



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

**INNOVACIONES NUTRIMENTALES EN
LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR
(*Saccharum* spp.)**

HÉCTOR EMMANUEL SENTÍES-HERRERA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

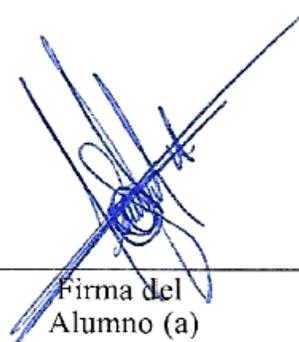
2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

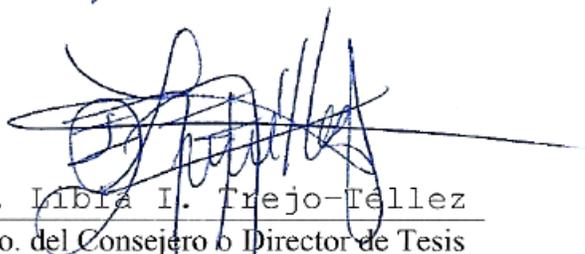
En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe HÉCTOR EMMANUEL SENTÍES HERRERA, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor LIBIA IRIS TREJO-TÉLLEZ, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis INNOVACIONES NUTRIMENTALES EN LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR (Saccharum spp.)

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 17 de julio de 2018



Firma del
Alumno (a)



Dra. Libia I. Trejo-Téllez
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: “**Innovaciones nutrimentales para la producción de caña de azúcar (*Saccharum spp.*)**”, realizada por el alumno: “**Héctor Emmanuel Sentíes-Herrera**”, 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
EDAFOLOGIA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA:



DRA. LIBIA IRIS TREJO-TELLEZ

ASESOR:



DR. FERNANDO CARLOS GÓMEZ MERINO

ASESOR:



DR. JORGE CADENA ÍÑIGUEZ

ASESOR:



DR. PROMETEO SANCHEZ GARCÍA

ASESOR:



DR. VÍCTOR HUGO VOLKE HALLER

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Agosto de 2018

INNOVACIONES NUTRIMENTALES EN LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum spp.*).

Héctor Emmanuel Senties Herrera, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

La innovación es todo cambio basado en el conocimiento que genera valor. En agricultura, la innovación permite aplicar el conocimiento científico y el desarrollo tecnológico en la generación de nuevos productos o procesos para hacer más rentable esta actividad. En esta tesis de doctorado intitulada “Innovaciones Nutrimientales en la Producción de Caña de Azúcar (*Saccharum spp.*)”, se desarrollaron cuatro capítulos. En el Capítulo I se hace una descripción detallada del sistema de producción de caña de azúcar de México, en el cual se abordan temas de interés económico, político, social y científico. Al final del mismo, se encuentra una propuesta de perspectivas futuras para esta industria de gran tradición que contempla temas de innovación. El Capítulo II, trata de un estudio con elementos benéficos (los cuales han sido abordados escasamente en caña de azúcar), como una alternativa nutrimental para mejorar parámetros de calidad agroindustrial durante la etapa de maduración de las tres variedades de caña de azúcar más cultivadas en México: CP 72-2086 (de maduración temprana), Mex 79-431 (de maduración intermedia), y Mex 69-290 (de maduración tardía). Los resultados obtenidos muestran que en las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431, el vanadio puede inhibir la floración, condición deseable para productores e industriales. En el Capítulo III se describe el desarrollo de un experimento para evaluar el efecto de diferentes elementos benéficos en variables de semilla botánica o fuzz de caña de azúcar durante la campaña de hibridación de 2015, para mejorar la producción y viabilidad de ésta. Los resultados mostraron beneficios en el uso de Si para incrementar la cantidad de semilla botánica por panícula y mejorar el porcentaje de germinación. Finalmente, el Capítulo IV, describe el desarrollo de un experimento con elementos esenciales a partir de una concentración conocida en la cual la mayoría las plantas pueden completar su ciclo de vida. Se modificó la concentración de cuatro nutrimentos esenciales: N, P, K y Mg, en la solución nutritiva aplicada a la variedad CP 72-2086 en condiciones de hidropónicas en invernadero durante tres meses. Los resultados obtenidos indicaron que la demanda nutrimental de la caña de azúcar incrementa conforme avanza el ciclo de vida de la planta, evidenciando que aumentos del 25% en el abastecimiento de dichos nutrimentos en periodos de 30 días, dan como resultado un mejor crecimiento y desarrollo de la planta. Con estos resultados es posible sostener que los elementos benéficos y el manejo de las relaciones nutrimentales son prácticas que pueden contribuir a la innovación del cultivo de la caña de azúcar.

Palabras clave: Innovación, caña de azúcar, elementos benéficos, hibridación, concentraciones nutrimentales.

NUTRIMENTAL INNOVATIONS IN THE PRODUCTION OF SUGARCANE (*Saccharum spp.*)

Héctor Emmanuel Senties Herrera, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

Innovation is all change based on knowledge that generates value. In agriculture, innovation allows applying scientific knowledge and technological development in the generation of new products or processes to make this activity more profitable. In this Ph. D. thesis entitled "Nutritional Innovations in the Production of Sugarcane (*Saccharum spp.*)", four chapters were developed. Chapter I provides a detailed description of the sugarcane production system in Mexico, which addresses issues of economic, political, social and scientific interest. At the end of it, there is a proposal of future perspectives for this industry of great tradition that includes innovation topics. Chapter II deals with a study with beneficial elements (which have been scarcely approached in sugarcane), as a nutritional alternative to improve agro-industrial quality parameters during the maturation stage of the three most cultivated sugarcane varieties in Mexico: CP 72-2086 (of early maturation), Mex 79-431 (of intermediate maturation), and Mex 69-290 (of late maturation). The results obtained show that in varieties CP 72-2086 and Mex 79-431, vanadium can inhibit flowering, a desirable condition for producers and industrialists. Chapter III describes the development of an experiment to evaluate the effect of different beneficial elements on botanical seed variables or fuzz during the 2015 hybrid campaign, to improve the production and viability of it. The results showed benefits in the use of Si to increase the amount of botanical seed per panicle and improve the percentage of germination. Finally, Chapter IV, describes the development of an experiment with essential elements from a known concentration in which most plants can complete their life cycle. The concentration of four essential nutrients: N, P, K and Mg was modified in the nutrient solution applied to the variety CP 72-2086 under hydroponic conditions in greenhouse for three months. The results obtained indicated that the nutritional demand of sugarcane increases as the life cycle of the plant advances, evidencing that increases of 25% in the supply of these nutrients in periods of 30 days, result in a better growth and development of the plant. With these results it is possible to establish that the beneficial elements and the management of the nutritional relationships represent agronomical applications that can contribute to the innovation of the cultivation of sugarcane.

Keywords: Innovation, sugarcane, beneficial elements, hybridization, nutrient concentrations.

DEDICATORIA

A Dios, por ser fuente inagotable de sabiduría. Con él todo es posible, y gracias a él hoy tengo el honor de dedicarle esta tesis y compartir mi felicidad con mis seres más queridos.

A Betty mi madre, que Dios la tenga en su Gloria. Te dedico esta tesis con todo el amor que un hijo pueda darle a su madre. Gracias por el poco tiempo que vivimos juntos, pero de gran calidad, tiempo suficiente para darme los más maravillo en esta vida, una familia y mi hermana.

A mi Mamá Ina que me permitió conocer el amor incondicional de una madre. Gracias por ser la mejor madre del mundo, te amo y por ello te dedico este éxito alcanzado.

A mi papá Héctor, que siempre estuvo orgulloso de mí hasta el final. Gracias por ser un hombre impecable y ser mi padre. Deseo ser digno representante tuyo y así honrar siempre tu nombre. Dios te tenga en su Gloria.

A mí hermanita Betty, porque eres el principal motivo de inspiración para seguir luchado y salir adelante. Dios por medio de nuestra madre, me dio el más bello regalo en la vida, la dicha de tener una hermanita, te amo.

A mis tíos, que han sido y seguirán siendo parte fundamental en mi vida. Con mucho cariño y amor les doy las gracias a Tito, Jessica, Pedro, Yadira, Juan, Carlos, Nuvia y Eneida.

A mis primos que son mis hermanos: Carla, Carlos, Regina, Cesar, Yesica, Héctor, Pedro, Marcos, Isabela e Ian. Deseo de corazón el que podamos seguir siendo hermanos. Que Dios los cuide mucho a todos.

Una vez más mi exhortación a que sigamos juntos como familia, de buena fe, y que todos contribuyamos hacer mejor las cosas, con las enseñanzas de nuestros padres y de DIOS.

Héctor Emmanuel Sentíes Herrera

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, por ser mi institución becaria y la cual es pilar en mi formación profesional.

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo por convertirse nuevamente en la institución de la cual obtuve el grado de Doctor en Ciencias. También extiendo mi agradecimiento al Laboratorio Alcalde Blanco de Nutrición Vegetal, en el cual pase muchos momentos de aprendizaje, risas y de hacer buenas amistades. Al Campus Córdoba, en el cual realicé mi primer trabajo de investigación y con el que obtuve grandes satisfacciones.

A la Dra. Libia Iris Trejo-Téllez, GRACIAS por ser mi consejera. Al final del camino, como al concluir toda investigación, me hice consciente de las cosas buenas y malas que se tuvieron, y pasé a hacer un análisis de los puntos de mejora y me di cuenta del valor de cada aspecto durante el tiempo que duró el programa doctoral, cada palabra, consejo, regaño, enojo, risas, etc., que pudimos compartir durante este tiempo y espero podamos seguir compartiendo. Dios le bendiga hoy y siempre.

Al Dr. Fernando Carlos Gómez Merino, quien me brindo soporte, amistad y conocimientos fundamentales para poder concluir mi programa doctoral. Hasta el último momento a pesar de todas las adversidades que presentamos los alumnos en un posgrado, siempre me brindo su apoyo, y dedicó tiempo valioso para escucharme y ser mi amigo. Gracias nuevamente por ser parte esencial en mi historia de vida tanto profesional como personal. Con la bendición de Dios a seguir concluyendo proyectos.

Al Dr. Jorge Cadena Iñiguez, agradezco su apoyo, aportaciones valiosas que me dio durante mi trabajo de investigación y la orientación en puntos importantes sobre el quehacer científico. Para mí es un excelente ejemplo de científico de la innovación.

Al Dr. Prometeo Sánchez García, por mostrarme que la docencia no está peleada con la parte comercial o privada. Le doy gracias por su disposición de ayuda y brindarme el mejor consejo. Me enseñó que para ver cosas que nunca he visto, tengo que hacer cosas que nunca he hecho. Muchas gracias.

Al Dr. Víctor Hugo Volke Haller. Usted lleva consigo la experiencia en sus años, y sobre todo de un criterio de análisis científico con la mejor herramienta para el investigador, la estadística. Gracias por sus horas dedicadas a explicar y enseñarme bases fundamentales en el análisis de datos derivados de la experimentación agrícola.

A la maestra Naty, por su amistad y consejos. De las tantas personas que vas conociendo a lo largo de la vida, pocas son las que te acompañan, y usted es una de esas pocas personas que me ha seguido acompañando. Muchas gracias por su amistad incondicional. Dios le guarde.

A Robert Loyo Joachin, por seguir brindandome tu amistad y apoyo incondicional, para llevar a cabo mis trabajos de investigación, así como darme soporte para culminarlos. Muchas gracias pariente por todo, que Dios nos permita seguir siendo buenos amigos.

Al CIDCA, por todas las facilidades en infraestructura y personal para llevar a cabo los trabajos de investigación de mi programa doctoral.

Al Dr. Carlos Flores Revilla, por sus siempre amables atenciones y disponibilidad de apoyo para lograr cumplir exitosamente mi investigación.

Al Ing. Carlos Rangel, por su buena amistad y apoyo en la realización de este proyecto de investigación.

Quiero agracer con mucho cariño, a la Lic. Carmen Padilla, quien siempre estuvo al pendiente de mi programa doctoral, casi al finalizar esta etapa, nos encontramos y lo que me dijo fue lo siguiente: ¡maestro! ahora que no le he preguntado ¿para cuándo se va a presentar? me llega la noticia que, a la vuelta de la esquina, está su examen de grado. ¡Muchas felicidades!

A Laurita, que siempre tuvo la mejor de las disposiciones para apoyarme con todos los trámites del COLPOS, viáticos, solicitudes de vehículos, liquidación de gastos, etc., por todo ello y principalmente por su amistad, estoy muy agradecido.

A Roberto de la Rosa y Juan Manuel Deheza, que pasamos gratos momentos en el LABSAB compartiendo el desayuno, alguna plática y también su invaluable apoyo para aprender las técnicas de análisis de fertilidad de suelo. Valoro mucho todo lo que me brindaron en estos años.

A Don Wences, quien siempre me recibió con un fuerte abrazo y luego me invitaba un pan con una taza de café, gracias por los consejos y compartir su conocimiento en las técnicas de espectrofotometría.

A Anita, que siempre me apoyo en todos los trámites que debía hacer con el Dr. Cadena. Además, te agradezco por tus consejos y pláticas muy amenas que tuvimos.

A Lore, que siempre se mostró en la mejor disposición de ayudarme en todo lo que respecta a trámites con el Dr. Prometeo.

Quiero agradecer a los doctores Carlos Viveros, José Luis Quemé y Edisón Silva, de los centros de investigación en caña de azúcar de Colombia (CENICAÑA), Guatemala (CENGICAÑA) y Ecuador (CINCAE), respectivamente. Gracias por sus valiosas aportaciones, consejos y sobre todo compartir sus experiencias en mejoramiento genético de caña de azúcar.

Luis Miguel Morales León, por ser mi amigo desde la infancia y el único con quien he compartido casi todas las etapas importantes en mi vida. Te agradezco tu apoyo para ayudarme en mi trabajo de investigación durante la estancia que realizamos en Chipas, por las risas, malos entendidos, pero al final por tu buena compañía.

A doña Rosa Macorra, por brindarme su amistad. Muchas gracias por todo los buenos momentos de pláticas y consejos, además, el buen sazón de su comida.

A Jorge, Juan Carlos, Miguel y Abraham que, a pesar del poco tiempo de conocernos, me apoyaron y brindaron las facilidades para poder llegar a este momento tan importante en mi vida. Gracias por todo.

A don Mario Contreras Martínez y su esposa Mercedes, por brindarme su amistad y abrir las puertas de casa. Especialmente a don Mario, con quien he compartido gratos momentos. Gracias por su apoyo, compartir experiencias y las carnes asadas que organizamos.

A mis amigos Peter Ladewig, Patricia Gamboa y Hugo Escobar, con quienes pase momentos inolvidables. Gracias por su valiosa amistad.

A Berenice Hernández Rivera. Hay mucho que agradecerle, contigo puede vivir lo inimaginable, simplemente quiero que sepas que estas en mis oraciones y que deseo que siempre Dios te bendiga.

CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	v
LISTA DE CUADROS	xv
LISTA DE FIGURAS	xix
CAPÍTULO I.....	¡Error! Marcador no definido.
El Sistema Mexicano de Producción de Caña de Azúcar: Historia, Estado Actual y Nuevas Directrices (The Mexican Sugarcane Production System: History, Current Status and New Trends)	1
Abstract.....	1
1.1. Introducción.....	3
1.2. Productividad de caña y azúcar en México en un contexto global.....	4
1.3. Apoyos gubernamentales para investigación en caña de azúcar	12
1.4. El sistema de producción de caña de azúcar en México.....	13
1.5. Marco legal y organización de la industria azucarera mexicana	14
1.6. Corporativos de la industria azucarera mexicana.....	15
1.7. Cambio climático y seguro agrícola en México.....	19
1.8. Mejoramiento genético de caña de azúcar en México	23
1.9. Plagas y enfermedades comunes como potencial amenaza de la caña de azúcar en México	26
1.10. Nuevas directrices en la cadena de valor de la caña de azúcar	27
1.11. Literatura citada	33
CAPÍTULO II	41
Yodo, silicio y vanadio y afectan la fisiología, maduración industrial y calidad de jugos de la caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.). (Iodine, silicon, and vanadium affect the physiology, industrial maturation, and juice quality of sugarcane (<i>Saccharum</i> spp.).	41
Abstract.....	41
2.1. Introducción.....	42
2.2. Materiales y Métodos	43
2.2.1. Material vegetal y condiciones experimentales	43
2.2.2. Diseño de tratamientos.....	44

2.2.3. Variables evaluadas	44
2.2.4. Diseño experimental y análisis estadísticos	47
3. Resultados	47
3.1. Desarrollo y crecimiento de las variedades	47
3.2. Incrementos relativos en diámetro de tallo.	48
3.3. Floración	50
3.4. Médula	52
3.5. Oquedad	54
3.6. Calidad industrial de los jugos	56
4. Discusión	60
4.1. Crecimiento y desarrollo de las variedades	60
4.2. Calidad industrial de los jugos	72
5. Perspectivas futuras	75
6. Literatura citada	75
CAPÍTULO III	90
Elementos benéficos en la hibridación de caña de azúcar: Respuestas fisiológicas durante y después del cruzamiento, y producción de semilla botánica	90
Resumen	90
Abstract	90
3.1. Introducción	91
3.1.1. Marco teórico	92
3.1.1.1. Aluminio	93
3.1.1.2. Yodo	94
3.1.1.3. Lantano	95
3.1.1.4. Silicio	96
3.1.1.5. Titanio	98
3.2. Materiales y Métodos	99
3.2.1. Ubicación del Experimento y Condiciones Experimentales	99
3.2.2. Diseño experimental y tratamientos	100
3.2.3. Variables evaluadas	101
3.2.3.1. Potencial hidrógeno y conductividad eléctrica	101
3.2.3.2. Mediciones de la reducción de diámetro del raquis central y del tallo	101
3.2.3.3. Lecturas SPAD	102
3.2.3.4. Apertura de flores	102

3.2.3.5. Variables evaluadas en poscosecha	102
3.2.3.6. Variables tomadas en germinación	104
3.2.4. Análisis estadístico	105
3.3. Resultados	105
3.3.1. Germinación baja: Cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252.....	105
3.3.1.1. pH y CE de la solución aséptica.....	105
3.3.1.2. Apertura floral.....	106
3.3.1.3. Lecturas SPAD.....	112
3.3.1.4. Diámetro del raquis central	118
3.3.1.5. Diámetro del tallo	120
3.3.1.6. Variables evaluadas en poscosecha	122
3.3.1.6.1. Peso seco del raquis central	122
3.3.1.6.2. Peso seco del fuzz	124
3.3.1.6.3. Longitud de la panícula	125
3.3.1.6.4. Impurezas y peso final durante el proceso de poscosecha.....	126
3.3.1.7. Variables de germinación.....	128
3.3.1.7.1. Dinámica de germinación.....	128
3.3.1.7.2. Porcentaje de germinación.....	128
3.3.2. Germinación baja: Cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418.....	129
3.3.2.1. pH y CE de la solución aséptica.....	129
3.3.2.2. Apertura floral.....	131
3.3.2.3. Lecturas SPAD.....	137
3.3.2.4. Diámetro del raquis central	145
3.3.2.5. Diámetro del tallo	146
3.3.2.6. Variables evaluadas en poscosecha	148
3.3.2.6.1. Peso seco del raquis central	148
3.3.2.6.2. Peso seco del fuzz	150
3.3.2.6.3. Longitud de panícula del progenitor femenino	151
3.3.2.6.4. Impurezas y peso final durante el proceso poscosecha.....	152
3.3.2.7. Variables de germinación.....	154
3.3.2.7.1. Dinámica de germinación.....	154
3.3.2.7.2. Porcentaje de germinación.....	155
3.3.3. Germinación media: Cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	155
3.3.3.1. pH y CE de la solución aséptica.....	155
3.3.3.2. Apertura de flores.....	157
3.3.3.3. Lecturas SPAD.....	171
3.3.3.4. Diámetro del raquis central	180
3.3.3.5. Diámetro del tallo	183
3.3.3.6. Variables evaluadas en poscosecha	185
3.3.3.6.1. Peso seco del raquis central	185
3.3.3.6.2. Peso seco de fuzz	186

3.3.3.6.3. Longitud de panícula	187
3.3.3.6.4. Impurezas y peso final durante el proceso poscosecha.....	189
3.3.3.7. Variables de germinación	192
3.3.3.7.1. Dinámica de germinación	192
3.3.3.7.2. Porcentaje de germinación.....	193
3.4. Discusión	194
3.4.1. Aluminio	194
3.4.2. Yodo	197
3.4.3. Lantano	200
3.4.4. Silicio	203
3.4.5. Titanio	206
3.5. Conclusiones.....	209
3.6. Literatura citada	210
CAPÍTULO IV.....	224
Relaciones Macronutrimientales y Crecimiento de Caña De Azúcar en Condiciones de Invernadero	224
Resumen	224
Chapter IV	226
Macronutrient Relations and Growth of Sugarcane in Greenhouse Conditions	226
Abstract.....	226
4.1. Introducción.....	228
4.1.1. Marco Teórico	228
4.1.1.1. Requerimientos nutrimentales en plantas superiores	228
4.1.1.2. Nutrición en caña de azúcar	230
4.2. Materiales y Métodos	230
4.2.1. Ubicación del experimento y condiciones experimentales	230
4.2.2. Sistema de riego.....	231
Figura 1. Vitroplántula de caña de azúcar	231
4.2.3. Diseño de las soluciones nutritivas evaluadas	231
4.2.4. Diseño experimental	232
4.2.5. Variables evaluadas	232
4.2.5.1. Variables agronómicas, fisiológicas y nutrimentales	232
4.2.6. Análisis estadístico	233
4.3. Resultados.....	233

4.3.1. Caracterización inicial de las vitroplántulas de caña de azúcar variedad CP 72-2086	233
4.3.2. Primera evaluación: 30 días después del inicio de tratamientos.....	234
4.3.2.1. Número total de tallos	234
4.3.2.2. Número de hijos.....	235
4.3.2.3. Altura de planta.....	236
4.3.2.4. Diámetro del tallo	237
4.3.2.5. Altura de tallo al último collar visible	238
4.3.2.6. Hojas desarrolladas	239
4.3.2.7. Hojas en desarrollo.....	240
4.3.2.8. Peso fresco de raíz.....	241
4.3.2.9. Peso fresco del tallo	242
4.3.2.10. Peso fresco de hojas	243
4.3.2.11. Peso seco de raíz	244
4.3.2.12. Peso seco del tallo.....	245
4.3.2.13. Peso seco de hojas	246
4.3.2.14. Área foliar	247
4.3.2.15. Lecturas SPAD	247
4.3.3. Segunda evaluación: 60 días después del inicio de tratamientos.....	248
4.3.3.1. Número total de tallos.....	248
4.3.3.2. Número de hijos.....	249
4.3.3.3. Altura de planta.....	250
4.3.3.4. Diámetro del tallo	251
4.3.3.5. Altura del tallo al último collar visible	252
4.3.3.6. Hojas desarrolladas	253
4.3.3.7. Hojas en desarrollo.....	254
4.3.3.8. Peso fresco de raíz.....	255
4.3.3.9. Peso fresco del tallo	256
4.3.3.10. Peso fresco de vaina	256
4.3.3.11. Peso fresco de hojas	257
4.3.3.12. Peso seco de raíz	258
4.3.3.13. Peso seco del tallo.....	259
4.3.3.14. Peso seco de vaina	260
4.3.3.15. Peso seco de hojas	261

4.3.3.16. Área foliar	262
4.3.3.17. Lecturas SPAD	262
4.3.4. Tercera evaluación: 90 días después de iniciados los tratamientos	263
4.3.4.1. Número total de tallos	263
4.3.4.2. Número de hijos.....	264
4.3.4.3. Altura de planta.....	265
4.3.4.4. Diámetro del tallo	266
4.3.4.5. Altura del tallo al último collar visible	267
4.3.4.6. Hojas desarrolladas	267
4.3.4.7. Hojas en desarrollo.....	268
4.3.4.8. Peso fresco de raíz.....	269
4.3.4.9. Peso fresco del tallo	270
4.3.4.10. Peso fresco de vaina	270
4.3.4.11. Peso fresco de hojas.....	271
4.3.4.12. Peso seco de raíz	272
4.3.4.13. Peso seco del tallo.....	273
4.3.4.14. Peso seco de vainas.....	274
4.3.4.15. Peso seco de hojas	275
4.3.4.16. Área foliar	276
4.3.4.17. Lecturas SPAD	277
4.3.5. Concentración nutrimental	277
4.3.5.1. Concentración inicial en vitroplántulas.....	277
4.3.5.2. Concentración nutrimental en raíces	279
4.3.5.3. Concentración nutrimental en tallos	283
4.3.5.4. Concentración nutrimental en vainas	286
4.3.5.5. Concentración nutrimental en hojas	288
4.4. Discusión de resultados.....	291
4.5. Conclusiones.....	298
4.6. Literatura citada	298

LISTA DE CUADROS

Capítulo I	¡Error! Marcador no definido.
El Sistema Mexicano de Producción de Caña de Azúcar: Historia, Estado Actual y Nuevas Directrices (The Mexican Sugarcane Production System: History, Current Status and New Trends)	1
Cuadro 1. Principales países productores de caña de azúcar en 2016.	6
Cuadro 2. Consorcios azucareros actuales de México, después de haber terminado la venta de los ingenios de FEESA en agosto de 2016.	16
Capítulo II	41
Yodo, silicio y vanadio y afectan la fisiología, maduración industrial y calidad de jugos de la caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.). (Iodine, silicon, and vanadium affect the physiology, industrial maturation, and juice quality of sugarcane (<i>Saccharum</i> spp.))	41
Cuadro 1. Incremento relativo de altura de planta y diámetro de tallo durante 30 días (entre diez y once meses de edad) en las tres variedades de caña de azúcar por efecto de la aplicación foliar de los elementos benéficos I, Si y V. ...	49
Cuadro 2. Efecto de la aplicación foliar de los elementos benéficos I, Si y V en Grados Brix y Sacarosa contenidos en el jugo a los 4 meses después de aplicados los tratamientos.....	57
Cuadro 3. Efecto de la aplicación foliar de los elementos benéficos I, Si y V en fibra y húmeda del tallo molido a los 4 meses después de aplicados los tratamientos.	59
Capítulo III	90
Elementos benéficos en la hibridación de caña de azúcar: Respuestas fisiológicas durante y después del cruzamiento, y producción de semilla botánica	90

Cuadro 1. Valores de pH de la solución aséptica durante el periodo de cruzamiento (12 días) para HOCP 93-746 x CP 96-1252.	106
Cuadro 2. Valores de conductividad eléctrica (dS m ⁻¹) de la solución aséptica durante el periodo de cruzamiento (12 días) para HOCP 93-746 x CP 96-1252.	106
3.3.1.2. Apertura floral.....	106
Cuadro 3. Impurezas y peso final durante el proceso de poscosecha de la semilla botánica o fuzz de plantas tratadas con aluminio (Al) y silicio (Si) del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252.	127
Cuadro 4. Valores de pH en la solución aséptica durante el periodo de cruzamiento (12 días) para HOCP 93-746 x Mex 58-418.	130
Cuadro 5. Valores de conductividad eléctrica (dS m ⁻¹) en la solución aséptica durante el periodo de cruzamiento (12 días) para HOCP 93-746 x Mex 58-418.	130
Cuadro 6. Impurezas y peso final durante el proceso de postcosecha de la semilla botánica fuzz en el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio a la solución aséptica.....	153
Cuadro 7. Valores de pH de la solución aséptica durante el periodo de cruzamiento (12 días) para CC 93-3826 x CP 80-1743.	156
Cuadro 8. Valores de conductividad eléctrica (dS m ⁻¹) de la solución aséptica durante el periodo de cruzamiento (12 días) para CC 93-3826 x CP 80-1743.	157
Cuadro 9. Impurezas y peso final durante el proceso de postcosecha del fuzz del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) en la solución nutritiva.....	1578
Capítulo IV	224
Relaciones Macronutrimientales y Crecimiento de Caña De Azúcar en Condiciones de Invernadero	224

Cuadro 1. Relaciones macronutrimientales evaluadas que se formularon a partir de la solución nutritiva universal Steiner.	232
Cuadro 2. Ajuste de las relaciones macronutrimientales evaluadas que se formularon a partir de la solución nutritiva universal Steiner.	232
Cuadro 3. Caracterización inicial de las vitroplántulas de caña de azúcar variedad CP 72-2086.	234
Cuadro 4. Concentración nutrimental de vitroplántulas de caña de azúcar antes del inicio de la aplicación de tratamientos.	278
Cuadro 5. Concentración de macronutrientos en raíz de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 30 d después del inicio de los tratamientos.	281
Cuadro 6. Concentración de macronutrientos en raíz de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 60 d después del inicio de los tratamientos.	281
Cuadro 7. Concentración de macronutrientos en raíz de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 90 d después del inicio de los tratamientos.	282
Cuadro 8. Concentración de macronutrientos en tallos de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 30 d después del inicio de los tratamientos.	284
Cuadro 9. Concentración de macronutrientos en tallos de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 60 d después del inicio de los tratamientos.	284
Cuadro 10. Concentración de macronutrientos en tallos de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 90 d después del inicio de los tratamientos.	285
Cuadro 11. Concentración de macronutrientos en vainas de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 60 d después del inicio de los tratamientos.	287

Cuadro 12. Concentración de macronutrientos en vainas de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 90 d después del inicio de los tratamientos. 287

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I	¡Error! Marcador no definido.
El Sistema Mexicano de Producción de Caña de Azúcar: Historia, Estado Actual y Nuevas Directrices (The Mexican Sugarcane Production System: History, Current Status and New Trends)	1
Figura 1. Países productores y producción mundial de azúcar de caña en los últimos tres ciclos de producción: 2013/14, 2014/15 y 2015/16. Fuente: USDA, 2016.	5
Figura 2. Producción total de caña de azúcar y superficie cosechada en las últimas cuatro zafras en México (Fuente: MAM, 2014; 2015; 2016; CONADESUCA, 2016e).....	7
Figura 3. Rendimientos de caña de azúcar en campo en las últimas cuatro zafras en México (Fuente: MAM, 2014; 2015; 2016; CONADESUCA, 2016e). ...	8
Figura 4. Entidades federativas de México en donde se cultiva la caña de azúcar y producción por región cañera. A. Producción de caña de azúcar en porcentaje por zafra, en los tres últimos ciclos de cosecha: 2013/14; 2014/15; 2015/16.	11
Figura 5. Superficie cultivada con caña de azúcar asegurada entre 2013 y 2016. Fuente: AGROASEMEX 2013, 2014, 2016b, 2016c.....	21
Figura 6. Subsidio a la prima de seguro agrícola AGROASEMEX 2013-2016. Fuente: AGROASEMEX, 2013; 2014; 2016b; 2016c.	22
Figura 7. Distribución porcentual de variedades de caña de azúcar mexicanas y extranjeras en la superficie cultivada con esta gramínea en México de 2012 a 2015 (Fuente: MAM, 2013, 2014, 2015, 2016).	25
Capítulo II	41
Yodo, silicio y vanadio y afectan la fisiología, maduración industrial y calidad de jugos de la caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.). (Iodine, silicon, and vanadium affect the physiology, industrial maturation, and juice quality of sugarcane (<i>Saccharum</i> spp.).	41

Figura 1. Porcentaje de floración por efecto de la aplicación foliar de los elementos benéficos I (A), Si (B) y V (C), en las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431 y Mex 69-290.	51
Figura 2. Presencia de médula por efecto de la aplicación foliar de los elementos benéficos I (A), Si (B) y V (C), en las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431 y Mex 69-290..	53
Figura 3. Oquedad por efecto de la aplicación foliar de los elementos benéficos I (A), Si (B) y V (C), en las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431 y Mex 69-290	55
Capítulo III	90
Elementos benéficos en la hibridación de caña de azúcar: Respuestas fisiológicas durante y después del cruzamiento, y producción de semilla botánica	90
Figura 1. Apertura de flores tratadas con 50 μ M Al en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252.....	107
Figura 2. Apertura de flores tratadas con 100 μ M Al en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252.....	108
Figura 3. Apertura de flores tratadas con 150 μ M Al en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252.....	109
Figura 4. Apertura de flores tratadas con 5 μ M Si en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252.	110
Figura 5. Apertura de flores tratadas con 10 μ M Si en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252.....	111
Figura 6. Apertura de flores tratadas con 15 μ M Si en la solución aséptica a la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252....	112
Figura 7. Lecturas SPAD promedio en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (0, 50, 100 y 150 μ M Al) a la solución aséptica.....	113

Figura 8. Lecturas SPAD promedio en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de silicio (0, 5, 10 y 15 μM Si) a la solución aséptica.....	114
Figura 9. Lecturas SPAD promedio en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica.	115
Figura 10. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (0, 50, 100 y 150 μM Al) a la solución aséptica.....	116
Figura 11. Lecturas SPAD promedios en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de silicio (0, 5, 10 y 15 μM Si) a la solución aséptica.....	117
Figura 12. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica.....	118
Figura 13. Reducción del raquis central promedio en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) columnas en color azul y silicio (Si) columnas en color naranja.	119
Figura 14. Reducción del raquis en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si).....	120
Figura 15. Reducción del tallo en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si).....	121
Figura 16. Reducción del tallo en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si).	122
Figura 17. Peso seco promedio del raquis central en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica.	123

Figura 18. Peso seco del raquis central en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica.....	124
Figura 19. Peso seco del fuzz en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) en la solución aséptica.....	125
Figura 21 Longitud de la panícula del progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) en la solución aséptica.	126
Figura 22. Dinámica de germinación del fuzz del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 en días por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica.....	128
Figura 23. Porcentaje de germinación del fuzz del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 en días por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica.....	129
Figura 24. Apertura de flores tratadas con 20 μ M I en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418.....	131
Figura 25. Apertura de flores tratadas con 40 μ M I en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418.....	132
Figura 26. Apertura de flores tratadas con 60 μ M I en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418.....	132
Figura 27. Apertura de flores tratadas con 10 μ M La en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418.....	133
Figura 28. Apertura de flores tratadas con 20 μ M La en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418.....	134
Figura 29. Apertura de flores tratadas con 30 μ M La en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418.....	135
Figura 30. Apertura de flores tratadas con 25 μ M Ti en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418.....	135
Figura 31. Apertura de flores tratadas con 50 μ M Ti en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418.....	136

Figura 32. Apertura de flores tratadas con 75 μM Ti en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418.....	137
Figura 33. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (0, 20, 40 y 60 μM I) a la solución aséptica.....	138
Figura 34. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de lantano (0, 20, 20 y 30 μM La) en la solución aséptica.....	139
Figura 35. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de titanio (0, 25, 50 y 75 μM Ti) en la solución aséptica.....	140
Figura 36. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti).	141
Figura 37. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (0, 20, 40 y 60 μM I) a la solución aséptica.....	142
Figura 38. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de lantano (0, 10, 20 y 30 μM La) en la solución aséptica.....	143
Figura 39. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de titanio (0, 25, 50 y 75 μM Ti) a las soluciones asépticas.....	144
3.3.2.4. Diámetro del raquis central	145
Figura 41. Reducción del raquis en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica.	145
Figura 42. Reducción del raquis en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica.	146

Figura 43. Reducción del diámetro del tallo en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica.	147
Figura 44. Reducción del diámetro del tallo en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica.	148
Figura 45. Peso seco del raquis central en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica.	149
Figura 46. Peso seco del raquis central en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica.	150
Figura 47. Peso seco del fuzz en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica.	151
Figura 48. Longitud de panícula del progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica....	152
Figura 49. Dinámica de germinación del fuzz del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 en días por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica.....	154
Figura 50. Porcentaje de germinación del fuzz del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 en días por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si)..	155
Figura 51. Apertura de flores tratadas con 50 μ M Al en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	158
Figura 52. Apertura de flores tratadas con 100 μ M Al en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	159
Figura 53. Apertura de flores tratadas con 150 μ M Al en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	160
Figura 54. Apertura de flores tratadas con 20 μ M I en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	161

Figura 55. Apertura de flores tratadas con 40 μM I en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	162
Figura 56. Apertura de flores tratadas con 60 μM I en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	163
Figura 57. Apertura de flores tratadas con 10 μM La en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	164
Figura 58. Apertura de flores tratadas 20 μM La en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	165
Figura 59. Apertura de flores tratadas con 30 μM La en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	166
Figura 60. Apertura de flores tratadas con 10 μM Si en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	167
Figura 61. Apertura de flores tratadas con 15 μM Si en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	168
Figura 62. Apertura de flores tratadas con 25 μM Ti en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	169
Figura 63. Apertura de flores tratadas con 50 μM Ti en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	170
Figura 64. Apertura de flores tratadas con 75 μM Ti en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743.....	171
Figura 65. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (0, 50, 100 y 150 μM Al) a la solución aséptica.....	172
Figura 66. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de yodo (0, 20, 40 y 60 μM I) en la solución aséptica.....	173
Figura 67. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de lantano (0, 10, 20 y 30 μM La) en la solución aséptica.....	174

Figura 68. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de silicio (0, 5, 10 y 15 μM Si) en la solución aséptica.....	174
Figura 69. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de titanio (0, 25, 50 y 75 μM Ti) en la solución aséptica.....	175
Figura 70. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) a la solución aséptica.....	176
Figura 71. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (0, 50, 100 y 150 μM Al) a la solución aséptica.....	177
Figura 72. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de yodo (0, 20, 40 y 60 μM I) a la solución aséptica.....	177
Figura 73. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de lantano (0, 10, 20 y 30 μM La) a la solución aséptica.....	178
Figura 74. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de silicio (0, 5, 10 y 15 μM Si) a la solución aséptica.....	179
Figura 75. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de titanio (0, 25, 50 y 75 μM Ti) a la solución aséptica.....	180
Figura 76. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) en la solución aséptica.....	180
Figura 77. Reducción del raquis central en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti).....	181

Figura 78. Reducción del raquis central en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti).....	182
Figura 79. Reducción del diámetro del tallo en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti).....	183
Figura 80. Reducción del diámetro del tallo en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti).....	184
Figura 81. Peso seco del raquis central en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) a la solución aséptica..	185
Figura 82. Peso seco del raquis central del progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) a la solución aséptica.....	186
Figura 83. Peso seco del fuzz en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti).	187
Figura 84. Longitud de la panícula en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) en la solución aséptica.....	188
Figura 85. Longitud de la panícula del progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) en la solución aséptica.....	189
Figura 86. Dinámica de germinación del fuzz del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) a la solución aséptica.....	192
Figura 87. Porcentaje de germinación del fuzz del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti)..	193

Capítulo IV.....	224
Relaciones Macronutrimientales y Crecimiento de Caña De Azúcar en Condiciones de Invernadero	224
Figura 1. Vitroplántula de caña de azúcar	231
Figura 2. Número total de tallos después de 30 ddt con las distintas relaciones macronutrimientales.....	235
Figura 3. Inducción de hijos (brotes del rizoma sin que salieran a la superficie del suelo) por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 30 días de tratamiento.	236
Figura 4. Altura de planta por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 30 días de tratamiento..	237
Figura 5. Diámetro del tallo por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 30 días de tratamiento.	238
Figura 6. Altura del tallo al último collar visible por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 30 días de tratamiento.....	239
Figura 7. Hojas desarrolladas por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 30 días de tratamiento.	240
Figura 8. Hojas en desarrollo por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 30 días de tratamiento.	241
Figura 9. Peso fresco de raíz por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 30 días de tratamiento.	242
Figura 10. Peso fresco del tallo por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 30 días de tratamiento.	243
Figura 11. Peso fresco de hojas por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 30 días de tratamiento.....	244
Figura 12. Peso seco de raíz por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 30 días de tratamiento.	245
Figura 13. Peso seco del tallo por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 30 días de tratamiento.	246

Figura 14. Peso seco de hojas por efecto de las relaciones macronutrimen- tales (RM) durante 30 días de tratamiento.....	246
Figura 15. Área foliar por efecto de las relaciones macronutrimen- tales durante 30 días de tratamiento.....	247
Figura 16. Lecturas SPAD por efecto de las relaciones macronutrimen- tales durante 30 días de tratamiento.	248
Figura 17. Población de tallos por efecto de las relaciones macronutrimen- tales durante 60 días de tratamiento.	249
Figura 18. Inducción de hijos (brotes del rizoma sin que salieran a la superficie del suelo) por efecto de las relaciones macronutrimen- tales durante 60 días de tratamiento.	250
Figura 19. Altura de planta por efecto de las relaciones macronutrimen- tales durante 60 días de tratamiento.	251
Figura 20. Diámetro del tallo por efecto de las relaciones macronutrimen- tales durante 60 días de tratamiento.	252
Figura 21. Altura del tallo al último collar visible por efecto de las relaciones macronutrimen- tales durante 60 días de tratamiento.....	253
Figura 22. Hojas desarrolladas por efecto de las relaciones macronutrimen- tales (RM) durante 60 días de tratamiento.	254
Figura 23. Hojas en desarrollo por efecto de las relaciones macronutrimen- tales 60 días de tratamiento.....	255
Figura 24. Peso fresco de raíz por efecto de las relaciones macronutrimen- tales (RM) durante 60 días de tratamiento.	255
Figura 25. Peso fresco del tallo por efecto de las relaciones macronutrimen- tales durante 60 días de tratamiento.	256
Figura 26. Peso fresco de vainas por efecto de las relaciones macronutrimen- tales durante 60 días de tratamiento.....	257
Figura 27. Peso fresco de hojas por efecto de las relaciones macronutrimen- tales durante 60 días de tratamiento.....	258
Figura 28. Peso seco de raíz por efecto de las relaciones macronutrimen- tales (RM) durante 60 días de tratamiento.	259

Figura 29. Peso seco del tallo por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 60 días de tratamiento.	260
Figura 30. Peso seco vainas por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 60 días de tratamiento.	261
Figura 31. Peso seco de hojas por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 60 días de tratamiento.	261
Figura 32. Área foliar por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 60 días de tratamiento.....	262
Figura 33. Lecturas SPAD por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 60 días de tratamiento.	263
Figura 34. Población de tallos por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 90 días de tratamiento.	264
Figura 35. Inducción de hijos (brotes del rizoma sin que salieran a la superficie del suelo) por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 90 días de tratamiento.	265
Figura 36. Altura de planta por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 90 días de tratamiento..	266
Figura 37. Diámetro del tallo por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 90 días de tratamiento.	266
Figura 38. Altura del tallo al último collar visible por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 90 días de tratamiento.....	267
Figura 39. Hojas desarrolladas por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 90 días de tratamiento.	268
Figura 40. Hojas en desarrollo por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 90 días de tratamiento.	269
Figura 41. Peso fresco de raíz por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 90 días de tratamiento.	269
Figura 42. Peso fresco del tallo por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 90 días de tratamiento.	270
Figura 43. Peso fresco de vainas por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 90 días de tratamiento.....	271

4.3.4.11. Peso fresco de hojas.....	271
Figura 44. Peso fresco de hojas por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 90 días de tratamiento....	272
Figura 45. Peso seco de raíz por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 60 días de tratamiento.	273
Figura 46. Peso seco del tallo por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 90 días de tratamiento.	274
Figura 47. Peso seco vainas por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 90 días de tratamiento.	275
Figura 48. Peso seco de hojas por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 90 días de tratamiento.	276
Figura 49. Área foliar por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 90 días de tratamiento.	276
Figura 50. Lecturas SPAD por efecto de las relaciones macronutrimientales (RM) durante 90 días de tratamiento.	277
Figura 51. Absorción de macronutrimientos por la caña de azúcar de acuerdo con sus etapas fenológicas (modificado de Oliveira, 2011).	293
Figura 52. Curva de absorción y demanda de macronutrimientos N, P y K por la caña de azúcar de acuerdo con las etapas de desarrollo (modificado de Haifa Chemicals, 2014).	294

CAPÍTULO I

El Sistema Mexicano de Producción de Caña de Azúcar: Historia, Estado Actual y Nuevas Directrices (The Mexican Sugarcane Production System: History, Current Status and New Trends)

Abstract

Sugarcane is a globally important crop since it provides nearly 80% of the sugar consumed worldwide. This plant is a crucial source of food, feed and bioenergy, among other products, and represents an important component of the economy of 130 countries and territories located in the tropics and subtropics all over the world. As a C4 plant, sugarcane exhibits an outstanding capacity for biomass and sucrose production. Thanks to its highly efficient photosynthetic pathway, sugarcane produces the greatest crop tonnage among all commercially cultivated plants. The remarkable levels of sugarcane biomass production have made this plant a leading candidate for agriculture diversification. Indeed, the structural and chemical composition of sugarcane makes it particularly appealing for transformation into valuable products through industrial processing, including not only sucrose and ethanol but nearly 200 other products and by-products with a high aggregate value and significant market interest. Its diversification potential, together with its economic and strategic importance, has made sugarcane production a driving force in many cane-producing countries. Nevertheless, sustainability and social responsibility are still unmet goals in most sugarcane production systems worldwide, including in Mexico, which is the sixth largest producer of sugar and sugarcane. Mexico's production has not been focused on exportation, but rather on domestic consumption. Though the country has the potential to cultivate 5 million ha with this crop, the current area used for sugarcane production is below 800 thousand ha. Sugarcane is produced in Mexico under a wide range of socioeconomic, environmental and agricultural conditions. During the last crop season, 2015/2016, the harvested area was 778,125 ha, with a production volume of 54,188,609 t cane, with an average yield of 69.64 t ha⁻¹ of

cane and 3,803,472 t of sugar produced. This activity generates approximately 1 million direct jobs and nearly 2.2 million indirect ones. This chapter presents an updated analysis of the sugarcane agricultural system in Mexico. We describe the most salient changes both in the field and in the sugarcane industry in Mexico during the last three harvest seasons (i.e. 2012/13, 2013/14, 2014/15 and 2015/16), with special emphasis on yields, cultivated area, sugarcane produced, exports and price variation in both raw material and sucrose. We also address data concerning insurance and governmental subsidies and budgets focused on improving national sugarcane productivity. Regarding the sugarcane breeding program in Mexico, we report the most recent advances in developing new cultivars and provide an updated list of the most commonly grown cultivars in the country. Phytosanitary issues are also addressed, with a special focus on emergent diseases. We also present data on crop nutrient management techniques needed to attain sustainable use of fertilizers and water. Finally, we put forward some general recommendations to strengthen the sugarcane production system in Mexico. By employing new technologies, increasing public and private investments, lowering production costs, and opening up new market niches, diversifying products and introducing innovative practices in both the field and the sugar mills, the sugarcane system in Mexico can take advantage of the potential it possesses and become a sustainable and more profitable activity within the country.

