination of *Triticum aestivum* and *Hordeum vulgare*. Advan. Biol. Res. 1: 40-48.

- Echevarría-Machado, I., R. M. Escobedo-G.M and A. Larqué-Saavedra. 2007. Responses of transformed *Catharanthus roseus* roots to femtomolar concentrations of salicylic acid. *Plant physiol. Biochem.* 45: 501-507.
- El Tayeb, M. A. and A. N. Ahmed. 2010. Response of wheat cultivars to drought and Salicylic acid. *Am-Euras. J. Agron.* 3: 01-07.
- El-Feky, S. S., F. A. El-Shintinawy and E. M. Shaker. 2014. Role of CaCl₂ and salicylic acid on metabolic catabolic and productivity of boron stressed barley (*Hordium vulgare* L.). *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 3: 368-380.
- El-Wahed, M. S. A., A. A. Amin and El-Sh. M. Rashad. 2006. Physiological effect of some bioregulators on vegetative growth, yield and chemical constituents of yellow maize plants. *World J. Agric. Sci.* 2: 149-155.
- Elwan, M.W. M and M. A. M. El-Hamahmy. 2009. Improved productivity and quality associated with salicylic acid application in greenhouse pepper. *Sci. Hortic.* 122: 521-526.
- Fahad, S. and A. Bano. 2012. Effect of salicylic acid on physiological and biochemical characterization of maize grown in saline area. *Pak. J. Bot.* 44: 1433-1438.
- Farahbakhsh, H. and M. S. Saiid. 2011. Effects of foliar application of salicylic acid on vegetative growth of maize under saline conditions. *Arfr. J. Plant Sci.* 5: 575-578.
- Fariduddin, Q., S. Hayat and A. Ahmad. 2003. Salicylic acid influences net photosynthetic rate, carboxylation efficiency, nitrate reductase activity, and seed yield in *Brassica juncea*. *Photosynthetica* 41: 281-284.
- Farzane, M. H., R. Monem, S. M. Mirtaheri and S. F. Kashani. 2014. Effect of Salicylic acid on germination and growth seedling of 10 variety barley (*Hordeum vulgare* L.) under drought stress. *Int. J. of Biosci.* 5: 445-448.
- Fatima, R. N., F. Javed and A. Wahid. 2014. Salicylic acid modifies growth performance and nutrient status of rice (*Oryza sativa*) under cadmium Stress. *Int. J. Agric & Biol.* 16: 1083-1090.
- Fayez, K. A. and S. A. Bazaid. 2014. Improving drought and salinity tolerance in barley by application of salicylic acid and potassium nitrate. *J. Saudi Soc. Agri. Sci.* 13: 45-55.
- Gunes, A., A. Inal, M. Alpaslan, N. Cicek, E. Guneri, F. Eraslan and T. Guzelordu. 2005. Effects of exogenously applied salicylic acid on the induction of multiple stress tolerance and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.). *Arch. Agron. Soil Sci.* 51: 687-695.
- Gunes, A., A. Inal, M. Alpaslan, F. Eraslan, E. G. Bagci and N. Cicek. 2007. Salicylic acid changes on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress and

- mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) grown under salinity. *J. Plant Physiol.* 164: 728-736.
- Gutiérrez-Coronado, M. A., C. Trejo-López and A. Larqué-Saavedra. 1998. Effects of salicylic acid on the growth of roots and shoots in soybean. *Plant Physiol. Biochem.* 36: 563-565.
- Habibi, G. 2012. Exogenous salicylic acid alleviates oxidative damage of barley plants under drought stress. *Acta Biol. Szeged.* 56: 57-63.
- Hayat, Q., S. Hayat, M. Irfan and A. Ahmad. 2010. Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: A review. *Environ. Exp. Bot.* 68: 14-25.
- Hayat, S., Q. Fariduddin, B. Ali and A. Ahmad. 2005. Effect of salicylic acid on growth and enzyme activities of wheat seedlings. *Acta Agron. Hung.* 53: 433-437.
- Hesami, S., E. Nabizadeh, A. Rahimi and A. Rokhzadi. 2012. Effects of salicylic acid levels and irrigation intervals on growth and yield of coriander (*Coriandrum sativum*) in field conditions. *Environ. Exp. Biol.* 10: 113-116.
- Janda, K., E. Hideg, G. Szalai, L. Kovács y T. Janda. 2012. Salicylic acid may indirectly influence the photosynthetic electron transport. *J. Plant Physiol.* 169: 971-978.
- Javaheri, M., K. Mashayekhi, A. Dadkhah and F. T. Zaker. 2012. Effects of salicylic acid on yield quality characters of tomato fruit (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Int. J. Agric. Crop Sci.* 4: 1184-1187.
- Khan, N. A., S. Syeed, A. Masood, R. Nazar and N. Iqbal. 2010. Application of salicylic acid increases contents of nutrients and antioxidative metabolism in mungbean and alleviates adverse effects of salinity stress. *Int. J. Plant Biol.* 1: 1-8.
- Khodary, S. E. A. 2004. Effect of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt stressed maize plants. *Int. J. Agri. Biol.* 6: 5-8.
- Largia, M. J. V., G. Pothiraj, J. Shilpha and M. Ramesh. 2015. Methyl jasmonate and salicylic acid synergism enhances bacoside a content in shoot cultures of *Bacopa monnieri* (L.). *Plant Cell Tiss Organ Cult.* 122: 9-20.
- Larqué-Saavedra, A., R. Martín-Mex, A. Nexticapan-Garcéz, S. Vergara-Yoisura and M. Gutiérrez-Rendón. 2010. Efecto del ácido salicílico en el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 16: 183-187.
- Larqué-Saavedra, A. 1978. The antitranspirant effect of acetylsalicylic acid on *Phaseolus vulgaris* L. *Physiol. Plant* 43: 126-128.

- López T., R., V. Camacho R. y M. A. Gutiérrez C. 1998. Aplicación de ácido salicílico para incrementar el rendimiento agronómico en tres variedades de trigo. *Terra Latinoamericana* 16: 43-48.
- Martín-Mex, R., R. López-Gutiérrez, J. Medina-Arceo, J. Cruz-Campos, A. Nexticapan-Garcés, F. González-Rodríguez y A. Larqué-Saavedra. 2004. Incremento en la productividad de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) por aspersiones de ácido salicílico. Primera Convención Mundial del Chile. León, Guanajuato, México. pp: 326.
- Martín M., R., A. Nexticapan G., L. Vega M., A. Baak P. y A. Larqué S. 2005. Efecto del ácido salicílico en la floración y productividad de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). Segunda Convención Mundial del Chile. Zacatecas, Zacatecas, México. pp: 325-326.
- Martín-Mex, R., A. Nexticapan-Garcés, R. Herrera-Tuz, S. Vergara-Yoisura y A. Larqué-Saavedra. 2012. Efecto positivo de aplicaciones de ácido salicílico en la productividad de papaya (*Carica papaya*). *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 18: 1637-1643.
- Martín-Mex, R., A. Nexticapan-Garcés and A. Larqué Saavedra. 2013. Potential benefits of salicylic acid in food production. In: *Salicylic acid*, Hayat S., A. Ahmad and M. N. Alyemeni (Eds). Springer publishers, Dordrecht, The Netherlands. pp. 299-213.
- Mutlu, S., Ö. Karadagoglu, Ö. Atici and B. Nalbantoglu. 2013. Protective role of salicylic acid applied before cold stress on antioxidative system and protein patterns in barley apoplast. *Biol. Plant* 57: 507-513.
- Pacheco, A. C., C. da Silva C., E. S. da Silva F. and A. Alemán C. 2013. Salicylic acid-induced changes to growth, flowering and flavonoids production in marigold plants. *Glob. J. of Med. Plant Res.* 7: 3158-3163.
- Piñeros-Castro, Y., A. Otálvaro-Álvarez y M. Velásquez-Lozano. 2009. Efecto de la aplicación de elicitores sobre la producción de 4B-hidroxiwithanolido E, en raíces transformadas de *Physalis peruviana* L. *Universitas Scientiarum* 14: 23-28.
- Pirasteh-Anosheh, H., G. Ranjbar, Y. Emam and M. Ashraf. 2014. Salicylic-acid-induced recovery ability in salt-stressed *Hordeum vulgare* plants. *Turk. J. Bot.* 38: 112-121.
- Qados, A. M. S. A. 2015. Effects of salicylic acid on growth, yield and chemical contents of pepper (*Capsicum annuum* L) plants grown under salt stress conditions. *Intl J. Agri. Crop Sci.* 8: 107-113.
- Raskin, I. 1992. Role of salicylic acid in plants. *Annu. Rev. Plant physiol. Plant Mol. Biol.* 43: 439-463.
- Rivas-San Vicente, M. and J. Plasencia. 2011. Salicylic acid beyond: its role in plant growth and development. *J. Exp. Bot.* 1: 1-18.