Keywords: Saccharinae, *Saccharum* spp., Mexico, innovation, sugarcane cultivation, sugar refinery.

1.1. Introducción

México es actualmente el sexto productor mundial de azúcar y de caña de azúcar (CONADESUCA, 2016b), aunque no es un país netamente exportador de este insumo y la actividad se sustenta en el mercado y consumo interno (Aguilar-Rivera *et al.*, 2012). En la zafra 2015/2016 la superficie cosechada fue de 778,125 hectáreas, con 51 ingenios en operación que procesaron un volumen de caña de 54,188,609 toneladas que representan un rendimiento promedio de 69.64 t ha⁻¹, y de azúcar estándar de 3,803,472 toneladas lo que genera más de 26 mil millones de pesos (1,368.5 millones de dólares) (CONADESUCA, 2016e). Sin embargo, el comportamiento de la producción de caña de azúcar puede variar de un año a otro, debido a que depende de factores como el clima que afectan al cultivo y también a los cambios en las políticas azucareras impuestas por los países productores orientadas principalmente a la autosuficiencia y el apoyo a productores.

En México, la agroindustria de la caña de azúcar genera beneficios directos a más de 1 millón de mexicanos, de los cuales, 483,447 son empleos directos en fábricas (36,819 trabajadores, 189,945 productores, 154,214 jornaleros, 80,080 cortadores de caña y 22,389 transportistas) y 2.2 millones de empleos indirectos. Así mismo, representa el 1.98% del PIB manufacturero, el 16.44% del PIB agropecuario y 8.29% del PIB de la industria alimentaria (Enriquez-Poy, 2016). Lo anterior representa avances sustanciales ya que para 2013, la industria participó con el 0.4% del PIB nacional, 2.5% del manufacturero y 11.6% del primario (Sentíes-Herrera *et al.*, 2014).

Esta agroindustria tiene presencia productiva en 15 de 32 entidades federativas y 258 municipios, que se agrupan en seis zonas productoras (Noreste, Pacífico, Centro, Noroeste, Golfo y Sur) (Hernández-Cázares, 2014). En esta cadena de valor, existen enormes fortalezas relacionadas con la calidad del suelo y el clima

propicio donde se desarrolla, así como una organización de productores primarios e industriales bien estructurada, aunque a la vez compleja. A pesar de estas fortalezas, también existen grandes retos que tendrán que abordarse a fin de asegurar el éxito presente y futuro de esta cadena de valor. En este capítulo se presenta un análisis actual del sistema agrícola de caña de azúcar en México, y a partir de este análisis se proponen directrices a fin de asegurar su consolidación, a través de estrategias de innovación que permitan elevar su productividad y rentabilidad.

1.2. Productividad de caña y azúcar en México en un contexto global.

La caña de azúcar es la planta cultivada más productiva en el mundo, y contribuye con el 80% del total de azúcar que se produce en el planeta; el restante 20% es producido por la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) (**Figura 1**) (European Commission, 2016). En este contexto, el desarrollo de la industria azucarera a nivel mundial ha evolucionado para constituirse en una importante actividad económica, generadora de empleos y divisas para los países productores y exportadores. De los principales países productores de azúcar, en los últimos tres ciclos de producción (2013/14, 2014/15 y 2015/16) son diez los que aportan el 70% de la producción mundial (**Figura 1**) (USDA, 2016). Los principales países productores son: Brasil (que aporta el 24.5% global de caña de azúcar), India (19.2%), China (7.6%) Tailandia (7.2%), Estados Unidos (5.3%), México (4.4%), Pakistán (3.6%), Australia (3.2%), Guatemala (2.0%), Colombia (1.5%), Filipinas (1.5%), Indonesia (1.5%), Argentina (1.4%), Sudáfrica (1.4%) y Cuba (1.2). El resto de los países contribuyen con el 14.6%.

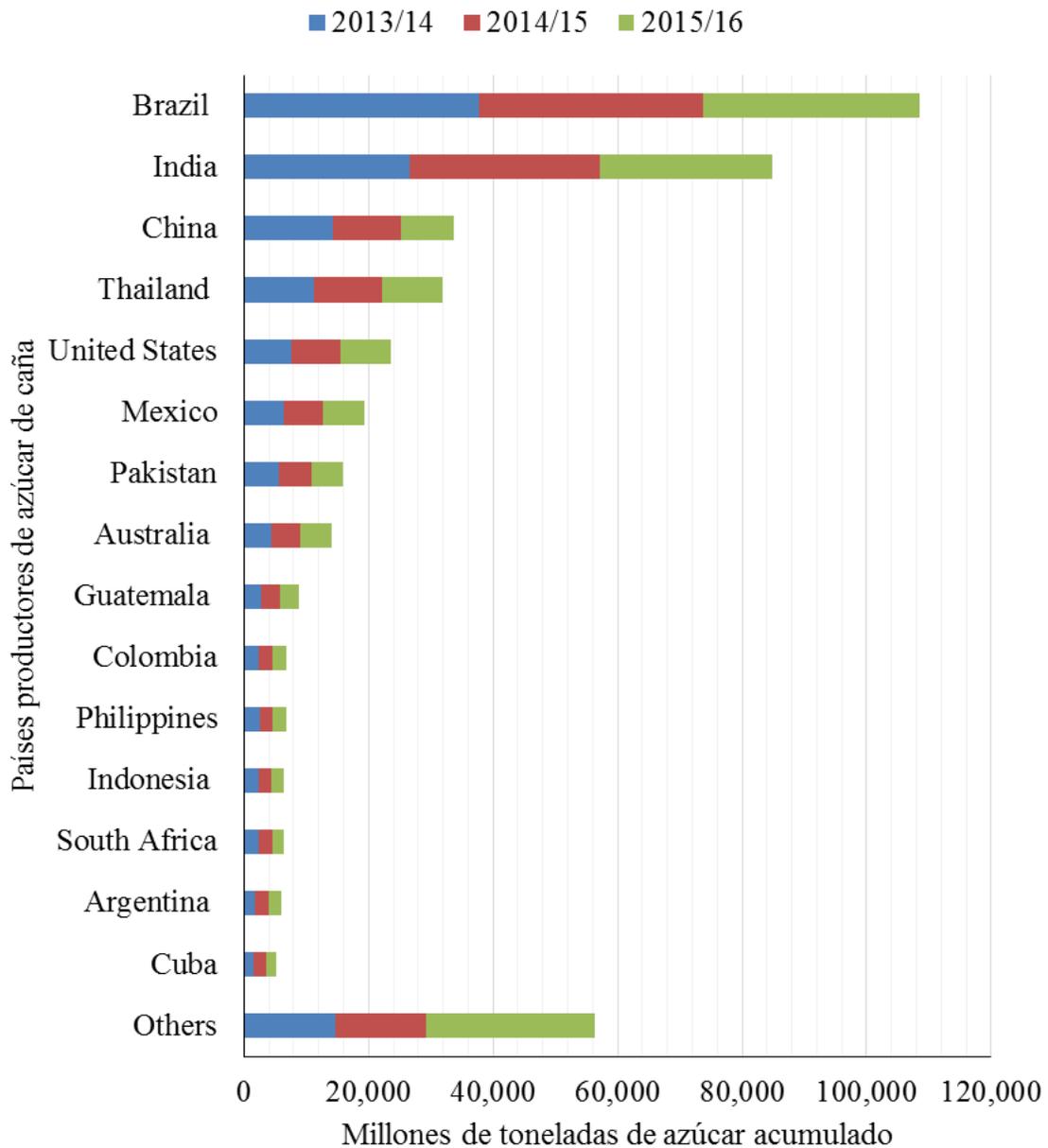


Figura 1. Países productores y producción mundial de azúcar de caña en los últimos tres ciclos de producción: 2013/14, 2014/15 y 2015/16. Fuente: USDA, 2016.

Para el ciclo de producción 2016/17, de acuerdo con datos de la USDA (2016), se predice que Brasil aumentará 8.8% su producción de azúcar, manteniéndose por tanto en el primer lugar a nivel mundial. Por el contrario, India, Estados Unidos, China, México y Sudáfrica, reducirán su producción de azúcar significativamente

con valores de -7.9, -2.5, -2.4, -1.4, y -1.4%, respectivamente. De acuerdo con el reporte estadístico de FAOSTAT (2016), en 2014, los principales países responsables del 84% de la producción de caña de azúcar fueron: Brasil (36.4% de la producción mundial), India (17.4%), China (12.4%), Tailandia (5.1%), Pakistán (3.3%), México (2.8%), Colombia (1.9%), Filipinas (1.6%), Australia (1.5%), Indonesia (1.4%), Estados Unidos (1.4%), Guatemala (1.4%), Argentina (1.2). El resto de los países productores aportó el 12.2% de la producción (**Cuadro 1**) (FAOSTAT, 2016). En 2016, la mayoría de los países mantuvo las mismas posiciones, aunque Australia, cuya producción decreció, fue remplazada por Indonesia y Estados Unidos.

Cuadro 1. Principales países productores de caña de azúcar en 2016.

País	Producción (Int \$ 1000)	Producción (t)
Brasil	23,454,723	721,077,287
India	10,623,396	361,037,000
China	3,448,771	123,460,500
Tailandia	3,168,770	98,400,000
Pakistán	1,727,002	58,397,000
México	1,672,929	50,946,483
Colombia	1,236,257	33,363,560
Filipinas	927,129	32,000,000
Indonesia	864,979	28,700,000
Estados Unidos	861,971	29,235,877

Fuente: MAPS OF WORLD, 2016.

En México, entre las zafras 2012/13, 2013/14 y 2014/15 la superficie de caña de azúcar cosechada presentó un crecimiento anual de 1.4%. Así, para la zafra 2012/13 la superficie de caña era de 780,271 ha y para la zafra 2014/15 alcanzó una superficie de 812,756 ha, valor histórico más alto reportado (MAM, 2014; 2015; 2016). Sin embargo, en la zafra 2015/16, la superficie de caña cosechada se redujo en 4.3%, para tener una superficie total de 778,125 hectáreas (**Figura 2**) (CONADESUCA, 2016e).

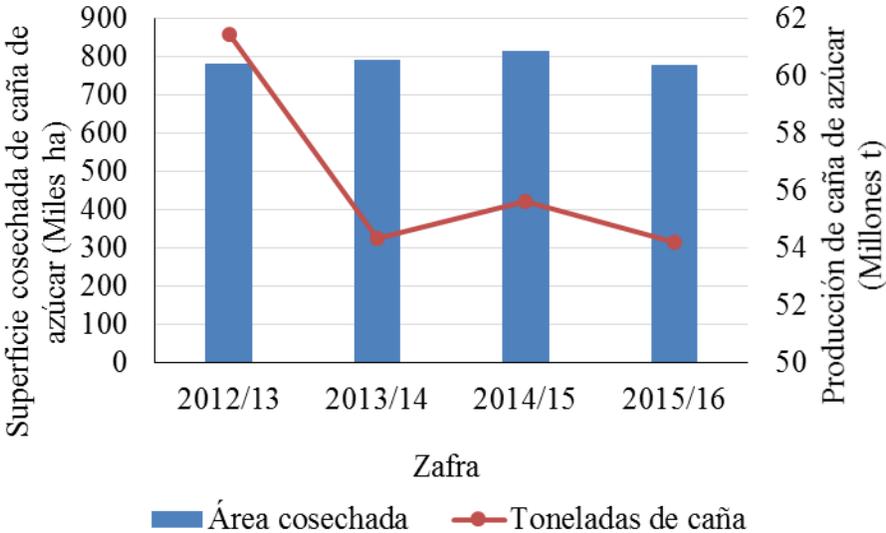


Figura 2. Producción total de caña de azúcar y superficie cosechada en las últimas cuatro zafras en México (Fuente: MAM, 2014; 2015; 2016; CONADESUCA, 2016e).

Entre las zafras 2012/13, 2013/14, 2014/15 y 2015/16, el rendimiento de caña por hectárea ha presentado fluctuaciones. En la zafra 2012/13 se mostró un rendimiento de 78.74 t ha⁻¹, mientras que para la zafra siguiente (2013/14), el rendimiento se redujo en un 12.7%, con un rendimiento de 68.71 t ha⁻¹. Esta tendencia a la baja también se presentó en la zafra 2014/15, ya que el rendimiento bajó 0.4%, con 68.41 t ha⁻¹. Contrario a esta tendencia, en la última

zafra 2015/16 se mostró un incremento de 1.8% en el rendimiento, con un rendimiento de 69.64 t ha⁻¹ (**Figura 3**).

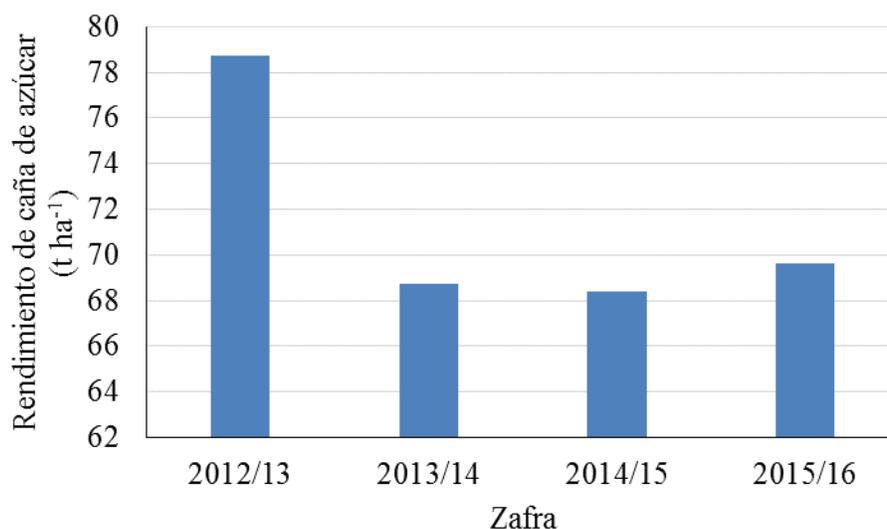


Figura 3. Rendimientos de caña de azúcar en campo en las últimas cuatro zafras en México (Fuente: MAM, 2014; 2015; 2016; CONADESUCA, 2016e).

A nivel mundial, el consumo *per cápita* de azúcar es de 23.7 kg, mientras que en México es de 37.9 kg, valor 59.9% superior al valor promedio internacional (SAE, 2016). De hecho, México es el noveno consumidor mundial de azúcar, con 2.7% del total (USDA, 2016).

La demanda mundial de azúcar ha disminuido debido a las nuevas tendencias y preferencias de los consumidores por productos bajos en azúcar, ya que el consumo de azúcar se ha relacionado con problemas de obesidad y diabetes. De ahí que de 2011 a 2015 haya habido un decremento anual del 1.9% en el consumo de azúcar (SAE, 2016).

Los principales países exportadores de azúcar son Brasil (47.4%), Tailandia (17.0%), Australia (7.0%), India (5.6%), Guatemala (4.4%), México (2.3%), Cuba

(1.8%) y Colombia (1.5%). El 2.9% del volumen de azúcar exportada proviene de la Unión Europea y ésta es obtenida a partir de remolacha azucarera (USDA, 2016).

Para el ciclo de producción 2016/17, de acuerdo con datos de la USDA (2016), las predicciones indican que los países que aumentarán sus exportaciones son Brasil, México, Argentina, Australia, Tailandia, Guatemala y Cuba, en un orden de 6.4, 35.2, 138.9, 6.8, 2.3, 2.4 y 5.3%, respectivamente, respecto al ciclo inmediato anterior. Estos siete países encabezarán la lista de exportadores de azúcar. Para el caso de México, el principal mercado es el estadounidense (SAE, 2016). En contraste, India, Colombia y Malasia, serán los países que tendrán menor participación en la exportación de azúcar, ya que tendrán una reducción del 65.5, 24.6 y 11.4%, respectivamente, respecto a sus exportaciones en el ciclo 2015/16.

El incremento en las ganancias económicas en la agroindustria mexicana de la caña de azúcar es debido al alza en los precios del azúcar en mercados internacionales y nacional; a pesar de que, en marzo de 2015, se invalida y suspende el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (NAFTA) en el rubro de azúcar. Posteriormente, se reanudan los acuerdos y se fija una cuota 60 mil toneladas de azúcar para México, y participar con un poco más del 25% de las importaciones de este edulcorante por parte de Estados Unidos. Sin embargo, dicho producto debe cumplir con ciertas características que darán lugar al precio de venta, y estas estarán basados en la concentración de pol, fluctuando los precios entre 20 y 25 centavos de dólar por libra. Lo anterior implica poca competitividad de la venta del azúcar con América del Norte (Enriquez-Poy, 2016).

En México, el cultivo de la caña de azúcar se concentra en seis regiones (Sentíes-Herrera *et al.*, 2014) (**Figura 4**). Para la zafra 2015/16 la región Golfo (estados de Veracruz, Oaxaca y Tabasco), generó el 48.2% de la producción nacional de caña de azúcar; en la región Pacífico (estados de Nayarit, Jalisco, Michoacán y Colima), se produjo el 22.9%; la producción de la región Noreste (Sinaloa) representó el 0.5%; la región Sureste (estados de Chiapas, Campeche y Quintana Roo) aportó el 9.1%; la región Centro (estados de Puebla y Morelos) produjo el 6.4%; y la

región Noroeste (Tamaulipas y San Luis Potosí) aportó el 12.9%. (CONADESUCA, 2016e).

El periodo de cosecha o zafra en México tiene una duración aproximada de ocho meses, inicia en noviembre, se incrementa la cosecha en enero, febrero, marzo y abril, y finaliza entre mayo a junio (Sentíes-Herrera *et al.*, 2014).

En las últimas tres zafras se ha presentado una reducción en el número de ingenios en operación. Para el ciclo 2013/14 operaron 55 ingenios, pero al ciclo siguiente (zafra 2014/15) operaron 54, y finalmente en la última zafra (2015/16) solo operaron 51 (MAM, 2015, 2016; CONADESUCA, 2016e).

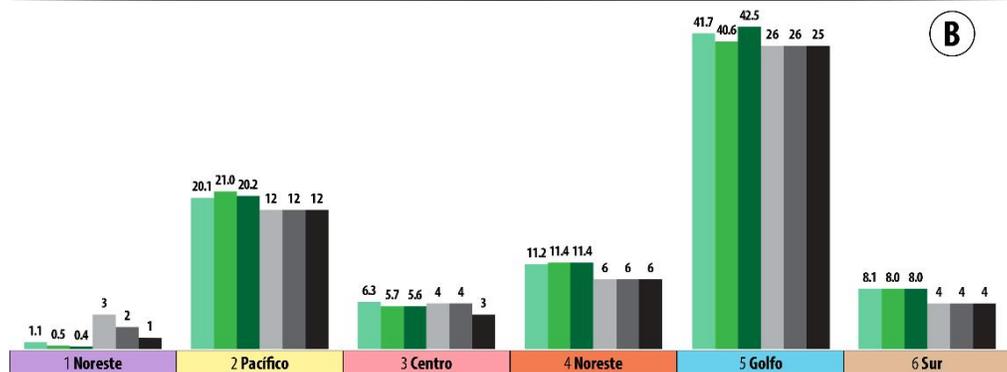
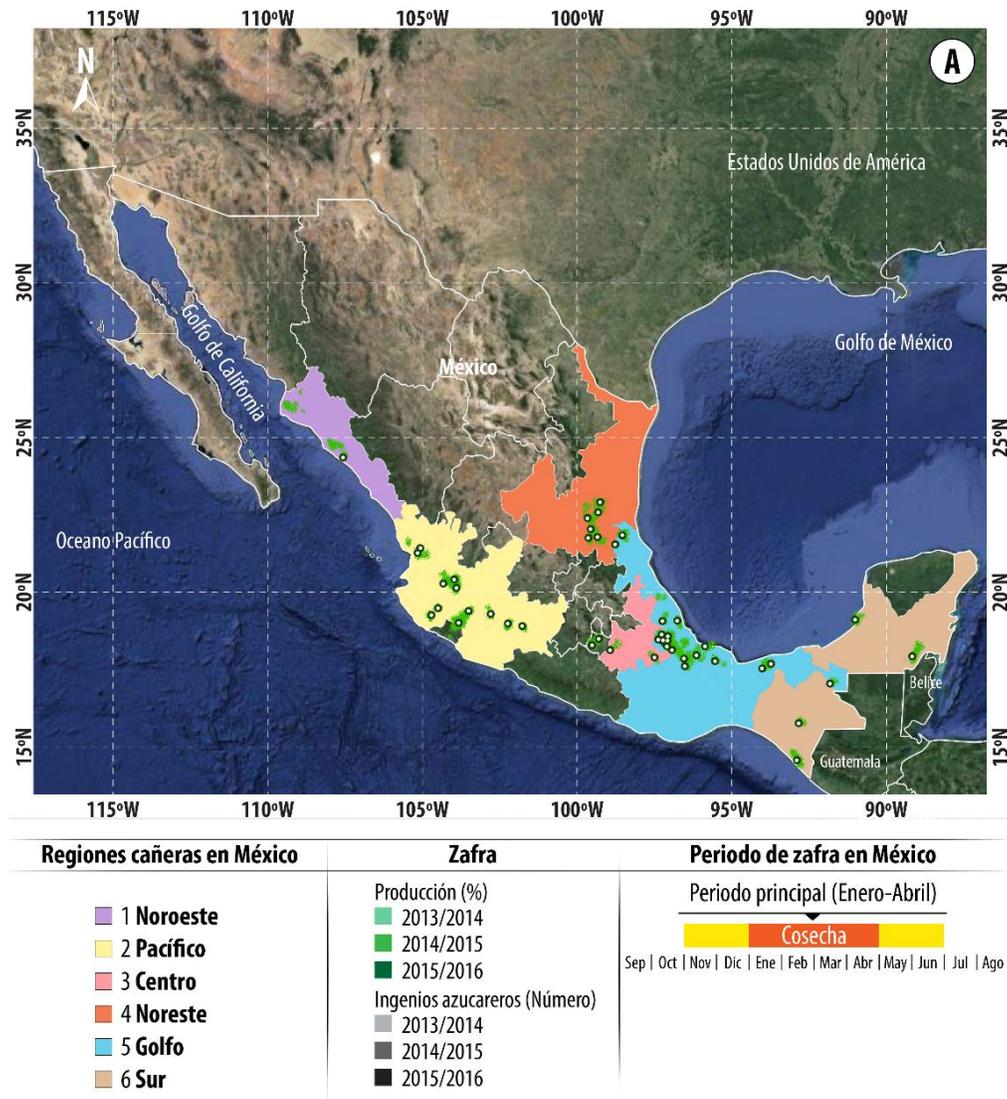


Figura 4. Entidades federativas de México en donde se cultiva la caña de azúcar y producción por región cañera. A. Producción de caña de azúcar en porcentaje por zafra, en los tres últimos ciclos de cosecha: 2013/14; 2014/15; 2015/16.

Las seis regiones productoras que agrupan los 15 estados donde se lleva a cabo esta actividad están indicados en diferentes colores. B. La producción de caña de azúcar por región como porcentaje del total es indicado en colores verdes, mientras que el número de ingenios por región aparece en colores grises (Sentíes-Herrera *et al.*, 2014; CONADESUCA, 2016e).

1.3. Apoyos gubernamentales para investigación en caña de azúcar

En las reglas de operación de programas de apoyo de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) 2014-2018, se establece la administración y operación de nueve programas con 43 componentes, de los cuales tres programas y ocho componentes son los que están catalogados para beneficiar a productores relacionados con el sector cañero (CONADESUCA, 2016d). Los tres programas con sus componentes son: a) Programa de Fomento a la Agricultura con los componentes Agroproducción, Producción Integral, Agroclúster Rural, PROAGRO Productivo, Tecnificación del Riego, Modernización de Maquinaria y Equipo, b) Programa de Productividad Rural, con los componentes Infraestructura Productiva para el Aprovechamiento Sustentable del Suelo y Agua, y Atención a Siniestros Agropecuarios para Atender a Pequeños Productores, y c) Programa de Productividad y Competencia Agroalimentaria con su componente Acceso al Financiamiento en Apoyo a la Agricultura. Para más detalles su puede consultar las reglas de operación en: <http://www.conadesuca.gob.mx/documentos%20de%20interes/Gu%C3%ADa%20Pr%C3%A1ctica%20de%20Programas%20de%20Apoyo%20de%20la%20SAGARPA%20para%20Productores%20de%20Ca%C3%B1a%20de%20Az%C3%BAcar%202016.pdf>

En relación a montos para ciencia y tecnología, en 2013, la suma fue de 2.3 millones de dólares (Sentíes-Herrera *et al.*, 2014), sin embargo, estos montos han cambiado significativamente. De acuerdo con la Secretaria de Hacienda y Crédito Público, el presupuesto de la federación 2015 para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología ascendió a \$33,644,672,206 pesos (\$1,770,772,221 dólares) (SHCP, 2015). Para 2016, este monto aumento un 13%, para alcanzar una suma

total de \$37,929,796,845 pesos (\$1,996,305,097 dólares) (Cámara de Diputados, 2016). Sin embargo, para el siguiente año fiscal 2017, dicho presupuesto presento una disminución de casi un 30%, para alcanzar una suma total de \$26,963,512,279 pesos (\$1,419,132,225 dólares) (Cámara de Diputados, 2017).

1.4. El sistema de producción de caña de azúcar en México

De acuerdo con Sentíes-Herrera *et al.* (2014), en México la caña de azúcar es producida en las zonas tropicales y subtropicales de las costas del Pacífico y Golfo de México, en Valles del Altiplano Central y en parte de la Península de Yucatán. En estas áreas cultivadas, el 62% de la producción es de temporal y el restante 38% tiene algún tipo de riego. Es importante destacar que, para la producción de caña de azúcar en México, los suelos presentan características físicas y químicas apropiadas para el cultivo de esta gramínea. Sin embargo, el 70% de los suelos requieren aplicación de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Aunque en menor frecuencia y a menor concentración, también se aplican macronutrientes secundarios (calcio, magnesio y azufre), así como micronutrientes (boro, cloro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, níquel y zinc), así como bioestimulantes importantes en la nutrición vegetal.

En los últimos años se ha apreciado una tendencia positiva para la inversión del sector azucarero, debido fundamentalmente a que los precios de liquidación final para la caña de azúcar en las últimas zafas han fomentado la inversión en el campo cañero. De acuerdo con Enriquez-Poy (2016), a partir de 2016 se esperan tres años de altos precios de liquidación. Estas nuevas tendencias generan mayor certidumbre a los productores de caña para reinvertir en esta actividad. El campo cañero mexicano ofrece un gran potencial para incrementar la producción de azúcar basado en: a) Fertilización eficiente, b) Cambio de variedades de caña de azúcar (que ofrezcan alto contenido de sacarosa, buen rendimiento y resistencia a plagas y enfermedades), c) Renovación programada del campo cañero (cinco a seis cosechas); d) Sistemas de riego más ampliado; y e) Mayor acceso a financiamiento. Una revisión reciente sobre aspectos socioeconómicos,

ambientales, agronómicos y fitosanitarios del sistema de producción de caña de azúcar en México ha sido presentada por Sentíes-Herrera *et al.* (2014).

1.5. Marco legal y organización de la industria azucarera mexicana

El marco legal de la agroindustria de la caña de azúcar ha presentado cambios entre los últimos dos sexenios. El programa, leyes, manuales, estatuto y otros documentos normativos en la industria azucarera son los siguientes: Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2014-2018, Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, Contrato Ley de la Agroindustria Azucarera y Alcoholera, Ley del Seguro Social, Ley Federal del Trabajo y tratados internacionales de libre comercio, entre otras. Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, Manual de Organización del Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, Manual de Procedimientos del Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, Estatuto Orgánico del Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, Contrato uniforme de compra-venta y de siembra, cultivo, cosecha, entrega y recepción de caña de azúcar y el Contrato Ley de las Industrias Azucarera, Alcoholera y Similares de la República Mexicana. Aunado a esta normativa se cuenta con otros documentos del marco legal como son: Ley Federal de las Entidades Paraestatales, Ley de Adquisiciones, Arrendamientos y Servicios del Sector Público y el Reglamento de la Ley Federal de las Entidades Paraestatales (CONADESUCA, 2016c). Otras leyes, reglamentos, Convenios de Colaboración con los Estados, el Registro Nacional Agropecuario y Condiciones Generales de Trabajo Complementarios por parte de la SAGARPA, se encuentran disponibles en:

<http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/MarcoJuridico/Paginas/Leyes2.aspx>

(SAGARPA, 2016b). El marco legal que sustenta y regula la actividad azucarera en México es complejo y extenso, y el ámbito principal tiene que ver con la definición operativa de la siembra, cultivo e industrialización de la caña de azúcar, el cual se diseña, ajusta e instrumenta en base a su propia dinámica y decisiones

de sus participantes, en los diferentes órganos del gobierno y representa el nuevo mecanismo de coordinación entre gobierno, productores, industriales y otros agentes (Blackaller-Ayala, 2011).

En relación con las organizaciones de la agroindustria azucarera, las cuales cumplen funciones específicas en beneficio de esta cadena de valor, se cuenta con las siguientes: Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA) que pertenece a la SAGARPA; Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera (CNIAA); Asociación Nacional de Empresas Azucareras, A. C. (ANEA); Asociación de Técnicos Azucareros de México, A.C. (ATAM); Sindicato de Trabajadores de la Industria Azucarera y Similares de la República Mexicana (STIASRM); Confederación Nacional de Propietarios Rurales, A.C. (CNPR); Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR (UNC); Unión Nacional de Productores de Caña de Azúcar, C.N.C., A.C. (UNPCA); y Confederación Regional Obrera Mexicana (CROM) (SAGARPA, 2016a; MAM, 2016).

1.6. Corporativos de la industria azucarera mexicana

En 2001 el Gobierno Federal expropió 27 ingenios azucareros, y se creó el Fondo de Empresas Expropiadas del Sector Azucarero (FEESA), como una entidad paraestatal, cuyo objetivo fue administrar los bienes y otorgar apoyo presupuestal a los ingenios azucareros expropiados (DOF, 2001). Este proceso se revirtió con los años, y actualmente todos los ingenios operando en México se encuentran en posesión de la iniciativa privada. El Grupo Beta San Miguel (BSM) con 11 ingenios se posiciona como el consorcio azucarero más grande de México. Le siguen los consorcios Zucarmex con seis ingenios; Ingenios Santos con cinco, Grupo Azucarero de México (GAM) y Grupo Porres con cuatro cada uno; Grupo La Margarita, Grupo Promotora Industrial Azucarera S.A. (PIASA) y Grupo Sáenz con tres ingenios cada uno; Grupo García González, Grupo Azucarero del Trópico (GAT) y Grupo Motzorongo con dos ingenios cada uno; y los consorcios Fanjul/Asr Group, Azsuremex, Grupo Menchaca, Grupo Pantaleón, Azucarera San José de Abajo y AGAZUCAR con un ingenio cada uno. En total, actualmente existen 51 ingenios azucareros operando en México (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Consorcios azucareros actuales de México, después de haber terminado la venta de los ingenios de FEESA en agosto de 2016.

Corporativo	Ingenio	Asociado a la CNIAA	Región	Estado	Municipio
Grupo Beta San Miguel (BSM)	Central Casasano	Si	Centro	Morelos	Cuautla
	Central La Providencia	Si	Córdoba - Golfo	Veracruz	Cuichapa
	Constancia	Si	Córdoba - Golfo	Veracruz	Tezonapa
	El Potrero	Si	Córdoba - Golfo	Veracruz	Atoyac
	Emiliano Zapata	Si	Centro	Morelos	Zacatepec
	Quesería	Si	Pacífico	Colima	Cuauhtémoc
	San Francisco Ameca	Si	Pacífico	Jalisco	Ameca
	San Miguel del Naranjo	Si	Noreste	San Luis Potosí	El Naranjo
	San Miguelito	Si	Córdoba - Golfo	Veracruz	Córdoba
	San Rafael de Pucté	Si	Sureste	Quintana Roo	Othón P. Blanco
	Santa Rosalía	Si	Sureste	Tabasco	Cárdenas
Zucarmex	Central Atencingo	Si	Centro	Puebla	Chietla
	El Higo	Si	Noreste	Veracruz	El Higo
	Mahuixtlán	Si	Papaloapan - Golfo	Veracruz	Coatepec
	Melchor Ocampo	Si	Pacífico	Jalisco	Autlán de Navarro
	Pujiltic	Si	Sureste	Chiapas	Venustiano Carranza
	San Cristóbal	Si	Papaloapan - Golfo	Veracruz	Carlos A. Carrillo
Ingenios Santos	Alianza Popular	No	Noreste	San Luis Potosí	Tamasopo
	Bellavista	No	Pacífico	Jalisco	Acatlán de Juárez
	Cuatotolapan	No	Papaloapan - Golfo	Veracruz	Hueyapan de Ocampo

	Pedernales	No	Pacífico	Michoacán	Tacámbaro
	Plan de Ayala	No	Noreste	San Luis Potosí	Ciudad Valles
Grupo Azucarero de México (GAM)	El Dorado	Si	Noroeste	Sinaloa	Culiacán
	José María Martínez (Tala)	Si	Pacífico	Jalisco	Tala
	Lázaro Cárdenas	Si	Pacífico	Michoacán	Taretan
	Presidente Benito Juárez	Si	Sureste	Tabasco	Cárdenas
Grupos Porres	El Modelo	Si	Papaloapan - Golfo	Veracruz	La Antigua
	Huixtla	Si	Sureste	Chiapas	Huixtla
	San Pedro	Si	Papaloapan - Golfo	Veracruz	Lerdo de Tejada
	Santa Clara	Si	Pacífico	Michoacán	Tocumbo
Grupo La Margarita	Central Progreso	No	Córdoba - Golfo	Veracruz	Paso del Macho
	José María Morelos	No	Pacífico	Jalisco	Casimiro Castillo
	Pablo Machado (La Margarita)	No	Córdoba - Golfo	Oaxaca	Acatlán de Pérez Figueroa
Promotora Industrial Azucarera S.A. (PIASA)	Adolfo López Mateos	Si	Papaloapan - Golfo	Oaxaca	San Juan Batista Tuxtepec
	Plan de San Luis	Si	Noreste	San Luis Potosí	Ciudad Valles
	Tres Valles	Si	Papaloapan - Golfo	Veracruz	Tres Valles
Grupo Sáenz	Aarón Sáenz Garza	Si	Noreste	Tamaulipas	Xicoténcatl
	El Mante	Si	Noreste	Tamaulipas	El Mante
	Tamazula	Si	Pacífico	Jalisco	Tamazula de Gordiano
Grupo García González	Calipan	No	Centro	Puebla	Coxcatlán
	El Carmen	No	Centro	Veracruz	Ixtaczoquitlán
Grupo Azucarero del Trópico (GAT)	La Gloria	Si	Papaloapan - Golfo	Veracruz	Úrsulo Galván
	La Joya	Si	Sureste	Campeche	Chamotón
Grupo Motzorongo	Central Motzorongo	No	Córdoba - Golfo	Veracruz	Tezonapa
	El Refugio	No	Córdoba - Golfo	Oaxaca	Cosolapa

Fanjul/Asr Group	San Nicolás	Si	Córdoba - Golfo	Veracruz	Cuichapa
Azsuremex	Azsuremex	No	Sureste	Tabasco	Tenosique
Grupo Menchaca	El Molino	No	Noroeste	Nayarit	Tepic
Grupo Pantaleón	Pánuco	Si	Noreste	Veracruz	Pánuco
Azucarera San José de Abajo	San José de Abajo	Si	Córdoba - Golfo	Veracruz	Cuitláhuac
AGAZUCAR	Puga	Si	Noroeste	Nayarit	Tepic

* FEESA: Fondo de Empresas Expropiadas del Sector Azucarero.

1.7. Cambio climático y seguro agrícola en México

De acuerdo con el informe y el análisis que recopiló la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR) y el Centro de Investigación sobre Epidemiología de los Desastres (CRED), nueve de cada diez desastres naturales están relacionados con el cambio climático que se vive actualmente en el mundo. Dentro de éstos, el porcentaje de ocurrencias de desastres naturales por tipo de desastres entre 1995 y 2015, son: inundaciones (43%), tormentas (28%), terremotos (8%), temperaturas extremas (6%), deslaves (5%), sequías (5%), incendios (4%), actividad volcánica (2%) (UNISDR, 2015).

Debido principalmente a su posición geográfica, los efectos adversos del cambio climático en México han aumentado considerablemente. De hecho, se estima que para el año 2080, el cambio climático pudiera reducir la producción agrícola en México en un 25.7% (Moyer, 2010), lo que posiciona a México como el segundo país más vulnerable a los efectos del cambio climático, solo después de la India. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de desarrollar estrategias adecuadas para enfrentar los efectos de este fenómeno global. En la actualidad, México ocupa el 3er. lugar en producción agropecuaria de América Latina y el 12º del mundo, con una producción total de 246.2 millones de toneladas, cuyo valor en mercado es de 444 mil millones de pesos (23.36 millones de dólares). Datos gubernamentales refieren que los principales productos agrícolas son el maíz, caña de azúcar, chile verde, aguacate, tomate rojo, sorgo, trigo y papa (SIAP, 2016).

Además de sus efectos en la agricultura, el cambio climático afecta fuertemente otras actividades como el turismo, la producción y consumo de energías, la habitabilidad de las zonas costeras, la disponibilidad de recursos hídricos y la salud humana, además de la fenología de plantas y animales. Por lo anterior, el gobierno mexicano, a partir de mayo de 1990, se da autorización a la constitución y organización de la institución de seguros denominada AGROASEMEX, S. A. En la actualidad, se ha consolidado como un instrumento eficaz de política pública para impulsar la participación de los agentes privados y sociales en el mercado asegurador, otorgando certidumbre

a la actividad agropecuaria, ante los fenómenos naturales y se declara preparada para respaldar riesgos a la producción por siniestros derivados de los cambios climáticos (AGROASEMEX, 2016a).

La superficie de caña de azúcar asegurada en México se ha incrementado notablemente (**Figura 5**), a excepción de los años 2012 y 2013, en el que ésta representó entre el 14 y 13.4% respecto al total nacional, lo que implicó una disminución de 0.6%. En los años 2014 y 2015 creció en un 8.8 y 18.7%, respectivamente. Para el año 2016, se tiene información del segundo trimestre, para el cual, se tiene reportadas 602 mil hectáreas aseguradas a nivel nacional, de las cuales 48.5 mil hectáreas corresponde a caña azúcar, lo que representa un 8.05% del total de la superficie asegurada en México (AGROASEMEX, 2013, 2014, 2016c). En este último periodo, la caña de azúcar representa el tercer cultivo asegurado, seguido del maíz y trigo que ocupan el primero y segundo lugar, en superficie cultivada asegurada, respectivamente (AGROASEMEX, 2016c). Con relación a la superficie nacional ocupada con caña de azúcar, para las zafra 2012/13, 2013/14 y 2014/15, se cultivaron 780.3, 790.7 y 812.8 mil hectáreas, de las cuales, el 41.6, 44.6 y 51.5%, respectivamente, fueron aseguradas. En la zafra 2015/16 se cultivaron 778.1 hectáreas, de las cuales hasta el segundo trimestre del programa de aseguramiento agropecuario de AGROASEMEX 2016, solo se tiene aseguradas un 6.2%, aunque se espera que se alcance un 51.5% de superficie asegurada para el cierre de 2016 (AGROASEMEX, 2016c; CNPR, 2016; MAM, 2016).

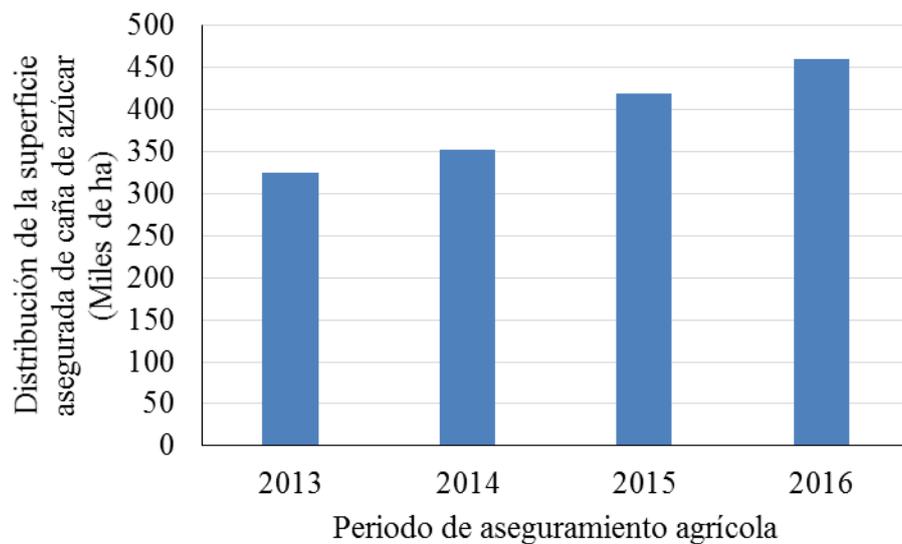


Figura 5. Superficie cultivada con caña de azúcar asegurada entre 2013 y 2016. Fuente: AGROASEMEX 2013, 2014, 2016b, 2016c.

El programa de aseguramiento agropecuario por parte de AGROASEMEX, en los últimos cuatro años (2013-2016), el subsidio a la prima de seguro agrícola mostró fluctuaciones importantes (**Figura 6**). El presupuesto autorizado para el año 2013, fue de 1,265.00 millones de pesos (66.58 millones de dólares), y se ejerció el recurso al 100% para el cierre de año. Para el año 2014, se incrementó el presupuesto en un 3.5%, para alcanzar un monto total de 1,308.8 millones de pesos (68.88 millones de dólares), y al final del periodo, se ejerció el 99.99% del monto total ministrado. Para el año 2015, hubo un recorte presupuestal, y el monto destinado para dicho año fue de 1,111.6 millones de pesos (58.51 millones de dólares), lo que representó una disminución del 15% en el presupuesto comparado al año anterior, y se ejerció prácticamente la totalidad del recurso otorgado. Para el año 2016, el presupuesto se incrementó en un 35%, en relación con el periodo anterior, que alcanzó los 1,500.9 millones de pesos (78.99 millones de dólares). A la fecha se ha ejercido 390.4 millones de pesos (20.55 millones de dólares), lo que significa un avance del presupuesto al segundo trimestre de 2016 del 26.01%. Al final de 2016, se espera que la totalidad de 1,668.9 millones de pesos (87.84 millones de

dólares) sean utilizados para fines de aseguramiento (AGROASEMEX, 2013, 2014, 2016b, 2016c).

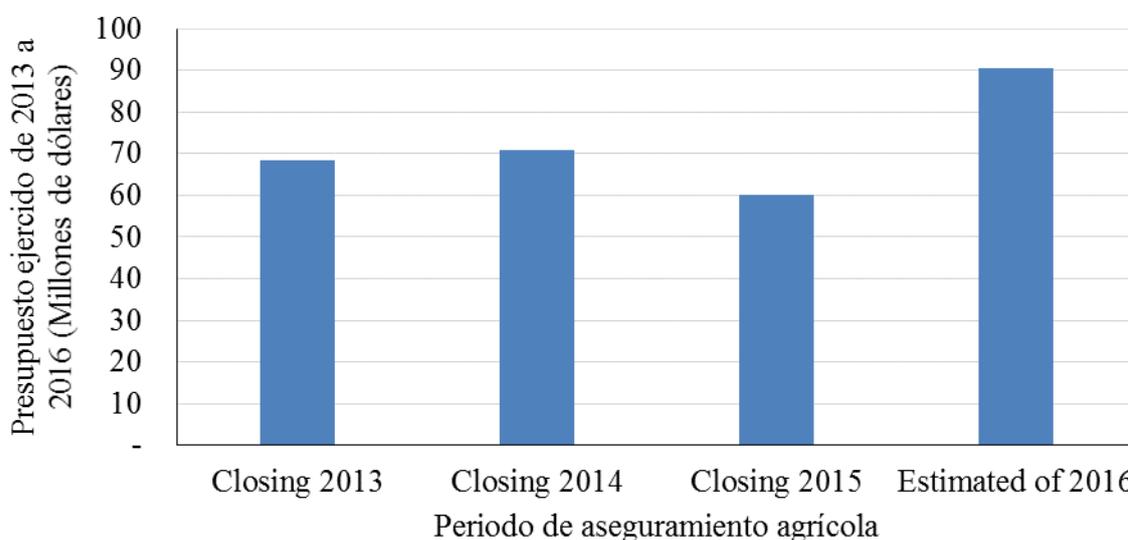


Figura 6. Subsidio a la prima de seguro agrícola AGROASEMEX 2013-2016.
Fuente: AGROASEMEX, 2013; 2014; 2016b; 2016c.

De manera general, se considera que la caña de azúcar presenta baja siniestralidad (Altamirano, 2001). Sin embargo, para el periodo 2013-2016 en México, la superficie asegurada para este cultivo tuvo una tasa de crecimiento anual de 12.9%, y se pronostica que, para el cierre del año 2016, la superficie asegurada alcance 460 mil hectáreas. Este pronóstico es muy concordante a la superficie de caña de azúcar afectada por algún tipo de embate de tipo biótico o abiótico en la zafra 2015/16, la cual fue de 431,054 hectáreas, más del 50% de la superficie cultivada con esta gramínea (CONADESUCA, 2016a). Por lo anterior, para la zafra 2016/17, se pudiera tener asegurada un poco más del 50% de la superficie con caña de azúcar y así dar certidumbre a los productores. De acuerdo con Rivera (2012), en el estado de Veracruz, son afectadas más de 14 mil hectáreas, con disminución en el rendimiento del 25% y con pérdidas económicas de 196 millones de pesos (10.32 millones de dólares) anuales. Lo anterior es un foco de atención, para dar mayor importancia a los daños y pérdidas por efecto del cambio climático, y el contar con un tipo de seguro agrícola, dará garantía al productor cañero, y de esta manera obtener un beneficio de su cultivo siniestrado.

1.8. Mejoramiento genético de caña de azúcar en México

A nivel mundial existen 36 programas de mejoramiento genético de la caña de azúcar (Chaves-Solera, 2013), los cuales mantienen un gran número de clones seleccionados en programas regionales, clones importados de otras estaciones y de especies silvestres de las colecciones mundiales (Machado-Junior, 2002). En México, el programa de mejoramiento genético para este cultivo está coordinado por el Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar, A. C. (CIDCA), en conjunto con las estaciones de Hibridación y Cuarentenaria. Cuenta con un banco de germoplasma compuesto por 3,184 variedades, de las cuales 1,133 son mexicanas y 2,051 extranjeras, mismas que se encuentran clasificadas por sexo, para dar lugar a 16 Bancos de Cruzamientos, y así continuar año con año con los trabajos de mejoramiento genético de esta especie (Sentíes-Herrera *et al.*, 2016a y b). El progreso y competitividad de la industria azucarera mexicana en gran medida se debe al desarrollo de nuevas variedades, con características sobresalientes respecto a indicadores agroindustriales y de adaptabilidad a las diferentes regiones cañeras del país. Sentíes-Herrera y Gómez-Merino (2014), hacen una descripción detallada del proceso de mejoramiento genético, iniciando con hibridación y posteriormente la selección y liberación de variedades, incluyendo los procesos de importación de materiales extranjeros, además de la nomenclatura actual para nombrar a las variedades mexicanas liberadas en cada uno de los 11 campos experimentales regionales.

Se tiene registrado que el 55% de la superficie sembrada es con variedades mexicanas y el 45% con variedades extranjeras (CIDCA, 2016; Sentíes-Herrera *et al.*, 2016b). Sin embargo, con datos del manual azucarero mexicano 2016, para la zafra 2014/2015, se cuenta con un total de 111 variedades de caña de azúcar reportadas de manera oficial, de las cuales 73 son mexicanas y 38 extranjeras, lo que implica un cambio en la proporción de variedades que sustentan la producción de caña de azúcar nacional, lo que significa que la superficie real sembrada con variedades mexicanas sea del 66% y el restante 34% con variedades extranjeras (MAM, 2016).

Los datos anteriores son indicativos de un importante avance en la generación de variedades de caña de azúcar adaptadas a las diferentes regiones productoras de caña de azúcar del país con característica agroindustriales sobresalientes. En términos de las variedades de mayor importancia para el cultivo comercial, Sentíes-Herrera *et al.* (2014) determinaron que para 1980 nueve variedades ocupaban el 70% de área cultivada, en 2012, este número se redujo a solo cuatro variedades que ocupan el mismo porcentaje de superficie de cultivo. Lo anterior implica una reducción en la variabilidad genética de cultivares de caña de azúcar en un periodo de 32 años del 44.4%. Por fortuna, esta tendencia de decrecimiento se ha revertido en los últimos años y actualmente son 20 variedades las que sostienen el 92.4% de la producción de caña nacional: CP 72-2086 (31.9%), Mex 69-290 (25.5%), Mex 79-431 (6.9%), ITV 92-1424 (6.0%), RD 75-11 (4.9%), Mex 68-P-23 (2.6%), My 55-14 (2.6%), Mex 57-473 (2.0%), Nco 310 (1.7%), ATEMEX 96-40 (1.6%), Mex 69-749 (1.3%), SP 70-1284 (0.9%), Mex 68-1345 (0.9%), ITV 92-373 (0.5%), Co 997 (0.5%), ZMex 55-32 (0.5%), CP 74-2005 (0.4%), L 60-14 (0.4%), Mex 55-32 (0.4%), Mex 73-1240 (0.3%), Mex 91-662 (0.3%), Mex SFC 95-46 (0.1%), y Mex 80-1410 (0.1%) (**Figura 7**). En esta lista, las variedades mexicanas representan el 49.1% y las extranjeras el 43.3%. El 7.6% restante, corresponde a variedades mexicanas y extranjeras de la cuales siguen sobresaliendo las variedades Mex.

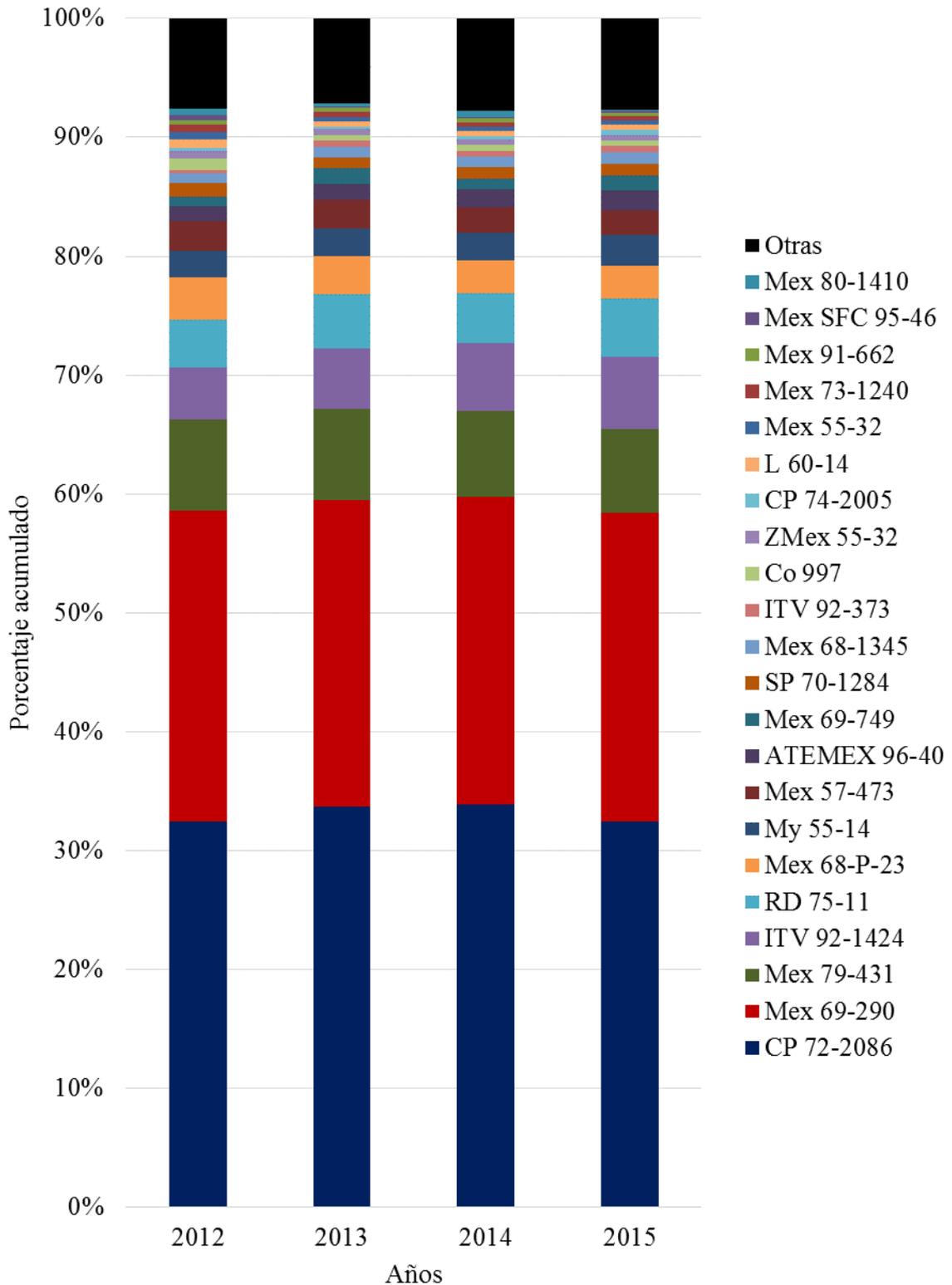


Figura 7. Distribución porcentual de variedades de caña de azúcar mexicanas y extranjeras en la superficie cultivada con esta gramínea en México de 2012 a 2015 (Fuente: MAM, 2013, 2014, 2015, 2016).

En México, aparte del CIDCA, institución encargadas del mejoramiento genético de este cultivo, se encuentra colaborando con otras instituciones de ciencias agrícolas e universidades, destacando el Colegio de Postgraduados (COLPOS), el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), el Centro de Investigación en Alimentos y Desarrollo (CIAD), el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) (Sentíes-Herrera *et al.*, 2014). En la actualidad se cuenta con el Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA) que es una entidad que coordina acciones de vinculación, promoción, fomento, competitividad e innovación para el desarrollo sustentable de la agroindustria de la caña de azúcar, a través de la planeación y ejecución de políticas públicas que den certidumbre en la toma de decisiones de los actores, soportado en el Sistema Integral de Información y el Centro de Investigación Científica y Tecnológica de la Caña de Azúcar (CICTCAÑA) para atender los retos de los mercados nacional e internacional de edulcorantes y bioenergía (SAGARPA, 2016a). Recientemente, a partir de finales de 2014, se constituye el Centro de Investigación, Innovación y Transferencia Agrícola Tangamanga, A.C. (CIITATAC) en la región de la Cuenca del Papalopan en el estado de Veracruz, con el propósito de participar y atender las necesidades más apremiantes del sector cañero en dicha región.

1.9. Plagas y enfermedades comunes como potencial amenaza de la caña de azúcar en México

A nivel mundial, la caña de azúcar es susceptible a un gran número de enfermedades bacterianas, fúngicas, virales y fitoplasmas. Existen alrededor de 160 hongos y 8 patógenos bacterianos reportados junto con al menos 7 enfermedades reconocidos de etiología desconocida en todo el mundo (Rott *et al.*, 2000).

La mayoría de las variedades de caña de azúcar son genéticamente resistentes a las enfermedades que afectan este cultivo. Pero el uso de material libre de patógenos es usado para evitar la diseminación de éstos.

En México, en la zafra 2015/16 fueron afectadas más de 400 mil ha por causa de plagas y enfermedades. Las plagas de presentaron mayor incidencia fueron barrenador del tallo (*Diatrea saccharalis*) (171,867 ha), rata cañera (*Sigmodon hispidus*) (138,998 ha), mosca pinta (*Aeneolamia postica*) (116,079 ha) y gusano cortador (*Agrotis* sp.) (2,513 ha). En relación con enfermedades, las dos que presentaron mayores afectaciones al cultivo fueron causadas por hongos del género *Fusarium* (1,194 ha) y *Puccinia* (414 ha), aunque su incidencia no ocasionó daños mayores y permitió la cosecha (CONADESUCA, 2016a).

La presencia y proliferación de una plaga o enfermedad dependerá de que se presenten las condiciones óptimas para su crecimiento y desarrollo. Se reporta que el cultivo de caña de azúcar en México esta expuesto al embate por 29 plagas de las hojas, 9 del tallo y 31 en raíces, para un total de 69 plagas. Con relación a enfermedades, puede ser susceptible a 15 hongos, 3 bacterias y 2 virus para un total de 20 enfermedades. Y finalmente puede estar en competencia con 48 malezas, de las cuales 27 son anuales y 21 perennes (Senties-Herrera *et al.*, 2014).

De acuerdo con AGROASEMEX (2016d), el pulgón amarillo (*Melanaphis sacchari sorghi*), es una plaga de importancia para diversos cultivos entre ellos caña de azúcar, por lo anterior, la aseguradora AGROASEMEX está contemplando dichos daños en el Fondos de Aseguramiento para asegurar las cosechas ante la presencia de esta plaga.

1.10. Nuevas directrices en la cadena de valor de la caña de azúcar

En México, la agroindustria de la caña de azúcar requiere un fuerte impulso de innovaciones tanto en campo como en fábrica, a fin de hacer de ésta una actividad más rentable y competitiva a escala global, con indicadores que satisfagan requerimientos actuales de sustentabilidad y responsabilidad social. Estas innovaciones pueden lograrse a través del empleo de las nuevas tecnologías, el aumento de las inversiones públicas y privadas, la reducción de los costos de producción, la apertura de nuevos nichos de mercado, la diversificación de productos y la introducción de prácticas innovadoras para la

producción, el procesamiento, la comercialización y la organización empresarial.

En términos de producción primaria, resulta crucial la generación de variedades mejoradas de alto rendimiento agroindustrial, que presenten resistencia a las principales plagas y enfermedades, así como buena adaptación a las condiciones agroclimáticas en las distintas regiones cañeras. Además, la creación de bancos de germoplasma es indispensable para la conservación *ex situ* y utilización como fuente de variabilidad genética y como reserva varietal para diversos fines. Así, tanto la generación de nuevas variedades como la creación y el mantenimiento de bancos de germoplasma son requisitos indispensables para la sustentabilidad del sistema de producción, y hacer frente a los embates del cambio climático. A través de estas dos iniciativas es posible generar variedades que hagan uso más eficiente de los insumos agrícolas, lo cual se está convirtiendo en un factor crítico para la producción azucarera a escala global, ya que este año el aumento en el precio de estos insumos ha superado el 55% respecto al año anterior, y la tendencia en el alza de los precios continúa (Enriquez-Poy, 2016). Dentro de los programas de mejoramiento genético es necesario considerar la diversificación de la agroindustria, a fin de mejorar la producción no solo de sacarosa, sino también de fibra, celulosa y hemicelulosa, entre otros, con el propósito de ser utilizadas en la cogeneración de energía, en la industria del papel y la producción de biocombustibles. Además, a través de estrategias de ingeniería genética, la caña de azúcar se está perfilando como una potencial biofábrica dentro de las más productivas en el futuro, debido a su alta eficiencia en la producción de biomasa y elevados rendimientos por unidad de superficie. A través de los nuevos enfoques biotecnológicos ha sido posible transformar genéticamente la caña de azúcar para producir biopolímeros, proteínas farmacológicas y carbohidratos de alto valor (Gómez-Merino *et al.*, 2014).

La tecnificación del campo con riego y agricultura de precisión serán aliados importantes para elevar la productividad del cultivo. A través del uso de sistemas de información geográfica será posible identificar zonas potenciales para la expansión del cultivo, en concordancia con la vocación de las tierras y

el interés de los productores del campo, y tomando en consideración las directrices que México tenga en materia de seguridad alimentaria a fin de evitar competencia con cultivos que sirven de sustento en la alimentación de la población del país. En este marco, el análisis actual de las características climáticas y edáficas de las áreas productoras de caña de azúcar indica que existen condiciones favorables para el desarrollo del cultivo (Senties-Herrera *et al.*, 2014). Estos datos son determinantes para hacer predicciones sobre desarrollo, adaptabilidad y producción del cultivo, además, de buscar nuevas zonas de cultivo. Se estima que la superficie de caña de azúcar podría crecer 5 millones de hectáreas de las cuales 500 mil serían de potencial alto y 4.5 millones con potencial medio (SAGARPA, 2009).

La aplicación de la agricultura de precisión es cada vez más común como herramienta para la gestión y manejo de los cultivos, y permite un uso más eficiente de insumos y sistematizar procesos. El conocimiento en métodos derivados del análisis espacial y espectral, por medio de sensores específicos, son determinantes para la estimación directa de deficiencias nutrimentales, estimar rendimientos o necesidades de agua, y monitorear plagas y enfermedades, en tiempo real, lo que permite una mejora en la toma de decisiones (Mulla, 2013). Aunado a lo anterior, el uso de drones en aplicaciones comerciales tiene el potencial de cambiar el futuro de diversas industrias, impactando de manera significativa, tal como es la producción e inspección de cultivos (Rao *et al.*, 2016).

El desarrollo de procedimientos robustos y automatizados de análisis de imágenes basado en objetos (OBIA) obtenidas por vehículos no tripulados (UAV) o drones, es una estrategia para la construcción de mapas de distribución de malezas en campos agrícolas, por citar un ejemplo, lo que se puede ayudar a calcular las necesidades de herbicidas y la estimación del costo total de las operaciones de manejo de malezas por adelantado (Peña *et al.*, 2013). El cultivo de caña de azúcar presenta un uso alto en productos para el control de malezas, por lo que adaptar dicha tecnología permitirá una mejor gestión y productividad del cultivo, aumentando los rendimientos y disminuyendo los costos de producción.

El uso de esta tecnología también permite estimar índices relacionados al crecimiento vegetativo y sobre el estatus nutricional de la planta. El contar con un monitoreo del cultivo de caña de azúcar durante su ciclo productivo, permitirá conocer cómo se está desarrollando, e identificar posibles causas que frenen su crecimiento. Disponer de un diagnóstico nutrimental asociado a indicadores de desarrollo y crecimiento, permite generar información confiable para la toma de decisiones y determinar momentos de aplicación óptimos y localizados de fuentes de nutrimentos.

La industria de la caña de azúcar es potencial beneficiario de los UAV, para la producción de este importante cultivo a nivel mundial. Esto implica una gran posibilidad para la mejora en el manejo y gestión del cultivo. Recientemente, se está aplicando dicha tecnología para la valoración de las pérdidas de población en plantaciones comerciales con gran precisión, problema causado por una mala brotación después del corte, debida a rizomas dañados o por la muerte de tallos jóvenes, lo que hace necesario realizar resiembras para ocupar estos espacios y así evitar la disminución del rendimiento (Luna y Lobo, 2016). El cálculo de estos espacios asociados con un análisis económico, permitirán determinar la gravedad del problema y tomar las acciones pertinentes bajo un manejo económicamente rentable que permita sostener la productividad del cultivo al menor costo.

En cuanto al uso de fertilizantes, se prevé que éste aumentará a más de 200 millones de toneladas para 2018, lo que representa un 25% más respecto a 2008. Esto implica un crecimiento anual de 1.8%. La demanda de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) aumentará en 1.4, 2.2 y 2.6% por año, respectivamente, y su oferta de crecerá en 3.7, 2.7 y 4.2% anual, respectivamente. Lo que implica alzas significativas en los precios de los mismos (FAO, 2015). Es importante puntualizar que el P es un recurso no renovable, y que las reservas mundiales pueden durar entre 100 y 300 años (INRA, 2015). Además, solo tres países: Marruecos, China, y Estados Unidos controlan en 85% de la producción total de P en el mundo. Por otra parte, hay un problema generalizado de baja eficiencia en el uso de P por los cultivos, y se estima que solamente el 50% del P que se aplica es disponible para la planta. Además, en países emergentes y en vías de desarrollo localizados en

las zonas tropicales del planeta, tendrán que utilizar mayor cantidad de fósforo para mantener la productividad agrícola, lo que se conoce como el impuesto del fósforo (Roy *et al.*, 2016). A fin de atender esta problemática, es necesario diseñar políticas públicas del sistema producto caña de azúcar, que involucren la implementación de alternativas para el manejo de los fertilizantes químicos, por lo que un complemento es la utilización de biofertilizantes a base de bacterias fijadoras de nitrógeno, solubilizadoras de fósforo, promotoras de crecimiento y abonos orgánicos, cuyo beneficios se verán en el aumento de los rendimientos de caña y la conservación de los recursos naturales y medio ambiente (Velasco-Velasco, 2014).

La FAO, en sus proyecciones para la producción agrícola mundial, ha establecido que ésta deberá aumentar un 70% en 2050 para alimentar a 2,300 millones de personas adicionales. Dicho aumento tendrá lugar con mayores incrementos de rendimientos y con la ampliación de la tierra dedicada a la agricultura (FAO, 2009). Entonces, con la relación al creciente aumento de la población mundial y la limitada disponibilidad de tierras cultivables, el reto de la agricultura será satisfacer las necesidades de alimentos y fibras del mundo, sin reducir la capacidad de la base de recursos (suelo y agua) para permitir la producción garantizada para la posteridad y también para dar cabida a las preocupaciones medioambientales y energéticas de la sociedad (Ryan *et al.*, 2008). En este contexto, el agua es un insumo vital para la producción de alimentos. Se sabe que para producir 1 kg de caña de azúcar se necesita aproximadamente 1,500 litros de agua (UNWATER, 2012). Debido a ello el uso responsable de este recurso es importante en el contexto de la responsabilidad social y de las directrices destinadas a la gestión sostenible de los recursos naturales. La huella hídrica (WF) ha sido ampliamente utilizada como un indicador que contribuye a la seguridad y sustentabilidad de este recurso natural (Casolani *et al.*, 2016), y está definida por el nivel de consumo, tipo de consumo, clima y eficiencia con la que se utiliza el agua (CONAGUA, 2007). El conocimiento integral del sistema de producción y la implementación de innovaciones permitirán generar estrategias para hacer uso eficiente de los recursos suelo y agua, insumos para la producción como fertilizantes y otros agroquímicos, realizar análisis de impacto ambiental, económico y social,

además optimizar los sistemas de producción y de logística en los ingenios azucareros. En el corto y mediano plazo, la implementación de estas tecnologías tanto en campo como en fábrica impactarán significativamente en el desarrollo del sector, lo que implicaría también una reducción en los costos de producción y mayores ingresos a los productores e industrias.

En términos generales, la producción agrícola enfrenta tres grandes desafíos: la necesidad de mayor producción de alimentos para abastecer la creciente población mundial, el deterioro de los recursos genéticos y naturales, y los efectos del cambio climático global. Para el cultivo de la caña de azúcar, estos retos obligan a diseñar estrategias eficientes a corto, mediano y largo plazo, ya que existe un grave deterioro del recurso suelo y el agua escasea cada vez más, y se prevé que los efectos del cambio climático en México pudieran reducir significativamente la producción del campo. Por lo tanto, es necesario impulsar la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación en todos los eslabones de esta cadena de valor, a fin de asegurar una producción sustentable rentable a largo plazo.

Las necesidades de innovación en la producción de caña de azúcar deben estar orientadas a lograr adaptaciones al cambio climático, uso eficiente del agua, riego, resistencia a factores de estrés abiótico y biótico, uso eficiente de fertilizantes e implementación de biofertilización, cosecha en verde, mecanización, digitalización y agricultura de precisión, gestión ambiental, abonos orgánico, aplicación de biotecnologías y ciencias genómicas, desarrollo de variedades para diversos fines, créditos y apoyos gubernamentales, diversificación y caña de azúcar como biofábrica, capacitación laboral y organización de productores, certificación de procesos y protección industrial (Gómez-Merino *et al.*, 2014).

La generación de productos biotecnológicos entre ellos cultivos con características agronómicas mejoradas y superiores a los actuales, implican desafíos técnicos de percepción, regulación y de hechos inherentes a los retos reales y percibidos que se enfrentan actualmente. La innovación agrícola biotecnológica ofrece medios eficientes y rentables para producir una gama de nuevos productos y herramientas para dar un valor añadido, tanto económico

como ambiental. Sentíes-Herrera y Gómez-Merino (2014), analizan algunas tecnologías para robustecer el programa de mejoramiento genético de caña de azúcar, aunado a un mejor control estadístico en cada una de las fases que implica la generación de una variedad, ahora con un enfoque biotecnológico, lo que permitirá ampliar la generación de productos biotecnológicos para la adaptación y diversificación de esta importante agroindustria. Un ejemplo reciente de aplicaciones biotecnológicas para caña de azúcar en México, es la creación de laboratorios de cultivo de tejidos vegetales con el propósito de hacer investigaciones en relación con el estrés hídrico, obtención de pureza varietal, limpieza y desinfección de semillas para creación de semilleros certificados y bancos de germoplasma para la conservación de los recursos genéticos de la caña de azúcar (Bello-Bello *et al.*, 2014; Castañeda-Castro *et al.*, 2014a y b).

Con la tendencia de mejores precios en las próximas zafras, se da certidumbre para reinvertir e incluso hacer nuevas inversiones en el sector cañero, que promoverán un crecimiento económico de las regiones productoras, además de contar con los programas de apoyo gubernamentales. La agroindustria de la caña de azúcar en México se posiciona como una de las más fuertes y de importancia económica, las perspectivas son prometedoras, lo cual garantiza el crecimiento, desarrollo y expansión de esta en un futuro cercano.

1.11. Literatura citada

AGROASEMEX, 2013. Programa del subsidio a la prima del seguro agropecuario. Informe de cierre del ejercicio 2013. Disponible en: http://www.agroasemex.gob.mx/Portals/0/documentos/AvancesdelPrograma/PROGRAMA_DEL_SUBSIDIO_A_LA_PRIMA_DEL_SEGURO_AGROPECUARIO_4TO_TRIMESTRE_2013.pdf

AGROASEMEX, 2014. Programa del subsidio a la prima del seguro agropecuario. Informe de cierre del ejercicio 2014. Disponible en: http://www.agroasemex.gob.mx/Portals/0/documentos/AvancesdelPrograma/PROGRAMA_DEL_SUBSIDIO_A_LA_PRIMA_DEL_SEGURO_AGROPECUARIO_4TO_TRIMESTRE_2014.pdf

- AGROASEMEX. (2016a). Cambio climático. Disponible en: <http://www.gob.mx/agroasemex/videos/cambio-climatico-agroasemex-s-a?idiom=es>
- AGROASEMEX. (2016b). Programa de aseguramiento agropecuario. Informe al primer trimestre de 2016. Disponible en: <http://www.agroasemex.gob.mx/Portals/0/documentos/SubsidioalaPrimadelSeguroAgropecuario/INFORME%201ER%20TRIM%202016%20PROG.%20ASEG.%20AGROPEC.pdf?ver=2016-04-20-154643-837>
- AGROASEMEX. (2016c). Programa de aseguramiento agropecuario. Informe al segundo trimestre de 2016. Disponible en: <http://www.agroasemex.gob.mx/Portals/0/documentos/SubsidioalaPrimadelSeguroAgropecuario/INFORME%202DO%20TRIM%202016%20PROG.%20ASEG.%20AGROPECUARIO.pdf?ver=2016-07-13-215611-090>
- AGROASEMEX. (2016d). AGROASEMEX atento ante la amenaza del pulgón amarillo. Disponible en: <https://www.gob.mx/agroasemex/articulos/agroasemex-atento-ante-la-amenaza-del-pulgon-amarillo?idiom=es>
- Aguilar Rivera, N., Rodríguez L.D.A., Enríquez, R.V., Castillo, M.A., Herrera, S.A. (2012). The Mexican Sugarcane Industry: Overview, Constraints, Current Status and Long-Term Trends. *Sugar Tech.* 14: 207-222. doi: 10.1007/s12355-012-0151-3
- Altamirano, C.J.R., 2001. La Reforma al Sistema de Aseguramiento Agropecuario y la Participación de los Productores Organizados en la Operación del Seguro. Comisión Nacional de Seguros y Finanzas, México, D. F. 165 p. Disponible en: <http://www.cnsf.gob.mx/Eventos/Premios/2001%20Seguros/2001%20Seguros%20Segundo%20vf.pdf>
- Bello-Bello, J. J., Morales-Ramos, V. y Gómez-Merino, F. C. (2014). Conservación de Recursos Genéticos de Caña de Azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad.* 7(2): 42-46.
- Blackaller-Ayala, C. (2011). La agroindustria mexicana de la caña de azúcar en México. Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR. Disponible en:

- http://www.caneros.org.mx/site_caneros/descargas/pleno_aguascalientes/presentacion_Blackaller.pdf
- Cámara de Diputados. (2016). Presupuesto de egresos de la federación para el ejercicio fiscal 2016. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/PEF_2016.pdf
- Cámara de Diputados. (2017). Presupuesto de egresos de la federación para el ejercicio fiscal 2017. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/PEF_2017/2017/work/models/PPEF2017/paquete/egresos/Proyecto_Decreto.pdf
- Casolani, N., Pattara, C., & Liberatore, L. (2016). Water and Carbon footprint perspective in Italian durum wheat production. *Land Use Policy*. 58: 394-402. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.07.014>
- Castañeda-Castro, O., Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., Morales-Ramos, V., González-Arno, M. T., Martínez-Ocampo, Y. M., Gámez-Pastrana, R. y Pastelín-Solano, M. C. (2014a). Aplicaciones del Cultivo de Tejidos Vegetales en Caña de Azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad*. 7(2): 16-21.
- Castañeda-Castro, O., Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., Jácome-Ortiz, L., Hernández de la Luz, H., Morales-Ramos, V., González-Arno, M. T., Martínez-Ocampo, Y. M., Gámez-Pastrana, R. y Pastelín-Solano, M. C. (2014b). Respuestas de las Variedades Mex 69-290 y CP 72-2086 de Caña de Azúcar (*Saccharum* spp.) a la Salinidad. *Agroproductividad*. 7(2): 55-59.
- Chaves-Solera, M. A. (2013). Composición del banco de germoplasma de caña de azúcar de Costa Rica. Disponible en: <http://www.laica.co.cr/biblioteca/servlet/DownloadServlet?c=443&s=1753&d=9507>
- CIDCA. (2016). Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar. Disponible en: <http://www.cniaa.mx/Cidca.aspx>
- CNPR. (2016). Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2003-2012. Confederación Nacional de Productores Rurales. Unión Nacional de Cañeros. Disponible en: http://www.caneros.org.mx/site_caneros/estadisticas/nacional.pdf

- CONADESUCA. (2016a). Boletín 101 de la corrida de campo. Disponible en:
<http://www.conadesuca.gob.mx/ReporteFabricaTempFallaServer/Boletin%20CC%20101.pdf>
- CONADESUCA. (2016b). Informe Estadístico de Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México Zafras 2006-2007/2015-2016. Disponible en:
http://www.conadesuca.gob.mx/documentos%20de%20interes/Informe%20Estad%3ADstico%20del%20Sector%20Agroindustrial%20de%20la%20Ca%C3%B1a%20de%20Az%C3%BAcar%20en%20M%C3%A9xico%20Zafra%202015_2016.pdf
- CONADESUCA. (2016c). Marco Jurídico. Disponible en:
<http://www.conadesuca.gob.mx/marcojuridico.html>
- CONADESUCA. (2016d programa). Nota técnica informativa sobre incentivos gubernamentales dirigidos al sector (guía práctica de los programas de apoyo de la SAGARPA para productores de caña de azúcar) 2016. Disponible en:
<http://www.conadesuca.gob.mx/documentos%20de%20interes/Gu%C3%ADa%20Pr%C3%A1ctica%20de%20Programas%20de%20Apoyo%20de%20la%20SAGARPA%20para%20Productores%20de%20Ca%C3%B1a%20de%20Az%C3%BAcar%202016.pdf>
- CONADESUCA. (2016e sup). Sistema INFOCAÑA. Disponible en:
<http://www.campomexicano.gob.mx/azcf/reportes/reportes.php?tipo=CIERRE>
- CONAGUA. (2007). El agua virtual y la huella hídrica. Disponible en:
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Infograf%C3%ADa%20Huella%20H%C3%ADdrica.pdf>
- DOF. (2001). DECRETO por el que se expropián por causa de utilidad pública, a favor de la Nación, las acciones, los cupones y/o los títulos representativos del capital o partes sociales de las empresas que adelante se enlistan. Disponible en:
<http://www.normateca.gob.mx/Archivos/DECRETO%20POR%20EL%20QUE%20SE%20EXPROPIAN%20POR%20CAUSA%20DE%20UTILIDAD%20PUBLICA,%20A%20FAVOR%20DE%20LA%20NACION,%20LAS%20ACCIONES,%20LOS%20CUERPOS%20Y->

- O%20TITULOS%20REPRESENTATIVOS%20DEL%20CAPITAL%20(INGENIOS%20AZUCAREROS%20DOF%202003-SEP-%202001).PDF
- Enriquez-Poy, M. (2016). Historia, actualidad y futuro de la agroindustria de la caña de azúcar en México. Memoria del XXXVIII Convención ATAM y 10° Congreso ATALAC. Conferencia Magistral.
- European Commission. (2016). Sugar. Avialable at: http://ec.europa.eu/agriculture/sugar/index_en.htm?cookies=disabled
- FAO. (2009). 2050: es esencial una mayor inversión en investigación agrícola. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/35780/icode/>
- FAO. (2015). El uso de fertilizantes sobrepasará los 200 millones de toneladas en 2018. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/277654/icode/>
- FAOSTAT. (2016). Cultivos. Avialable at: <http://faostat.fao.org/beta/es/#data/QC>
- Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L.I. and Sentíes-Herrera, H.E. (2014). Sugarcane as a Novel Biofactory: Potentialities and Challenges. *In* Guevara-Gonzalez, R., Torres-Pacheco, I. (Eds.): Biosystems Engineering: Biofactories for Food Production in the Century XXI. Sprimnger, Cham, Switzerland. pp. 129-149.
- Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., Morales-Ramos, V., Salazar-Ortiz, J., Velasco-Velasco, J., Sentíes-Herrera, H. E. and Ladewig, P. (2014). Necesidades de Innovación en la Producción de Caña de Azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad*. 7(2): 22- 26.
- Hernández-Cázares, A.S. (2014). La Agroindustria de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) en México. *Agroproductividad*. 7(2): 35-41.
- INRA. (2015). El fósforo: un recurso limitado fundamental para la agricultura del siglo XXI. Disponible en: http://www7.international.inra.fr/es/investigaciones/el_fosforo
- Luna, I., & Lobo, A. (2016). Mapping Crop Planting Quality in Sugarcane from UAV Imagery: A Pilot Study in Nicaragua. *Remote Sensing*. 8(6): 1-18. <https://doi.org/10.3390/rs8060500>
- Machado-Junior, G. R. (2002). Sugarcane varieties. *Sugarcane Journal*. 66(2): 6-7.

- MAM. (2013). Manual Azucarero Mexicano. Grupos industriales y producción 2011/2012. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F. 495 p.
- MAM. (2014). Manual Azucarero Mexicano. Grupos industriales y producción 2012/2013. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F. 501 p.
- MAM. (2015). Manual Azucarero Mexicano. Grupos industriales y producción 2013/2014. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F. 505 p.
- MAM. (2016). Manual Azucarero Mexicano. Grupos industriales y producción 2014/2015. Compañía Editora del Manual Azucarero. México, D.F. 495 p.
- Moyer, M. (2010). How much is left? A graphical accounting of the limits to what one planet can provide. *Scientific American*. 303: 74-81. doi:10.1038/scientificamerican0910-74
- Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*. 114(4): 358-371. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., Castro, A. I. de, Kelly, M., & López-Granados, F. (2013). Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images. *PLOS ONE*. 8(10): e77151. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077151>
- Rao, B., Gopi, A. G. and Maione, R. (2016). The societal impact of commercial drones. *Technology in Society*. 45: 83-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techsoc.2016.02.009>
- Rivera, C. (2012). Transferencia de Riego en la Agroindustria de Caña de Azúcar. Disponible en: http://www.caneros.org.mx/site_caneros/descargas/pleno_gdl/02_Rolando_Rivera_AgroCorporateSolutions_Presentation_CANA_RR2.pdf
- Rott, P., Bailey, R. A., Comstock, J. C., Croft, B. J. and Saumtally, A. S. (2000). A guide to sugarcane diseases. CIRAD-ISSCT, France, ISBN 2-87614-386-0

- Roy, E. D., Richards, P. D., Martinelli, L. A., Coletta, L. D., Lins, S. R. M., Vazquez, F. F., Willig, E., Spera, S. A., VanWey, L. K. and Porder, S. (2016). The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. *Nature Plants*. 2(5): 16043. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.43>
- Ryan, J., Singh, M., & Pala, M. (2008). Long-Term Cereal-Based Rotation Trials in the Mediterranean Region: Implications for Cropping Sustainability. En B.-A. in *Agronomy* (Ed.) (Vol. 97. pp. 273-319). Academic Press. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211307000077>
- SAE. (2016). Subastas SAE. Venta de ingenios azucareros junio-agosto 2016. Disponible en: <http://licitacion.sae.gob.mx/Home.aspx>
- SAGARPA. (2009). Sistema Nacional de Información de la Agroindustria Azucarera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Aguascalientes, México. Disponible en: <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/eventos/cng2009/memoria/cng2009/20091019%20siazucar%20para%20cng%20julio%20c-rivera.pps>
- SAGARPA. (2016a). CONADESUCA. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/conadesuca/Paginas/default.aspx>
- SAGARPA. (2016b). Marco Jurídico. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/MarcoJuridico/Paginas/Leyes2.aspx>
- Sentíes-Herrera, H.E., Gómez-Merino, F.C., Valdez-Balero, A. Silva-Rojas, H.V. and Trejo-Téllez, L.I. (2014). The Agro-Industrial Sugarcane System in Mexico: Current Status, Challenges and Opportunities. *Journal of Agricultural Science*. 6(4): 26-55. doi:10.5539/jas.v6n4p26
- Sentíes-Herrera, H.E., Trejo-Téllez, L.I., Gómez-Merino, F.C., Flores-Revilla, C., Loyo-Joachin, R., Vázquez-López, E., y Comité Técnico Administrativo del CIDCA, A.C. (2016a). Elementos benéficos en la hibridación de caña de azúcar (*Saccharum* spp.): efectos en la fisiología del progenitor femenino durante el cruzamiento y postcosecha. Memoria del XXXVIII Convención ATAM y 10° Congreso ATALAC. 10 p.

- Sentíes-Herrrea, H. E. y Gómez-Merino, F. C. (2014). Nuevas Directrices en Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad*. 7(2): 9-15.
- Sentíes-Herrrea, H. E., Gómez-Merino, F. C. y Loyo-Joachin, R. (2016b). El Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar (*Saccharum* spp.) en México: una Historia de Éxito con Nuevos Desafíos. *Agroproductividad*. 9(7): 8-13.
- SHCP. (2015). Gasto Público por Ramo. Disponible en: http://www.apartados.hacienda.gob.mx/presupuesto/temas/pef/2015/docs/38/r38_reurgfpp.pdf
- SIAP. (2016). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: <http://www.gob.mx/siap/#multimedia>
- UNISDR. (2015). The Human Cost of Weather Related Disasters 1995-2015. Disponible en: http://www.unisdr.org/2015/docs/climatechange/COP21_WeatherDisastersReport_2015_FINAL.pdf
- UNWATER. (2012). How Much Water is Needed to Produce Your Meal? Disponible en: http://www.unwater.org/wwd12/downloads/WWD2012_VW_LIST1.pdf
- USDA. (2016). Sugar: World Markets and Trade. Disponible en: <http://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/Sugar.pdf>
- Velasco-Velasco, J. (2014). Los Biofertilizantes y la Producción de Caña de Azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad*. 7(2): 60-64.

CAPÍTULO II

Yodo, silicio y vanadio y afectan la fisiología, maduración industrial y calidad de jugos de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.). (Iodine, silicon, and vanadium affect the physiology, industrial maturation, and juice quality of sugarcane (*Saccharum* spp.).

Abstract

Beneficial elements affect plant growth and development, they can also influence crop yield and quality as a function of their concentration and availability, the phenological stage and the genotype of the plant. The objective of this study was to evaluate the effect of foliar spraying of iodine (I), silicon (Si), and vanadium (V) at different concentrations on the physiology, industrial maturation, and juice quality in three sugarcane varieties: CP 72-2086, Mex 79-431, and Mex 69-290. The concentrations of the foliar sprays were: for I, 0, 11.8, and 23.6 mM; for Si, 0, 0.5, and 1.0 mM; and for V, 0, 10, and 20 μ M. A completely randomized experimental design was used. Two foliar sprays were applied, the first one at an age of 8 months and the second at 9 months. Plant height and stem diameter were evaluated between two and three months after the second foliar spray. Cavity, pith, and flowering were evaluated three months after the second foliar spray. The evaluation of sugarcane juice quality was made four months after the second foliar spray, determining degrees Brix and polarization (pol or percentage of sucrose content). The 23.6 mM I concentration decreased plant height and stem diameter in the Mex 69-290 variety. The 0.5 Si and 20 μ M V applications increased growth in the CP 72-2086 and Mex 79-431 varieties. Adding 20 μ M V significantly increased plant height in all three varieties. V concentrations of 10 and 20 μ M inhibited flowering and pith formation in the CP 72-2086 variety, while in the Mex 79-431 variety, flowering and pith formation were inhibited by both 10 μ M V and 1.0 mM Si. Applying 11.8 mM I decreased flowering and pith by 80% in the CP 72-2086 variety. Cavity increased in all three varieties because of all three treatments applied at the following concentrations: 23.8 mM I, 0.5 and 1.0 mM Si, and 10 and 20 μ M V. Regarding the industrial quality, there were no significant changes, except for the Mex 79-431 variety which showed a decrease in degrees Brix and sucrose with the application of 11.8 mM I.

Key words: Poaceae, Saccharinae, beneficial elements, flowering, pith, cavity.

2.1. Introducción

Los elementos esenciales tienen funciones determinantes en procesos vitales como regulación osmótica, permeabilidad de membrana, estructura y metabolismo celular, que repercuten en el crecimiento y desarrollo normal de las plantas (Kulcheski *et al.*, 2015). Por su parte, los elementos benéficos no son esenciales para las plantas, pero al ser suministrados por diferentes vías pueden ejercer un efecto favorable en su crecimiento y desarrollo (Pilon-Smits *et al.*, 2009). Dichos elementos, pueden favorecer o mejorar una condición e intervenir en diferentes rutas metabólicas que activen mecanismos de defensa a estrés biótico y abiótico, favorecer el aprovechamiento de otros nutrimentos, entre otros beneficios más (Trejo-Téllez *et al.*, 2007). Dentro de los elementos benéficos se pueden citar yodo (I), silicio (Si) y vanadio (V).

Como elemento benéfico, el I puede complementar la nutrición mineral de las plantas (Smoleń y Sady, 2011). Smoleń *et al.* (2014), demostraron que la nutrición con I mejora la calidad poscosecha de zanahorias. En la macroalga *Laminaria digitata*, Nitschke y Stengel (2014), reportaron que además de estimular una respuesta antioxidante, el I mejora el ajuste osmótico y la fotoprotección.

El Si tiene efectos positivos en el crecimiento y fisiología de las plantas (Korndörfer *et al.*, 2000) y en caña de azúcar, puede aumentar la eficiencia fotosintética y la resistencia al ataque de plagas y enfermedades, aumenta la toleración al estrés hídrico y heladas, y mejora la arquitectura de la planta, entre otros (Savant *et al.*, 1999; Korndörfer *et al.*, 2002). La caña de azúcar es considerada como una planta acumuladora de Si, y responde favorablemente a la fertilización con este elemento, especialmente en suelos que muestren niveles deficientes de Si (Meyer y Keeping, 2000; Keeping y Meyer, 2003; Keeping *et al.*, 2009; Martínez, 2011).

El V es un elemento de transición, con una amplia distribución en la naturaleza y sistemas biológicos, además de formar parte en combustibles fósiles (Rodríguez-Mercado y Altamirano-Lozano, 2006) e insumos agrícolas como fertilizantes químicos que contiene en su composición metavanadato de

amonio (NH_4VO_3) (Chonkid et al., 2007). Este elemento presenta una amplia gama de estados de oxidación desde -1 hasta +5, siendo +4 y +5 las dos formas estables para coexistir en la naturaleza, las cuales pueden resultar tóxicas para diversos organismos vivos (Mandiwana y Pinichev, 2006; Kanamori y Tsuge, 2012). De hecho, el V muestra potenciales efectos cancerígenos, tóxicos y genotóxicos (Mandiwana y Pinichev, 2006), y poco se conoce sobre su efecto benéfico en plantas superiores. Recientemente, Saco et al. (2013), reportaron que el V puede resultar beneficioso en la estimulación del metabolismo secundario en plantas, aunque los mecanismos bioquímicos y moleculares que yacen detrás de estas respuestas aún no se conocen con exactitud.

En México, la caña de azúcar representa el sexto producto agrícola de mayor importancia (FAO, 2015), y el país se ubica como el sexto productor de este cultivo a escala mundial, con más de 50 millones de toneladas de caña producidas anualmente, en una superficie cercana a las 800 mil hectáreas (Sentíes-Herrera *et al.*, 2014; Sentíes-Herrera y Gómez-Merino, 2014). En este contexto, esta investigación se planteó con el objetivo evaluar el efecto de diferentes concentraciones de I, Si y V aplicados vía foliar en la etapa de maduración de tres variedades de caña de azúcar más cultivadas en México, CP 72-2086, Mex 79-431 y Mex 69-290, en indicadores fisiológicos, nutrimentales y de calidad industrial.

2.2. Materiales y Métodos

2.2.1. Material vegetal y condiciones experimentales

Para este estudio se utilizaron las variedades comerciales de caña de azúcar CP 72-2086, Mex 79-431 y Mex 69-290 de maduración industrial temprana, media y tardía, respectivamente. La investigación se realizó en el campo experimental del Campus Córdoba del Colegio de Postgraduados, localizado a 18° 50' latitud norte y 96° 51' longitud oeste, a una altitud de 650 m. El clima de la zona es templado húmedo con lluvias en verano y temperatura media de 20

°C, máxima de 35 °C y mínima de 10 °C, con una precipitación media anual de 1,807 mm (Soto-Esparza, 1986).

La siembra de las variedades se realizó a cordón doble con esquejes de 50 cm de longitud aproximadamente, y con tres yemas. La distancia entre surcos fue de 1.40 m. La época de siembra fue en diciembre de 2013, y las condiciones de manejo agronómico del cultivo hasta la etapa de maduración industrial y cosecha fueron las utilizadas en la región. Los ensayos experimentales correspondientes a este estudio se efectuaron durante los meses de septiembre de 2014 a febrero de 2015.

2.2.2. Diseño de tratamientos

Los tratamientos evaluados consistieron en la aplicación de aspersiones foliares de soluciones que contenían uno de los tres elementos benéficos con tres niveles de concentración: I, a 0, 11.8 y 23.6 mM; Si, a 0, 0.5 y 1 mM; y V a 0, 10 y 20 µM. Las fuentes de I, Si y V fueron dióxido de silicio (SiO_2), metavanadato de amonio (NH_4VO_3) y yoduro de potasio (KI), respectivamente. La aplicación de tratamientos inició cuando las plantas alcanzaron la edad de ocho meses. Se realizaron dos aplicaciones, a los ocho y nueve meses de edad. Las aplicaciones se hicieron con aspersor de mochila y se utilizó agua destilada con un gasto de 3 L por parcela experimental. La parcela experimental consistió en una superficie de 10 por 4.2 m (total de 42 m²) con tres surcos y tres repeticiones por tratamiento. Se tomó el surco central para las mediciones, para lo cual se eliminó 1 m en cada extremo.