- Rodrigues-Brandao, I., A. Moraes K., A. Millech E., M. Conceicao L., L. Amarate, J. A. Peters and E. J. Bolacel B. 2014. Salicylic acid on antioxidant activity and betacyanin production from leaves of *Alternanthera tenella*. *Cienc. Rural* 44: 1893-1898.
- Sánchez-Chávez, E., R. Barrera-Tovar, E. Muñoz-Márquez, D. L. Ojeda-Barrios y A. Anchondo-Nájera. 2011. Efecto del ácido salicílico sobre biomasa, actividad fotosintética, contenido nutricional del chile jalapeño. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 17: 63-66.
- Sandoval-Rangel, A., A Benavides-Mendoza, M. A. Alvarado-Vázquez, R. Foroughbakhch-Pournavab, M. A. Núñez-González y V. Robledo-Torres. 2011. Influencia de ácidos orgánicos sobre el crecimiento, perfil bromatológico y metabolitos secundarios en chile piquín. *Terra Latinoamericana* 29: 395-401.
- Sayed, H. E. A. and H. M. Mujahed. 2016. Exogenous application of salicylic acid for stimulates germination, growth and yield production of wheat (*Triticum aestivum* L.) plant under Water Stress. *Int. J. Life Sci.* 5: 88-104.
- Shi, S., M. Pan, T. Lu, H. Chen, M. Zhu and J. Liu. 1999. Analysis of salicylic acid induced proteins in rice. *Tsinghua Sci. Technol.* 4: 519-1523.
- Singh, P. K. and V. K. Chaturvedi 2012. Effects of salicylic acid on seedling growth and nitrogen use efficiency in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Biosyst.* 146: 302-308.
- Singh, A. P., G. Dixit, S. Misha, S. Dwivedi, M. Tiwari, S. Mallick, V. Pandey, P. K. Trivedi, D. Chakrabarty and R. D. Tripathi. 2015. Salicylic acid modulates arsenic toxicity by reducing its root to shoot translocation in rice (*Oryza sativa* L.). *Front. Plant Sci.* 6: 1-28.
- Singh, P. K., S. K. Shahi, A. P. Singh. 2015a. Effects of salt stress on physico-chemical changes in maize (*Zea mays* L.) plants in response to salicylic acid. *Indian J. Plant Sci.* 4: 2319-3824.
- Tavares L. C., C. Araújo R., S. de Olivera, A. Pich B., and F. Amaral V. 2014. Treatment of rice seeds with salicylic acid: seed physiological quality and yield. *J. Seed Sci.* 36: 356-356.
- Tucuch H., C. J., G. Alcántar G. y A. Larqué S. 2015. Efecto del ácido salicílico en el crecimiento de la raíz y biomasa total de plántulas de trigo. *Terra Latinoamericana* 33: 63-68.
- Tucuch-Haas, C. J., G. Alcántar-González, V. H. Volke-Haller, Y. Salinas-Moreno, L. I. Trejo-Téllez y A. Larqué-Saavedra. 2016. Efecto del ácido salicílico sobre el crecimiento de raíz de plántulas de maíz. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 7: 709-716.

- Vazirimehr, M. R. and K. Rigi. 2014. Effect of salicylic acid in agriculture. *Int. J. Plant Anim. Environ. Sci.* 4: 291-296.
- Villanueva-Couoh, E., G. Alcántar-González, P. Sánchez-García, M. Soria-Fregoso y A. Larqué-Saavedra. 2009. Efecto del ácido salicílico y dimetilsulfóxido en la floración de *Chrysanthemum morifolium* (Ramat) Kitamura en Yucatán. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 15: 25-31.
- Zamaninejad, M., S. K. Khorasani, M. J. Moeini and A. R. Heidarian. 2013. Effect of salicylic on morphological characteristics, yield and yield components of corn (*Zea mays* L.) under drought condition. *Euro. J. Exp. Bio.* 3: 153-161.