2.2.3. Variables evaluadas

Las variables fueron evaluadas a los 2, 3 y 4 meses posteriores a la última aplicación foliar. Las variables de campo fueron: diámetro de tallo y altura de planta evaluadas a los 2 y 3 meses, para dichas variables se consideraron los incrementos relativos de un mes, para ello a la altura y diámetro final se le restó la altura y diámetro inicial, respectivamente; oquedad, médula, y

floración, se evaluaron a los 3 meses. Se tomaron 10 muestras por tratamiento.

La calidad de los jugos de caña fue evaluada a los 4 meses después de la aplicación de los tratamientos (segunda aplicación), y se llevaron a cabo en laboratorio de campo del ingenio El Potrero (18°53' Latitud Norte, 96°47' Longitud Oeste, 503 m de altitud), y se determinaron la humedad, azúcares reductores, grados Brix, pol (sacarosa), pureza y fibra. El procedimiento utilizado fue el método de la licuadora o pol-ratio (García-Espinoza, 1984; Golcher *et al.*, 1984; Salgado-García *et al.*, 2013). Para todas las determinaciones, se tomaron tres tallos por muestreo con tres repeticiones, los cuales fueron cortados a la altura del canuto número 11 (el canuto número uno corresponde a la primera hoja desarrollada, contabilizando del ápice superior hacia la raíz) para obtener la sección 8-10 y los tallos. Los tallos fueron picados en una picadora de pasto (modelo THCF2500-K9, marca AntariX; Veracruz, México); las muestras picadas se colectaron en una lona, se mezcló perfectamente y se cuarteó para tomar una muestra de 400 g para su posterior análisis. De la sección 8-10, en la parte media de estos canutos, se cortaron rodajas y se mezclaron homogéneamente, para obtener una muestra de 100 g para desecar y determinar humedad. Las rodajas fueron colocadas en una canastilla de tela de centrífuga y fueron secadas hasta peso constante a 80-85 °C en una estufa de aire forzado. El cálculo de la humedad se hizo con la fórmula siguiente:

$$H = \left(\frac{PH - PS}{PH} \right) * 100$$

Dónde:

H = humedad de la muestra (%)

PH = Peso húmedo de la muestra (g)

PS = Peso seco de la muestra (g)

Posteriormente las rodajas secas fueron molidas en un molino (modelo Mini-Mill, marca Thomas Scientific, New Jersey, USA) para determinar los azúcares

reductores. Se pesaron 2.5 g de la muestra, se colocaron en matraces de 250 mL y se agregaron 200 mL de agua a 100 °C. Se dejó reposar de 3 a 4 h a temperatura ambiente para que se enfriara la muestra. Se aforó a 250 mL y la determinación de los azúcares reductores se realizó con el reactivo de Fehling y el método de Lane y Eynon, de acuerdo con lo descrito en la Norma Mexicana F-277 (NMX-F-277-1991).

En los tallos, se determinaron grados Brix, pol (sacarosa), pureza y fibra. La muestra de 400 g de tallos picados, fueron colocados en un vaso metálico de una licuadora Hawaiana y se agregó 1 L de agua destilada. La muestra fue licuada por 5 min. Para determinar los grados Brix, la medición se basó en la densidad aparente, dada por la concentración de los sólidos disueltos en las soluciones impuras de azúcar. Para ello, se decantó el licuado sobre un embudo de tela de centrifuga y se recuperó 500 mL en una probeta. Se dejó reposar hasta eliminar el aire ocluido. Para realizar la lectura, se introdujo un hidrómetro, y se tomó en la parte inferior de menisco. La temperatura de la muestra también se tomó para corregir a 20 °C con la tabla de correcciones de los aerómetros Brix. La pol se determinó con base al contenido de sacarosa aparente, dado por el giro de polarización de un rayo de luz (200 nm), el cual es proporcional a la cantidad de sacarosa aparente en solución. Del filtrado, se tomó una alícuota de 100 mL en un frasco de boca ancha de 250 mL y se agregó subacetato de plomo seco de Horn, hasta que la solución se clarificó (NMX-F-267-1991). Se agitó y se vació en un embudo con papel filtro para análisis de azúcar (Tipo 100/N, Peso 85 g m⁻², grosor 0.18 mm, Filtración 30 s, marca Sartorius) sobre un vaso de precipitado. El primer filtrado (aproximadamente 25 mL) fue desechado, y del siguiente se tomó la lectura de polarización (pol). Para realizar los cálculos se utilizó la tabla de Schmitz, que considera los grados Brix ajustados y el valor de la polimerización obtenidos. La pureza se determinó con la fórmula siguiente (Salgado-García *et al.*, 2013):

$$Pureza = \left(\frac{Sacarosa (pol)}{Brix} \right) * 100$$

La determinación de fibra se hizo de acuerdo con la Norma Mexicana-F-546 (NMX-F-546, 1983). Se utilizó el bagazo que quedó en el vaso de la licuadora y el que se recogió en el embudo de filtrado. Para desprender las partículas, se utilizó un chorro de agua destilada y se colocó en un cilindro para prensa de bagazo. Se lavó posteriormente con 18 L de agua destilada y se prensó. El bagazo prensado, se colocó en una canastilla previamente tarada de tela inoxidable de centrífuga. Se puso a secar hasta peso constante a 80-85 °C en una estufa de aire forzado durante 24 h. Después se pesó. La cantidad de fibra se calculó con la fórmula siguiente:

$$Fibra\ en\ caña = \left(\frac{Peso\ seco\ de\ la\ fibra * 100}{Peso\ de\ la\ muestra} \right)$$

2.2.4. Diseño experimental y análisis estadísticos

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar. Se realizó de manera independiente para cada variedad el análisis de la varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de Tukey ($P < 0.05$) con el programa estadístico SAS v. 9.4.

3. Resultados

3.1. Desarrollo y crecimiento de las variedades

Incrementos relativos en altura de planta.

La altura de la planta mostró efectos significativos por la aplicación de los elementos benéficos, en comparación con el testigo (**Cuadro 1**). Las plantas de la variedad CP 72-2086 tratadas con I, aumentaron significativamente su crecimiento en 1.6 (63%) veces, mientras que con la aplicación de Si, a medida que aumentó la concentración se mejoró el crecimiento, incrementándose 5 (400%) y 6 (538%) veces más. La anterior tendencia se observó con la aplicación de V, a medida que incrementó la concentración, el crecimiento fue mayor en 1.9 (86%) y 5 (400%) veces más, en comparación con el testigo. Las plantas de la variedad Mex 79-431, tratadas con I, mostraron un cambio

negativo en esta variable al reducir su crecimiento en un 47%. Sin embargo, con las concentraciones de 0.5 mM Si y 20 μ M V se obtuvieron incrementos de 3.6 (260%) y 5 (410%) veces más, en comparación con el tratamiento testigo. Las plantas de la variedad Mex 69-290 tratadas con I, mostraron un decremento de 2.9 (35%) veces, con la aplicación de la concentración más alta (23.6 mM I). En esta misma variedad, la aplicación de Si, incrementó el tamaño de la planta 2.6 (160%) veces con la concentración baja (0.5 mM Si), en tanto que, con V se observó un incremento del 1.9 (86%) y 4.4 (340%) veces, proporcional a la concentración, a mayor concentración de V, se tuvo mayor crecimiento.

3.2. Incrementos relativos en diámetro de tallo.

Los tratamientos tuvieron efectos diferenciales en cada una de las variedades probadas, en comparación con el testigo (**Cuadro 1**). Las plantas de la variedad CP 72-2086 tratadas con I, mostraron un decremento en función de la concentración, con 11.8 mM y 23.6 mM se redujo el crecimiento en un 33 y 52%, respectivamente. La aplicación de Si en esta misma variedad, mostró una respuesta positiva con la concentración alta (1.0 mM) al incrementar el diámetro en 18%. Sin embargo, no se mostró efecto alguno con la aplicación de V. Las plantas de la variedad Mex 79-431, redujeron su diámetro en un 47% por efecto de la aplicación de 11.8 mM I, al igual que con Si, al incrementar la concentración se redujo dicha variable en 47% (0.5 mM Si) y 55% (1.0 mM Si). Por su parte, con V, se mostraron respuestas diferentes en el diámetro, con la concentración baja (10 μ M V) se redujo en 57%, mientras que con la concentración alta (20 μ M V) se incrementó en 107%.

Cuadro 1. Incremento relativo de altura de planta y diámetro de tallo durante 30 días (entre diez y once meses de edad) en las tres variedades de caña de azúcar por efecto de la aplicación foliar de los elementos benéficos I, Si y V.

Variedad	Altura de planta (cm)			Diámetro de tallo (mm)		
	[0 mM]	[11.8 mM]	[23.6 mM]	[0 mM]	[11.8 mM]	[23.6 mM]
	I					
CP 72-2086	5.7±0.77a	5.7±0.77a	9.3±0.77a	2.1±0.33a	1.4±0.09ab	1.0±0.06b
Mex 79-431	5.7±0.77a	3.0±0.50b	6.0±0.50a	2.1±0.33a	1.1±0.01b	2.1±0.09a
Mex 69-290	5.7±0.77a	5.0±0.50a	2.0±0.50b	2.1±0.33a	1.5±0.12b	1.6±0.12b
	Si					
	[0 mM]	[0.5 mM]	[1.0 mM]	[0 mM]	[0.5 mM]	[1.0 mM]
CP 72-2086	7.0±0.50b	35.0±2.18a	44.7±3.26a	3.8±0.35b	3.1±0.81b	4.5±0.52a
Mex 79-431	7.0±0.50b	25.0±3.50a	8.0±0.10b	3.8±0.35a	2.0±0.17b	1.7±0.17b
Mex 69-290	7.0±0.50b	18.3±2.08a	4.0±0.50b	3.8±0.35a	1.1±0.08b	2.8±0.17a
	V					
	[0 µM]	[10 µM]	[20 µM]	[0 µM]	[10 µM]	[20 µM]
CP 72-2086	5.0±0.5c	9.3±0.77b	25±0.01a	1.37±0.12a	1.04±0.41a	1.83±0.08a
Mex 79-431	5.0±0.50b	5.3±0.29b	35.7±2.02a	1.4±0.12b	0.6±0.09c	2.9±0.22a
Mex 69-290	5.0±0.50c	9.3±0.77b	22.0±1.00a	1.4±0.12a	2.0±0.27a	1.2±0.20a

Medias ± DE con letras distintas en cada variable por variedad (hilera), indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). Los incrementos relativos son la diferencia de la medición final respecto a la medición inicial.

3.3. Floración

El porcentaje de floración mostró diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) entre tratamientos en dos variedades, CP 72-2086 y Mex 79-431 (**Figura 1**). La aplicación de I en las concentraciones ensayadas no mostró efectos significativos a excepción de la concentración de 11.8 mM I que inhibió en un 80% la floración en la variedad CP 72-2086 (**Figura 1A**). Es importante destacar que esta variedad es de maduración temprana y presenta un alto porcentaje de floración, como se observó con el testigo que tuvo una floración del 100%. La aplicación de 0.5 y 1.0 mM Si redujo en un 40 y 50% la floración en la variedad CP 72-2086, mientras que en la variedad Mex 79-431, los porcentajes no son muy altos, la concentración 0.5 mM Si produjo un porcentaje del 20% de floración, con la concentración de 1.0 mM Si se inhibió totalmente y el testigo quedó intermedio con un 10% de floración. La variedad Mex 69-290 no presentó floración (**Figura 1B**). La aplicación de vanadio en dos concentraciones (10 y 20 μM), redujeron la floración en un 100% en la variedad CP 72-2086. En la variedad Mex 79-431 se inhibió este proceso con la concentración 10 μM V y en la variedad Mex 69-290, no se observó cambio alguno (**Figura 1C**).

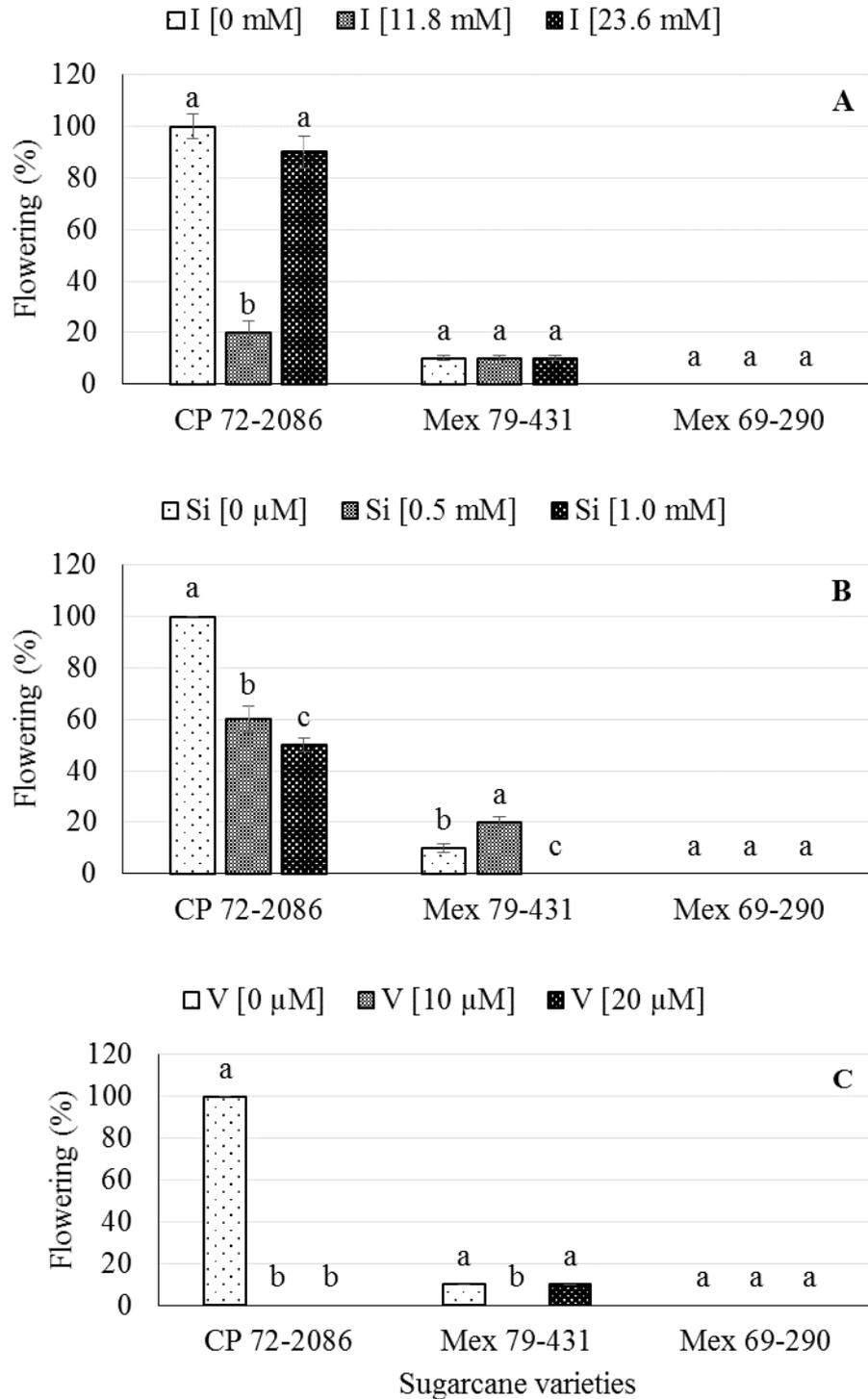


Figura 1. Porcentaje de floración por efecto de la aplicación foliar de los elementos benéficos I (A), Si (B) y V (C), en las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431 y Mex 69-290. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos por variedad (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.4. Médula

La aplicación de I mostró una reducción significativa del número de entrenudos con médula (80%) con la aplicación de 11.8 mM I y seguida de la aplicación 23.6 mM I (30%) en la variedad CP 72-2086, mientras que en la variedad Mex 79-431 no se mostró diferencia alguna (**Figura 2A**). La aplicación de Si 0.5 y 1.0 mM mostró una reducción del número de entrenudos del tercio superior del tallo moletero de casi el 50% en comparación con el testigo en la variedad CP 72-2086 (**Figura 2B**), mientras que en Mex 79-431 (**Figura 2B**) la respuesta a las mismas concentración fue muy contrastante, ya que con la dosis 0.5 mM Si se aumentó el número de entrenudos con médula (50%) y con la concentración 1.0 mM Si se redujo totalmente, en comparación al testigo. No obstante, la aplicación de V en las concentraciones (10 y 20 μ M) inhibió en un 100% la formación de médula en la variedad CP 72-2086; y en la variedad Mex 79-431 se redujo al 100% con la aplicación de 10 μ M V (**Figura 2C**). En caso particular para la variedad Mex 69-290, no hubo respuesta a la aplicación de los tres elementos, pues en ninguno de los casos presentó médula (**Figura 2A, B, C**).

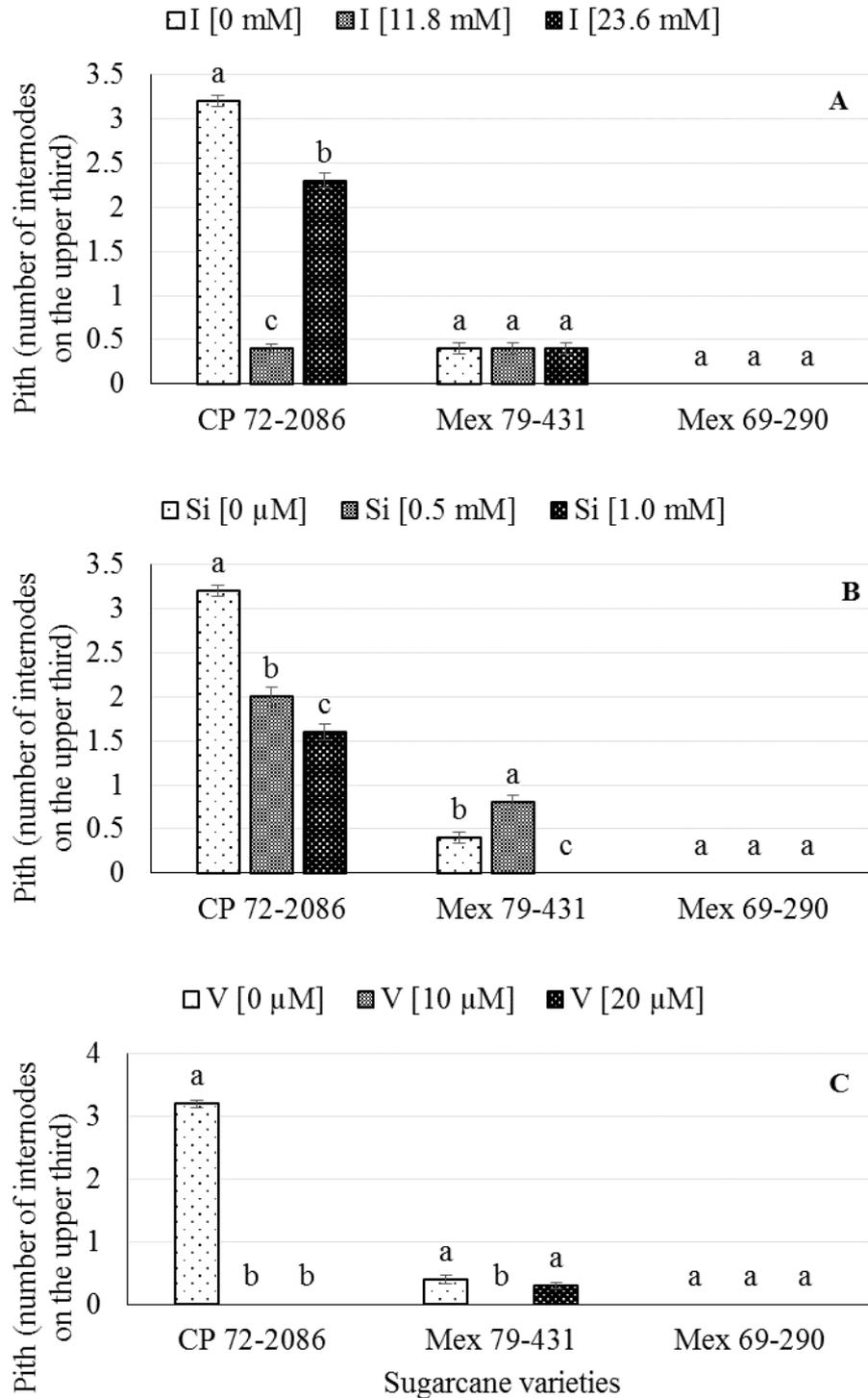


Figura 2. Presencia de médula por efecto de la aplicación foliar de los elementos benéficos I (A), Si (B) y V (C), en las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431 y Mex 69-290. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos por variedad (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.5. Oquedad

La aplicación de I en la variedad CP 72-2086 mostró diferencias significativas (**Figura 3A**), aunque éstas no pasaron de un entrenudo con oquedad. En contraste, la variedad Mex 69-290, a mayor concentración de I se incrementó significativamente el número de entrenudos con oquedad, de hasta 4 entrenudos con las concentraciones 23.6 mM I (**Figura 3A**). La aplicación de Si en la variedad CP 72-2086 se mostró contrastante, ya que con la concentración 0.5 mM Si se observó el menor número de entrenudos con oquedad y con la dosis 1.0 mM Si se duplicó dicho valor en comparación al testigo (**Figura 3B**). Por otra parte, en la variedad Mex 69-290, la dosis 1.0 mM Si aumentó un porcentaje significativo el número de entrenudos con oquedad, en 0.4 entrenudos más en comparación con el testigo (**Figura 3B**). Respuestas diferentes se observaron con la aplicación de V, ya en la variedad CP 72-2086 fue incrementándose el número de entrenudos con oquedad en función del aumento de la concentración, sin llegar a rebasar los dos entrenudos basales (**Figura 3C**).

Misma tendencia se observó en la variedad Mex 69-290 con el caso inverso en las concentraciones, donde la concentración 0.5 mM Si mostró el mayor aumento en esta condición seguida del efecto de la concentración 1.0 mM Si (**Figura 3C**). Para el caso de la variedad Mex 79-431, en ninguno de los casos presentó cambios en función de la aplicación de los tres elementos benéficos y sus respectivas concentraciones (**Figura 3A, B, C**).

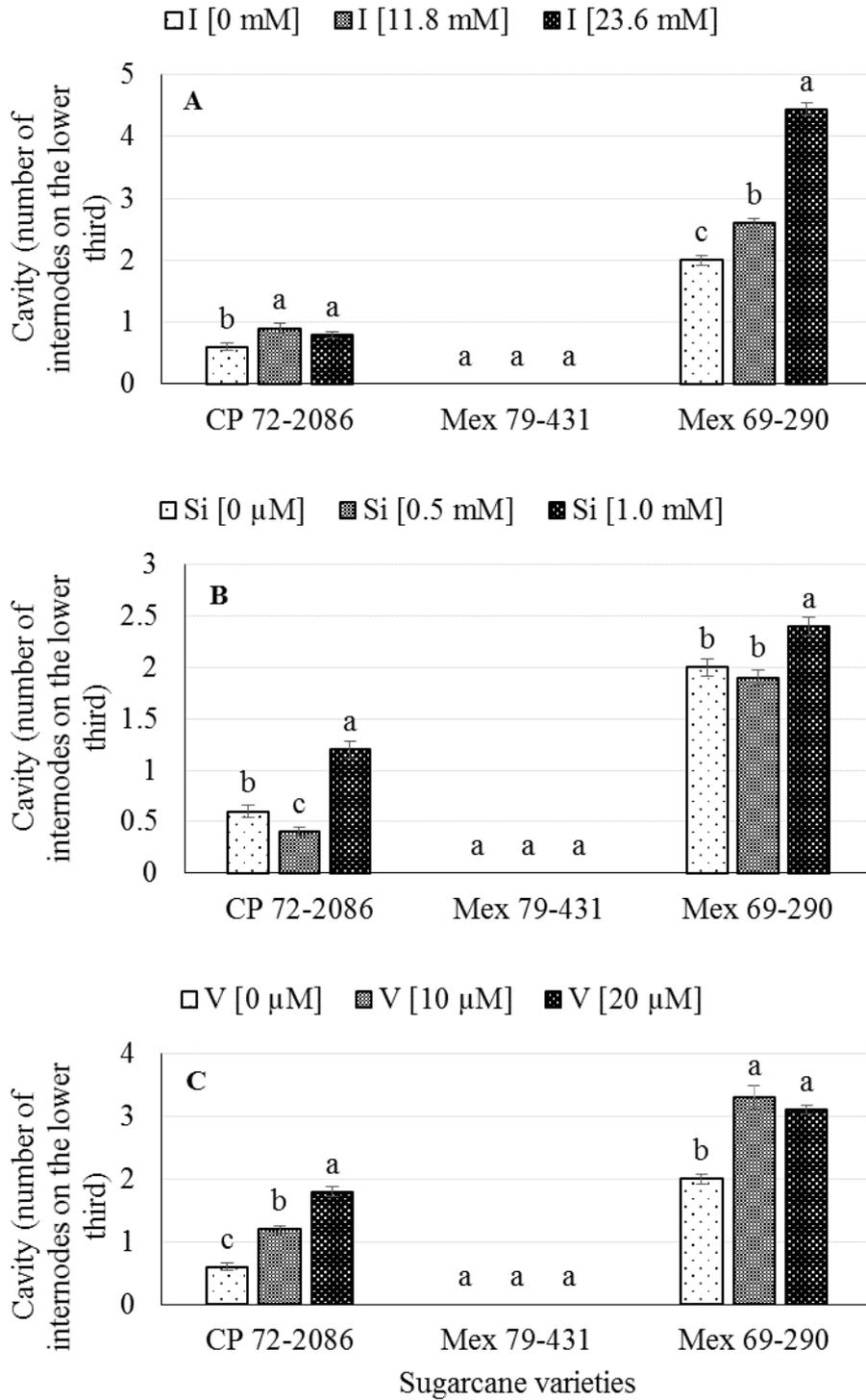


Figura 3. Oquedad por efecto de la aplicación foliar de los elementos benéficos I (A), Si (B) y V (C), en las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431 y Mex 69-290. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre tratamientos por variedad (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.6. Calidad industrial de los jugos

Los variables grados Brix y Sacarosa (%Pol) no tuvieron cambios significativos por efecto de los elementos benéficos probados y su concentración para las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290 (**Cuadro 2**), a excepción, del I en su concentración 23.6 mM I que en la variedad Mex 79-431 mostró una disminución significativa en dichos parámetros en comparación con el testigo (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Efecto de la aplicación foliar de los elementos benéficos I, Si y V en Grados Brix y Sacarosa contenidos en el jugo a los 4 meses después de aplicados los tratamientos.

Variedad	Grados Brix (%)			Sacarosa (%Pol)		
	[0 mM]	[11.8 mM]	[23.6 mM]	[0 mM]	[11.8 mM]	[23.6 mM]
	I					
CP 72-2086	16.1±0.40a	15.6±0.27a	15.9±0.39a	15.2±0.37a	14.8±0.28a	14.9±0.35a
Mex 79-431	16.0±0.32a	15.4±0.12ab	14.6±0.17b	15.1±0.27a	14.6±0.20ab	13.7±0.06b
Mex 69-290	15.4±0.18a	15.2±0.10a	15.1±0.09a	14.5±0.12a	14.2±0.13a	14.2±0.02a
	Si					
	[0 mM]	[0.5 mM]	[1.0 mM]	[0 mM]	[0.5 mM]	[1.0 mM]
CP 72-2086	16.1±0.40a	16.6±0.70a	15.6±0.11a	15.2±0.37a	15.7±0.69a	14.9±0.17a
Mex 79-431	16.0±0.32a	15.3±0.21a	15.5±0.21a	15.1±0.27a	14.3±0.32a	14.4±0.25a
Mex 69-290	15.4±0.18a	15.7±0.22a	14.5±0.37a	14.5±0.12a	14.7±0.19a	13.5±0.46a
	V					
	[0 µM]	[10 µM]	[20 µM]	[0 µM]	[10 µM]	[20 µM]
CP 72-2086	16.1±0.40a	16.0±0.18a	15.8±0.30a	15.2±0.37a	15.1±0.21a	14.8±0.39a
Mex 79-431	16.0±0.32a	15.8±0.27a	15.3±0.21a	15.1±0.27a	14.9±0.32a	14.2±0.26a
Mex 69-290	15.4±0.18a	15.3±0.24a	14.8±0.19a	14.5±0.12a	14.2±0.25a	13.8±0.19a

Medias ± DE con letras distintas en cada variable por variedad (hilera), indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

En relación con la fibra y humedad, se observaron diferencias estadísticas para cada variedad por efecto de elemento benéfico y su concentración (**Cuadro 3**). El I no afectó el contenido de fibra en las tres variedades de caña de azúcar ensayadas (**Cuadro 3**). En contraste, la aplicación de 0.5 y 1.0 mM Si redujo el porcentaje de fibra en la variedad CP 72-2086, en tanto que en las otras dos variedades no se observó efecto de los tratamientos (**Cuadro 3**). La aplicación de 20 μ M V redujo el porcentaje de fibra con valores de 11.5 y 12% para las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431, respectivamente, en comparación con el testigo. La variedad Mex 69-290 no mostró cambio alguno en esta variable (**Cuadro 3**). Para el caso de humedad, con la aplicación de 11.8 mM I la variedad CP 72-2086 presentó el mayor porcentaje (72.1%), mientras que al aplicar 23.6 mM I, el porcentaje de humedad más alto (72.4%) se observó en la variedad Mex 79-431. Dicho elemento no tuvo efecto en la variedad Mex 69-290 (**Cuadro 3**). La aplicación de 1.0 mM Si incrementó el porcentaje de humedad con valores de 72.3 y 71.6% para las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431, respectivamente, en comparación con el testigo. Está misma tendencia se observó con la aplicación de 20 μ M V, donde las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431 mostraron los porcentajes más altos con valores de 72.9 y 72.3%, respectivamente, en comparación con el testigo (**Cuadro 3**). En la variedad Mex 69-290 no hubo cambios significativos respecto a humedad por efecto de los elementos benéficos y concentraciones ensayadas (**Cuadro 3**).

Cuadro 3. Efecto de la aplicación foliar de los elementos benéficos I, Si y V en fibra y húmeda del tallo moledero a los 4 meses después de aplicados los tratamientos.

Variedad	Fibra (%)			Humedad (%)		
	I					
	[0 mM]	[11.8 mM]	[23.6 mM]	[0 mM]	[11.8 mM]	[23.6 mM]
CP 72-2086	13.1±0.07a	12.5±0.13a	12.9±0.69a	70.9±0.26b	72.1±0.23a	71.5±0.64b
Mex 79-431	13.1±0.54a	13.4±0.34a	13.2±1.04a	70.4±0.18b	70.6±0.45b	72.4±0.87a
Mex 69-290	11.0±0.19a	11.3±0.25a	12.2±0.27a	73.4±0.32a	73.2±0.32a	73.1±0.18a
	Si					
	[0 mM]	[0.5 mM]	[1.0 mM]	[0 mM]	[0.5 mM]	[1.0 mM]
CP 72-2086	13.1±0.07a	12.1±0.05b	11.6±0.27b	70.9±0.26b	71.8±0.27ab	72.3±0.13a
Mex 79-431	13.1±0.54a	13.2±0.72a	12.4±0.13a	70.4±0.18b	71.3±0.26ab	71.6±0.25a
Mex 69-290	11.0±0.19a	11.6±0.17a	11.8±0.45a	73.4±0.32ab	72.5±0.39b	73.9±0.29a
	V					
	[0 µM]	[10 µM]	[20 µM]	[0 µM]	[10 µM]	[20 µM]
CP 72-2086	13.1±0.07a	12.8±0.24a	11.5±0.31b	70.9±0.26b	71.3±0.25b	72.9±0.23a
Mex 79-431	13.1±0.54a	13.1±0.16a	12.±0.34b	70.4±0.36b	71.5±0.61ab	72.3±0.54a
Mex 69-290	11.0±0.19a	11.5±0.71a	11.2±0.22a	73.4±0.32a	73.0±0.31a	74.1±0.35a

Medias ± DE con letras distintas en cada variable por variedad (hilera), indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

Las variables de pureza del jugo y azúcares reductores no mostraron diferencias estadísticas significativas por efecto de la aplicación de los elementos benéficos en las tres variedades ensayadas (datos no mostrados).

4. Discusión

4.1. Crecimiento y desarrollo de las variedades

En el presente estudio se observaron respuestas diferenciales en las tres variedades de caña de azúcar a la aplicación foliar de I, Si y V en las concentraciones estudiadas en indicadores agronómicos, fisiológicos y de calidad. Nuestros resultados pueden ser explicados en términos del significado biológico de hormesis. Es un fenómeno de dosis-respuesta de relación difásica, con respecto a la amplitud y alcance de la respuesta generada, que se caracteriza por la estimulación en bajas dosis y una inhibición en dosis altas en la homeostasis celular (Calabrese y Baldwin, 1997, Calabrese y Baldwin, 2002, Calabrese y Blain, 2009). La forma de dicha relación dosis-respuesta, puede ser una U invertida o en forma de J (Calabrese, 2015). Para lo cual se han propuesto modelos matemáticos para dar mayor sustento a las curvas dosis-respuesta para estudiar la hormesis (An, 2005; Liu *et al.*, 2005). Por lo tanto, la aplicación de agentes potencialmente dañinos en dosis bajas para los organismos vivos, pueden inducir respuestas a diferentes tipos de estrés o influir en otros procesos metabólicos en las plantas (Shama y Alderson, 2005). Calabrese y Blain (2005), publicaron una base de datos de dosis-respuesta para la evaluación de la hormesis con alrededor de 5000 respuestas, basado en el diseño del estudio, magnitud de la dosis-respuesta, significancia estadística y reproducibilidad de los resultados. En 2011, esta base se amplió a 9000 respuestas, donde se incluye información de: modelo biológico, dosis y distribución de éstas, propiedades físicas y químicas de los agentes, entre otros aspectos relevantes (Calabrese y Blain, 2011). En este contexto, diversas investigaciones de dosis-respuesta, se han conducido para evaluar las respuestas horméticas de las plantas y los mecanismos subyacentes.

Cedergreen *et al.* (2007), dan evidencia del efecto hormético, en cuatro especies de plantas: una acuáticas *Lemna minor*, en la microalga *Pseudokirchneriella subcapitata* y dos terrestres *Tripleurospermum inodorum* y *Stellaria media*, expuestas a nueve herbicidas, un fungicida y mezclas binarias de éstos. Encontraron que se puede estimular el crecimiento relativo de las plantas en un 105% más que el testigo. Belz (2008), estudio el efecto hormético del sesquiterpeno lactona parthenin en plantas de mostaza (*Sinapis arvensis*). Encontró que la magnitud y ocurrencia de la hormesis depende de las condiciones climáticas y el parámetro medido. Condiciones menos estresantes, fueron propicias para incrementar el área foliar (138% más que el testigo). Conforme fue aumentando la dosis (0 a 3 kg ha⁻¹), el crecimiento del área foliar fue inhibido completamente. Velini *et al.* (2008), demostraron que dosis subtóxicas del herbicida glifosato estimula el crecimiento en un amplio rango de especies vegetales, por su efecto en la ruta del ácido shikímico.

En nuestro estudio, se observaron patrones distintos en las dosis-respuestas a los tres elementos benéficos ensayados para cada una de las variedades de caña de azúcar. Las concentraciones de I ocasionaron efectos contrastantes, por ejemplo: la dosis 11.8 mM I, en la variedad CP 72-2086 no presentó efecto alguno en la altura de planta, pero en las otras dos restantes, se presentó un decremento. Sin embargo, con la dosis de 23.6 mM I, se estimuló el crecimiento en las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431, mientras que en la Mex 69-290, fue reducido notoriamente. Dicho patrón se presentó con Si y V, en las variables evaluadas para cada variedad. Estos cambios pueden ser explicados desde una perspectiva genética, por la complejidad genómica que poseen las variedades actuales de caña de azúcar, ya que presentan un alto número cromosómico ($2n = 100-130$), de los cuales entre el 70 y 80% proviene de *S. officinarum*, del 10 al 20% de *S. spontaneum*, y aproximadamente el 10% son recombinaciones entre las dos especies (D'Hont *et al.*, 1995; Piperidis *et al.*, 2000). Además, está asociado con el alto nivel de ploidía, la ocurrencia de aneuploidía y su complejidad citogenética (Grivet y Arruda, 2001). Lo anterior da pauta que se presenten diferencias por

genotipo. Blanco *et al.* (2003), caracterizaron cuatro variedades de caña de azúcar, observando incrementos relativos de altura de planta y diámetro de tallo distintos, al igual que otras características de interés industrial, sin embargo, ellos estudiaron el comportamiento varietal, más no el nutricional. Viveros-Valens *et al.* (2014), realizaron un análisis con 19 variedades de caña de azúcar, y reportaron que tanto el diámetro de tallo como la altura de planta son indicadores determinantes en la selección de genotipos con caracteres superiores para rendimiento de materia verde y sacarosa. Con base a lo anterior, una alternativa viable para mejorar estos indicadores de rendimiento es el manejo nutrimental, y los elementos benéficos pueden desempeñar una función crucial en estimular el potencial productivo. En esta investigación, el diámetro de tallo y la altura de planta fueron afectados de manera diferencial dependiendo de la variedad y de las concentraciones de I, Si y V probadas. Por otra parte, los resultados obtenidos en el estudio pueden ser explicados con base al efecto hormético de iones metales tóxicos no esenciales. Estos iones son: Cd, Cr, Al, Pb, As y Se, los cuales estimulan el crecimiento basado en un proceso adaptativo compensatorio, donde actúan como elicitores de las respuestas de defensa de las plantas para estimular el crecimiento (Poschenrieder *et al.*, 2013). Estos iones presentan tres modos de acción para dar origen a curvas de crecimiento bifásicas, los cuales son: activación de defensas específicas para el estrés, activación de defensas generales y la interacción con substratos. Se pueden diferenciar tres curvas de dosis-respuesta para estos iones, en estudios de toxicología y nutrición vegetal: 1) la curva de nutrimentos esenciales; 2) la curva del umbral de toxicidad por un elemento tóxico no esencial en la que presenta un nivel sin efecto, y 3) la curva hormética, donde se presenta una estimulación del crecimiento por bajas concentraciones del elemento tóxico no esencial (Poschenrieder *et al.*, 2013). Por lo anterior, podemos incluir a los elementos benéficos I, Si y V, como iones horméticos no esenciales para las plantas, por los efectos positivos que mostraron en las diferentes concentraciones en las tres variedades probadas. Con base en lo anterior, se sustenta que la hormesis puede ser generalizable debido

a su plasticidad biológica que puede extenderse en modelos vegetales, microbianos y animales (Calabrese y Blain, 2011).

Sin embargo, la escasa información sobre esencialidad o efecto benéfico del I en el metabolismo de las plantas ha llevado a conjeturas que no pueden ser generalizables. Por ejemplo, Borst-Pauwels (1961), observó que concentraciones bajas de I (0.02 a 0.2 mg kg^{-1}) afectaron positivamente el crecimiento y desarrollo de plantas como las halófilas, lo cual contrasta con los hallazgos reportados por Zhu *et al.* (2003) en plantas de espinaca, ya que concentraciones mayores a $10 \text{ }\mu\text{M}$ afectan negativamente el rendimiento final. Nuestros resultados coinciden con el reporte inmediato anterior, ya que las dos concentraciones de I ensayadas redujeron significativamente los índices de crecimiento evaluados en las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290. De forma similar Macowiak y Grossl (1999), reportaron que la aplicación de 10 y 100 mM de yoduro tuvo efectos negativos en rendimientos de biomasa de plantas de arroz. Los efectos negativos del yoduro pueden deberse en parte a una acumulación excesiva de este elemento en los tejidos (Zhu *et al.*, 2003). En plantas de arroz crecidas en suelo y en un sistema hidropónico, la altura de planta y la biomasa de raíces fueron afectadas negativamente con la concentración de $100 \text{ }\mu\text{M IO}_3^-$ (Kato *et al.*, 2013). Por otra parte, en plantas de lechuga, concentraciones de 20 a $80 \text{ }\mu\text{M IO}_3^-$ estimularon la producción de biomasa, bajo condiciones de estrés por salinidad, además de reducir las concentraciones de Na^+ y Cl^- , así como activar enzimas antioxidantes como SOD, APX, DHAR y GR (Leyva *et al.*, 2011). Así, el I puede ejercer un efecto fitoprotector y estimular el crecimiento y desarrollo vegetal. Lo anterior demuestra que el I puede afectar de manera diferencial a las especies de plantas cultivadas y los efectos de éste dependerá de la concentración de I, la forma química y el método de aplicación, así como el tipo de ambiente de crecimiento (campo, invernadero, laboratorio) (Mackowiak *et al.*, 2005; Weng *et al.*, 2008a; Weng *et al.*, 2008b; Weng *et al.*, 2008c). En plantas de arroz, las raíces reducen el yodato a yoduro en el transcurso de varias horas, lo que indica una preferencia por este ion para su absorción (Kato *et al.*, 2013). Lo anterior,

indica que el I tiene efectos en la hormesis de las plantas, y ésta dependerá de la especie vegetal y de la especie química y concentración del mismo.

El Si puede estimular el crecimiento y desarrollo de las plantas por la protección que otorga contra efectos perjudiciales del estrés abiótico y biótico (Epstein, 1999). Plantas de pepino crecidas en un sistema de recirculación de la solución nutritiva conteniendo dos concentraciones, baja y alta, de 10 y 100 mg L⁻¹ de SiO₂, respectivamente, mostraron aumento de la rigidez de las hojas, color verde más intenso y reducción de la senescencia de éstas, incremento de la biomasa fresca y seca, del contenido de clorofila y de la actividad de la Rubisco, además de proporcionar mayor resistencia a fitopatógenos (Adatia y Besford, 1986). Estas evidencias se han replicados en diversos cultivos tales como en arroz (Hossain *et al.*, 2002; Datnoff y Rodrigues, 2005; Ning *et al.*, 2014), avena (Borda *et al.*, 2007; Toledo *et al.*, 2011), sorgo (Hodson y Sangster, 1993; Lux *et al.*, 2003; Hattori *et al.*, 2005; Sonobe *et al.*, 2011; Ahmed *et al.*, 2011; Hattori *et al.*, 2003; Masarovič *et al.*, 2012) y en caña de azúcar (Savant *et al.*, 1999; Meyer y Keeping, 2000; Savant *et al.*, 2008; Keepinga *et al.*, 2009; Sousa y Korndörfer, 2010; Camargo *et al.*, 2013; Keeping *et al.*, 2015). De hecho, el Si es el elemento benéfico más estudiado en caña de azúcar, y esta planta posee una gran capacidad para absorber y acumular dicho elemento (Korndörfer, 2010). El descubrimiento de los efectos benéficos del Si en caña de azúcar fue reportado por primera vez por D'Hotman De Viliers en 1937 (Meyer y Keeping, 2001). Estudios posteriores reportaron que la aplicación de escoria de silicato mostró efectos estimulantes en el crecimiento de la caña de azúcar (Clements, 1965; Ayres, 1966). Es por ello que, el Si se ha utilizado como fertilizante en Brasil, Australia, Sudáfrica y la India (Epstein, 1999). La caña de azúcar puede absorber cantidades que oscilan entre 300 y 700 kg ha⁻¹ Si (Snyder *et al.*, 2006). Samuels (1969) encontró que un cañaveral de 12 meses de edad puede acumular en parte aérea hasta 370 kg ha⁻¹ Si, en comparación con las concentraciones de K y N, que fueron de 362 y 140 kg ha⁻¹, respectivamente. Por lo anterior se atribuye que suelos deficientes en Si representan un factor limitante en los rendimientos de caña de azúcar. Roos *et al.*

(1974) reporta una remoción de este elemento de 408 kg ha⁻¹, para una productividad de apenas 74 t ha⁻¹ de caña (hojas más tallo), lo cual implicaría que en sistemas más productivos esta remoción podría ser mucho más alta (Korndörfer, 2010). De hecho, la aplicación de fertilizantes solubles de Si en dosis menores a 200 kg ha⁻¹ de Si incrementa rendimiento y reduce daños por *Diatrea saccharalis* (Ye y Hu, 1995; Camargo *et al.*, 2014). En nuestra investigación, se replicaron los efectos benéficos del Si en las tres variedades de caña estudiadas, ya que se observó un incremento en el crecimiento de las plantas. Este efecto estimulante puede ser debido a que el Si influye en la señalización de hormonas endógenas como giberelinas (GA), ácido jasmónico (JA), ácido salicílico (SA), el ácido abscísico (ABA) y etileno (ET), principalmente en eventos de estrés promovidos por salinidad, sequía y metales pesados (Kim *et al.*, 2015). El incremento en las concentraciones de GA es una estrategia paliativa que contrarresta el estrés abiótico y mantiene el crecimiento y desarrollo de la planta. Soundararajan *et al.* (2013), reportaron que los niveles de GA endógeno en plantas de *Salvia splendens* sometidas a estrés salino por NaCl, fueron modificados por la aplicación de Si, con mejoras en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Hwang *et al.* (2007), en condiciones de campo, encontraron que la aplicación de N y Si promueve la bioactivación de GA₁ y de su promotor inmediato GA₂₀, aumentando sus niveles en cultivares de arroz. La regulación transcripcional es un proceso fundamental en la inmunidad de las plantas. La inducción o represión de genes de defensa está orquestada por las redes que están dirigidos por hormonas vegetales de los cuales el ácido jasmónico (JA) y ácido salicílico (SA) son los principales actores de señalización (Caarls *et al.*, 2015). En respuesta a los diferentes tipos de estrés, la planta acumula JA y derivados, los cuales juegan un papel importante en las respuestas de defensa (Pieterse *et al.*, 2012). Se ha demostrado que el tratamiento con Si exógeno en condiciones por estrés por salinidad resulta en una reducción el JA en comparación con el testigo. Dicho cambio en el nivel de JA, es debido a que las plantas tratadas con Si, presentan un menor estrés (Epstein, 2009; Liang *et al.*, 2005). El SA, es un mecanismo de defensa a patógenos y de tolerancia a estrés abiótico como

sequía, salinidad y metales pesados (Hara *et al.*, 2012). En una condición de estrés por metales pesado, se han observado mayores niveles de SA, sin embargo, con el tratamiento con Si disminuye el SA, lo cual indica que Si puede estar relacionado con la modulación de dicha hormona (Kim *et al.*, 2015). El ABA, se acumula en el tejido vegetal con el fin de evitar la pérdida de agua con el cierre de estomas durante estrés por salinidad (Munns y Tester, 2008; Ollas *et al.*, 2013). La biosíntesis de ABA esta medida por las enzimas zeaxantina epoxidasa (ZEP) (Agrawal *et al.*, 2001) y 9-cis-epoxicarotenoide dioxigenasa (NCED) (Shinozaki *et al.*, 2003), y sus funciones se han estudiado en condiciones de salinidad, sin embargo, aún no se conocen los mecanismos de respuesta a la aplicación de Si. Plantas de arroz tratadas con Si en condiciones de estrés por salinidad, reducen la expresión de ARNm, comparación con el testigo, lo que indica que las plantas de arroz absorben Si para contrarrestar el efecto de la salinidad y la concentración de ABA se reduce significativamente (Kim *et al.*, 2015). El ET también actúa en defensa a factores de estrés abiótico (Von Dahl y Baldwin, 2007). De acuerdo con Kim *et al.* (2011), las aplicaciones exógenas de Si no afectan a la biosíntesis de ET en plantas de arroz en condiciones óptimas de crecimiento, pero en condiciones de estrés como heridas mecánicas, la producción de ET es disminuida significativamente en comparación con las plantas no tratadas con Si. La nutrición con Si disminuye significativamente la peroxidación de lípidos causada por el exceso de Mn, inhibe la aparición de síntomas de toxicidad por Mn y mejora el crecimiento de plantas de pepino (Shi *et al.*, 2005). Estos efectos están relacionados con el aumento de la actividad de las enzimas SOD, APX, dehidroascorbato reductasa (DHAR) y glutatión reductasa (GR) y las mayores concentraciones de ascorbato y el glutatión (Shi *et al.*, 2005). Caracteres agronómicos y de calidad son mejorados en condiciones de estrés por salinidad cuando es suministrado Si [1.4 a 2.8 mM], en genotipos de caña de azúcar sensibles y tolerantes al estrés salino (Asharf *et al.*, 2010). Aplicaciones foliares de Si al 2%, mejoran la actividad de las enzimas sacarosa sintasa y sacarosa fosfato sintasa (Pawar *et al.*, 2003).

El vanadio es un elemento de crucial importancia para la fotosíntesis y crecimiento de fitoplancton (Nalewajko *et al.*, 1995) y esencial para algunas especies de algas, hongos y bacterias fijadoras de nitrógeno. Por ejemplo, el V resulta determinante en la formación de la holoenzima de la peroxidasa de bromo, yodo y cloro (Anke, 2004). Sin embargo, la biodisponibilidad y la concentración de este elemento determina el efecto benéfico o su toxicidad en el metabolismo de las plantas (Larsson *et al.*, 2013). Para el caso de algas como *Scenedesmus obliquus* y *Chlorella pyrenoidosa* se puede incrementar de cinco a seis veces el crecimiento en condiciones autótrofas durante siete días en presencia de NH_4VO_3 (Meisch y Bielig, 1975). Dicho efecto benéfico en el crecimiento se observó en la presente investigación para las variedades Mex 79-431 y Mex 69-290, ya que promovió en crecimiento y desarrollo con la concentración más alta de V (**Figuras 1 y 2**). Esto demuestra que muchos organismos presentan sistemas selectivos y eficientes para captar, transportar y acumular concentraciones altas de vanadio, como es el caso de las ascidias que poseen un grupo de proteínas llamadas vanabins, que son una única familia de proteínas de unión a vanadio que se encuentran involucradas en el *metabolismo del V* (Ueki *et al.*, 2003; Yamaguchi *et al.*, 2006). Por otro lado, el V es capaz de inhibir la actividad de muchas enzimas y proteínas implicadas en procesos biológicos catalíticos, incluyendo ATPasas, fosfatasas, ribonucleasas, fosfodiesteras, fosfoglucomutasas y glucosa-6-fosfatasa, entre otras, debido a que este elemento presenta propiedades fisicoquímicas análogas al fosfato, que muestran una mayor flexibilidad en esta geometría de coordinación, analizados en células eucariontes (Nechay y Saunders, 1978; McLauchlan *et al.*, 2010), y esto puede ocurrir en plantas superiores, lo indica la necesidad de nuevas investigación en nutrición y bioquímica funcional de la caña de azúcar, enfocadas a elementos benéficos, debiso a que el V, interfieren con una matriz esencial de los sistemas enzimáticos tales como diferentes ATPasas, quinasas de proteínas, ribonucleasas y fosfatasas (Mukherjee *et al.*, 2004). Por lo anterior, los mecanismos que yacen y las similitudes estructurales o funcionales con otros elementos esenciales, aun no están elucidados, lo que se requiere hacer mayor investigación en áreas omicas.

En lo que respecta a la oquedad, ésta es un indicador de deterioro interno de tallos en forma de ahuecamiento que ocurre en los entrenudos del tercio inferior hacia el tercio medio (la caña se divide en tres secciones y corresponde al número total de entrenudos dividido entre tres, y éstas a su vez forman los tres tercios, inferior, medio y superior) hacia arriba durante las etapas de máximo crecimiento y maduración, lo cual es una condición no deseable en el crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar y que se traduce en una reducción del rendimiento y calidad final de los tallos molederos (IMPA, 1975; 1983). Por tanto, la selección basada en oquedad es uno de los principales criterios de eliminación de variedades en etapas tempranas de programas de mejoramiento genético, ya que afecta significativamente el peso de los tallos y puede tener variación entre variedades, además de una alta heredabilidad (Gravois *et al.*, 1990). El presente estudio, no se observaron cambios significativos para las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431. Sin embargo, para la variedad Mex 69-290, la oquedad aumentó con la aplicación de I en su concentración alta, lo que infiere que la formación de oquedad también puede ser un factor dependiente del estado nutricional de la planta. Con esta evidencia, surge la necesidad de continuar las investigaciones sobre los efectos de los elementos benéficos a mayor rango de dosis y con un mayor número de elementos, en más genotipos de caña de azúcar adaptados a diferentes ambientes productivos. Si se logra demostrar que la oquedad se puede modificar con algún elemento benéfico, entonces éste ya no sería un carácter discriminativo en los programas de mejoramiento genético, lo que significa aumentar la presión de selección de individuos en dicho programa para incrementar la variabilidad genética de esta gramínea.

Aunque para los programas de mejoramiento genético de caña de azúcar la floración es un carácter deseable, para el productor este proceso representa mermas en la calidad de la materia prima (Casagrande y Machado-de-Vasconcelos, 2010). Tasso-Júnior *et al.* (2009) estudiaron la variación genotípica de la floración y formación de médula en seis variedades de caña de azúcar, y mostraron que un alto número de tallos sin flor tiene una baja formación de

médula. En el presente trabajo, la aplicación de V (en ambas concentraciones probadas) y 11.8 mM I en la variedad CP 72-2086 (**Figura 3A**), inhibieron la floración en un 100 y 80%, respectivamente. En el caso de variedad Mex 79-431 (**Figura 3B**), se observaron resultados similares con la aplicación de 1.0 mM Si y 10 μ M V. La floración es un proceso fisiológico complejo afectado por factores tanto de naturaleza externa, entre los que se pueden citar fotoperiodo, temperatura, humedad, radiación solar, fertilidad del suelo, como de naturaleza interna, entre los que se incluyen fitocromos, hormonas, florígenos, ácidos nucleicos, entre otros, y el conocimiento de estos factores ha permitido manipular el proceso de floración a través del mejoramiento genético o la aplicación de reguladores vegetales (Araldi *et al.*, 2010). Se conocen alrededor de 29 genes que activan la transición del meristemo vegetativo a la inflorescencia (McSteen *et al.*, 2000; Araldi *et al.*, 2010). Tras la transición a la floración, el meristemo vegetativo se convierte en un meristemo de inflorescencia. El meristemo de inflorescencia entonces da lugar a meristemas axilares, llamados meristemas sucursales, que producen meristemas espiguillas y meristemas florales finalmente (McSteen *et al.*, 2000). En caña de azúcar la inducción florar en el hemisferio Norte ocurre en los meses de agosto, septiembre y octubre y la floración de octubre a enero (Casagrande y Machado-de-Vasconcelos, 2010). En el caso de nuestro experimento, la primera aplicación foliar de elementos benéficos ocurrió en el mes de septiembre y se repitió la dosis en octubre, que coincidió con el periodo del estímulo floral, y en consecuencia no se presentó la transición del meristemo vegetativo al floral por la acción de Si para la variedad Mex 79-431, y de V y I para las variedades CP 72-2086 y Mex 79-431.

Si bien no se conocen a detalle los efectos de elementos como I, Si y V en los procesos de floración y formación de médula de la caña de azúcar, se conocen algunos efectos de estos elementos en diferentes especies de plantas.

El I tiene efectos negativos en el proceso de floración en plantas de tomate, Wen-Jin *et al.* (2010), encontraron que concentraciones de 5 y 6 mg L⁻¹ reducen significativamente la cantidad de flores. En la presente investigación, se observó

un efecto similar, ya que la concentración 11.8 mM I inhibió en un 80% la floración de la variedad CP 72-2086. Estas evidencias indican que las respuestas a la aplicación de I dependen del tipo y especie de planta, además que altas concentraciones de I pueden conducir a efectos inhibitorios en la secreción de hormonas, transporte de glucosa y aminoácidos y en la biosíntesis de ARN y proteínas (Aceves *et al.*, 2013). Un estudio del efecto antimicrobiano del yodo a nivel de la expresión génica en la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, reveló que a concentraciones de 0.5, 0.75 y 1 mM, el I induce alteraciones en la transcripción de genes de componentes C y del metabolismo de hidratos de carbono para la producción de energía y rescate de células, como un efecto similar al de un bactericida para la agricultura (Kitagawa *et al.*, 2005). Con ello, es posible postular que la aplicación de I a baja concentración pueda estar modulando la expresión de ciertos genes implicados en floración, lo cual requiere mayores investigaciones.

Por otro lado, aunque se han estudiado los efectos del Si en el crecimiento y desarrollo de diversos cultivos, incluyendo caña de azúcar, son escasos los trabajos sobre los efectos de dicho elemento en la floración. Recientemente, Espinoza *et al.* (2015), reportaron el sinergismo que proporciona el SiO₂ al producto comercial ethephon (ácido 2-cloroetilfosfónico) en la inhibición de la floración en la variedad CP 88-1165, ya que este proceso fisiológico se redujo en 0.6, 15.7 y 2.6% para tres zafras consecutivas a partir del año 2009 hasta 2012, respectivamente, con incrementos en la productividad del cultivo por hectárea. Los resultados mostrados pueden estar enmascarados ya que no se incluyó un tratamiento con solo la aplicación de SiO₂, para determinar su uso potencial en la reducción de la floración y la mejora de la calidad de la producción de caña por hectárea. En nuestro trabajo se observó una reducción de la floración en las variedades Mex 79-431 del 100% con la aplicación de la concentración 1.0 mM Si y como fuente fue el SiO₂.

Respecto a V, su estudio en algunos organismos vivos ha mostrado que puede tener tanto efectos deletéreos (Chongkid *et al.*, 2007) como beneficiosos. En

garbanzo, la aplicación de 200 mg L⁻¹ NaVO₃ produjo una alta tasa de germinación (>99%) y un alto contenido de isoflavonas, incluyendo formononetina y biochanina A (Zhang *et al.*, 2012). En términos productivos, el efecto del V que se observó en este estudio fue positivo, ya que inhibió en 100% la floración (carácter no deseable para producción de azúcar de caña) en ambas concentraciones usadas. A pesar de que el V posee potenciales efectos tóxicos y genotóxicos (Mandiwana y Pinichev, 2006), puede presentar efectos benéficos como por ejemplo inducir el metabolismo secundario (Saco *et al.*, 2013). El vanadio afecta la actividad de diferentes enzimas como haloperoxidasas (Crans *et al.*, 2004), nitrato reductasas (Rehder, 2008) y nitrogenasas (Rehder, 2013). Los iones de vanadio pueden interactuar con proteínas de unión al ADN, como es el caso de la topoisomerasa I, ya que el vanadato forma enlaces covalentes entre el residuo catalítico de tirosina de la subunidad pequeña y los extremos abiertos del ADN (Davies *et al.*, 2006, Perry *et al.*, 2010). El V también inhibe la actividad catalítica de enzimas como ribonucleasas o ARNasas y, en consecuencia, el V es utilizado para prevenir la escisión de ARN por la ribonucleasa (Crans *et al.*, 2004). De allí que sean varios los genes en células eucariontes pueden ser activados por este elemento traza tales como: factor de necrosis tumoral alfa (TNF- α), La interleucina-8 (IL-8), activador de la proteína-1 (AP-1), interruptores-reguladores moleculares Ras, proto-oncogén c-RAF-1, proteína quinasa activada por mitógenos (MAPK), guardian del genoma (p53), factor de transcripción nuclear kappa B (NF- κ B), etc (Mukherjee *et al.*, 2004). Estas evidencias, abren nuevas líneas de investigación tanto para inducir como para inhibir el florecimiento en caña de azúcar. En este contexto, dado que en términos productivos la inhibición de la floración en caña de azúcar es deseable, ya que permite mantener los parámetros de calidad por más tiempo hasta el momento de la cosecha, el uso integral de estos elementos benéficos ofrece una alternativa de manejo nutrimental o bioestimulante para la producción de caña de azúcar.

4.2. Calidad industrial de los jugos

En los programas de mejoramiento de caña de azúcar, la capacidad de síntesis de azúcar y el rendimiento de azúcar en fábrica constituyen caracteres de importancia mayúscula para la selección de genotipos. Sin embargo, en la mayoría de los programas, es difícil obtener rendimientos mayores al 18% de pol (sacarosa) (Tonatto *et al.*, 2009) y los aumentos en la producción de azúcar son debidos a incrementos en la producción de caña (Jackson, 2005). De hecho, de acuerdo con Milligan *et al.* (1990), el rendimiento de caña es el determinante del rendimiento de sacarosa, y éste último depende del número de tallos, así como de la altura y diámetro del tallo, siendo el diámetro la característica de mayor importancia como determinante de rendimiento.

La calidad de la caña de azúcar como materia prima está definida como una serie de características intrínsecas propias de la planta, alterada por el manejo agrícola e industrial, las cuales definen su potencial para la producción de azúcar (Fernandes, 2003). Andrade (2006) menciona que una caña madura y de calidad debe tener las características siguientes: Brix (% de sólidos solubles) mayores o igual al 18%, pol (% de sacarosa aparente) mayor o igual a 14.4%, pureza del jugo mayor o igual al 80% y azúcares reductores (glucosa y fructuosa) menor o igual a 1.4%. El proceso de maduración de la caña de azúcar en México inicia a partir del mes de noviembre, marcando el inicio de la zafra que concluye hasta el mes de mayo o junio, dependiendo de las condiciones de clima (Sentíes-Herrera *et al.*, 2014). Al inicio de este periodo las condiciones climáticas determinantes para dicho proceso se caracterizan por la disminución de la temperatura y de la precipitación y estas condiciones climáticas tienen influencia directa en la maduración a lo largo del periodo de zafra, dividiendo este periodo en tres partes, para variedades de maduración temprana, media y tardía, lo que compromete la calidad de la caña como materia prima (Flores-Cáceres, 2001). El empleo de maduradores ha estado encaminado a aumentar los rendimientos sin afectar la producción del cultivo tratado ni comprometer su desarrollo en el ciclo agrícola posterior (Villegas y Arcila, 2003). Por otra parte, Salgado *et al.* (2000), mencionan

que el suministro de nutrimentos es una de las mejores prácticas para incrementar los rendimientos de caña y sobre todo la cantidad de sacarosa. Sin embargo, un desbalance nutrimental podría ocasionar problemas fisiológicos, los cuales pueden repercutir en la maduración de la caña de azúcar. Por ejemplo, el exceso de nitrógeno disminuye la calidad de los jugos, con baja en la concentración de sacarosa y aumento en la de azúcares reductores (Salgado *et al.*, 2003). En el presente estudio no se presentó diferencia estadística en los indicadores de calidad determinados en las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290, dado que éstos se encontraron entre los rangos óptimos de madurez y calidad de jugos reportados por Andrade (2006) (datos no mostrados), lo que indica que los elementos benéficos evaluados (I, Si y V) no influyeron en la calidad de estos sólidos y por tanto en la calidad del jugo. Sin embargo, la aplicación de I si mostró un cambio significativo en los grados Brix y pol (sacarosa) en la variedad Mex 79-431 (**Cuadro 1**), pues el nivel más alto de I produjo el valor más bajo en ambas características de calidad y estadísticamente fueron diferentes al testigo. Por su parte, Pawar *et al.* (2003) observaron que las aplicaciones foliares de Si (2%) incrementaron la sacarosa sintasa y actividades de la sacarosa fosfato sintasa en las hojas, aunque no se cambió el contenido de azúcar comercial media. La fertilización con Si, no solo ha demostrado mejorar el crecimiento y rendimientos de los cultivos, sino también mejora la calidad de los mismos, y esto se respalda con los resultados obtenidos en diversos cultivos como arroz, caña de azúcar, hortalizas y frutas. Por ejemplo, características de calidad de jugo de caña de azúcar como °Brix, pol, azúcar de caña comercial y de recuperación de azúcar en dos genotipos (SPF 213 y HSF 240) sensibles y tolerantes a la salinidad por NaCl también fueron significativamente mejorados por el Si (Ashraf *et al.*, 2009). Smoleń *et al.* (2014), aplicaron yodato y yoduro en la biofortificación de plantas de zanahoria y lograron aumentar el valor de los grados Brix respecto a plantas testigo, lo cual resulta contrario a lo que se encontró en esta investigación. Por su parte, Salgado *et al.* (2003), probaron diferentes dosis de fertilización con N, P y K, y determinaron la calidad del jugo, y no encontraron diferencias significativas en los grados Brix, pureza, sacarosa y humedad, resultados similares a los

observados en este estudio con la aplicación foliar de I, Si y V, para dos de las tres variedades estudiadas, lo que muestra que cada variedad responde de manera diferente. Estas evidencias reafirman la necesidad de desarrollar investigaciones específicas para cada genotipo de caña de azúcar.

En conclusión, en esta investigación ha sido posible demostrar que los elementos benéficos tienen efectos diferenciales en la fisiología de las variedades de caña de azúcar evaluadas. Destaca el hecho de que en la variedad CP 72-2086 los valores de diámetro de tallo y altura de planta pueden aumentar con la aplicación de 0.5 y 1.0 mM Si, mientras que con la aplicación de 10 y 20 μ M V y de 11.8 mM I pueden inhibir el proceso de floración y producción de médula significativamente. La oquedad se incrementa por la aplicación de los tres elementos benéficos. En la variedad Mex 79-431, se puede incrementar considerablemente la altura de la planta con la aplicación de 0.5 mM Si y 20 μ M V, en tanto que el diámetro con 20 μ M V puede también incrementar. El proceso de floración y producción de médula puede inhibirse con la aplicación de 0.1 mM Si y 10 μ M V. En la variedad Mex 69-290, se observaron efectos negativos ya que las aplicaciones de 10 μ M V y 23.6 mM redujeron la altura de la planta, al igual que el diámetro de tallo. Sin embargo, la aplicación de 0.5 mM Si y 20 μ M V puede incrementar la altura de la planta. En lo referente a oquedad, los tres elementos presentaron un incremento en esta condición, destacando las dosis de 0.5 y 1.0 mM Si, 20 μ M V y 23.6 mM I.

Respecto a la calidad industrial de los jugos, no se presentaron efectos por la aplicación de Si, V ni I en la calidad industrial del jugo de las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290. Para el caso de la variedad Mex 79-431, la aplicación de I en su concentración baja disminuyó tanto los grados Brix como la sacarosa. En general, la aplicación foliar de I, Si y V mostraron efectos benéficos en el crecimiento y desarrollo de las variedades en estudio, y no hubo afectaciones significativas en la calidad industrial de las tres variedades, que es la condicionante más importante para determinar la cosecha en caña de azúcar.

5. Perspectivas futuras

En este estudio se da a conocer efectos benéficos de I, Si y V, pero también se abre nuevas líneas de investigación, tales como evaluar y determinar curvas de dosis-respuesta para los efectos horméticos de estos elementos. Aunado a ello, estudios de genómica y metabolómica, pueden ayudar a explicar los mecanismos que yacen de tras de los efectos en el metabolismo de las plantas. Identificación de genes, factores de transcripción, rutas metabólicas (metabolismo primario y secundario). Lo anterior dará lugar a una serie de mecanismos o estrategias específicas para mejorar un carácter de interés como parámetros de crecimiento y desarrollo o de interés industrial. También son una opción para mitigar los efectos de estrés bióticos y abióticos emergentes por efectos del cambio climático. A pesar de la infinidad de datos que se puedan generar, se deben estandarizar experimentos, que estos sean reproducibles y puedan extrapolarse a otros organismos para tener mayor confiabilidad de los resultados. La participación de diferentes disciplinas en ciencias biológicas permitirá la creación de modelos y patrones para la puesta en marcha de nuevos experimentos, para evaluar la universalidad de los efectos de los elementos benéficos, desde una perspectiva de fisiología y bioquímica funcional.

6. Literatura citada

- Aceves, C., Anguiano, B., and Delgado, G. (2013). The Extrathyronine Actions of Iodine as Antioxidant, Apoptotic, and Differentiation Factor in Various Tissues. *THYROID*. 23(8): 938-946. doi: 10.1089/thy.2012.0579
- Adatia, M.H., and Besford, R.T. (1986). The Effects of Silicon on Cucumber Plants Grown in Recirculating Nutrient Solution. *Annals Botany*. 58(3): 343-351.
- Ahmed, M., Fayyaz-ul-Hassen, Qadeer, U., and Aslam, M.A. (2011). Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. *African Journal of Agricultural Research*. 6(3): 594-607. doi: 10.5897/AJAR10.626

- An, M. (2005). Mathematical modelling of dose-response relationship (hormesis) in allelopathy and its application. *Nonlinearity in Biology, Toxicology and Medicine*. 3: 153-172. doi: 10.2201/nonlin.003.02.001
- Andrade, L.A.B., 2006. "Cultura de cana de açúcar," in *Produção de aguardente de cana*, 2ª Edição, ed M. G. Cardoso. (UFLA), 25-67.
- Anke, M. (2004). Vanadium-An element both essential and toxic to plants, animals and humans? *Anal. Real Acad. Nac. Farm.* 70: 961-999.
- Araldi, R., Lima-Silva, F. M., Orika-Ono, E. e Domingues-Rodrigues, J. (2010). Florescimento em cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, Santa Maria. 40(3): 694-702. ISSN 0103-8478.
- Ashraf, M., Rahmatdatullah, A.M., Ahmed, R., Mujeeb, F., Sarwar, A., Ali, L. (2010). Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Plant and Soil*. 326(1): 381-391. doi: 10.1007/s11104-009-0019-9
- Ayres, A. (1966). Calcium silicate slag as a growth stimulant for sugarcane on low silicon soils. *Soil Science*. 101(3): 216-217.
- Belz, R. G. (2008). Stimulation versus inhibition-bioactivity of Parthenin, a phytochemical from *Parthenium hysterophorus* L. *Dose-Response*. 6(1): 80-96. doi: 10.2203/dose-response.07-007.Belz
- Blanco, M. A., Borroto, J., Golles, J. L., Capdesuñer, Y., Cervantes, A., Rodríguez, S., Rivas, M. y Peralta, H. (2003). Dinámica del crecimiento y desarrollo de cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum* sp.): aspectos fisiológicos y azucareros. *Cultivos Tropicales*. 24(1): 47-54.
- Borda, O.A., Barón, F.H., y Gómez, M.I. (2007). El silicio como elemento benéfico en avena forrajera (*Avena sativa* L.): respuestas fisiológicas de crecimiento y manejo. *Agronomía Colombiana*. 25(2): 273-279. ISSN 0120-9965.
- Borst-Pauwels, G.W.F.H. (1961). Iodine as a micronutrient for plants. *Plant and Soil*. 14(4): 377-392.
- Caarls, L., Pieterse, C. M. and Van-Wees, S. C. How salicylic acid takes transcriptional control over jasmonic acid signaling. *Frontiers in Plant Science*. 6: 170. doi: 10.3389/fpls.2015.00170

- Calabrese, E. J. (2015). Hormesis: principios y aplicaciones. *Homeopathy*. 104(2):69-82. doi:10.1016/j.homp.2015.02.007
- Calabrese, E. J. and Baldwin, L. A. (2002). Defining hormesis. *Human & Experimental Toxicology*. 21: 91-97. doi:10.1191/0960327102ht217oa
- Calabrese, E. J. and Blain, R. (2005). The occurrence of hormetic dose responses in the toxicological literature, the hormesis database: an overview. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 202: 289-301. doi:10.1016/j.taap.2004.06.023
- Calabrese, E. J. and Blain, R. (2011). The hormesis database: The occurrence of hormetic dose responses in the toxicological literatura. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 61(1): 73-81. doi:10.1016/j.yrtph.2011.06.003
- Calabrese, E. J. and Blain, R. B. (2009). Hormesis and plant biology. *Environmental Pollution*. 157(1): 42-48. doi:10.1016/j.envpol.2008.07.028
- Camargo, M.S., Korndörfer, G.H., and Wyler, P. (2014). Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. *Field Crops Research*. 167: 64-75. doi:10.1016/j.fcr.2014.07.009
- Camargo, M.S.; Rocha, G., and Korndörfer, G.H. (2013). Silicate fertilization of tropical soils: silicon availability and recovery index of sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 37(5): 1267-1275. ISSN 0100-0683.
- Casagrande, A. A. e Machado-de-Vasconcelos, A. C. (2010). "Fisiologia da parte aérea," *In Cana-de-açúcar*, eds L. L. Dinardo-Miranda, A. C. M. Vasconcelos, M. G. A. Landell (Instituto Agronomico Campinas), 221-237.
- Cedergreen, N., Streibig, J. C., Kudsk, P., Mathiasen, K. and Duke, S. O. (2007). The occurrence of hormesis in plants and algae. *Dose-Response*. 5: 150-162. doi: 10.2203/dose-response.06-008.Cedergreen
- Chongkid, B., Vachirapatama, N., and Jirakiattikul, Y. (2007). Effects of V on rice growth and vanadium accumulation in rice tissues. *Kasetsart Journal (Nat. Sci.)*. 41: 28-33.
- Clements, H.F. (1965). The roles of calcium silicate slags in sugarcane growth. *Repts Hawaiian Sugarc Technol*. 25: 103-126.
- Crans, D.C., Smee, J.J., Gaidamauskas, E., and Yang, L. (2004). The chemistry and biochemistry of vanadium and the biological activities exerted by

- vanadium compounds. *Chemical Reviews*. 104(2): 849-902. doi: 10.1021/cr020607t
- D'Hont, A., Rao, P.S., Feldmann, P., Grivet, L., Islam-Faridi, N., Taylor, P. and Glaszmann, J.C., (1995). Identification and characterisation of sugar cane intergeneric hybrids, *Saccharum officinarum*, *Erianthus arundinaceus*, with molecular markers and ADN *in situ* hybridization. *Theoretical and Applied Genetics*. 91: 320-326. doi: 10.1007/BF00220894
- Datnoff, L.E., and Rodrigues, F.A. (2005). The role of silicon in suppressing rice diseases. APSnet Feature. Disponible en: <http://www.apsnet.org/publications/apsnetfeatures/Documents/2005/SiliconRiceDiseases.pdf>
- Davies, D.R., Mushtaq, A., Interthal, H., Champoux, J. J. and Hol, W.G.J. (2006). The Structure of the Transition State of the Heterodimeric Topoisomerase I of *Leishmania donovani* as a Vanadate Complex with Nicked DNA. *J. Mol. Biol.* 357: 1202-1210. doi:10.1016/j.jmb.2006.01.022
- Epstein, E. (1999). Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 50: 641-664. doi: 10.1146/annurev.arplant.50.1.641
- Epstein, E. (2009). Silicon: its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology*. 155: 155-60. doi:10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x
- Epstein, E., and Bloom, A.J. (2005). *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. New York: Wiley & Sons. 400 pp.
- Espinoza, J.G., López, K., Corado, M., López, M., Soto, D., y Salazar, A. (2015). Efecto de ethephon y dióxido de silicio (55%) sobre la floración de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) variedad CP 88-1165, finca santa marta, ingenio Madre Tierra. Disponible en: <http://www.cengicana.org/es/publicaciones/memorias/func-startdown/545/>
- FAO. (2015). FAOSTAT. Food and agricultural commodities production. Commodities by country. Mexico. Disponible en: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- Fernandes, A. C. 2003. Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar. (STAB), 240 p.

- Flores-Cáceres, C.S. (2001). Las variedades de caña de azúcar en México. (ATAM), 308 p.
- García-Espinoza, A. (1984). Manual de campo de caña de azúcar. (Serie de Divulgación Técnica IMPA. Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar), 468 p.
- Golcher, A., Hasbach, A., R. F., y Infante, M. J. J. (1984). Manual para analistas de laboratorio azucarero. (AZÚCAR, S. A. de C. V. GEPLACEA-PNUD), 180 p.
- Gravois, K.A., Milligan, S.B., and Martin, E.A. (1990). The role of pith, tube, and stalk density in determining sugarcane sucrose content and stalk weight. *Theoretical and Applied Genetics*. 79(2): 273-277.
- Grivet, L. and Arruda, P. (2001). Sugarcane genomics: depicting the complex genome of an important tropical crop. *Current Opinion in Plant Biology*. 5: 122-127. doi:10.1016/S1369-5266(02)00234-0
- Hara, M., Furukawa, J., Sato, A. (2012). "Abiotic stress and role of salicylic acid in plants," *In Abiotic stress responses in plants: metabolism, productivity and sustainability*, eds P. Ahmad, M. N. V. Parsad (Springer Science), 235-251.
- Hattori, T., Inanaga, S., Tanimoto, E., Lux, A., Luxová, M., and Sugimoto, Y. (2003). Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. *Plant Cell Physiol*. 44(7): 743-749. doi: 10.1093/pcp/pcg090
- Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., Luxová, M., and Lux, A. (2005). Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum*. 123: 459-466. doi: 10.1111/j.1399-3054.2005.00481.x
- Hodson, M.J., and Sangster, A.G. (1993). The Interaction Between Silicon and Aluminium in *Sorghum bicolor* (L.) Moench: Growth Analysis and X-ray Microanalysis. *Annals of Botany*. 72(5): 389-400. doi:10.1006/anbo.1993.1124
- Hossain, M.T., Mori, R., Soga, K, Wakabayashi, K., Kamisaka, S., Fujii, S., Yamamoto, R., and Hoson, T. (2002). Growth promotion and an increase in

- cell wall extensibility by silicon in rice and some other Poaceae seedlings. *Journal of Plant Research*. 115(1): 23-27.
- Hwang, S. J., Hamayu, M., Kim, H. Y., Na, C. I., Kim, K. U., Shin, D. H., Kim, S. Y. and Lee, I. J. (2007). Effect of nitrogen and silicon nutrition on bioactive gibberellin and growth of rice under field conditions. *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 10(4): 281-286.
- IMPA. (1975). Veinticinco años de investigación cañera en México. (Centro Nacional de Investigaciones Azucareras), 303 p.
- IMPA. (1983). Programa de variedades. Objetivos, Importancia y Metodología Experimental. (Centro Nacional de Investigaciones Azucareras), 63 p.
- Jackson, P.A. (2005). Breeding for improved sugar content in sugarcane. *Field Crops Research*. 92:277-290. doi:10.1016/j.fcr.2005.01.024
- Kanamori, K., and Tsuge, K. (2012). "Inorganic Chemistry of Vanadium," *In Vanadium Biochemical and Molecular Biological Approaches*, ed. H. Michibata. (Springer), 3-31. doi: 10.1007/978-94-007-0913-3
- Kato, S., Wachi, T., Yoshihira, K., Nakagawa, T., Ishikawa, A., Takagi, D., Tezuka, A., Yoshida, H., Yoshida, S., Sekimoto, H., and Takahasshi, M. (2013). Rice (*Oryza sativa* L.) roots have iodate reduction activity in response to iodine. *Frontiers in Plants Science*. 4:227. doi: 10.3389 / fpls.2013.00227
- Keeping, M. G., and Meyer, J. H. (2003). Effect of four sources of silicon on resistance of sugarcane varieties to *Eldana saccharina* (Lepidoptera: Pyralidae). *Proc S Afr Sug Technol Ass*. 7: 99-103.
- Keeping, M. G., Kvedaras, O. L., and Bruton, A. G. (2009). Epidermal silicon in sugarcane: Cultivar differences and role in resistance to sugarcane borer *Eldana saccharina*. *Environmental and Experimental Botany*. 66(1): 54-60.
- Keeping, M.G., Rutherford, R.S., Sewpersad, C., and Miles, N. (2015). Provision of nitrogen as ammonium rather than nitrate increases silicon uptake in sugarcane. *AoB PLANTS*. 7: plu080. doi:10.1093/aobpla/plu080
- Keepinga, M.G., Kvedarasa, O.L., and Brutonc, A.G. (2009). Epidermal silicon in sugarcane: Cultivar differences and role in resistance to sugarcane borer

- Eldana saccharina*. Environmental and Experimental Botany. 66: 54-60. doi:10.1016/j.envexpbot.2008.12.012
- Kim, Y.H., Khan, A.L. and Hamayun, M. (2011). Influence of short-term silicon application on endogenous phytohormonal levels of *Oryza sativa* L. under wounding stress. Biological Trace Element Research. 144(1): 1175-85. doi: 10.1007/s12011-011-9047-4
- Kim, Y.H., Khan, A.L., and Lee, I.J. (2015). Silicon: a duo synergy for regulating crop growth and hormonal signaling under abiotic stress conditions. Journal: Critical Reviews in Biotechnology. 18: 1-11. PMID: 26381374
- Kitagawaa, E., Akamab, K., and Iwahashia, H. (2005). Effects of Iodine on Global Gene Expression in *Saccharomyces cerevisiae*. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry. 69(12): 2285-2292. doi:10.1271/bbb.69.2285
- Korndörfer, G. H., Colombo, C. A., e Leone, P. C. L. (2000). Termofosfato como fonte de silício para a cana-de-açúcar. Revista STAB. 19(1): 34-36.
- Korndörfer, G. H., Pereira, H. S., e Camargo, M. S. (2002). Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. Revista STAB. 21(2): 6-9.
- Korndörfer, G.H. (2010). "Silício," in Cana-de-açúcar, eds L. L. Dinardo-Miranda, A. C. M. Vasconcelos, M. G. A. Landell (Instituto Agronomico Campinas), 337-346.
- Kulcheski, F. R., Côrrea, R., Gomes, I. A., de Lima, J. C., and Margis, R. (2015). NPK macronutrients and microRNA homeostasis. Front. Plant Sci. 6: 451. doi: 10.3389/fpls.2015.00451
- Kumar-Agrawal, G., Jwa, N. S. and Kumar-Agrawal, S. (2003). Cloning of novel rice allene oxide cyclase (OsAOC): mRNA expression and comparative analysis with allene oxide synthase (OsAOS) gene provides insight into the transcriptional regulation of octadecanoid pathway biosynthetic genes in rice. Plant Science. 164(6): 979-92. doi:10.1016/S0168-9452(03)00082-7
- Larrahondo, J.E. (1995). "Calidad de la caña de azúcar", *In* El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, eds D. C. Cassalett, A. J. S. Torres y E. C. H. Isaacs (CENICAÑA): 337-354.

- Larsson, M.R., Baken, S., Gustafsson, J.P., Hadialhejazi, G., and Smolders, E. (2013). Vanadium bioavailability and toxicity to soil microorganisms and plants. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 32(10): 2266–2273. doi: 10.1002/etc.2322
- Leyva, R., Sánchez-Rodríguez, E., Ríos, J.J., Rubio-Wilhelmi, M.M., Romero, L., Ruiz, J.M., and Blasco, B. (2011). Beneficial effects of exogenous iodine in lettuce plants subjected to salinity stress. *Plant Science*. 181: 195-202. doi:10.1016/j.plantsci.2011.05.007
- Liang, Y., Wong, J. and Wei, L. (2005). Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. *Chemosphere*. 58:475-83.
- Liu, Y., Chen, X., Duan, S., Feng, Y. and An, M. (2011). Mathematical modeling of plant allelopathic hormesis based on ecological-limiting-factor models. *Dose-Response*. 9: 117-129. doi: 10.2203/dose-response.09-050.liu
- Lux, A., Luxová, M., Abe, J., Tanimoto, E., Hattori, T., and Inanaga, S. (2003). The dynamics of silicon deposition in the sorghum root endodermis. *New Phytologist*. 158: 437-441. doi: 10.1046/j.1469-8137.2003.00764.x
- Mackowiak, C.L., and Grossl, P.R. (1999). Iodate and iodide effect on iodine uptake and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture. *Plant and Soil*. 212:135-143.
- Mackowiak, C.L., Grossl, P.R., and Cook, K.L. (2005). Iodine toxicity in a plant-solution system with and without humic acid. *Plant and Soil*. 269: 141-150. doi 10.1007/s11104-004-0401-6
- Mandiwana, K. L., and Panichev, N. (2006). Speciation analysis of plants in the determination of V (V) by ETAAS. *Talanta*. 70: 1153-1156. doi:10.1016/j.talanta.2006.03.010
- Martínez, R. A. (2011). Aplicación de sílice en caña de azúcar en tres zafras consecutivas entre 2007 y 2010 en la Florida. *Revista Tecnicaña*. 27: 27-30.
- Masarovič, D., Slováková, L., Bokor, B., Bujdoš, M., and Lux, A. (2012). Effect of silicon application on *Sorghum bicolor* exposed to toxic concentration of zinc. *Biologia*. 67(4): 706-712. doi: 10.2478/s11756-012-0054-5

- McLauchlan, C.C., Hooker, J.D., Jones, M.A., Dymon, Z., Backhus, E.A., Greiner, B.A., Dorner, N.A., Youkhana, M.A., and Manus, L.M. (2010). Inhibition of acid, alkaline, and tyrosine (PTP1B) phosphatases by novel vanadium complexes. *Journal of Inorganic Biochemistry*. 104(3): 274-281. doi:10.1016/j.jinorgbio.2009.12.001
- McSteen, P., Laudencia-Chingcuanco, D. and Colasanti, J. (2000). A floret by any other name: control of meristem identity in maize. *Trends in Plant Science*. 5(2): 61-66. doi:10.1016/S1360-1385(99)01541-1
- Meisch, H.U. and Bielig, H.J. (1975). Effect of vanadium on growth, chlorophyll formation and iron metabolism in unicellular green algae. *Arch. Microbiol*. 105: 77-82.
- Meyer, J.H., and Keeping, M.G. (2001). "Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern Africa," *In Silicon in Agriculture*, eds L. E, Datnoff, G. H. Snyder, and G. H. Korndörfer (Elsevier). 8: 257–275.
- Meyer, J.H.; and Keeping, M.G. (2000). Review of research into the role of silicon for sugarcane production. *Proceedings of the Annual Congress-South African Sugar Technologists' Association*. 74: 29-40. ISSN 1028-3781.
- Milligan, S.B., Gravois, K.A., Bischoff, K.P., Martin, F.A. (1990). Crop effects on genetic relationships among sugarcane traits. *Crop Science*. 30:927-931.
- Mukherjee, B., Patra, B., Mahapatra, S., Banerjee, P., Tiwari, A., and Chatterjee, M. (2004). Vanadium-an element of atypical biological significance. *Toxicology Letters*. 150: 135-143. doi:10.1016/j.toxlet.2004.01.009
- Nalewajko, C., Lee, K. and Jack, T.R. (1995). Effects of vanadium on freshwater phytoplankton photosynthesis. *Water, Air and Soil Pollution*. 81: 93-105.
- Nechay, B.R., and Saunders, J.P. (1978). Inhibitory characteristics of cadmium, lead, and mercury in human sodium and potassium dependent adenosinetriphosphatase preparations. *J Environ Pathol Toxicol*. 2(2): 283-90.
- Ning, D., Song, A., Fan, F., Li, Z., and Liang, Y. (2014). Effects of slag-based silicon fertilizer on rice growth and brown-spot resistance. *PLOS ONE*. 9(7): e102681. doi:10.1371/journal.pone.0102681

- Nitschke, U., Stengel, D. B. 2014. Iodine contributes to osmotic acclimatization in the kelp *Laminaria digitata* (Phaeophyceae). *Planta*. 239(2): 521-530. doi: 10.1007/s00425-013-1992-z.
- NMX-F-267-1991. Industria azucarera. Muestras de jugo de caña de azúcar sacarosa clergel-Método de prueba. Sugar industry. Samples of sugar cane juice-clergel sucrose-Method of test Dirección General de Normas. Disponible en: <http://www.cndsca.gob.mx/eficienciaproductiva/normas/2013/NMX-f-267-1991.pdf>
- NMX-F-277-1991. Industria Azucarera. Muestras de jugo de caña de azúcar. Substancias reductoras. Método de prueba. Sugar industry. Samples of sugar cane juice. Reducing substances. Method of test. Normas Mexicanas. Dirección General de Normas. Disponible en: file: <http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-277-1991.PDF>
- NMX-F-456-1983. Alimento. Fibra en muestras de caña de azúcar. Método de prueba. Foods. Fiber in samples of sugar cane. Method of test. Normas Mexicanas. Dirección General de Normas. Disponible en: <http://www.cndsca.gob.mx/eficienciaproductiva/normas/2014/NMX-F-456-1983.PDF>
- Pawar, M.W., Joshi, S.S., and Amodkar, V.T. (2003). Effect of foliar application of phosphorus and micronutrients on enzyme activities and juice quality in sugar cane. *Sugarc Tech*. 5(3): 161-165.
- Perry, K., Hwang, Y., Bushman, F.D., and Duyne, G.D.V. (2010). Insights from the structure of a smallpox virus topoisomerase-DNA transition state mimic. *Structure*. 18(1): 127. Davies, D.R., Mushtaq, A., Interthal, H., Champoux, J.J., and Hol, W.G.J. (2006). The structure of the transition state of the heterodimeric topoisomerase I of *Leishmania donovani* as a vanadate complex with nicked DNA. *Journal of Molecular Biology*. 357:1202–1210. doi:10.1016/j.jmb.2006.01.022
- Pieterse, C.M., Van-der-Does, D., Zamioudis, C., Leon-Reyes, A. and Van-Wees, S. C. (2012). Hormonal Modulation of Plant Immunity. *Annual Review of Cell*

- and Developmental Biology. 28: 489-521. doi: 10.1146 / annurev-cellbio-092.910-154.055
- Pilon-Smits, E.A., C.F. Quinn, W. Tapken, M. Malagoli., and M. Schiavon. (2009). Physiological functions of beneficial elements. Current Opinion in Plant Biology. 12: 267-274. doi:10.1016/j.pbi.2009.04.009
- Piperidis, G., Christopher, M.J., Carroll, B.J., Berding, N. and D'Hont, A., (2000). Molecular contribution to selection of intergeneric hybrids between sugar cane and the wild species *Erianthus arundinaceus*. Genome. 43(6): 1033-1037.
- Poschenrieder, C., Cabot, C., Martos, S., Gallego, B. and Barceló, J. (2013). Do toxic ions induce hormesis in plants? Plants Science. 212: 15-20. doi:10.1016/j.plantsci.2013.07.012
- Rehder, D. (2008). Is vanadium a more versatile target in the activity of primordial life forms than hitherto anticipated? Organic & Biomolecular Chemistry. 6: 957-964. doi: 10.1039/b717565p
- Rehder, D. (2013). The future of/for vanadium. Dalton Transactions. 42 (33): 11749-11761. doi: 10.1039/C3DT50457C
- Rodríguez-Mercado, J. J., y Altamirano-Lozano, M. A. (2006). Vanadio: contaminación, metabolismo y genotoxicidad. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 22(4): 173-189.
- Roos, L., Nababsing, P., and Cheong, Y.W. (1974). "Residual effect calcium silicate to sugarcane soils," In International Congress Society of Sugar Cane Technologist. 15(2): 539-542.
- Saco, D., Martín, S., and San-José, P. (2013). Vanadium distribution in roots and leaves of *Phaseolus vulgaris*: morphological and ultrastructural effects. Biologia Plantarum. 57(1): 128-132. doi: 10.1007/s10535-012-0133-z
- Salgado-García, S., Lagunes-Espinoza, L. C., Núñez-Escobar, R., Ortiz-García, C. F., Bucio-Alanis, L., y Aranda-Ibañez, E. (2013). Caña de azúcar. Producción sustentable, (Mundi-Prensa. Colegio de Postgraduados, México, 2013), 528 p.