**CAPITULO IV. ASPERSIÓN FOLIAR DE ÁCIDO SALICÍLICO INCREMENTA
LA CONCENTRACIÓN DE FENOLES EN EL GRANO DE MAÍZ
FOLIAR SPRAYING OF SALICYLIC ACID INCREASES THE
CONCENTRATION OF PHENOLS IN THE GRAIN OF CORN**

Resumen

Se presentan resultados de la acumulación de fenoles solubles totales (FST) en el grano de maíz, por la aspersión de 0.1 y 1 μM de ácido salicílico (AS) a plántulas de maíz Xmejanal. La cuantificación de los FST se realizó por el método de Folin-Ciocalteu. El tratamiento de 1 μM de AS favorece significativamente la concentración de FST en el grano en 17 % sobre el control. Los datos se discuten en relación con la importancia de estos metabolitos secundarios como antioxidantes y compuestos de defensa contra los patógenos.

Palabras clave: *Zea mays*, ácido salicílico, fenoles y grano.

Abstract

Results of the accumulation of total soluble phenols (FST) in maize grain, by the of spraying 0.1 and 1 μM salicylic acid (SA) to corn seedlings Xmejanal are presented. Quantification of the FST was performed by the Folin-Ciocalteu. Treatment of 1 μM of AS favors significantly the concentration of FST in the grain by 17% over the control. The data are discussed in relation with the importance of these secondary metabolites as antioxidants and defense compounds against pathogens.

Keywords: *Zea mays*, salicylic acid, phenol and grain.

4.1 Introducción

Diversos trabajos señalan el potencial del ácido salicílico (AS) como regulador de diversos procesos fisiológicos y bioquímicos en las plantas (Hayat *et al.*, 2010), que favorecen la bioproduktividad (Martín-Mex *et al.*, 2013) y la tolerancia a daños causados por factores bióticos (An y Mou, 2011) y abióticos (Khan *et al.*, 2015). El AS ha sido asociado con la producción de compuestos fenólicos (Rodrigues-Brandao *et al.*, 2014) como el ácido rosmarínico (Hao *et al.*, 2014), ácido salvianólico B, ácido cafeico (Dong *et al.*, 2010) y flavonoides (Pacheco *et al.*, 2013); además de otros tipos de metabolitos secundarios como α y β pineno, ρ -cimeno, α -thujene, α -cadineno, cadinol, t-muurolol, 1, 8-cineol y limoneno (Al-oubaidi y Ameen, 2014).

Los fenoles representan un grupo muy amplio de compuestos característico del reino vegetal, que entre otras muchas funciones, juegan un papel importante en la pigmentación, crecimiento, reproducción y adaptación a condiciones de estrés biótico y abiótico en las plantas (Farah y Marino, 2006; Lattanzio *et al.*, 2006). Fisiológicamente están involucrados en la absorción de nutrientes, síntesis de proteínas, actividad enzimática, fotosíntesis, componentes estructurales y alelopatía (Robbins, 2003).

En el cultivo de maíz, los compuestos fenólicos participan en la coloración (Salinas *et al.*, 2013), dureza (Cabrera-Soto *et al.*, 2009) y tolerancia a patógenos (Bakan *et al.*, 2003; García *et al.*, 2003) en el grano. Por otro lado, el consumo de granos ricos en fenoles, trae consigo beneficios en la salud humana (Liu, 2007), debido a sus propiedades antioxidantes y anticancerígenas (Quiñones *et al.*, 2012).

Dada la importancia de los compuestos fenólicos en las plantas y en la salud humana, se llevó a cabo la presente investigación en el cultivo de maíz, con el propósito de determinar el efecto del AS asperjado al dosel de plántulas de maíz en la concentración de fenoles en el grano.