- Salgado-García, S., Nuñez-Escobar, R., y Bucio-Alanis, L. (2003). Determinación de la dosis óptima económica de fertilización en caña de azúcar. *Terra Latinoamericana*. 21(2): 267-272.
- Samuels, G. (1969) Silicon and sugar. *Sugar y Azucar*. 66(4): 25-29.
- Savant, N.K., Korndorfer, G.H., Datnoff, L.E., and Snyder, G.H. (1999). Silicon nutrition and sugarcane production: a review. *Journal of Plant Nutrition*. 22(12):1853-1903. doi:10.1080/01904169909365761
- Savant, N.K., Korndörfer, G.H., Datnoff, L.E., and Snyder, G.H. (2008). Silicon nutrition and sugarcane production: A review. *Journal of Plant Nutrition*. 22(12): 1853-1903. doi: 10.1080/01904169909365761
- Sentíes-Herrera, H. E., Gómez-Merino, F. C., Valdez-Balero, A., Silva-Rojas- H. V., and Trejo-Téllez, L. I. (2014). The agro-industrial sugarcane system in Mexico: current status, challenges and opportunities. *Journal of Agricultural Science*. 6(4): 26-54. doi:10.5539/jas.v6n4p26
- Sentíes-Herrera, H.E., y Gómez-Merino, F. C. (2014). Nuevas directrices en mejoramiento genético de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad*. 7(2): 9-15.
- Shama, G. and Alderson, P. (2005). UV hormesis in fruits: a concept ripe for commercialisation. *Trends in Food Science & Technology*. 16(4): 128-136. doi:10.1016/j.tifs.2004.10.001
- Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., He, Y., Qian, Q. and Yu, J. (2005). Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. *Phytochemistry*. 66(13): 1551-1559. doi: 10.1016/j.phytochem.2005.05.006
- Shinozaki, K., Yamaguchi-Shinozaki, K. and Seki, M. (2003). Regulatory network of gene expression in the drought and cold stress responses. *Current Opinion in Plant Biology*. 6(5): 410-417. doi:10.1016/S1369-5266(03)00092-X
- Smoleń, S., and Sady, W. (2011). Influence of soil application of iodine and sucrose on mineral composition of spinach plants. *Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus*. 10(3): 3-13.

- Smoleń, S., Sady, W., Ledwożyw-Smoleń, I., Strzetelski, P., Liszka-Skoczylas, M., and Rożek, S. (2014). Quality of fresh and stored carrots depending on iodine and nitrogen fertilization. *Food Chem.* 159: 316-22. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.03.024.
- Snyder, G.H., MatDatchenkova, V.V., and Datnoff, L.E. (2006). "Silicon," *In Plant Nutrition*, ed Fla, B.G (Taylor & Francis), 551–562.
- Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, A.E., Kobayashi, S., Kawamura, Y., Tanaka, K., and Inanaga, S. (2011). Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. *Journal of Plant Nutrition.* 34(1): 71-82. doi: 10.1080/01904167.2011.531360
- Soto-Esparza, M. (1986). Localidades y climas del estado de Veracruz. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos, 137 p.
- Soundararajan, P., Sivanesan, I., Jo, E. H. and Jeong, B. R. (2013). Silicon promotes shoot proliferation and shoot growth of *Salvia splendens* under salt stress *in vitro*. *Horticulture, Environment and Biotechnology.* 54(4): 311-318. doi 10.1007/s13580-013-0118-7
- Sousa, R.T.X., and Korndörfer. (2010). Utilization of silicon from metallurgy slag by sugarcane. *Sugar Tech.* 12(2): 98-103.
- Tasso-Júnior, L. C., Omir-Marques, M., da Silva-Neto, H. F., Camilotti, F., Hemrique-Bernardi, J. e Rodrigues-Nogueira, T. A. (2009). Variação genotípica no florescimento, isoporização e características tecnológicas em seis cultivares de cana-de-açúcar. *Revista de Biologia e Ciências da Terra.* 9(1): 12-18.
- Toledo, M.Z., Garcia, R.A., Merlin, A., and Fernandes, D.M. (2011). Seed germination and seedling development of white oat affected by silicon and phosphorus fertilization. *Scientia Agricola.* 68: 18.23. ISSN 0103-9016.
- Tonatto, M.J., Romero, E.R., Leggio-Neme, M.F., Digonzelli, P.A., Casen, S.D., Giardina, J.A., Alonso, L.G.P., Scandaliaris, J. y Fernandez-de-Ullivarri, J. (2009). "Mejora de la calidad de la matdateria prima" *In Manual del cañero*, eds E.R. Romero, P.A. Digonzelli. y J. Scandaliaris (Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Tucumán, Argentina), 247 p.

- Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., y Álcantar-González, G. (2007). "Elementos benéficos," *In* Nutrición de Cultivos, eds G. Álcantar-González y L. I. Trejo-Téllez (Mundi-Prensa), 49-91.
- Ueki, T., Adachi, T., Kawano, S., Aoshima, M., Yamaguchi, N., Kanamori, K. and Michibata, H. (2003). Vanadium-binding proteins (Vanabins) from a vanadium-rich ascidian *Ascidia sydneiensis samea*. *Biochim Biophys Acta*. 1626: 43-50.
- Velini, E. D., Alves, E., Gody, M. C., Meschede, D. K., Souza, R. T. and Duke, S. O. (2007). Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth. *Pest Management Science*. 64: 489-496. doi: 10.1002/ps.1562.
- Villegas, T. F. y Arcila, A. J. (2003). Maduradores en caña de azúcar. Manual de procedimientos y normas para su aplicación. (CENICAÑA), 66 p.
- Viveros-Valens, C. A., Baena-Garcia, D., Salazar-Villareal, F., Orlando-López, L. y Victoria, K. J. I. (2014). Características de la caña de azúcar asociadas con toneladas de caña por hectárea y sacarosa (%caña). Disponible en: file: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/viewFile/44494/51613
- Von-Dahl, C. C. and Baldwin, T. I. (2007). Deciphering the role of ethylene in plant-herbivore interactions. *Journal of Plant Growth Regulation*. 26(2): 201-209. doi: 10.1007/s00344-007-0014-4
- Weng, H.X., Hong, C.L., Yan, A.L., Pan, L.H., Qin, Y.C., Bao, L.T., Xie, L.L. (2008a). Mechanism of iodine uptake by cabbage: effects of iodine species and where it is stored. *Biological Trace Element Research*. 125: 59-71. doi 10.1007/s12011-008-8155-2
- Weng, H.X., Weng, J.K., Yan, A.L., Hong, C.L., Yong, W.B., and Qin, Y.C. (2008b). Increment of iodine content in vegetable plants by applying iodized fertilizer and the residual characteristics of iodine in soil. *Biological Trace Element Research*. 123: 218-228. doi 10.1007/s12011-008-8094-y
- Weng, H.X., Yan, A.L., Hong, C.L., Xie, L.L., Qin, L.C., Cheng, C.Q. (2008c). Uptake of different species of iodine by water spinach and its effect to growth.

Biological Trace Element Research. 124: 184-194. doi 10.1007/s12011-008-8137-4

Wen-Jin, Y., Yan, Y., Cheng-Gang, Z., Ming-Hua, L., Xiao-Fu, T., Jie-Yun, L., You-jie, Y., Fei-Hui, T., Xue-Ying, D., and Zhi, Q. (2010). Effect of Iodine on Flowering, Bearing and Yield of Cherry Tomato. *China Vegetables*. 1(4): 57-61.

Yamaguchi, N., Amakawa, Y., Yamada, H., Ueki, T. and Michibata, H. (2006). Localization of Vanabins, Vanadium-Binding Proteins, in the Blood Cells of the Vanadium-Rich Ascidian, *Ascidia sydneiensis samea*. *Zoological Science*. 23: 909-915. doi:10.2108/zsj.23.909

Ye, C. and Xu, J. (1995). Yield-increasing effect of high-efficient silicate fertilizer on sugarcane. *Fujian Agric Sci Technol*. 4: 13-4. (In Chinese).

Zhang, L., Mao, X., and Xia, Z. (2012). Effects of sodium metavanadate and germination on the sprouting of chickpeas and its content of vanadium, formononetin and biochanin A in the sprouts. *J. Diet. Suppl*. 9(1): 34-44. doi: 10.3109/19390211.2011.639858.

Zhu, Y.G., Huang, Y.Z., Hu, Y., and Liu, Y.X. (2003). Iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) plants grown in solution culture: effects of iodine species and solution concentrations. *Environment International*. 29: 33-37. doi:10.1016/S0160-4120(02)00129-0

CAPÍTULO III

Elementos benéficos en la hibridación de caña de azúcar: Respuestas fisiológicas durante y después del cruzamiento, y producción de semilla botánica

Resumen

En este estudio se probó el efecto de los elementos benéficos Al (50, 100 y 150 μM), I (20, 40 y 60 μM), La (10, 20 y 30 μM), Si (5, 10 y 15 μM) y Ti (25, 50 y 75 μM) durante el proceso de hibridación de caña de azúcar, en respuestas fisiológicas durante y después del cruzamiento, producción de semilla botánica y en la germinación. En general, estos elementos afectaron significativamente el pH y la conductividad eléctrica (CE) de la solución aséptica, y con efecto en la reducción del diámetro del raquis central y del diámetro del tallo. Los valores de las unidades SPAD se incrementaron sobre todo con Al y La, y se redujeron con I y Ti. En algunos casos, la apertura floral fue estimulada, lo mismo que la tasa de germinación en específico con Si y el porcentaje de germinación. Se concluye que la aplicación de estos elementos puede modificar la calidad de las semillas y su germinación, lo cual es benéfico para los programas de hibridación en caña de azúcar.

Palabras clave: *Saccharum* spp., hibridación, fuzz, aluminio, yodo, lantano, silicio, titanio

Abstract

In this study we tested the effect of the beneficial elements Al (50, 100 and 150 μM), I (20, 40 and 60 μM), La (10, 20 and 30 μM), Si (5, 10 and 15 μM) and Ti (25, 50 and 75 μM) during the process of hybridization of sugarcane, on physiological responses during and after crossing, production of botanical seed and effects on germination. In general, these elements did not significantly affect the pH or the electrical conductivity of the aseptic solution, and there was little effect on the reduction of the diameter of the central spine and the diameter of the stem. SPAD units were stimulated mostly with Al and La and were reduced with I and Ti. In some cases, the floral opening was stimulated, as well as the germination rate with Si and germination percentage. It is concluded that the application of these elements can modify the quality of the seeds and their germination, which is beneficial for the programs of hybridization in sugarcane.

Keywords: *Saccharum* spp., breeding, fuzz, aluminum, iodine, lanthane, silicon, titanium

3.1. Introducción

En México, el cultivo y aprovechamiento de la caña de azúcar (*Sachharum* spp.) llegó con el arribo de los españoles en el Siglo XVI. Desde ese entonces, en el país ha habido avances significativos en el conocimiento y manejo de este cultivo y fue en 1952 cuando inició la estructuración oficial de programa de mejoramiento genético para esta especie. En la actualidad este programa se encuentra bajo la dirección del Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar, A. C. (CIDCA), que cuenta con un banco de germoplasma compuesto por 3,184 variedades, de las cuales 1,133 son mexicanas y 2,051 extranjeras. Estas variedades se encuentran clasificadas por sexo, para dar lugar a 16 Bancos de Cruzamiento, y así continuar cada año con los trabajos de mejoramiento genético de esta especie (Senties-Herrera *et al.*, 2014; Senties-Herrera *et al.*, 2017; CIDCA, 2017). Dicho programa es reconocido entre los más de 25 programas de mejoramiento genético de caña de azúcar a nivel mundial, los cuales mantienen un gran número de clones seleccionados en programas regionales, importados de otras estaciones y de especies silvestres de las colecciones mundiales (Machado-Junior, 2002), y el de México no es la excepción. Entre los eslabones más importantes de la cadena de valor de la caña de azúcar en México destaca el desarrollo de nuevas y mejores variedades, con características sobresalientes agroindustriales y de adaptabilidad a las diferentes regiones cañeras del país (Senties-Herrera *et al.*, 2014), lo que garantiza el crecimiento, la competitividad y la sustentabilidad de esta agroindustria. Para llevar a cabo el proceso del mejoramiento genético de esta gramínea, el proceso de floración es la principal característica agronómica y fisiológica deseable para los fitomejoradores (Salgado-García *et al.*, 2013). El conocimiento de este proceso, para el establecimiento y buena ejecución de los cruzamientos, permite la generación de combinaciones híbridas entre progenitores sobresalientes para las características agroindustriales de interés (Silva *et al.*, 2013). Durante la hibridación, se realiza el armado y el establecimiento del cruzamiento, los cuales son colocados en las casas de hibridación, para que se lleve a cabo la polinización y finalmente la obtención de semilla botánica (fuzz) (Landell y Bressiani, 2010). Lo anterior se

realiza en dos tipos de cruzamientos: los biparentales (apareamiento de dos individuos de sexo diferente) y multiparentales (apareamiento de tres o más individuos de diferente sexo). Ambos cruzamientos se realizan en farol para evitar la contaminación de polen extraño (Sentíes-Herrera *et al.*, 2014). Para prolongar la longevidad de las inflorescencias hasta 25 días, se utiliza una solución aséptica, la cual está compuesta por ácidos no volátiles y volátiles. Dentro de los no volátiles se encuentran los ácidos fosfórico, sulfúrico y nítrico, mientras que el ácido sulfuroso representa a los volátiles (Liu, 1965). En el programa de mejoramiento de caña de azúcar de México, esta solución ha sido utilizado desde su inicio (hace poco más de 50 años), lo que significa que no se han estudiado nuevas formulaciones de soluciones en el desarrollo y viabilidad de la inflorescencia, y producción de semilla botánica (fuzz).

Una alternativa viable para mejorar los cruzamientos es incluir a los elementos benéficos en las soluciones asépticas para mejorar indicadores de crecimiento, desarrollo y respuestas a factores ambientales (Pilon-Smits *et al.*, 2009; Trejo-Téllez *et al.*, 2016), al momento de establecer el cruzamiento. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de la adición de los elementos benéficos aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) en la solución aséptica utilizada por el CIDCA, en diferentes indicadores fisiológicos del tallo y de la inflorescencia, así como en la producción y viabilidad de la semilla botánica o fuzz, en dos categorías de germinación: baja y media.

3.1.1. Marco teórico

Dentro de la clasificación de los nutrimentos, existe un grupo de elementos que sin ser esenciales para las plantas, al ser suministrados por diferentes vías pueden ejercer un efecto favorable en el crecimiento y desarrollo de las plantas, y que son conocidos como elementos benéficos. Estos elementos pueden ser esenciales para determinados grupos taxonómicos, pero que no son requeridos por todas las plantas (Pilon-Smits *et al.*, 2009). Dichos elementos, pueden favorecer o mejorar una condición e intervenir en diferentes rutas metabólicas que activen mecanismos de defensa a estrés biótico y abiótico, favorecer el

aprovechamiento de otros nutrimentos, entre otros beneficios más (Trejo-Téllez *et al.*, 2016). A continuación se describen las potencialidades de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti), su concentración benéfica y cultivos en los que se han probado.

3.1.1.1. Aluminio

El aluminio (Al) es uno de los constituyentes predominantes de la mayoría de los suelos y es causante de estrés para las plantas en suelos ácidos. La mayor parte del Al en suelo se encuentra como aluminosilicatos y otras formas de precipitados, que no afectan a las plantas. Sin embargo, en condiciones de acidez en el suelo (pH menor a 4.2), estos minerales son solubilizados, de tal forma que el ion Al^{3+} es liberado y forma parte de la solución del suelo; a pH entre 5.0 y 6.2 las especies presentes no son tóxicas para las plantas (Kinraide, 1997). El Al^{3+} es capaz de inhibir el crecimiento de raíces y dañar las células del ápice de ésta, que es la parte más sensible a Al^{3+} (Ryan *et al.*, 1993; Kochian, 1995). Dicho ion (Al^{3+}), puede interactuar con numerosas estructuras dentro y fuera de la célula y alterar mecanismos fisiológicos, incluyendo modificaciones en los mecanismos de comunicación y transporte en la pared y la membrana celular, interrupción de vías de señalización y de unión del Al^{3+} al ADN (Kochian *et al.*, 2004). La toxicidad ocasionada por Al^{3+} ha sido tema de investigación de diversos grupos alrededor del mundo, y se han descubierto diversos mecanismos de respuesta y de tolerancia a este metal en plantas cultivadas en suelos ácidos (Poschenrieder *et al.*, 2008; Bojórquez-Quintal *et al.*, 2017). Por otro lado, también se ha documentado que el Al puede tener efectos benéficos en el crecimiento y desarrollo de las plantas, sobre todo cuando es administrado como estimulante a bajas concentraciones, como el incremento de crecimiento radicular al ser suministrado a 40 μM en canola (Clune y Copeland, 1999); esta misma estimulación se observó en abedul (*Betula pendula*) al suministrar Al a concentraciones de 2 a 5 $mg L^{-1}$ (Kidd y Proctor, 2000), lo cual facilita el establecimiento de la plántula (Nosko *et al.*, 1988). A concentraciones entre 100 a 300 $mg L^{-1}$, incrementa la vida de florero en flores de corte (Jowkar *et al.*, 2013) y

también puede aumentar el contenido de proteínas a una concentración de 50 μM (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2007). Por otra parte, el Al, se le atribuyen efectos horméticos como respuesta a la mitigación a un estrés latente (Poschenrieder *et al.*, 2013). Puede contribuir a aumentar la actividad antioxidante, además de favorecer la absorción de N, P y K, disminuir la toxicidad por Fe y Mn, lo cual induce la estimulación del crecimiento de las plantas (Osaki *et al.*, 1997; Ghanati *et al.*, 2005; Watanabe *et al.*, 2005; Pilon-Smits *et al.*, 2009). Estos efectos benéficos se han demostrado en diversos cultivos de interés agrícola, como arroz (Osaki *et al.*, 1997; Roselló *et al.*, 2015; Moreno-Alvarado *et al.*, 2017), maíz (Piñeros *et al.*, 2005), triticale y alfalfa (Zhang *et al.*, 2007) y girasol (Ziaei *et al.*, 2014). Con base en lo anterior, el Al se postula como un elemento benéfico dependiente de la concentración en que se encuentre en el medio, y no sobrepase el umbral para ser tóxico o se encuentre en formas precipitadas que no tenga actividad alguna para ser aprovechado por las plantas. Aunque aún no han sido elucidados todos los procesos que yacen a estas repuestas positivas, cada vez se da a conocer más beneficios y potencialidades, por lo cual, es necesario conocer la concentración adecuada para ser utilizado como bioestimulante del crecimiento y así incrementar la productividad de los cultivos, aunado a otros procesos para mitigación de diferentes tipos de estrés causados por metales pesados, deficiencias nutrimentales, o de estimulación del metabolismo secundario, entre otros.

3.1.1.2. Yodo

Para la salud humana, el yodo (I) es un elemento esencial y es componente de la hormona tiroides. Sin embargo, millones de personas presentas afectaciones por la deficiencia de este elemento (Kiferle *et al.*, 2013). Para las plantas, el I no es considerado como un nutrimento esencial, y se cuenta con poca información de los mecanismos de absorción y su metabolismo de células vegetales (Kato *et al.*, 2013). En estudios recientes, se sabe que el I, interactúa en procesos de producción de biomasa y respuestas antioxidantes, además promueve la acumulación de compuestos fenólicos (Blasco *et al.*, 2011; 2013). En una revisión

reciente publicada por Medrano-Macías *et al.* (2016), se documenta que el I puede mejorar el crecimiento y estimular diversos mecanismos de tolerancia a factores de estrés, así como incrementar la capacidad antioxidante.

3.1.1.3. Lantano

El lantano (La) es un elemento metálico de las tierras raras (ETR), el cual se ha incorporado como insumo para la agricultura mejorando los rendimientos y calidad de los cultivos (de Oliveira *et al.*, 2015). Pertenece a un grupo de 17 elementos con propiedades químicas y físicas muy similares, de los cuales 15 son lantánidos, más escandio e itrio (IUPAC, 2005). Estos elementos están presentes en la naturaleza, con excepción de prometio (Brioschi *et al.*, 2012). El La se puede aislar de minerales como monazita (Ce, La, Th, Nd, Y) PO₄ y bastnasita (Ce, La, Y) CO₃F, en cantidades que oscilan entre 25 y 38% del total de lantánidos encontrados (28 mg kg⁻¹ de suelo) (Tyler, 2004). El La se ha considerado dentro del grupo de elementos benéficos (Trejo-Téllez *et al.*, 2016), ya que, al ser suministrado en concentraciones relativamente bajas, estimula el crecimiento, mejora la calidad y aumenta el rendimiento en diversos cultivos (Gao *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2007; Hu *et al.*, 2004). El uso de La en la agricultura es reciente, y el país que inicio fue China hace no más de 30 años (Liu *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012; Zeng *et al.*, 2006). Del área total cultiva en China, el 5% de las tierras agrícolas utiliza fertilizantes que en su composición química contiene La (Hu *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2008). En los últimos años, el uso agrícola de fertilizantes con La se ha extendido a países como Corea, Japón, Australia, Suiza, y Filipinas (Wang *et al.*, 2008). Sin embargo, en México aún no existen reportes de fertilizantes con La. Diversos estudios han demostrado los benéficos de usar el La para mejorar procesos fisiológicos y de crecimiento de las plantas. Por ejemplo, concentraciones entre 5 y 50 μM La, este elemento puede mejorar procesos fisiológicos, como incrementar el porcentaje de germinación, promover el crecimiento y acumulación de biomasa (Chaturvedi *et al.*, 2014), además de mitigar el estrés por metales pesado como cadmio (Cd) a una concentración de 20 mg La (Liu y Hasenstein, 2005). Uno del mecanismo de acción del La³⁺ en la

célula, es su función como estabilizador del citoesqueleto, lo que se traduce en un mayor crecimiento de raíces de maíz (Liu y Hesenstein, 2005). El La también tiene efectos en nutrimentos esenciales tales como K y Ca, ya que concentraciones 10 y 20 μM La, aumentan la absorción y concentración de K y Ca, mientras que una concentración de 30 μM La, disminuye la concentración de estos nutrimentos esenciales en la planta de tulipán (Ramírez-Martínez *et al.*, 2012). Aun con la evidencia que el La a bajas concentraciones puede mejorar la tasa fotosintética neta y conductancia estomática en plantas de arroz (Wang *et al.*, 2014), ejercer un efecto protector contra la radiación UV-B en plantas de soya (Yang *et al.*, 2014) y estimular el crecimiento, incrementar la concentración de azúcares solubles y los niveles de vitamina C en col china (Ma *et al.*, 2014), no se ha llegado a un consenso sobre los procesos que yacen detrás de estos beneficios y algunos resultados son contradictorios (Liu *et al.*, 2013; Skovran y Martínez-Gómez, 2015; Thomas *et al.*, 2014). Recientemente, García-Jiménez *et al.* (2017), demostró los efectos benéficos en el crecimiento y concentración de biomoléculas de plántulas de pimiento morrón crecidas en solución nutritiva que contenía 0 y 10 μM de La durante un periodo de 30 días. Encontraron que se puede incrementar en un 20% la altura de la planta, el diámetro del brote puede incrementarse en un 9%, y presentar mayor número de botones florales. Se estimuló el aumento en número de hojas y por ende el área foliar también fue favorecida, sin que se afectara la acumulación de materia seca al final del experimento. Con relación a biomoléculas, se puede estimular la biosíntesis de clorofila a y b, y de azúcares solubles totales. Sin embargo, dependiendo del tiempo de exposición de las plantas con La, se puede incrementar o disminuir la concentración de aminoácidos.

3.1.1.4. Silicio

El silicio (Si), es el segundo elemento más abundante, después del oxígeno, en la corteza de la tierra. En la solución del suelo este elemento está presente principalmente como ácido silícico $[\text{Si}(\text{OH})_4]$, ya que es la única forma de Si

soluble en agua, y su concentración en suelo puede variar entre 0.1 a 0.6 mM (Trejo-Téllez *et al.*, 2016). Este intervalo de concentración es similar a la de los principales nutrimentos inorgánicos que incluyen K, Ca, y S en la solución del suelo (Marschner, 2012). Varios factores influyen en la disponibilidad de Si en el suelo para plantas, incluyendo el tipo de suelo, el material parental uso de la tierra, la materia orgánica, la temperatura, el pH del suelo, y la textura (Liang *et al.*, 2015; Anda *et al.*, 2015). El Si(OH)_4 , es un ácido muy débil ($\text{pK}_a > 9.5$), y por ser la forma disponible en la solución del suelo, se ha determinado que la entrada de dicho ácido en raíces es por ambas rutas, apoplasto y simplasto (Exley, 2015). La ruta simplástica requiere de canales de agua (acuaporinas que pertenecen a las proteínas intrínsecas Nod-26), que son una ruta de contacto permeable al Si(OH)_4 que se ha identificado en diferentes plantas tanto monocotiledóneas como dicotiledóneas (Guerriero *et al.*, 2016, Luyckx *et al.*, 2017). Dicha permeabilidad selectiva de las acuaporinas, determina la resistencia del movimiento de Si(OH)_4 , y por ende, su concentración dentro de compartimentos específicos de la planta (Exley, 2015). Sin embargo, la acumulación de Si varía considerablemente entre especies, desde 0.1 hasta 10% de Si en base seca (Ma y Takahashi, 2002). De acuerdo con los modos de absorción de Si, las plantas pueden clasificarse en tres grupos: de captación activa, pasiva y exclusiva o acumuladores de Si, tipos intermedios de Si y excluidoras de Si, ejemplo de ellas son arroz, pepino y tomate, respectivamente (Mitani y Ma, 2005). La caña de azúcar es considerada como una planta acumuladora de Si, y responde favorablemente a la fertilización con este elemento, especialmente en suelos que muestren niveles deficientes de Si (Kingston, 2014; Keeping, 2017). Como elemento no esencial sino benéfico, el Si puede ejercer efectos positivos en crecimiento y fisiología de las plantas (Korndörfer y Lepsch, 2001) y en caña de azúcar, puede aumentar la eficiencia fotosintética y la resistencia al ataque de plagas y enfermedades, estimular la toleración al estrés hídrico y a heladas, y a mejorar la arquitectura de la planta, entre otros (Savant *et al.*, 1999; Korndörfer *et al.*, 2002). El Si puede mitigar los efectos adversos inducidos por metales pesados en el crecimiento de la planta (Shi *et al.*, 2005; Dragišić-Maksimović *et al.*, 2012;

Vaculík *et al.*, 2012). Estos efectos benéficos son explicados a través de dos mecanismos: 1) los efectos protectores de sílice amorfo como una barrera física, y 2) las funciones bioquímicas de ácido silícico acuoso (Ma y Yamaji, 2008; Cooke y Leishman, 2011). En relación a la nutrición con Si en caña de azúcar, ésta se ha centrado en su mayor parte en la respuesta de rendimiento a la aplicación de materiales ricos en Si a los suelos pobres en este elemento (Savant *et al.*, 1999; Meyer y Keeping, 2000). Por lo anterior, existen razones para incluir a este elemento en la nutrición de caña de azúcar destinada a los programas de hibridación.

3.1.1.5. Titanio

El titanio (Ti) tiene efectos biológicos significativos en plantas, dependiente de la concentración de éste. A bajas concentraciones provoca un efecto benéfico y puede provocar toxicidad a concentraciones superiores (Lyu *et al.*, 2017), lo que se ha propuesto como un efecto de hormesis (Kužel *et al.*, 2003; 2007). El Ti es el noveno elemento más abundante y segundo metal de transición con mayor concentración que comprende el 0.63% de rocas de la corteza terrestre. Los minerales más importantes de Ti son: anatasa, rutilo y brookita en forma de dióxidos (TiO_2) y ilmenita (FeTiO_3) como óxidos ternarios (Earnshaw y Greenwood, 1997). El Ti presenta tres estados de oxidación: +2, +3 y +4, este último es el más común en la naturaleza. Presenta cinco isótopos de manera natural: ^{46}Ti , ^{47}Ti , ^{48}Ti , ^{49}Ti y ^{50}Ti ; de ellos, el más abundante es ^{48}Ti (Trejo-Téllez *et al.*, 2016). A pesar de que se considera que el Ti es un material inerte para los humanos, sus efectos benéficos para las plantas se conocen desde la década de 1930 (Konishi y Tsuge, 1936). Dependiendo de la especie de planta, el contenido de Ti puede variar de 1 a 578 mg kg^{-1} , con una media de 33.4 mg kg^{-1} (Lyu *et al.*, 2017). La absorción de Ti por la planta, no se ve afectada por aplicaciones al suelo o en solución nutritiva, y éste puede acumularse en raíces y transportarse a brotes (Kelement *et al.*, 1993). Sin embargo, el valor del pH influye en la biodisponibilidad y absorción de Ti por las plantas, ya que en suelos ácidos

(pH 3.1) se aumenta la solubilidad y absorción de éste, y en pH de 4.9, la solubilidad disminuye y por ende su absorción por las plantas (Dumon y Ernst, 1988). De ahí que las aplicaciones foliares sean más eficientes para la absorción de Ti que las aplicaciones al suelo (Wojcik y Wojcik, 2001). Los efectos benéficos del Ti en plantas incluyen aumentos en el rendimiento en un 10 a 20% (Pais, 1983), incrementos en la absorción de nutrimentos esenciales en tejido vegetal (Hrubý *et al.*, 2002), y estimulación de la actividad de las enzimas peroxidasa, catalasa y nitrato reductasa (Pais, 1983) así como en la lipoxigenasa (Daood *et al.*, 1988) y en el incremento de los contenidos de ascorbato y de las clorofilas a y b en pimiento (Martínez-Sánchez *et al.*, 1993; Carvajal *et al.*, 1994).

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Ubicación del Experimento y Condiciones Experimentales

La investigación se realizó en la Estación de Hibridación del Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar, A. C. (CIDCA), ubicado en Tuxtla Chico, Chiapas, México, a 14° 56´ latitud norte y 92° 51´ longitud oeste, a una altitud de 320 m (INAFED, 2016). El clima de la región es cálido húmedo con temperatura media anual de 26.4 °C y precipitación media anual de 4,259 mm (Serrano-Altamirano *et al.*, 2006; CONAGUA, 2016).

Se realizó un cruzamiento biparental entre las variedades CC 93-3826 x CP 80-1743 (germinación media) y HOCP 93-746 x HOCP 96-1252 y HOCP 93-746 x Mex 58-418 (germinación baja). La categoría de germinación se asignó de acuerdo con los registros de tres años del CIDCA.

El cruzamiento se realizó de acuerdo con las condiciones de trabajo del CIDCA. Para ello se cortaron tallos con flores disponibles de cada uno de los progenitores y se colocaron en solución aséptica. Posteriormente fueron llevados a la casa de cruzamientos para implementar el cruzamiento. El periodo de duración del

cruzamiento fue de 12 días. Para evitar contaminación de polen por la presencia de otros cruzamientos, las panículas se protegieron con linternillas de manta.

Los tratamientos se manejaron siguiendo el criterio de reposición de ácidos débiles en la solución aséptica y éstos eran repuestos dos veces durante el cruzamiento. A diferencia de los ácidos débiles, todos los días se realizó un ajuste de volumen con ácido sulfuroso de acuerdo con lo que hayan absorbido los tallos. Por cada tallo, le correspondía un volumen de 1 L de solución aséptica. La solución aséptica (150 mM SO₂, 50 mM H₃PO₄, 25 mM H₂SO₄ y 25 mM HNO₃). A excepción del SO₂, que es comprado a Praxair Inc. (empresa proveedora de gases industriales), que es un gas que se mezcla con agua destilada hasta obtener una solución madre de 50,000 ppm, los demás compuestos fueron reactivos grado ACS de Fermont.

3.2.2. Diseño experimental y tratamientos

Para determinar el número de inflorescencia disponibles para realizar el experimento, se procedió a realizar dos estudios, para determinar las categorías de germinación y determinar disponibilidad de tallos potenciales a presentar floración.

El primero estudio consistió en determinar en los últimos 3 años los cruzamientos que presentaron una germinación mala ($\leq 20\%$), regular (20.1 a 40%) y buena (40.1 a 60%). Datos no incluidos en este trabajo.

El segundo estudio consistió en determinar la población total de tallos diferentes cruzamientos que presentaron cualquiera de las germinaciones anteriores, para cuantificar la población de flores que se pudieran tener disponibles para nuestros tratamientos. Datos no mostrados.

El resultado de los estudios realizados nos dio como resultado usar los cruzamientos para los tratamientos siguientes:

Cruzamientos de germinación baja: HOCP 93-746 x CP 96-1252 con los tratamientos de Al y Si, y HOCP 93-746 x Mex 58-418 con los tratamientos de I, La y Ti.

Cruzamiento de germinación media: CC 93-3826 x CP 80-1743 con todos los tratamientos Al, La, I, Si y Ti.

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones. La unidad experimental fue un cruzamiento biparental. Los tratamientos evaluados consistieron en la adición de elementos benéficos, cada uno de ellos a tres concentraciones, lo que dio como resultado los tratamientos siguientes: Al a 50, 100 y 150 μM ; I a 20, 40 y 60 μM ; La a 10, 20 y 30 μM ; Si a 5, 10 y 15 μM ; y Ti a 25, 50 y 75 μM . Las fuentes para estos elementos fueron: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (Fermont); KI (Fermont); LaCl_3 (Sigma Aldrich); SiO_2 (Sigma Aldrich); y TiO_2 (Baker), respectivamente. Como testigo absoluto se utilizó la solución aséptica empleada por el CIDCA que fue descrita anteriormente.

3.2.3. Variables evaluadas

3.2.3.1. Potencial hidrógeno y conductividad eléctrica

Se midió el potencial hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica (CE) de la solución aséptica en días alternos con un medidor portátil de pH, CE y temperatura marca Conductronic modelo PC18 (Puebla, México).

3.2.3.2. Mediciones de la reducción de diámetro del raquis central y del tallo

Se midió el diámetro al inicio y final del cruzamiento con un calibrador vernier digital marca Truper modelo 14388 (Shanghai, China). Para estimar la reducción del diámetro del tallo se midió el diámetro al iniciar los tratamientos, y el diámetro

final al terminar el periodo de tratamiento. La reducción en mm fue obtenida por la resta del valor final al valor inicial, con dichos resultados se procedió a realizar la representación gráfica de los datos.

3.2.3.3. Lecturas SPAD

Se realizaron mediciones de lecturas SPAD en días alternados durante el periodo que duró el cruzamiento con un medidor de clorofila SPAD-502 Plus Konica Minolta, Europa. Las lecturas se realizaron en todas las hojas en cada tallo para obtener un promedio por tallo por día en el tiempo que duró el cruzamiento.

3.2.3.4. Apertura de flores

La apertura de flores se midió diariamente de manera visual, para lo cual, se dividió en tres partes la inflorescencia. Los días a apertura de flores fueron considerados al momento en que la totalidad de las flores mostraron apertura total (tercer tercio).

3.2.3.5. Variables evaluadas en poscosecha

El peso de raquis y de fuzz fue determinado con una balanza electrónica marca Ohaus Pioneer® Plus Precision PA3202 (Parsippany, NJ, USA).

VARIABLES TOMADAS PARA EL PROGENITOR MASCULINO:

- a) Peso seco del raquis central (PSRC). Al terminar el cruzamiento, se cortó la panícula del progenitor masculino, se registró el peso seco del raquis central, con la previa separación del fuzz.
- b) Peso seco del fuzz (PSF). Al separar el fuzz del raquis central, éste fue pesado inmediatamente y guardado en una bolsa de papel para su conservación.

VARIABLES TOMADAS PARA EL PROGENITOR FEMENINO:

- a) Peso seco del raquis central (PSRC). El progenitor femenino continuó un lapso de 8 d más, terminado el cruzamiento, para completar la maduración de la semilla. Al cortar la panícula del tallo y se dejó secar durante 6 d más [3 d bajo sombra y a temperatura ambiente, y 3 d en condiciones controladas de humedad (30%) y temperatura (20 °C)]. El fuzz fue separado del raquis central (proceso de desgranado) y se procedió a pesar el raquis central inmediatamente.
- b) Peso de fuzz después del desgranado (PFDD1). La panícula del progenitor femenino fue desgranada después de transcurrido los 6 d de secado, y con ello se procedió al desgranado de la misma para determinar el rendimiento en peso de fuzz por panícula.
- c) Peso del fuzz después del despeluzado (PFDD2). Posterior al desgranado, se procedió a realizar el despeluzado (eliminación de pelusa al frotar de manera manual la semilla en un tapete de lana), terminada esta labor se procedió a realizar el pesado y registro del mismo.
- d) Impurezas después del despeluzado (IDD). Se obtuvo por diferencia del peso del fuzz después del despeluzado y el peso del fuzz después del desgranado.
- e) Peso del fuzz después del sopleteado (PFDS). Al obtener la semilla sin pelusa, se procedió a someterla a un tratamiento con aire, para la eliminación de semillas vanas, vainas secas y otros materiales como impurezas. Al finalizar dicho proceso, se pesó nuevamente el fuzz y se empaquetó en bolsas de plástico y se sellaron herméticamente.
- f) Impurezas después del sopleteado (IDS). Se obtuvieron por diferencia del peso del fuzz después del sopleteado y el peso del fuzz después del despeluzado.

3.2.3.6. Variables tomadas en germinación

La germinación de la semilla se lleva a cabo con el fuzz obtenido del progenitor femenino, el fuzz del progenitor macho no es considerado.

Por cada repetición se tuvieron 1100 semillas.

- a) Cinética de germinación (CG). Después de la siembra (día 1), diariamente se contabilizaron las semillas germinadas hasta los 8 días, lo que permitió obtener la cinética de la germinación (Ayala-Villegas *et al.*, 2014).
- b) Índice de velocidad de germinación (IVG). Se realizaron conteos diarios del número de semillas germinadas, considerando semillas con la radícula brotada. El cálculo del IVG se hizo de acuerdo a la propuesta de Maguire (1962).

$$VG = \frac{G_1}{N_1} + \frac{G_2}{N_2} + \dots + \frac{G_i}{N_i} + \dots + \frac{G_n}{N_n} = \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{N_i}$$

Dónde:

G = número de semillas germinadas

N = número de días desde la siembra hasta el día de conteo

- c) Tiempo promedio de germinación (TPG): corresponde al tiempo promedio para alcanzar la germinación al 50% y se calculó con la fórmula siguiente (Sobrevilla-Solís *et al.*, 2013):

$$TPG = \frac{\sum(t * n)}{\sum n}$$

Dónde:

t = tiempo en días (iniciando desde el día de la siembra)

n = número de semillas que completaron la germinación

- d) Porcentaje de germinación (PG). Al final de la prueba se dividió el número total de plántulas germinadas entre el número total de semillas (Martínez-Solís *et al.*, 2010).

3.2.4. Análisis estadístico

El análisis de la varianza (ANOVA) se realizó de para cada una de las categorías de germinación, así como para los tratamientos utilizados en cada uno de los cruzamientos. Las medias fueron las medias fueron comparadas por la prueba Tukey ($P \leq 0.05$) con el programa estadístico SAS v. 9.4.

3.3. Resultados

3.3.1. Germinación baja: Cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252

3.3.1.1. pH y CE de la solución aséptica

Para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252, los valores de pH y CE son presentados en el **Cuadro 1**. El pH promedio de la solución aséptica testigo tuvo el valor más bajo (2.63); mientras que el valor más alto (2.76) se tuvo en el tratamiento Si [10 μM]. Si bien existen diferencias estadísticas entre estos valores, existe poca variación en el pH de las soluciones.

La CE promedio más baja (1.19 dS m^{-1}) se registró en la solución aséptica con Si [10 μM]; mientras que la más alta (1.75 dS m^{-1}) en el tratamiento Si [5 μM] (**Cuadro 2**). No se observan cambios significativos en la CE entre los tratamientos conteniendo Al; mismos que tampoco fueron diferentes a la solución testigo.

Cuadro 1. Valores de pH de la solución aséptica durante el periodo de cruzamiento (12 días) para HOCP 93-746 x CP 96-1252.

Elemento benéfico [concentración]	pH	Mín	Máx
Testigo [0 µM]	2.63±0.03c	2.56	2.75
Al [50 µM]	2.70±0.04b	2.59	2.84
Al [100 µM]	2.75±0.03a	2.70	2.85
Al [150 µM]	2.71±0.05b	2.55	2.82
Testigo [0 µM]	2.63±0.03c	2.56	2.75
Si [5 µM]	2.73±0.05ab	2.58	2.83
Si [10 µM]	2.76±0.01a	2.73	2.80
Si [15 µM]	2.70±0.04b	2.63	2.85

Medias ± DE con letras distintas en la columna de pH indican diferencias estadísticas significativas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuadro 2. Valores de conductividad eléctrica (dS m⁻¹) de la solución aséptica durante el periodo de cruzamiento (12 días) para HOCP 93-746 x CP 96-1252.

Elemento benéfico [concentración]	CE	Mín	Máx
Testigo [0 µM]	1.63±0.03a	1.60	1.70
Al [50 µM]	1.30±0.15b	1.00	1.70
Al [100 µM]	1.26±0.07c	1.10	1.40
Al [150 µM]	1.28±0.14bc	1.00	1.60
Testigo [0 µM]	1.63±0.03a	1.60	1.70
Si [5 µM]	1.75±0.12a	1.50	2.00
Si [10 µM]	1.19±0.09b	1.00	1.40
Si [15 µM]	1.34±0.09b	1.10	1.60

Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre elementos benéficos y su concentración (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.1.2. Apertura floral

Los datos de apertura floral en la solución testigo y la solución Al (50 µM) se presentan en la **Figura 1**. En general el progenitor masculino mostró una media más alta que el femenino. Asimismo, la mayor apertura tanto en el progenitor masculino como en el femenino fue en los tratamientos testigo en comparación la aplicación de Al [50 µM], después de 3 d de iniciado este proceso. Después de 4 d, todos los tratamientos mostraron una apertura floral muy similar.

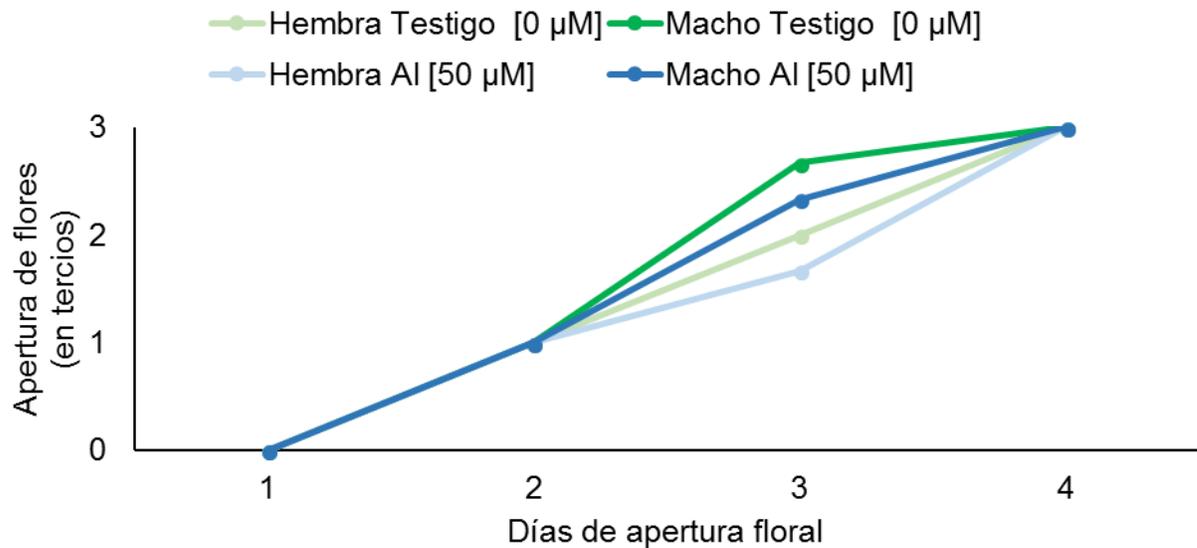


Figura 1. Apertura de flores tratadas con 50 μM AI en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

Al aplicar 100 μM AI se observó que al igual que con la aplicación de 50 μM AI, el progenitor masculino mostró una media más alta que el femenino. Destaca, asimismo, el efecto positivo del tratamiento 100 μM AI en el progenitor macho; quien registró la apertura floral a tres tercios después de 3 d (**Figura 2**).

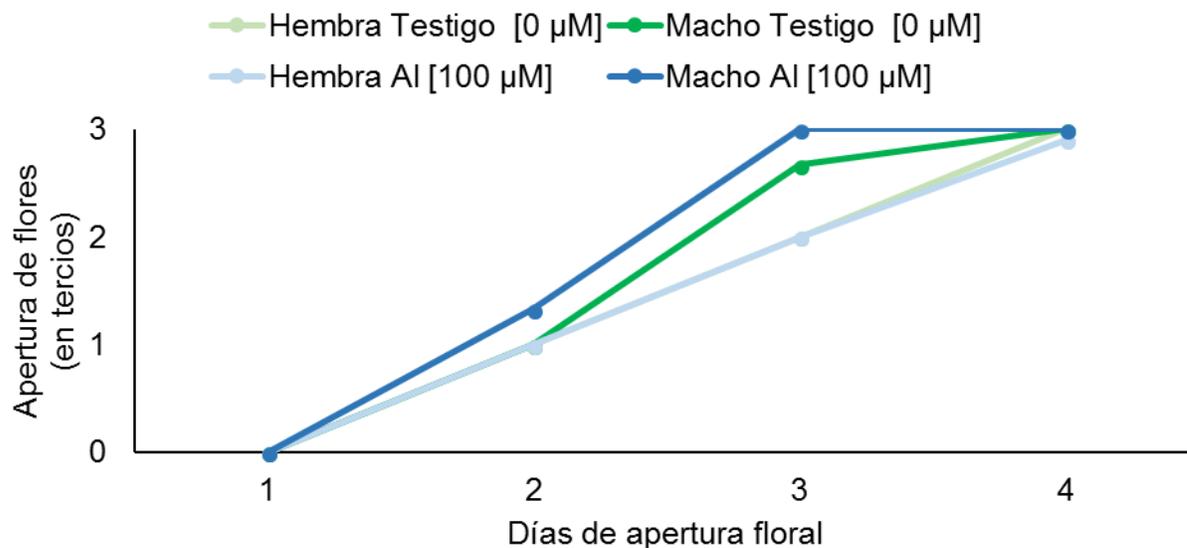


Figura 2. Apertura de flores tratadas con 100 μM AI en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

Con 150 μM AI adicionados a la solución aséptica, se observó un comportamiento muy similar al registrado con la aplicación de 50 μM AI, ya que en general el tratamiento testigo en el progenitor masculino mostró una media más alta que el femenino, esto al 3 d de iniciada la apertura floral. Asimismo, al final la evaluación (4 d), todos los tratamientos mostraron una apertura floral muy similar (**Figura 3**).

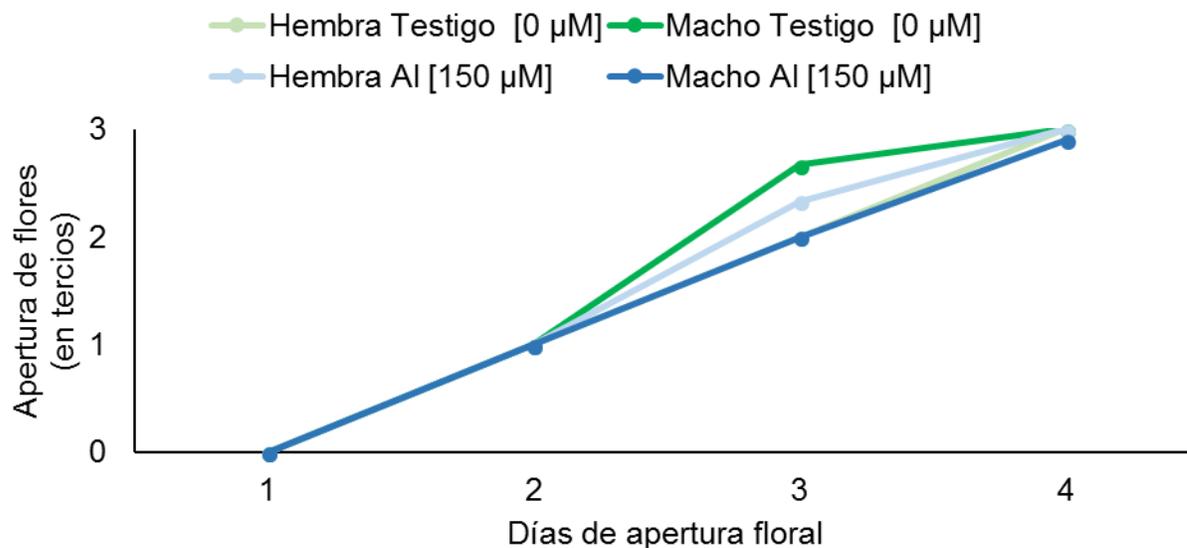


Figura 3. Apertura de flores tratadas con 150 μM Al en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

Efectos positivos de la aplicación de 5 μM Si a la solución aséptica, tuvo efecto positivo en la apertura floral del progenitor hembra después de 3 d, respecto al testigo; por el contrario, en el progenitor masculino este tratamiento redujo la apertura floral en el mismo periodo de evaluación. Al final de la evaluación todos los tratamientos alcanzaron aperturas florales similares y cercanas a tres tercios (**Figura 4**).

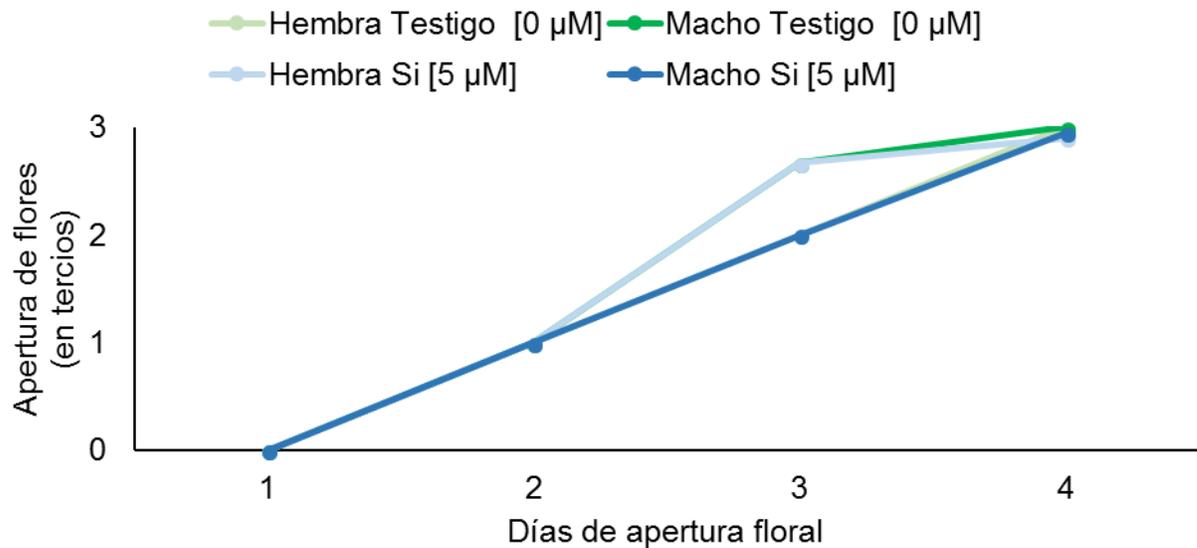


Figura 4. Apertura de flores tratadas con 5 μM Si en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

Con la aplicación 10 μM Si, los testigos tanto del progenitor masculino como el femenino al tercer día de iniciado el proceso tuvo la mayor apertura floral, en comparación con los testigos; sin embargo, al final la evaluación al cuarto días todos los tratamientos mostraron una apertura floral muy similar (**Figura 5**).

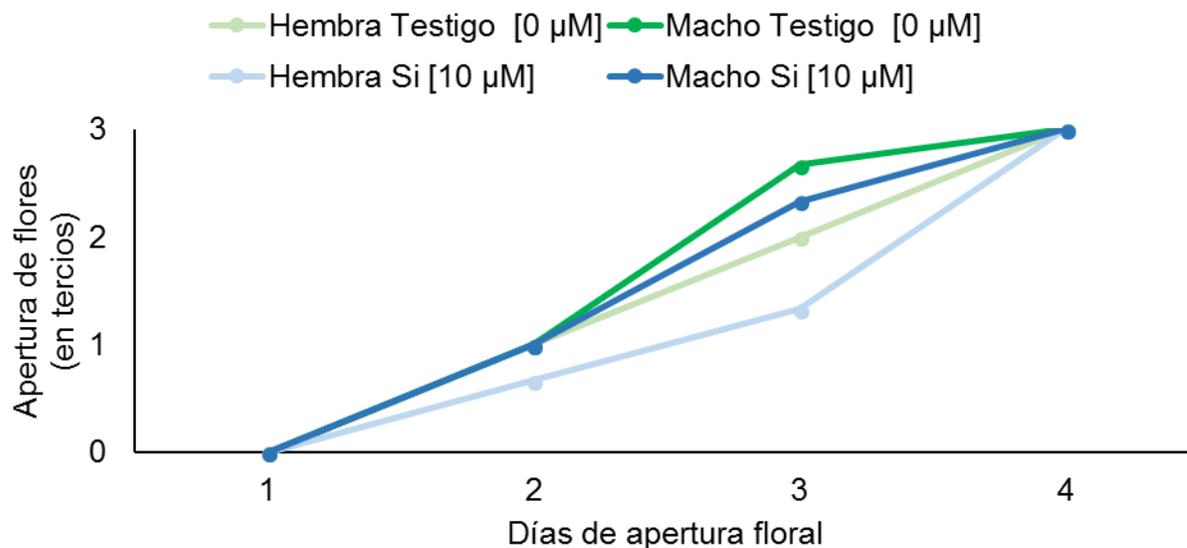


Figura 5. Apertura de flores tratadas con 10 μM Si en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

En la **Figura 6** se observa que la aplicación 15 μM Si a la solución aséptica no tuvo efecto positivo en la apertura floral tanto en progenitor masculino como en el femenino, después de 3 d de iniciado el proceso; sin embargo, después de 4 d se tuvieron valores de apertura floral de tres tercios tanto en este tratamiento de Si como en los testigos.

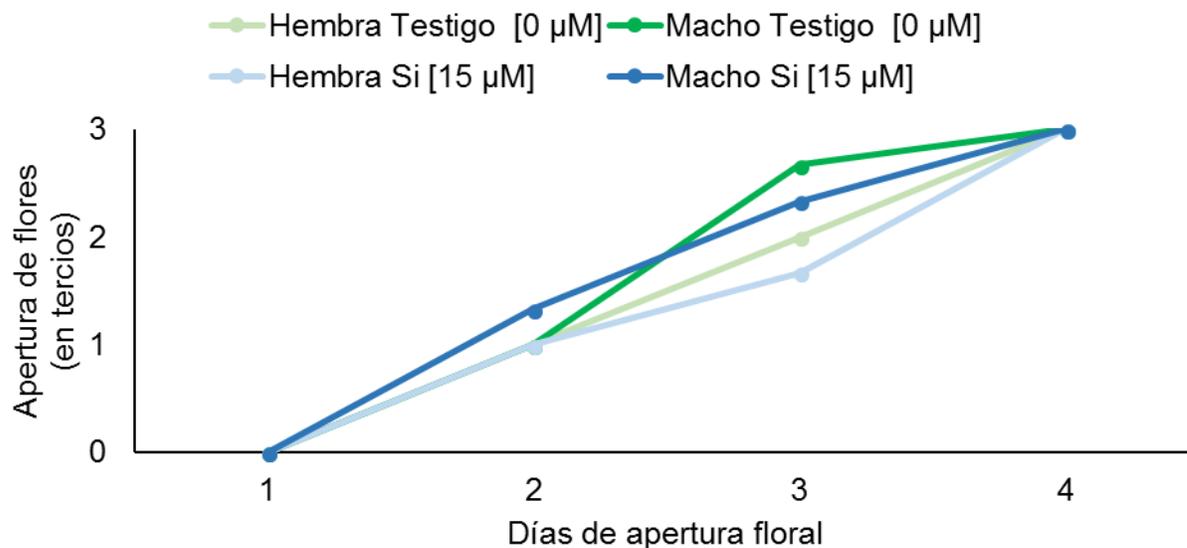


Figura 6. Apertura de flores tratadas con 15 μM Si en la solución aséptica a la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

3.3.1.3. Lecturas SPAD

En el progenitor masculino, las unidades SPAD fueron mayores con la adición de 100 y 150 μM Al, en comparación con el testigo y el tratamiento 50 μM Al; en este último se tuvieron los valores de lecturas SPAD más bajos. Asimismo, se observa en todos los tratamientos con Al y en el testigo que a medida que transcurrió el cruzamiento (del día 1 al 13), los valores medios de esta variable disminuyeron progresivamente (**Figura 7**).

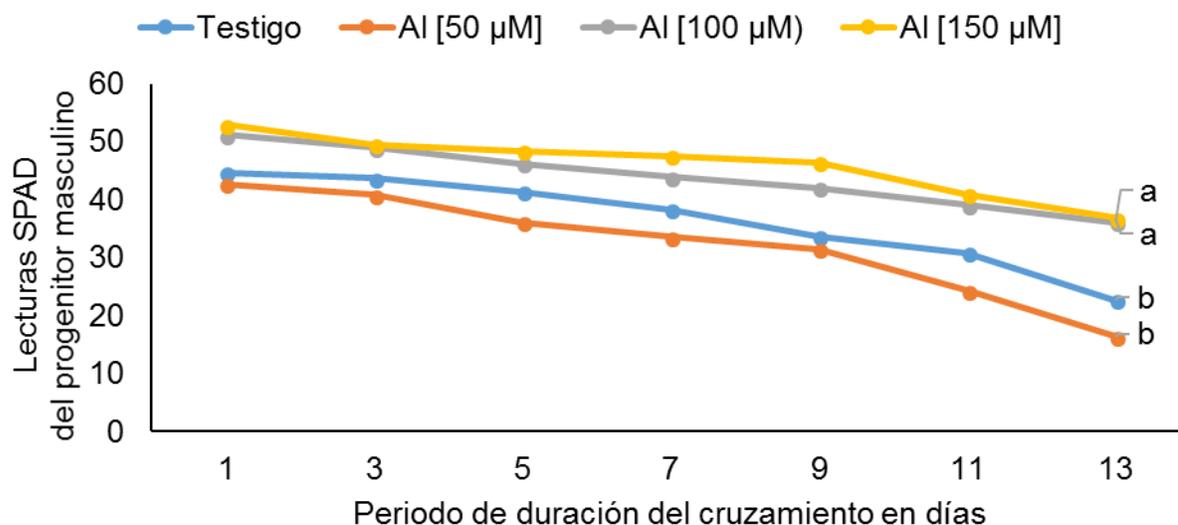


Figura 7. Lecturas SPAD promedio en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (0, 50, 100 y 150 µM Al) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre la concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Con la adición de Si a la solución aséptica en todas las concentraciones evaluadas, las lecturas SPAD en el progenitor masculino fueron muy similares al inicio del cruzamiento, pero las diferencias se hicieron notorias a partir del día 7 y se continuaron incrementando hasta el 13. Al final del cruzamiento, el testigo mostró los valores más bajos, en tanto que el tratamiento con 5 µM Si mostró las medias más altas; los tratamientos con 10 y 15 µM Si mostraron valores intermedios (**Figura 8**).

Por otro lado, al igual que lo observado con los tratamientos con Al (**Figura 7**), a medida que transcurrió el cruzamiento, los valores medios de esta variable disminuyeron progresivamente (**Figura 8**).

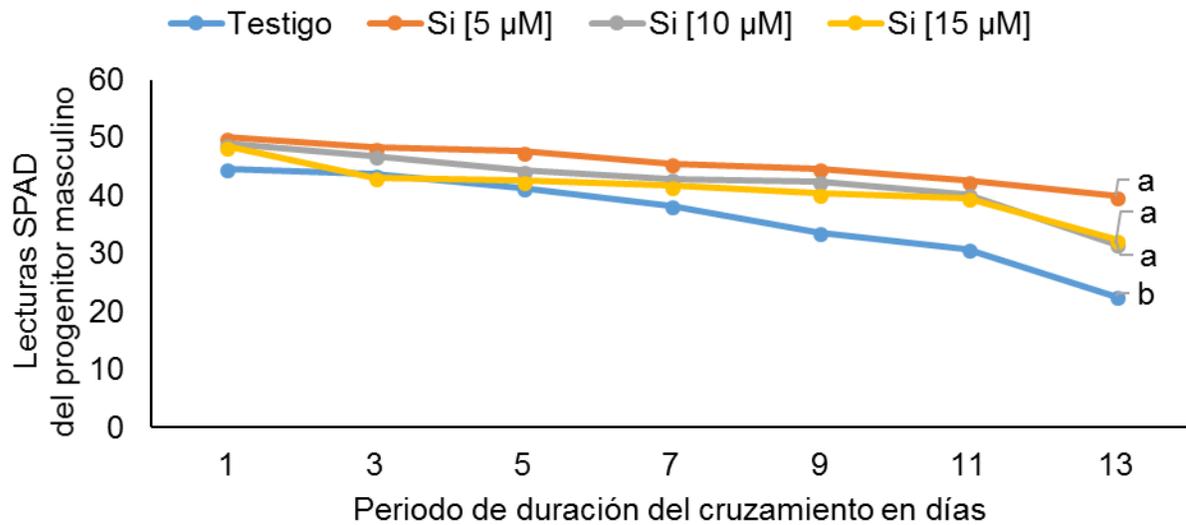


Figura 8. Lecturas SPAD promedio en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de silicio (0, 5, 10 y 15 µM Si) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre la concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Al hacer la comparación de las medias en los tratamientos con Al y Si en el progenitor masculino, se observa que los valores más altos y diferentes estadísticamente al testigo para la variable unidades SPAD se registraron con 100 y 150 µM Al, así como con 5 y 15 µM Si. Los valores más bajos se registraron al aplicar 50 µM Al y en el testigo (**Figura 9**).

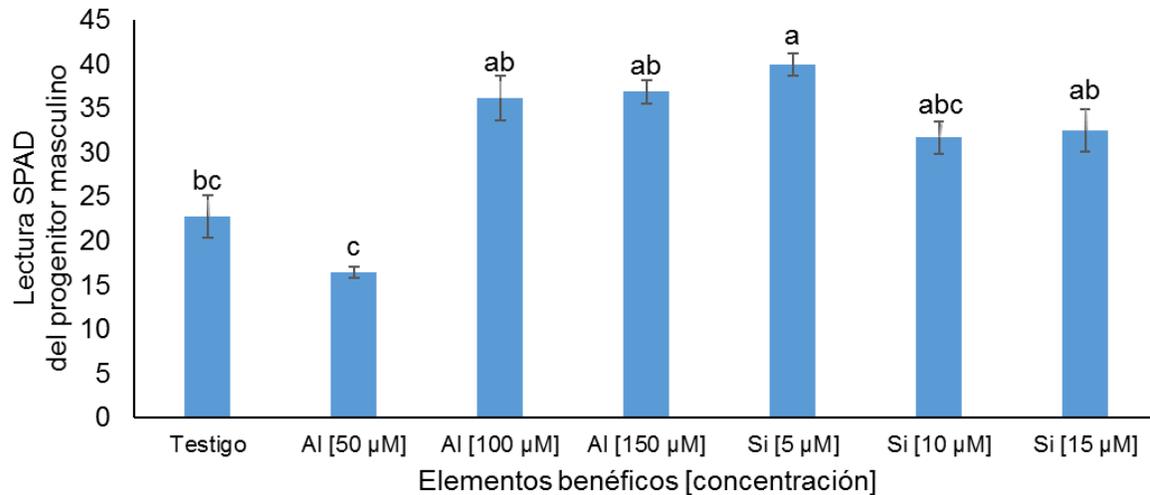


Figura 9. Lecturas SPAD promedio en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el progenitor femenino tratados con Al en la solución aséptica, las unidades SPAD fueron mayores con el tratamiento de 100 μ M Al, y disminuyeron conforme transcurrió el cruzamiento. El resto de los tratamientos mostró valores muy similares al testigo al final del cruzamiento (**Figura 10**).

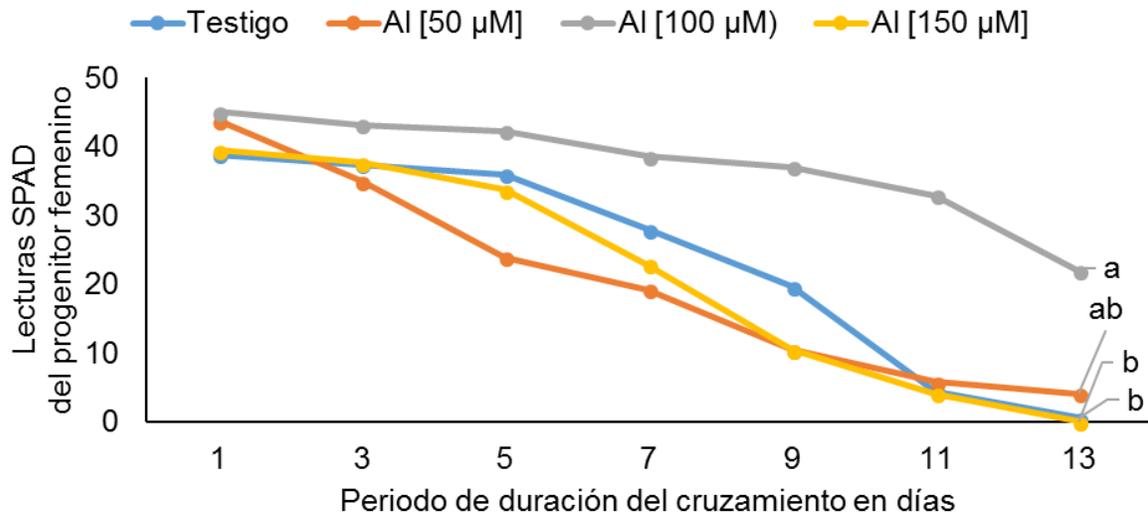


Figura 10. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (0, 50, 100 y 150 µM Al) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

El efecto del Si en las lecturas SPAD del progenitor femenino fue distinto al observado con Al. Los valores más altos se observaron en el tratamiento con 10 µM Si, y el testigo fue el más bajo al final del cruzamiento (**Figura 11**).

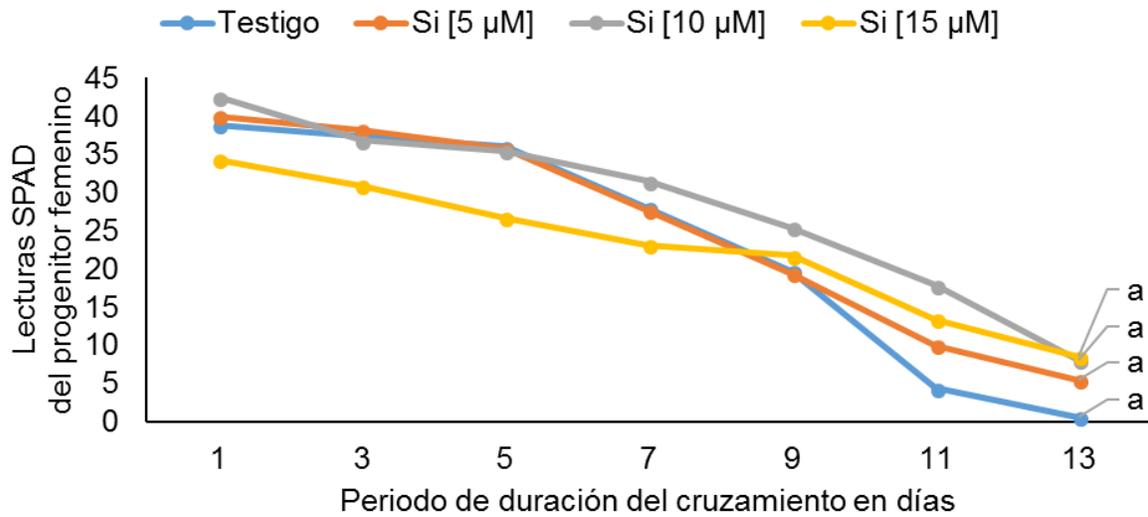


Figura 11. Lecturas SPAD promedios en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de silicio (0, 5, 10 y 15 µM Si) a la solución aséptica.

Al comparar las medias en los tratamientos con Al y Si en el progenitor femenino, se observa que el valor más alto para unidades SPAD se observó con 100 µM Al. Los demás tratamientos fueron estadísticamente inferiores y no son diferentes al testigo (**Figura 12**).

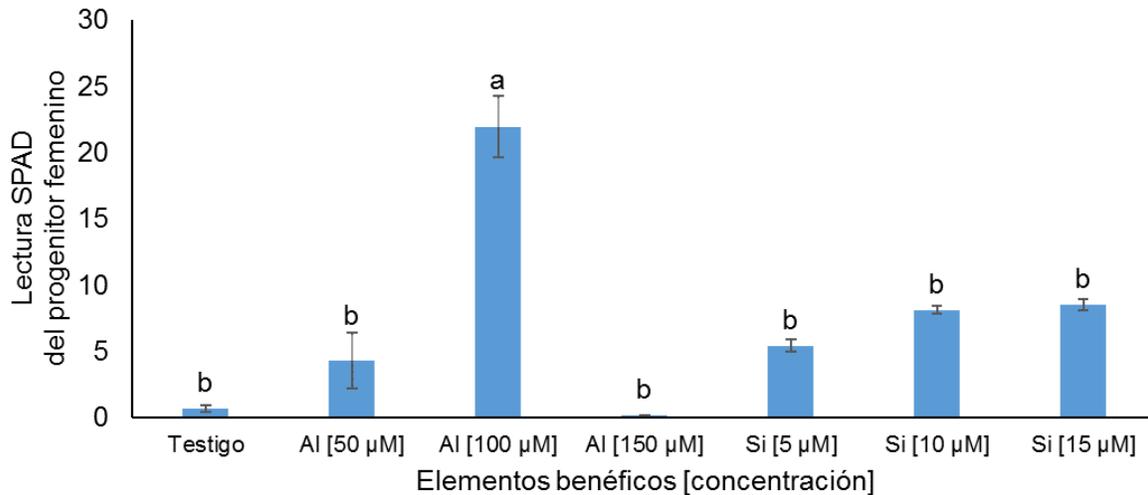


Figura 12. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.1.4. Diámetro del raquis central

Al comparar las medias en los tratamientos con Al y Si en el progenitor masculino, se observa que la mayor reducción del raquis central se tuvo con 50 μ M Al y 15 μ M Si, diferencias estadísticas entre concentraciones por elemento benéfico (**Figura 13**).

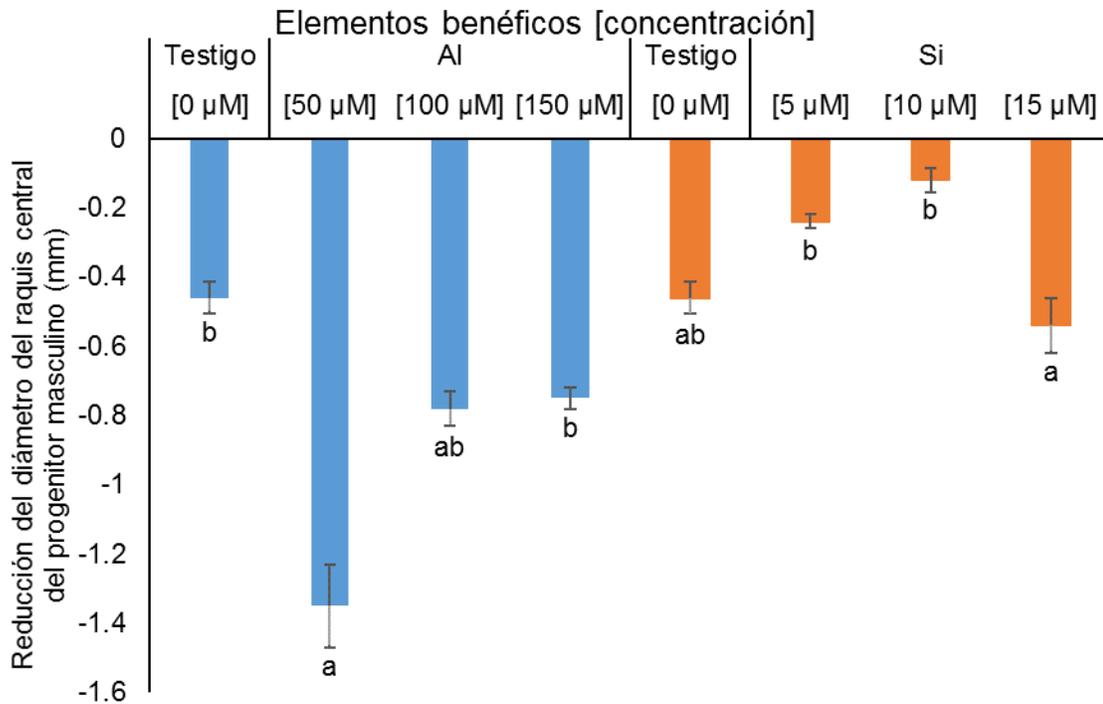


Figura 13. Reducción del raquis central promedio en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) columnas en color azul y silicio (Si) columnas en color naranja. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el progenitor femenino, las menores reducciones del raquis central a través del periodo de cruzamiento se observaron con 50 y 100 μ M Al, aunque no hubo diferencias estadísticas entre tratamientos (**Figura 14**). Sin embargo, con la aplicación de 5 y 10 μ M Si se observa la misma tendencia que con Al, para este caso si se presentan diferencias estadísticas significativas (**Figura 14**).

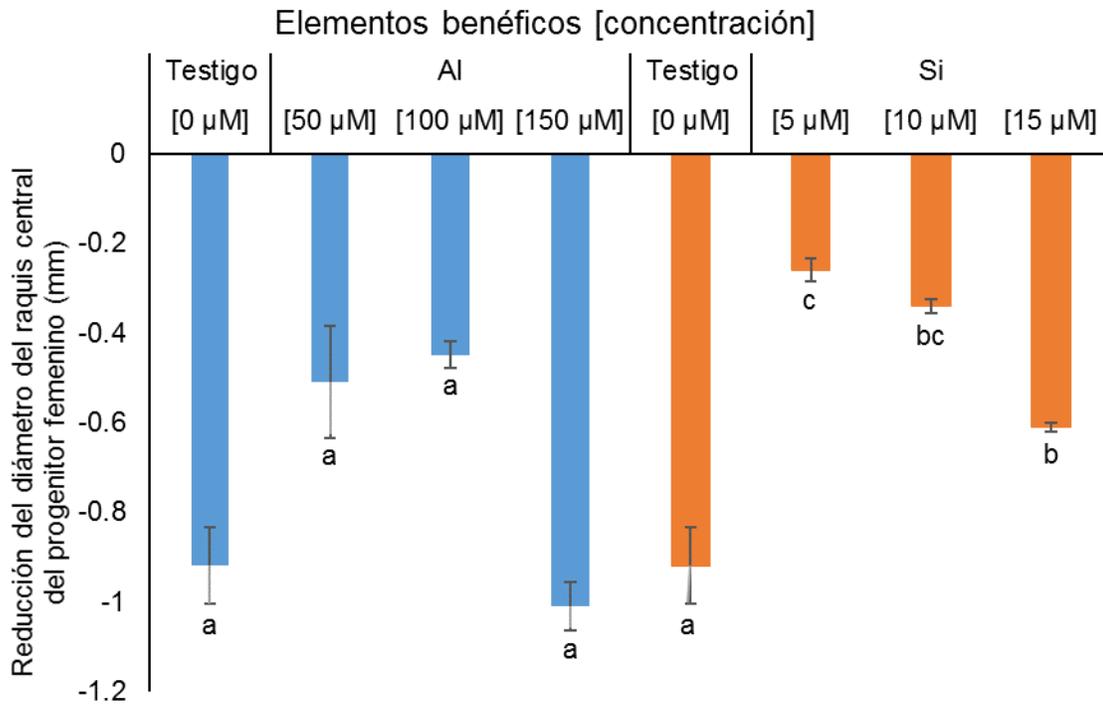


Figura 14. Reducción del raquis en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si). Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.1.5. Diámetro del tallo

En el progenitor masculino, la mayor reducción del diámetro de tallo se observó con 50 μ M Al, y la menor reducción con 15 μ M Si. El testigo mostró una reducción intermedia (**Figura 15**).

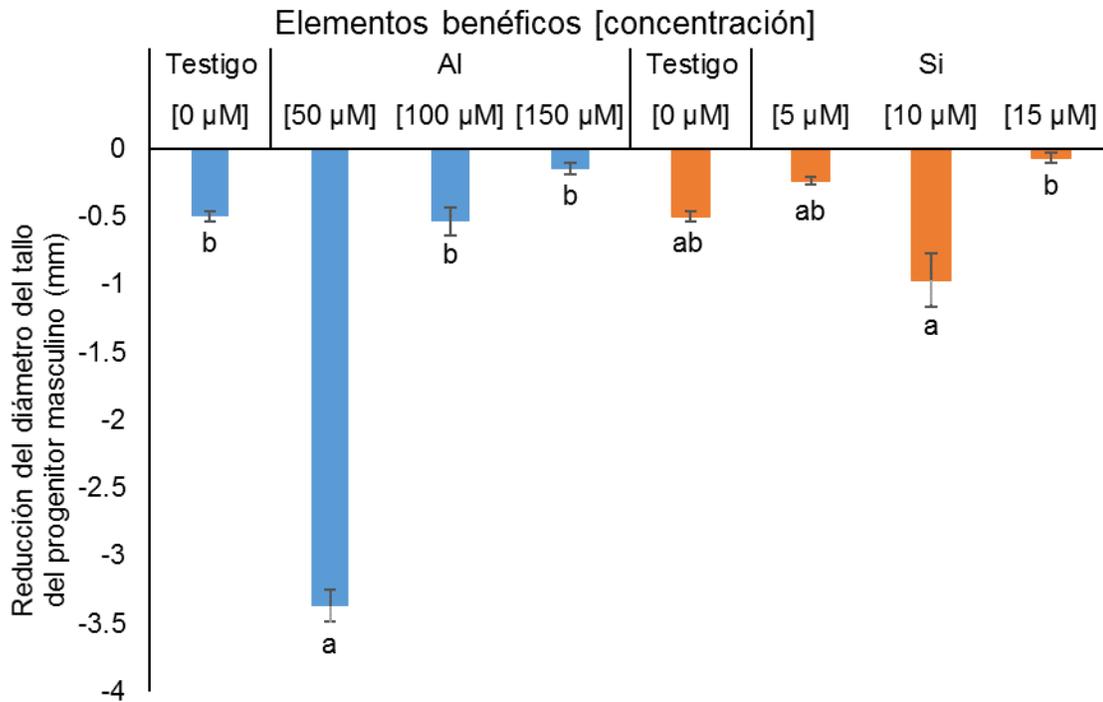


Figura 15. Reducción del tallo en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si). Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el progenitor masculino, la mayor reducción del diámetro de tallo se observó con 150 μ M Al, y la menor reducción con 50 μ M Al y con 15 μ M Si (**Figura 16**).

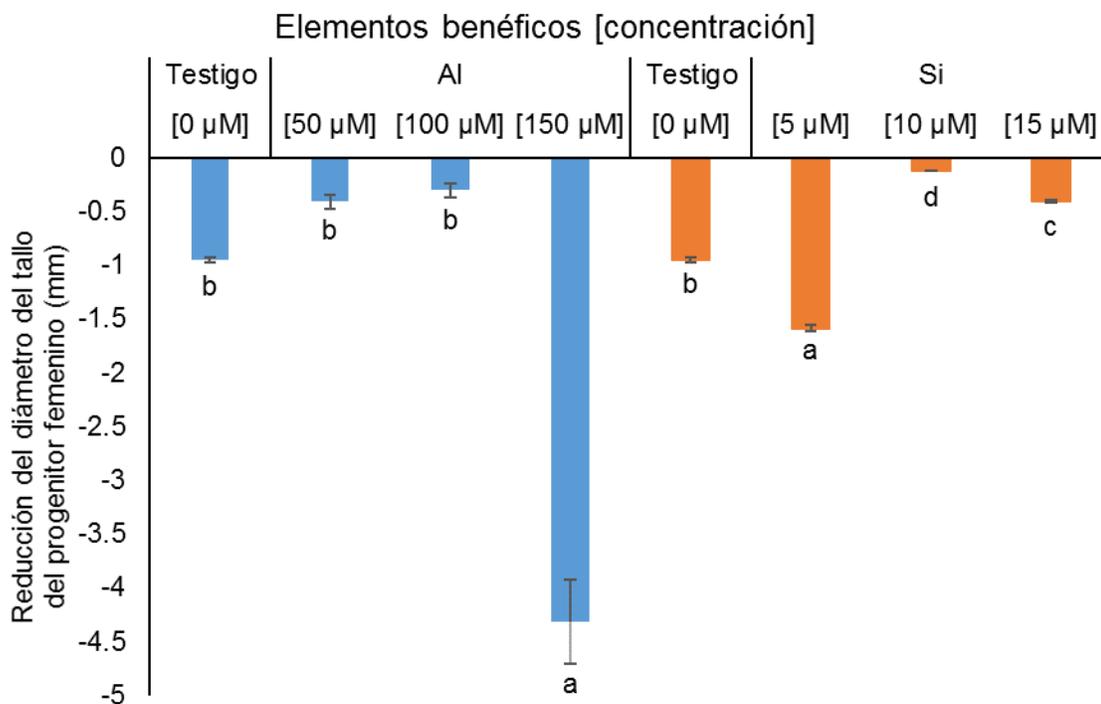


Figura 16. Reducción del tallo en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si). Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.1.6. Variables evaluadas en poscosecha

3.3.1.6.1. Peso seco del raquis central

En tallos del progenitor masculino tratados con Al y Si, se observó que el mayor peso seco del raquis central fue con Al [150 μ M], en tanto que el menor fue observado en el tratamiento Al [10 μ M] siendo estadísticamente diferentes (**Figura 17**).

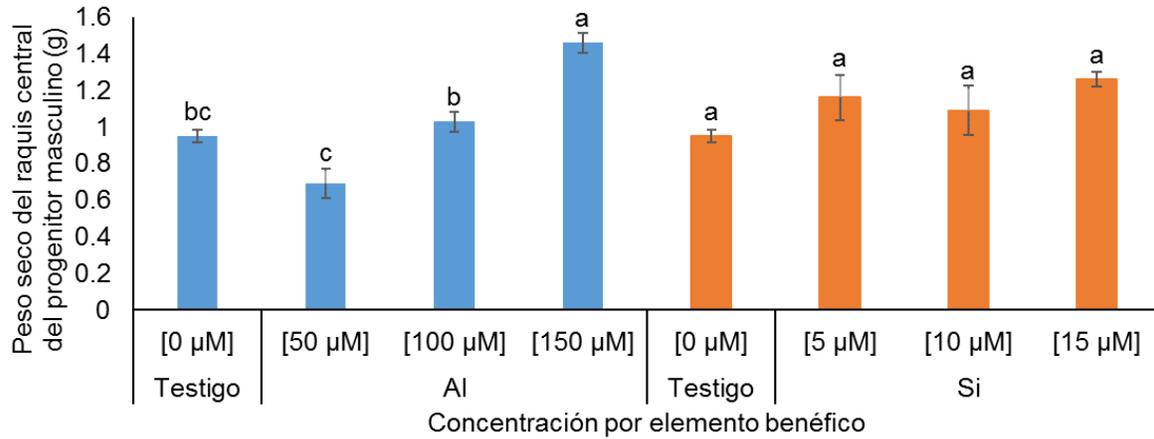


Figura 17. Peso seco promedio del raquis central en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el progenitor femenino el mayor peso seco del raquis central se observó en tallos tratados con Si [15 μ M], y la media más baja en el testigo. Los demás tratamientos observaron medias muy similares entre ellos y no fueron diferentes al testigo desde el punto de vista estadístico (**Figura 18**).

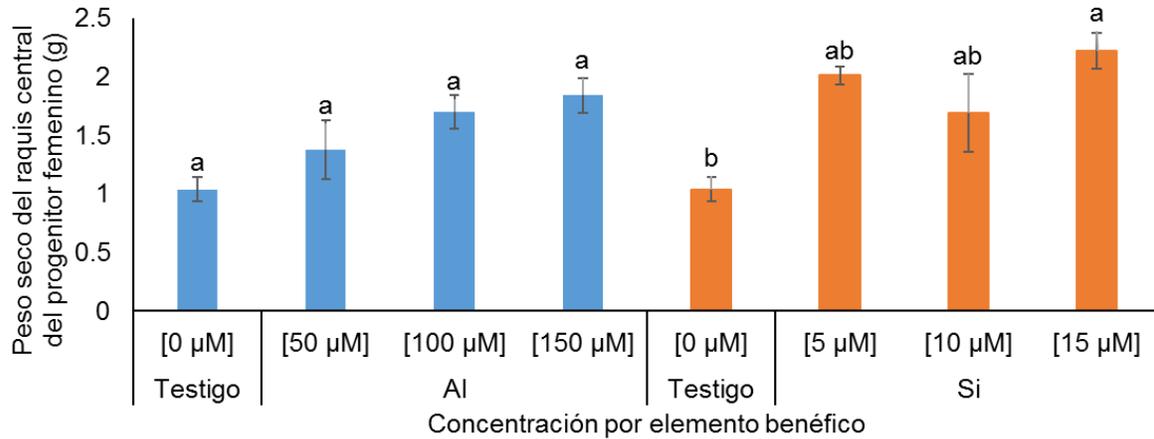


Figura 18. Peso seco del raquis central en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.1.6.2. Peso seco del fuzz

Respecto al peso seco del fuzz en el progenitor masculino, la media más alta se obtuvo en tallos tratados con Al [150 μ M], y la menor con Al [50 μ M]. Los tratamientos 150 μ M Al y 15 μ M Si superaron estadísticamente al tratamiento testigo (**Figura 19**).

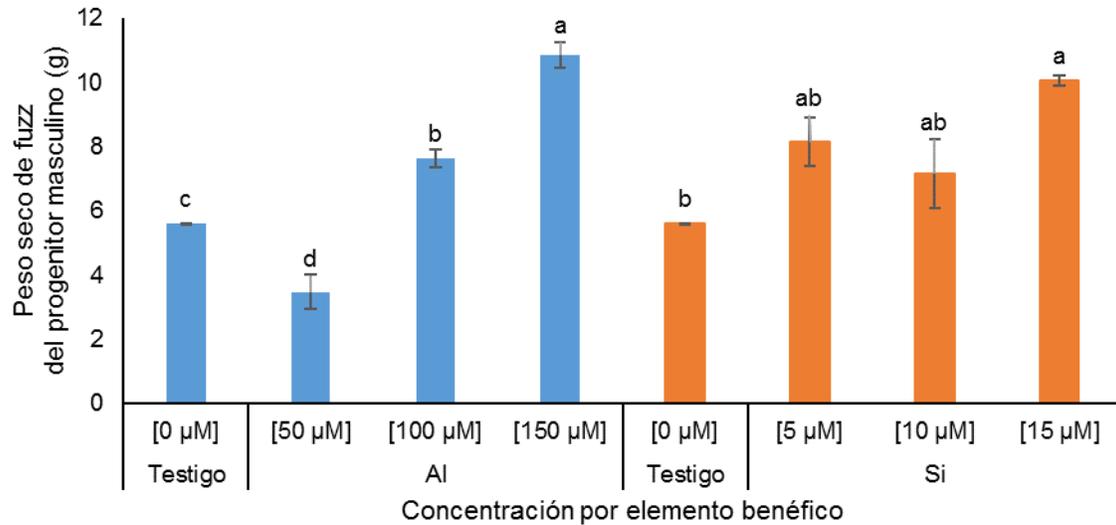


Figura 19. Peso seco del fuzz en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) en la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Respecto al peso seco del fuzz en el progenitor femenino, no se observaron diferencias estadísticas entre tratamientos (**Figura 20**).

3.3.1.6.3. Longitud de la panícula

Los tratamientos evaluados no tuvieron influencia en la longitud de la panícula del progenitor femenino como se observa en la **Figura 21**.

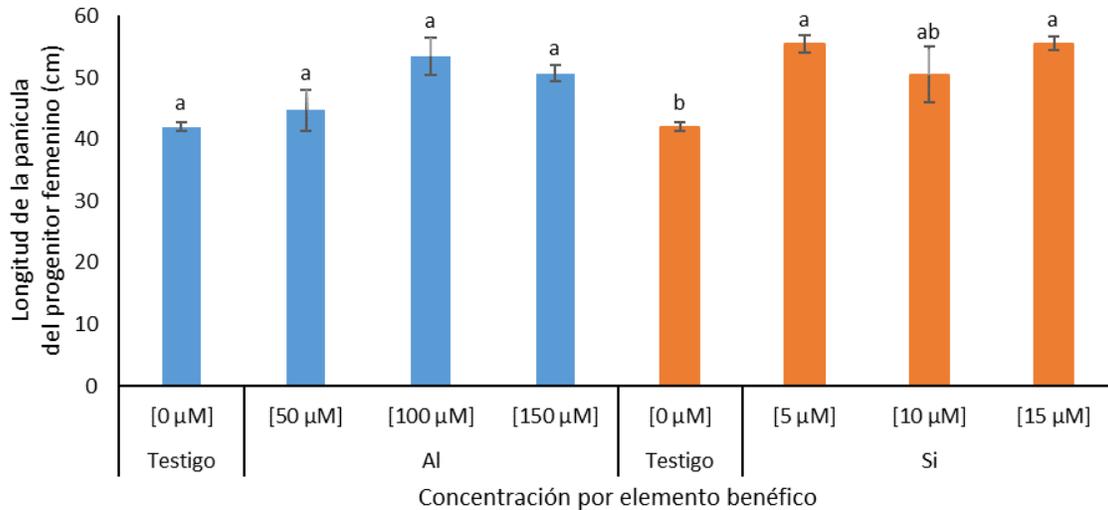


Figura 21 Longitud de la panícula del progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) en la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.1.6.4. Impurezas y peso final durante el proceso de poscosecha

Con relación a las impurezas y peso final durante el proceso de poscosecha de la semilla botánica o fuzz de plantas tratadas con aluminio (Al) y silicio (Si) del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252, la aplicación de 10 μ M Si aumentó significativamente el peso del fuzz después del desgrane en el progenitor femenino (**Cuadro 3**).

Respecto al peso del fuzz después del despeluzado, no hubo efecto de tratamientos, y todas las medias fueron estadísticamente similares; tampoco hubo efecto de los tratamientos con relación a las variables peso de impurezas ni peso de semillas vanas y otras impurezas. Sin embargo, el peso del fuzz después del sopleado fue menor en el testigo, en comparación con los demás tratamientos (**Cuadro 3**).

Cuadro 3. Impurezas y peso final durante el proceso de poscosecha de la semilla botánica o fuzz de plantas tratadas con aluminio (Al) y silicio (Si) del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252.

Elemento benéfico [concentración]	PFDD1 (g)	PFDD2 (g)	PI1 (g)	PFDS (g)	PSVI2 (g)
Testigo [0 µM]	14.4±0.05a	2.7±0.15b	11.7±0.12a	2.7±0.14b	0.01±0.01a
Al [50 µM]	13.2±0.05b	3.9±0.09a	9.3±0.14c	3.9±0.10a	0.03±0.02a
Al [100 µM]	13.3±0.05b	3.9±0.10a	9.4±0.13c	3.9±0.10a	0.03±0.02a
Al [150 µM]	14.3±0.05a	4.1±0.03a	10.2±0.06b	4.1±0.03a	0.04±0.01a
Testigo [0 µM]	14.4±0.05b	2.7±0.15b	11.7±0.12a	2.7±0.14b	0.01±0.01a
Si [5 µM]	14.4±0.05b	4.2±0.14a	10.3±0.17b	4.1±0.13a	0.04±0.01a
Si [10 µM]	15.5±0.05a	3.6±0.04a	11.8±0.09a	3.6±0.04a	0.0±0.01a
Si [15 µM]	12±0.05c	4.1±0.07a	7.9±0.01c	4.0±0.07a	0.2±0.01a

PFDD1: Peso del fuzz después del desgrane de la hembra; PFDD2: Peso del fuzz después del despeluzado; PI1: Peso de impurezas; PFDS: Peso del fuzz después del sopleteado; PSVI2: Peso de semillas vanas y otras impurezas. Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.1.7. Variables de germinación

Se utilizó la semilla proveniente del progenitor femenino para la evaluación de variables de germinación.

3.3.1.7.1. Dinámica de germinación

La dinámica de germinación fue mayor en el testigo, seguida por los tratamientos con Al. Las medias más bajas se observaron con Si (**Figura 22**).