4.2 Materiales y métodos

Se establecieron dos experimentos independientes con maíz de la raza Xmejen-nal (Nal-tel x Tuxpeño) en suelo en condiciones de campo. Plántulas de 7 días, fueron asperjadas a la parte aérea con ácido salicílico (AS) a concentraciones de 0.1 y 1 μM (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 1998) y como testigo se asperjó agua destilada. Se realizaron siete aplicaciones, hasta punto de goteo, en intervalos de 24 h, al amanecer. La fertilización realizada al suelo fue una aplicación de 17N, 17P, 17K, 20 g planta⁻¹ a los 20 dds. A la cosecha se colectaron muestras de grano a los que se les midió la concentración de fenoles totales.

Para la determinación, se tomaron 100 granos sanos de cada tratamiento, se molieron en un molino tipo ciclónico (Ika, Works, Inc. Wilmington, NC) con malla de 0.5 mm y se deshidrataron en una estufa a 50 °C por 12 h. Se pesó 1 g de cada muestra y se agregaron 20 mL de metanol al 80 % como disolvente. Las muestras se sonicaron por 15 min en un baño sonicador y posteriormente se agitaron por 105 minutos, en un agitador horizontal para realizar la extracción. Las muestras se centrifugaron por 10 min a 4000 rpm, (centrifuga Hettich Zentrifugen, modelo Universal 32) y el sobrenadante se filtró con papel Whatman No. 4 y se midió su volumen. La cuantificación de los FST se realizó por el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu, de acuerdo con lo descrito por Makkar (2002). La detección de los compuestos fenólicos, se realizó a 760 nm de absorbancia (espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda UV/VIS) y los resultados se expresaron en función

del ácido gálico (Sigma-Aldrich, MN), para lo cual se elaboró una curva patrón con este estándar.

Con los resultados de ambos experimentos se realizaron análisis de varianza, empleando un diseño experimental completamente al azar con cuatro repeticiones. Cuando se detectaron diferencias estadísticas, se realizó la comparación de medias por el método de Tukey ($P \leq 0.05$) con el paquete estadístico SAS.

4.3 Resultados y discusión

En la Figura 1 se presentan los resultados de la concentración de FST de ambos experimentos. Se observa que la aspersion foliar de AS a una concentración de 1 μM en la fase de plántula, incrementa significativamente la concentración de FST en grano, con una concentración media de 877.2 $\mu\text{g g}^{-1}$ de materia seca, lo que representa en promedio una concentración superior en 17 % a la registrada en el testigo. La concentración 0.1 μM de AS no fue estadísticamente diferente al tratamiento testigo en los dos experimentos; lo anterior a pesar de un incremento del 4 % respecto al testigo en el experimento uno.

Los resultados encontrados en la presente investigación indican que el AS aumenta la concentración de fenoles en el grano de maíz y son coincidentes con los encontrados en otras especies como *Simarouba glauca* (Awate y Gaikwad, 2014) y *Citrus de aurantium* (Sarrou *et al.*, 2015), cuando se suministra el AS de manera foliar y en *Salvia miltiorrhiza* cuando se aporta al medio en cultivo de tejidos (Dong *et al.*, 2010). Hao *et al.* (2014) y Dong *et al.* (2010) sugieren que el AS, induce la producción de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) estimulando una mayor actividad de la fenilalanina amonio liasa (PAL, por sus siglas en inglés), responsable de la síntesis de compuestos fenólicos.

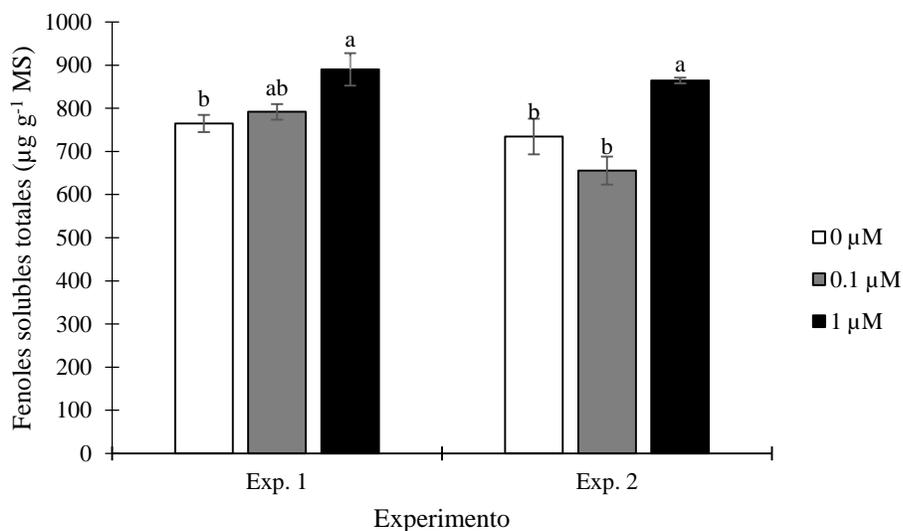


Figura 1. Concentración de fenoles totales en el grano de maíz proveniente de plantas asperjadas con diferentes concentraciones de ácido salicílico, en fase de plántula. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

La relevancia en el incremento de los fenoles radica en el papel que desempeñan estos compuestos como protectores contra daños causados por plagas y enfermedades (Lattanzio *et al.*, 2006), tales como *Sitophilos zeamays* (gorgojo del maíz) (García *et al.*, 2003) y *Fusarium* spp. (Bakan, *et al.*, 2003). Al respecto García *et al.* (2003) reportaron que las bases bioquímicas de estos mecanismos de resistencia se deben en parte a los niveles elevados de compuestos fenólicos, que se encuentran enlazados con los carbohidratos de la pared celular, limitando la entrada de insectos y disminuyendo la disponibilidad de nutrientes; por otro lado, también se ha documentado que la acumulación intracelular de AS conlleva al aumento de los niveles de especies reactivas de oxígeno (ERO) y expresión de genes relacionados a la patogenicidad (Díaz-Puente, 2012).

Los resultados obtenidos en esta gramínea de importancia alimenticia y económica, permiten confirmar la participación del AS en la inducción de síntesis de fenoles en las plantas (Dong

et al., 2010). Reafirmar su colaboración en la producción de metabolitos secundarios tal como se ha reportado en *Alternanthera tenella* (Rodrigues-Brandao *et al.*, 2014), *Saccharum officinarum* y *Calendula officinalis* L. (Pacheco *et al.*, 2013). Además dan la pauta para proponer su uso como herramienta en la inducción de tolerancia a plagas (García *et al.*, 2003) y enfermedades (Bakan, *et al.*, 2003) del grano en maíz; y también para incrementar el poder antioxidante de este cereal, que se traduce en beneficios potenciales en la salud humana (Liu, 2007; Adom y Liu, 2002).

Aunque se conocen algunos de los compuestos fenólicos presentes en las estructuras del grano de maíz, así como su distribución y proporción de manera natural, no ha sido elucidado si el AS puede incidir en este orden o si existe preferencia en incrementar algún fenol en particular, y puesto que cada compuesto le confiere a las estructura características muy propias para desempeñar funciones específicas (García *et al.*, 2003;Cabrera-Soto *et al.*, 2009), se sugiere realizar estudios adicionales sobre estos parámetros.

4.4 Conclusión

La aplicación foliar de ácido salicílico en concentración de 1 µM, en fase de plántulas de maíz, incrementa la concentración de fenoles solubles totales en el grano.

4.5 Literatura citada

- Adom K. K. and R. H. Liu (2002) Antioxidant activity of grains. *J. Agric. Food Chem.* 50: 6182-6187.
- Al-oubaidi H. K. M. and A. S. M. Ameen (2014) Increasing secondary metabolites of *Calendula officinalis* L. using salicylic acid *in vitro*. *World J. Pharm. Pharm. Sci.* 13: 1146-1155.
- An C. and Z. Mou. (2011) Salicylic acid and its function in plant immunity. *J. Integr. Plant Biol.* 53: 412-428.

- Awate P. D. and D. K. Gaikwad (2014) Influence of growth regulators on secondary metabolites of medicinally important oil yielding plant *Simarouba glauca* DC. under water stress conditions. *J. Stress Physiol. Biochem.* 10: 222-229.
- Bakan B., A. C. Bily, D. Melcion, B. Cahagnier, C. Regnault, B. J. R. Philogene and D. Richard-Molard (2003) Possible role of plant phenolics in the production of trichothecenes by *Fusarium graminearum* strains on different fractions of maize kernels. *J. Agric. Food Chem.* 51: 2826-2831.
- Cabrera-Soto M. L., Y. Salinas-Moreno, G. A. Velázquez-Cardelas y E. T. Espinosa (2009) Contenido de fenoles solubles e insolubles en las estructuras del grano de maíz y su relación con propiedades físicas. *Agrociencia.* 43: 827-839.
- Díaz-Puentes L. N. (2012) Resistencia sistémica adquirida mediada por el ácido salicílico. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial.* 10: 257-267.
- Dong J. G. Wan and Z. Liang (2010) Accumulation of salicylic acid-induced phenolic compounds and raised activities of secondary metabolic and antioxidative enzymes in *Salvia miltiorrhiza* cell culture. *J Biotechnol.* 148: 99-104.
- Farah A. and C. D. Marino (2006) Phenolic compounds in coffee. *Braz. J. Plant Physiol.* 18: 23-36.
- García S. L., A. J. Burt, J. A. Serratos, D. M. P. Díaz, J. T. Arnason y D. J. Bergvinson (2003) Defensas naturales en el grano de maíz al ataque de *Sitophilus zeamais* (Motsch, Coleoptera: Curculionidae): mecanismos y bases de la resistencia. *Rev. Educ. Bioq.* 22: 138-145.
- Gutiérrez-Coronado M. A., C. Trejo-López and A. Larqué-Saavedra (1998) Effects of salicylic acid on the growth of roots and shoots in soybean. *Plant Physiol. Biochem.* 36: 563-565.
- Hao W., H. Guo, J. Zhang, G. Hu, Y. Yao and J. Dong (2014) Hydrogen Peroxide is involved in salicylic acid-elicited rosmarinic acid production in *Salvia miltiorrhiza* Cell Cultures. *Sci. World J.* 1: 1-10.
- Hayat Q., S. Hayat, M. Irfan and A. Ahmad (2010) Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: A review. *Environ. Exp. Bot.* 68: 14-25.
- Khan M. I. R., M. Fatma, T. S. Per, N. A. Anjum and N. A. Khan (2015) Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Front. Plant Sci.* 6: 1-17.
- Lattanzio V., V. M. T. Lattanzio and A. Cardinali (2006) Role of phenolics in the resistance mechanisms of plants against fungal pathogens and insects. *Phytochemistry: Adv. Res.* 661: 23-67.

- Liu R. H. (2007) Whole grain phytochemicals and health. *J. Cereal Sci.* 46: 207-219.
- Makkar H. P. S. (2002) Quantification of tannins in tree and shrub foliage. Kluwer academic publishers. Viena, Austria. pp: 49-99.
- Martín-Mex R., A. Nexticapan-Garcéz and A. Larqué Saavedra (2013) Potential benefits of salicylic acid in food production. In Hayat S., A. Ahmad y M. N. Alyemeni (Eds). *Salicylic acid*. Springer publishers, Dordrech, The Netherlands. pp. 299-213.
- Pacheco A. C., C. C. da Silva, E. S. F. da Silva and C. A. Aleman (2013) Salicylic acid-induced changes to growth, flowering and flavonoids production in marigold plants. *J. Med. Plant Res.* 7: 3158-3163.
- Quiñones M., M. Miguel y A. Aleixandre (2012) Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutr. Hosp.* 27: 76-89.
- Robbins R. J. (2003) Phenolic acids in foods: an overview of analytical methodology. *J. Agric. Food Chem.* 51: 2866-2887.
- Rodrigues-Brandao I., A. K. Moraes, A. E. Millech, M. L. Conceicao, L. Amarate, J. A. Peters and E. J. B. Bolacel (2014) Salicylic acid on antioxidant activity and betacyan in production from leaves of *Alternanthera tenella*. *Ciencia Rural.* 44: 1893-1898.
- Salinas M. Y., C.S. García, E. C. Estrada y V. A. M. Vida. (2013) Variabilidad en contenido y tipos de antocianinas en granos de color azul/morado de poblaciones mexicanas de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 36:285-294.
- Sarrou, E., P. Chatzopoulou, K. Dimassi-Theriou, I. Therios, and A. Koularmani (2015) Effect of melatonin, salicylic acid and gibberellic acid on leaf essential oil and other secondary metabolites of bitter orange young seedlings. *J. Essential Oil Res.* 27: 487-496.

CONCLUSIONES GENERALES

El ácido salicílico participa como regulador de crecimiento en plantas de maíz, cuando se aplica al dosel en etapa de plántula.

Aplicaciones de bajas concentraciones de AS favorecen el desarrollo de la raíz (longitud, volumen y biomasa fresca) en 30.6 y 18 % respectivamente con concentraciones 1 y 0.1 μM .

La fotosíntesis incrementó en 28 y 13 % con aplicaciones de 1 y 0.1 μM de AS, respectivamente, sin embargo, no hubo beneficio en la conductancia estomática, transpiración y contenido de clorofila.

1 μM de AS mejoró el estatus nutrimental de las plantas con incrementos en los contenidos de N, P y K del orden del 50 % en tejido y grano. Favoreció la altura en 14.4 %, el diámetro de tallo en 41.2 % y 48 % la biomasa seca total. Además incrementó la longitud, diámetro, peso y rendimiento de grano de la mazorca.

El AS también contribuyó en la producción de compuestos fenólicos en el grano, incrementando 17 % su concentración con 1 μM de AS.

ANEXOS

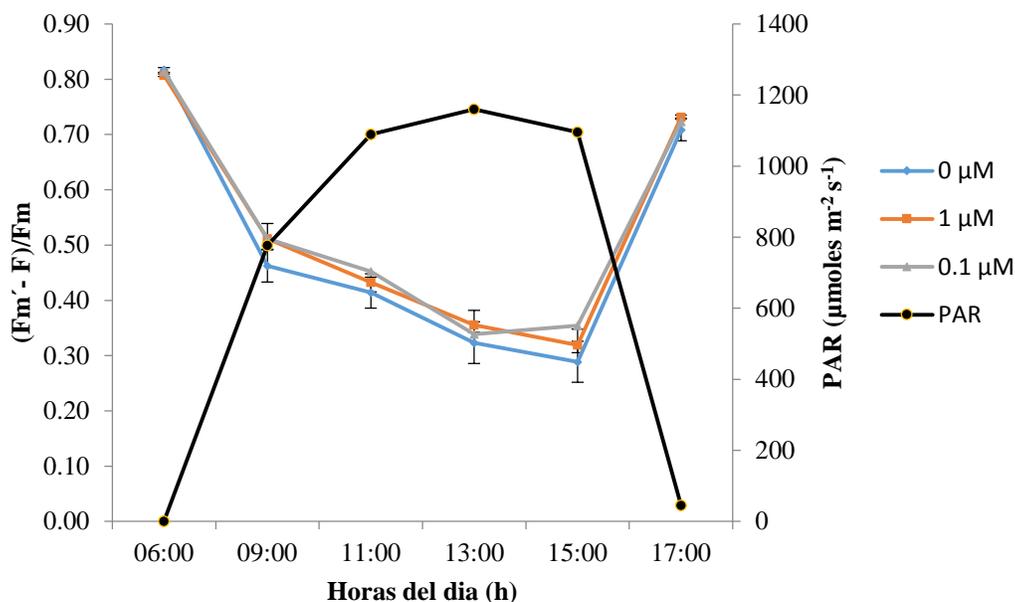


Fig. 1. Efecto de dos concentraciones diferentes de AS aplicados al cultivo de maíz, en la eficiencia fotosintética. Las mediciones se tomaron 35 días después de la última aplicación de los tratamientos. Cada dato es la media de 10 plantas.

Cuadro 1. Promedio de las características físicas del grano, de dos experimentos, por efecto del ácido salicílico.

Exp	Trat.	L (% R)	H	Croma	IF (%)	Peso (g)
1	Control	72.14 ab	82.82 b	23.73 b	13.00 a	28.58 a
	0.1 μM	73.71 a	84.49 a	24.95 ab	14.00 a	27.17 a
	1.0 μM	70.00 b	82.91 b	25.70 a	7.50 b	30.16 a
2	Control	66.45 a	83.92 a	30.56 a	39.50 a	34.09 a
	0.1 μM	65.74 a	84.92 a	25.46 b	37.00 a	30.13 b
	1.0 μM	66.28 a	83.90 a	29.78 a	28.50 b	32.92 ab

L= luminosidad; H= hue; C: croma; IF= índice de flotación; R=reflectancia. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05)