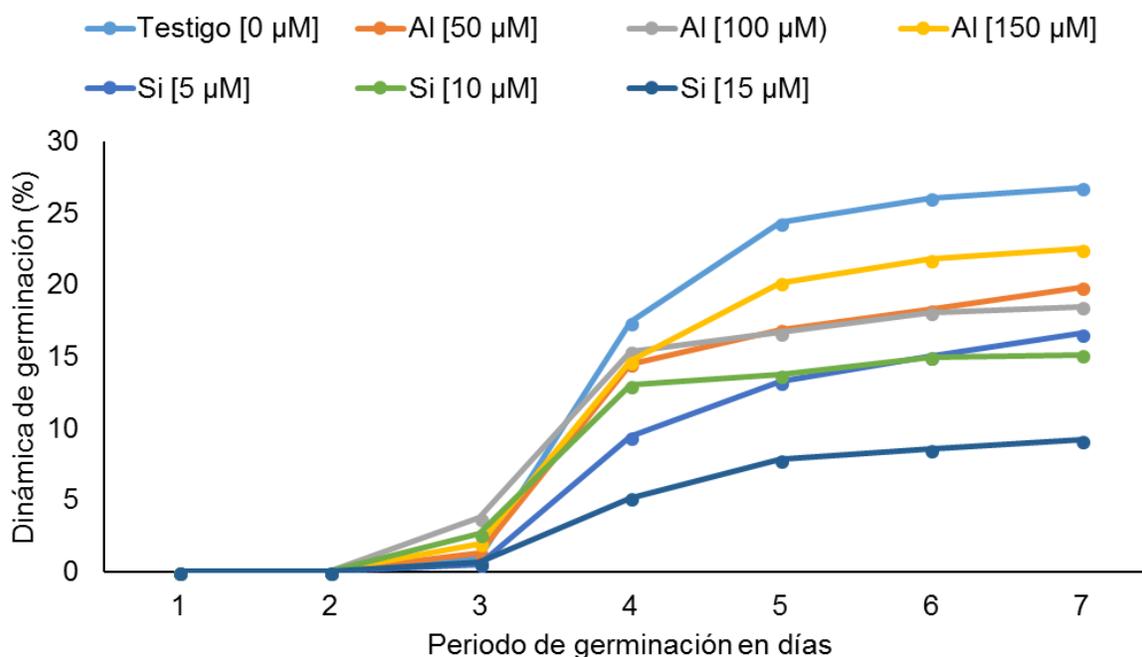


Figura 22. Dinámica de germinación del fuzz del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 en días por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica.

3.3.1.7.2. Porcentaje de germinación

Respecto al porcentaje de germinación del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252, las medias más altas se registraron en el testigo y en el tratamiento con 50

μM Al, y la más baja en el tratamiento con 15 μM Si. Los demás tratamientos mostraron medias muy similares (**Figura 23**).

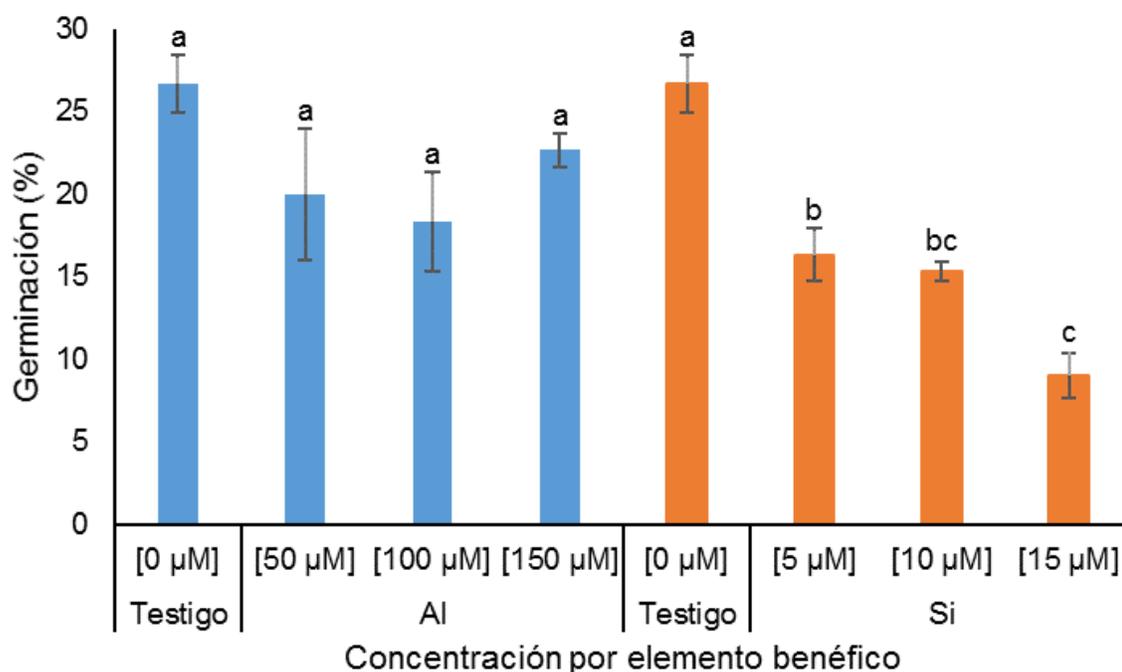


Figura 23. Porcentaje de germinación del fuzz del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 en días por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.2. Germinación baja: Cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418

3.3.2.1. pH y CE de la solución aséptica

Para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418, el pH y CE de las soluciones asépticas son presentados en el **Cuadro 4**. El pH promedio de la solución aséptica testigo se mantuvo en 2.61 y se encontraron diferencias estadísticas con el resto de las soluciones por concentración de elemento benéfico.

Cuadro 4. Valores de pH en la solución aséptica durante el periodo de cruzamiento (12 días) para HOCP 93-746 x Mex 58-418.

Elemento benéfico [concentración]	pH	Mín	Máx
Testigo [0 µM]	2.61±0.02c	2.56	2.64
I [20 µM]	2.72±0.04ab	2.60	2.84
I [40 µM]	2.73±0.05a	2.57	2.87
I [60 µM]	2.71±0.05b	2.58	2.87
Testigo [0 µM]	2.61±0.02c	2.56	2.64
La [10 µM]	2.72±0.04b	2.58	2.84
La [20 µM]	2.70±0.03c	2.64	2.79
La [30 µM]	2.73±0.04a	2.63	2.86
Testigo [0 µM]	2.61±0.02b	2.56	2.64
Ti [25 µM]	2.73±0.05a	2.59	2.87
Ti [50 µM]	2.67±0.04ab	2.57	2.79
Ti [75 µM]	2.71±0.05ab	2.61	2.89

Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

La CE de las soluciones asépticas se encontraron diferencias estadísticas con el resto de las soluciones por concentración de elemento benéfico como se observa en el **Cuadro 5**.

Cuadro 5. Valores de conductividad eléctrica (dS m⁻¹) en la solución aséptica durante el periodo de cruzamiento (12 días) para HOCP 93-746 x Mex 58-418.

Elemento benéfico [concentración]	CE	Mín	Máx
Testigo [0 µM]	1.33±0.15c	0.90	1.70
I [20 µM]	1.51±0.16a	0.90	1.80
I [40 µM]	1.37±0.21b	1.00	2.10
I [60 µM]	1.29±0.16c	0.90	1.80
Testigo [0 µM]	1.33±0.15b	0.90	1.70
La [10 µM]	1.51±0.22 ^a	1.00	2.20
La [20 µM]	1.31±0.21b	0.80	2.00
La [30 µM]	1.31±0.09b	1.10	1.50
Testigo [0 µM]	1.33±0.15b	0.90	1.70
Ti [25 µM]	1.21±0.15c	0.90	1.80
Ti [50 µM]	1.40±0.19a	0.90	2.00
Ti [75 µM]	1.44±0.14a	1.10	1.80

Medias ± DE con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.2.2. Apertura floral

Respecto a la apertura floral en el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 tratado con 20 μM I, se observó que en general el progenitor masculino mostró una media más alta que el femenino. Asimismo, se observó que este tratamiento tuvo un efecto negativo en la apertura floral del progenitor femenino, en comparación con el testigo, dado que en éste se prolongó la apertura floral hasta el día 5, lo cual no había sido observado en los tratamientos anteriores (**Figura 24**).

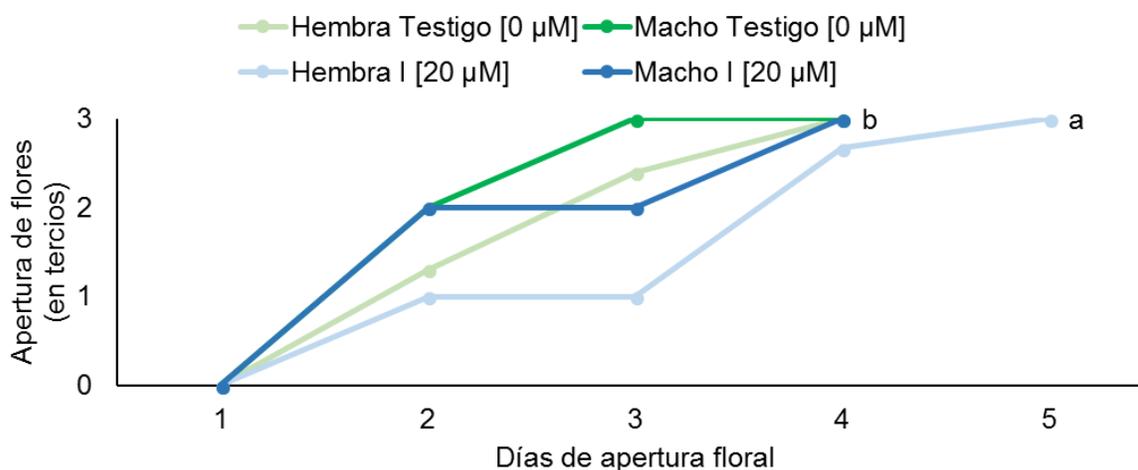


Figura 24. Apertura de flores tratadas con 20 μM I en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Al tratar las los tallos con 40 μM I, se alcanzó la apertura floral de tres tercios tanto en el progenitor masculino como en el femenino a los 3 d; por el contrario, en los testigos, este valor de apertura se alcanzó un día después (4 d) (**Figura 25**).

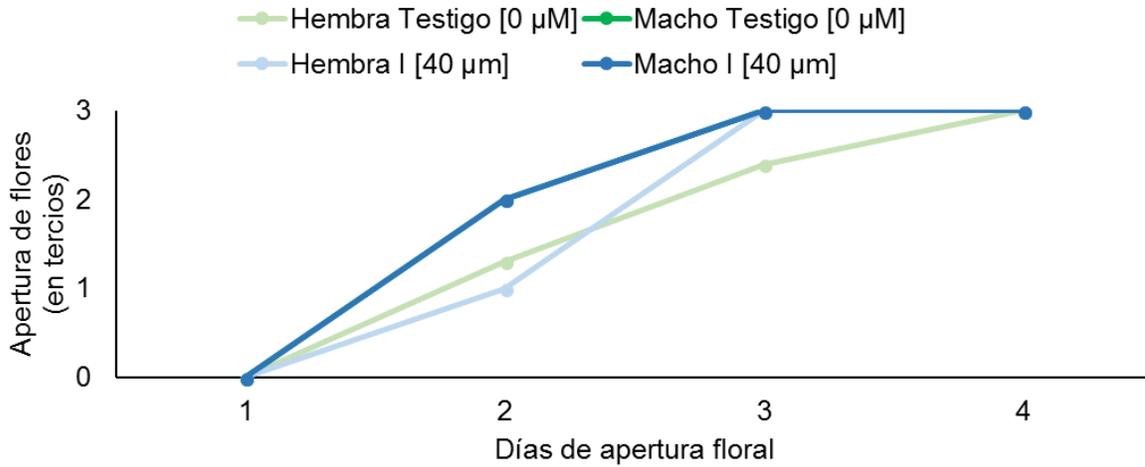


Figura 25. Apertura de flores tratadas con 40 μM I en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

En los tallos tratados con 60 μM I, tanto el progenitor masculino como femenino, la apertura florar a los tres tercios se alcanzó el día 4, coincidiendo con el tratamiento testigo (**Figura 26**).

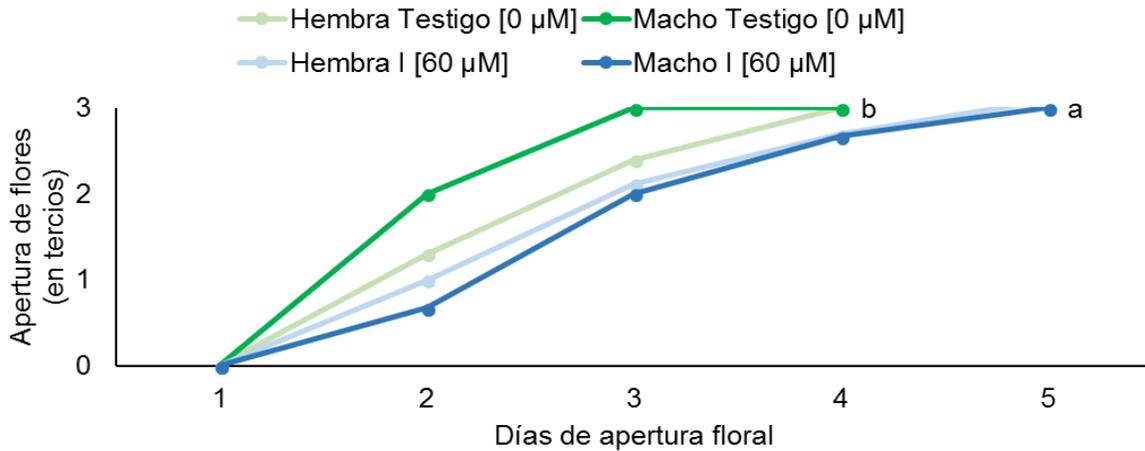


Figura 26. Apertura de flores tratadas con 60 μM I en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuando la planta es tratada con La, la apertura floral presenta las mismas tendencias en el progenitor femenino y masculino del tratamiento testigo, sin presentar diferencias estadísticas entre ellos (**Figura 27**).

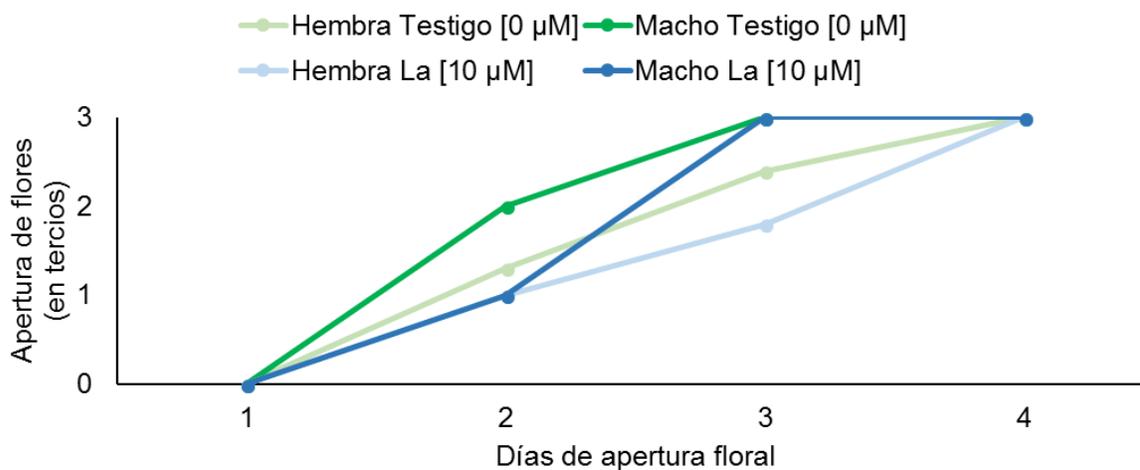


Figura 27. Apertura de flores tratadas con 10 μM La en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

El tratamiento con 20 μM La estimuló la apertura floral en ambos progenitores; misma que alcanzó los tres tercios al 3 d. A diferencia de lo ocurrido con los progenitores del tratamiento testigo que su apertura floral total se logró en el 4 d (**Figura 28**).

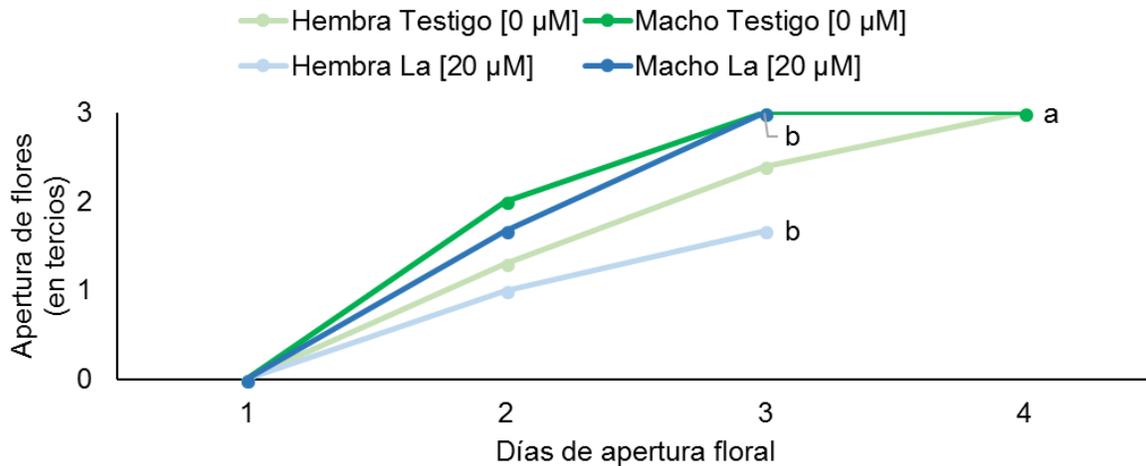


Figura 28. Apertura de flores tratadas con 20 μM La en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

El tratamiento con 30 μM La ocasionó la mayor apertura floral en el progenitor masculino después de 2 d, respecto a su testigo y a los datos del progenitor femenino; sin embargo, después de 4 d en ambos progenitores no hubo diferencias en la apertura floral respecto a sus testigos (**Figura 29**).

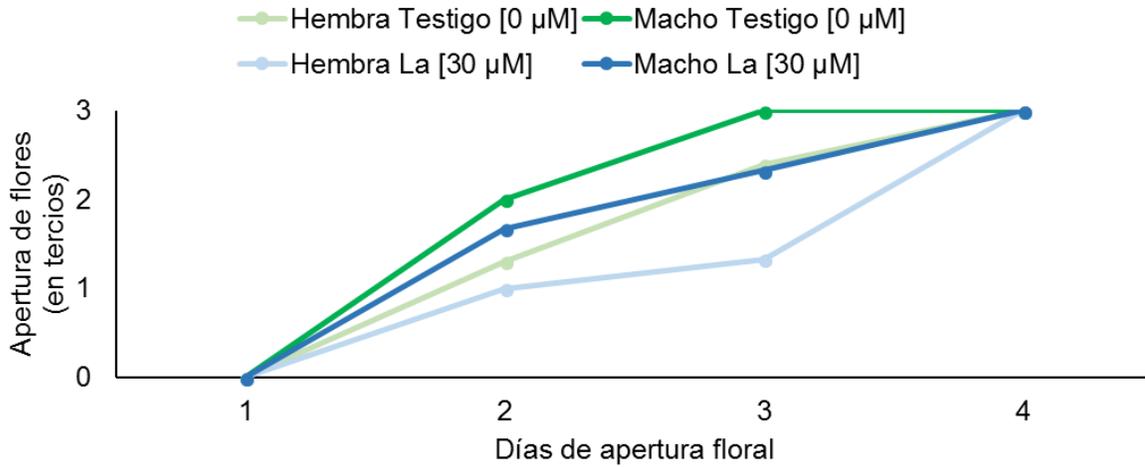


Figura 29. Apertura de flores tratadas con 30 μM La en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

El tratamiento con 25 μM Ti retrasó en 1 d la apertura floral tanto en el progenitor masculino como en el femenino, alcanzándose los tres tercios al 4 d (**Figura 30**).

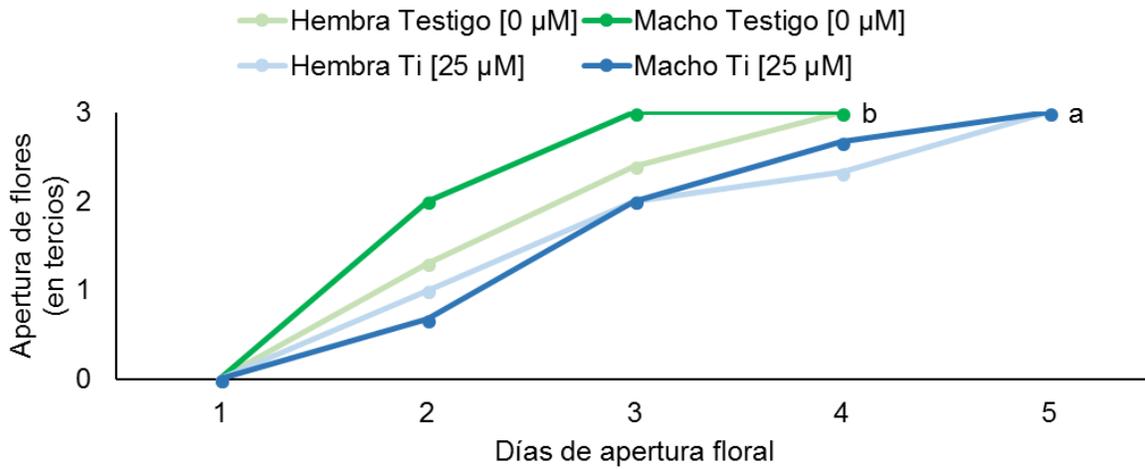


Figura 30. Apertura de flores tratadas con 25 μM Ti en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Con 50 μM Ti, la apertura floral fue más elevada en el progenitor masculino que en su testigo en los días 2 y 3; sin embargo, alcanzaron los tres tercios de apertura floral ambos tratamientos después de 4 d. todos los tratamientos se prolongaron hasta el día 4. Respuestas contrarias a la del progenitor masculino se observaron en el progenitor femenino (**Figura 31**).

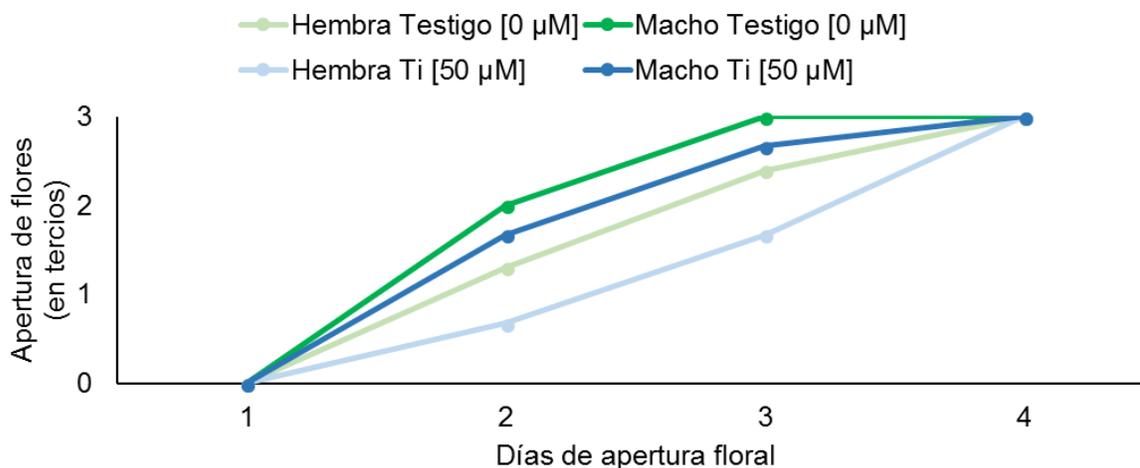


Figura 31. Apertura de flores tratadas con 50 μM Ti en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

A 75 μM Ti, se observó una mayor apertura floral en el progenitor masculino, en comparación con su testigo después de 3 d. En el progenitor femenino la apertura floral fue muy similar entre el testigo y el tratamiento con 75 μM Ti (**Figura 32**).

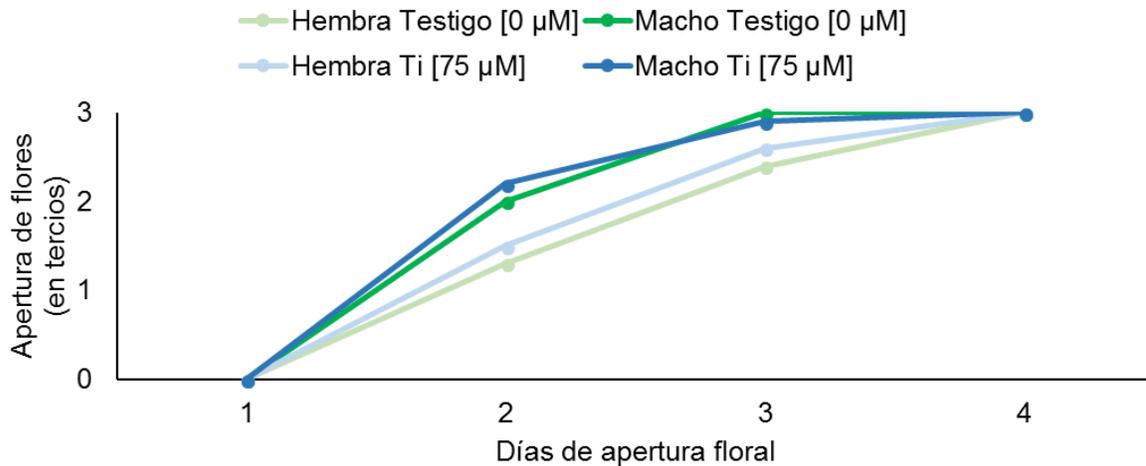


Figura 32. Apertura de flores tratadas con 75 μM Ti en la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

3.3.2.3. Lecturas SPAD

Al tratar los tallos con yodo, se observaron medias muy similares entre tratamientos tanto al inicio como al final del experimento respecto a las unidades SPAD registradas. Al inicio en todos los casos fueron mayores a 40, y al final se redujeron a menos de 10, lo que indica un proceso normal de degradación de clorofilas (**Figura 33**).

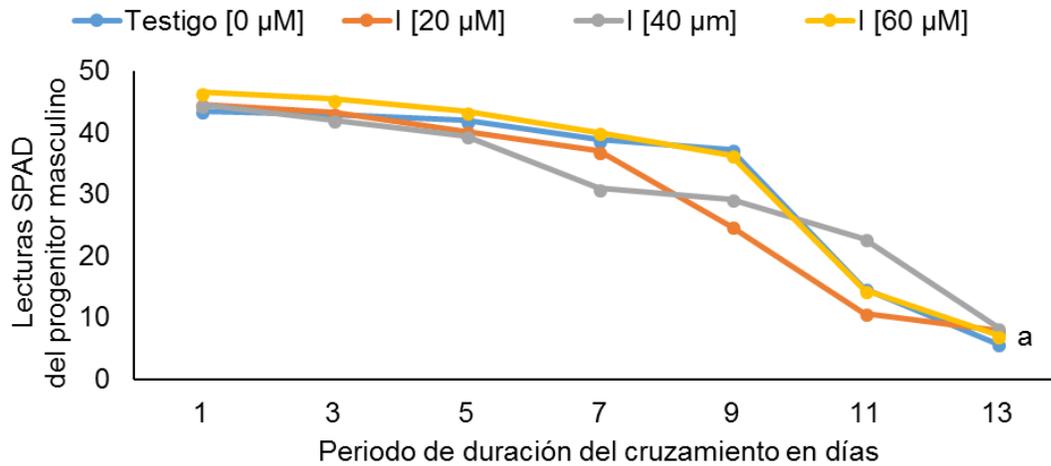


Figura 33. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (0, 20, 40 y 60 μM I) a la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Al aplicar La en la solución aséptica, las unidades SPAD fueron muy similares hasta el día 9 del registro. A partir del día 11 y 13, se observaron medias más altas respecto a esta variable en los tratamientos con lantano, en comparación con el testigo (**Figura 34**).

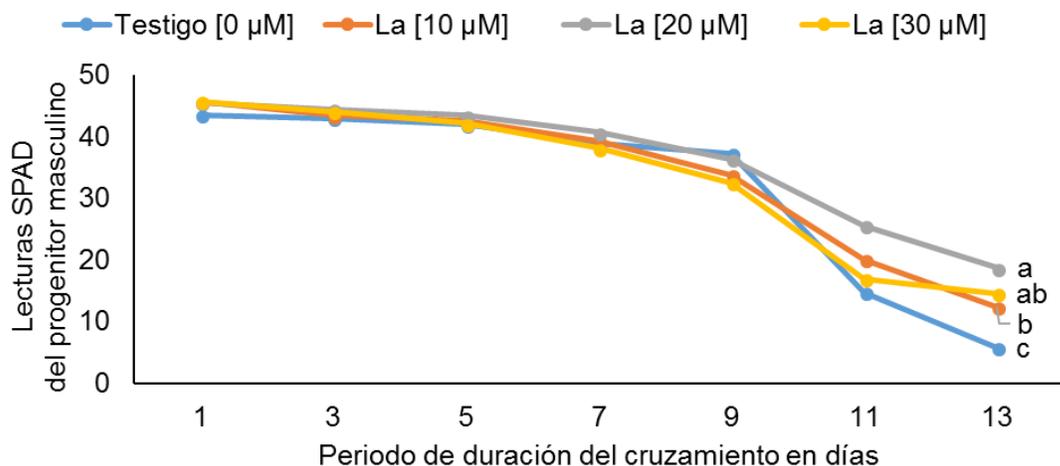


Figura 34. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de lantano (0, 20, 20 y 30 μM La) en la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Un comportamiento muy similar al observado en los tratamientos con La, se pudo observar al tratar los tallos con titanio, pues las unidades SPAD fueron muy similares hasta el día 9 del registro. A partir del día 11 y 13, se observaron medias más altas en los tratamientos con titanio, en comparación con los tallos del tratamiento testigo, y el valor de las medias fue directamente proporcional al de las concentraciones probadas de este elemento (**Figura 35**).

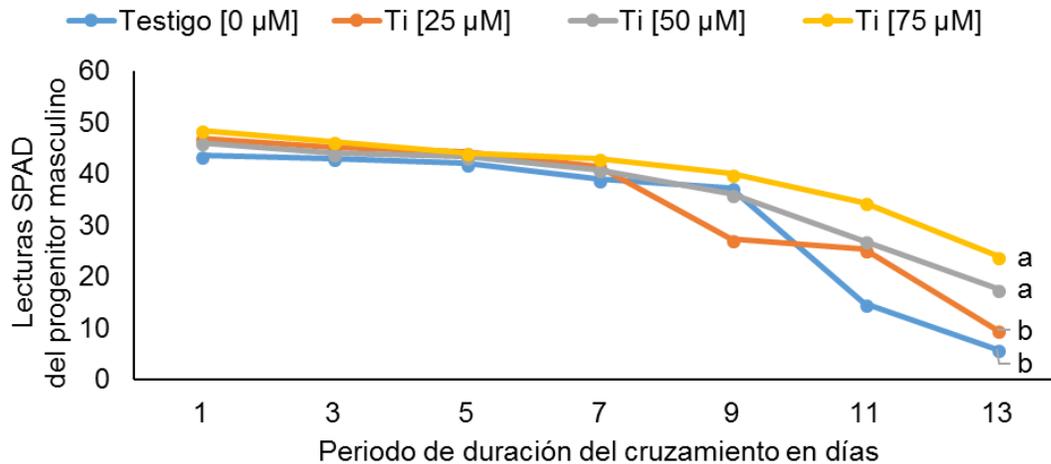


Figura 35. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de titanio (0, 25, 50 y 75 μM Ti) en la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Al comparar las medias de todos los tratamientos en el progenitor masculino, se pudo observar que las más altas fueron registradas en el tratamiento con 20 μM La y 75 μM Ti, y sobre todo con Ti, hubo diferencia estadística significativas respecto al testigo (**Figura 36**).

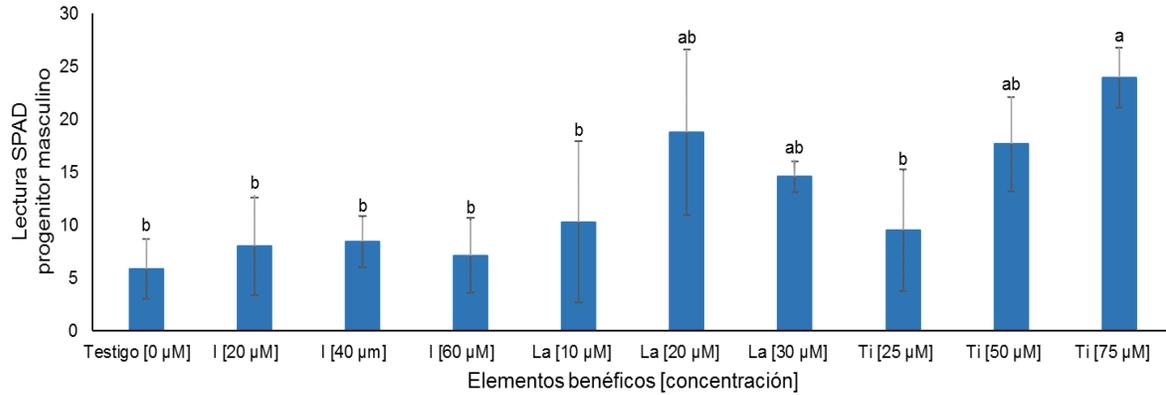


Figura 36. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti). Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el progenitor femenino, las unidades SPAD mostraron similitud tanto al inicio como al final del periodo de evaluación; destaca que del día 7 al 11, el tratamiento con 20 μ M I mostró medias más altas para esta variable en comparación con el resto de los tratamientos, incluyendo el testigo (**Figura 37**).

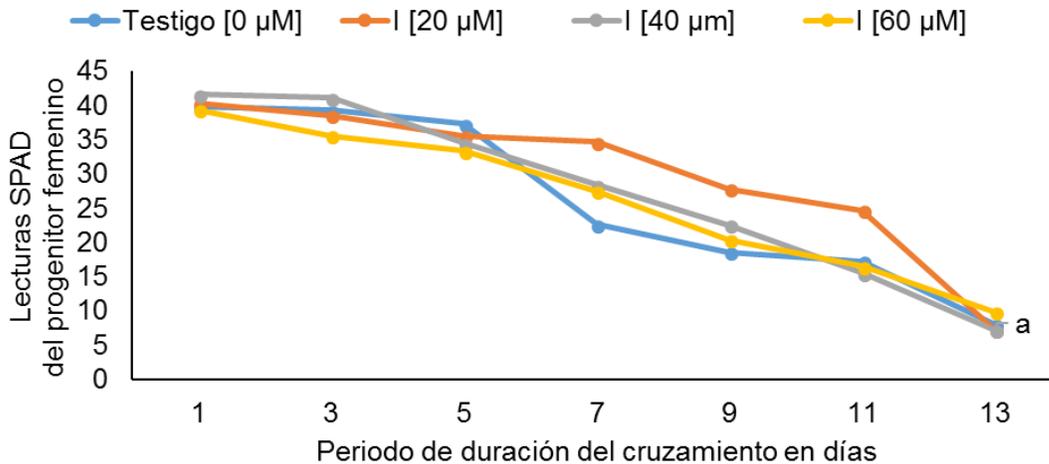


Figura 37. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (0, 20, 40 y 60 μM I) a la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Un comportamiento muy distinto al anterior se observó en los tratamientos con La, pues en todo el periodo evaluado, el tratamiento con 20 μM La mostró medias más altas para esta variable en comparación con el resto de los tratamientos, incluyendo el testigo (**Figura 38**).

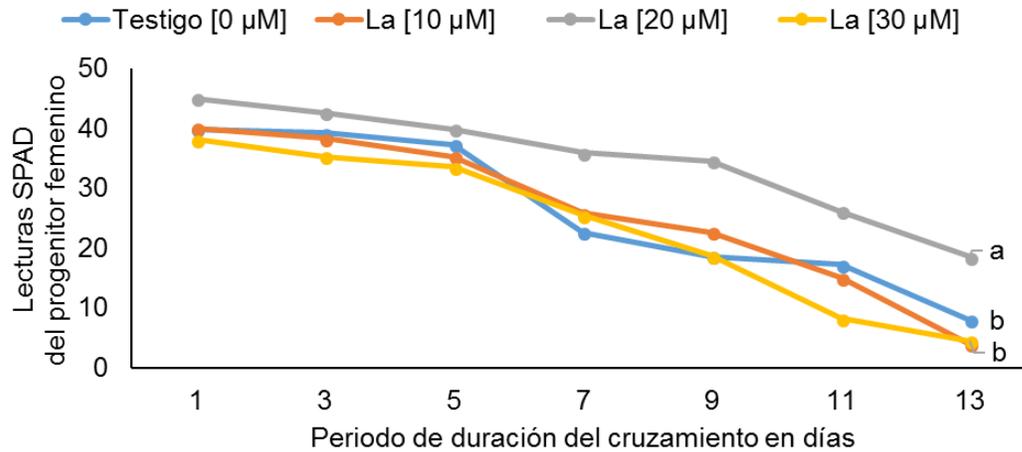


Figura 38. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de lantano (0, 10, 20 y 30 μM La) en la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Para el caso de los tratamientos con titanio, si bien al inicio del experimento se observaron algunas diferencias, al final todos los tratamientos mostraron medias muy similares, con un ligero aumento en las unidades SPAD al tratar los tallos con 50 y 75 μM Ti (**Figura 39**).

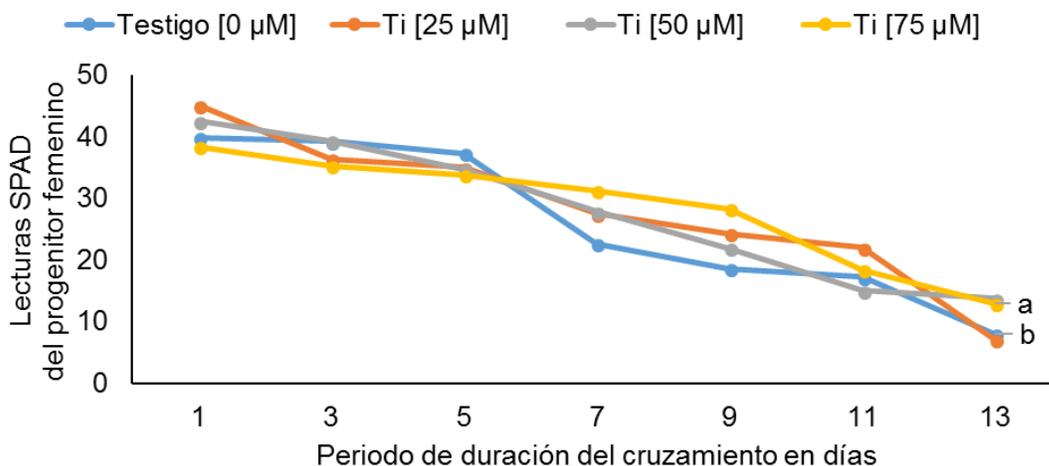


Figura 39. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de titanio (0, 25, 50 y 75 μM Ti) a las soluciones asépticas. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Al comparar las medias de todos los tratamientos en el progenitor femenino, se pudo observar que las más altas fueron registradas en el tratamiento con 20 μM La, así como 50 y 75 μM Ti. Es de notar que la media más baja se observó con 10 μM La, seguida de 30 μM La (**Figura 40**).

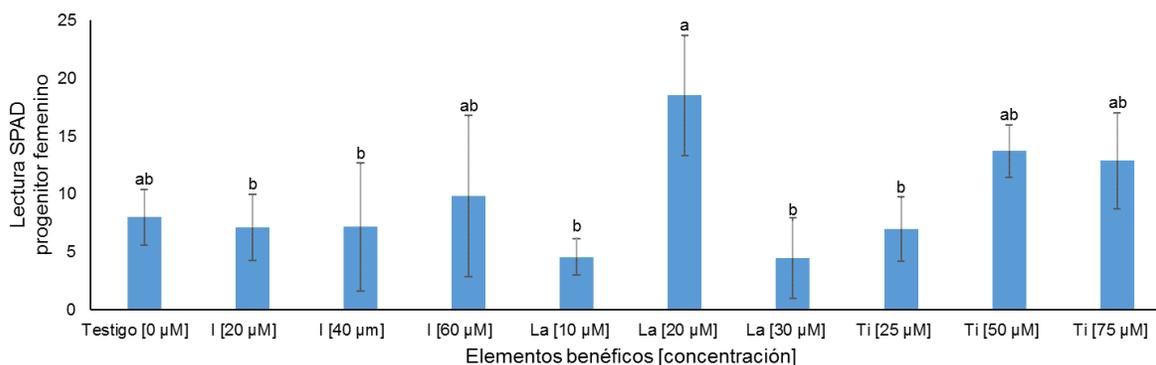


Figura 40. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a las soluciones asépticas. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.2.4. Diámetro del raquis central

Al comparar las medias en los tratamientos con I, La y Ti en el progenitor masculino, se observa que la mayor reducción del raquis central se tuvo con 60 μM I y 30 μM La, en tanto que la menor reducción se observó con 20 μM La (Figura 41).

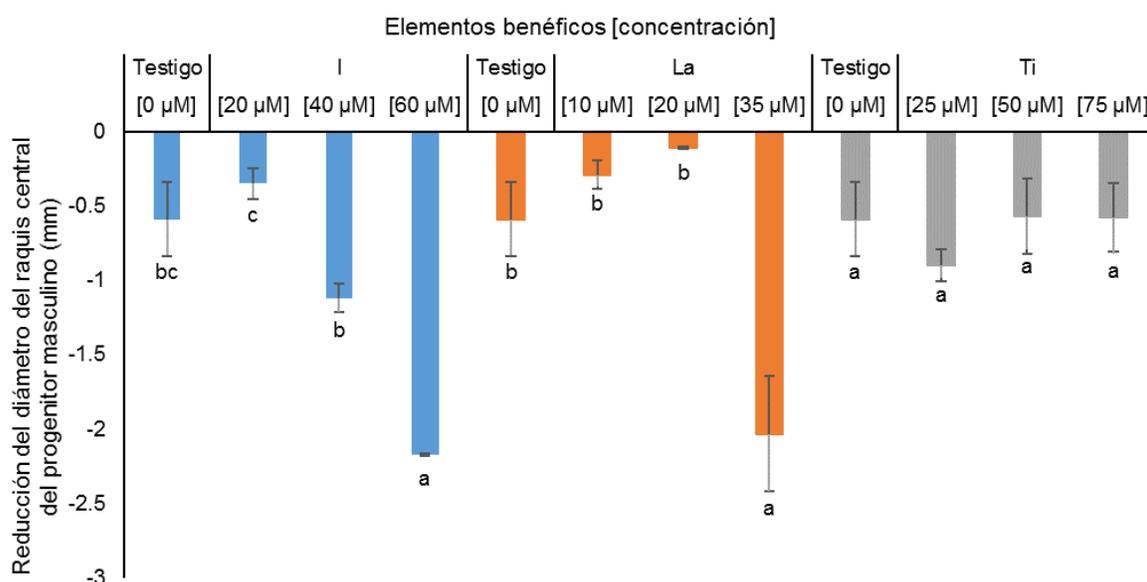


Figura 41. Reducción del raquis en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el progenitor femenino, la mayor reducción del raquis central del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 se observó en los tratamientos con yodo, y los tratamientos con titanio fueron los que observaron la menor reducción (Figura 42).

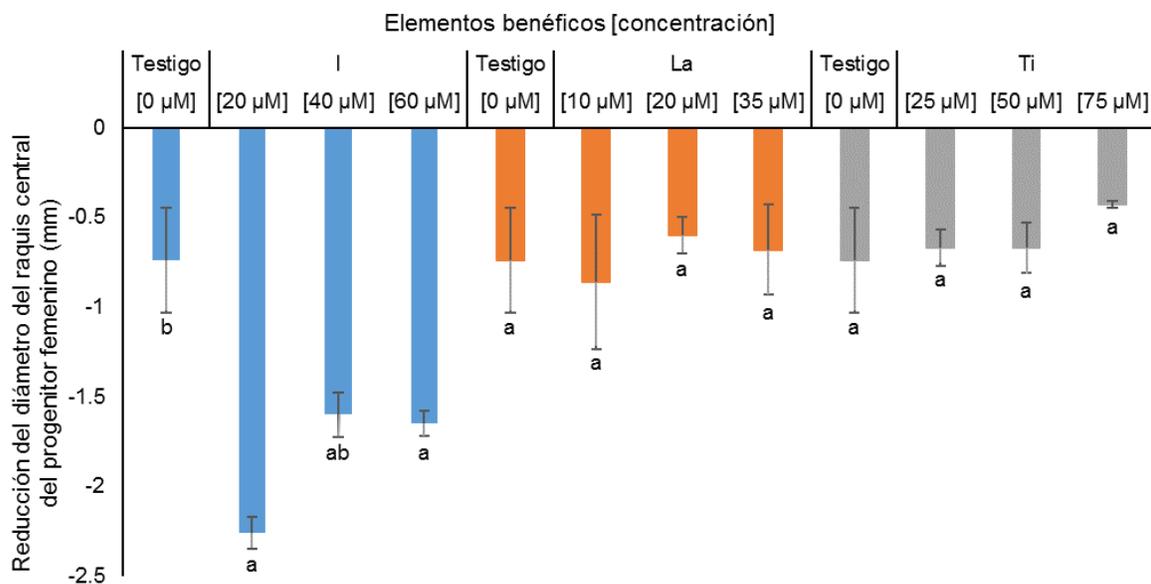


Figura 42. Reducción del raquis en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.2.5. Diámetro del tallo

Con relación a la reducción del diámetro del tallo en el progenitor masculino, la media más alta se obtuvo con el tratamiento con La [20 µM], seguida del tratamiento Ti [50 µM]. Los demás tratamientos tuvieron medias muy similares, aunque la menor reducción se observó con La [10 µM] (**Figura 43**).

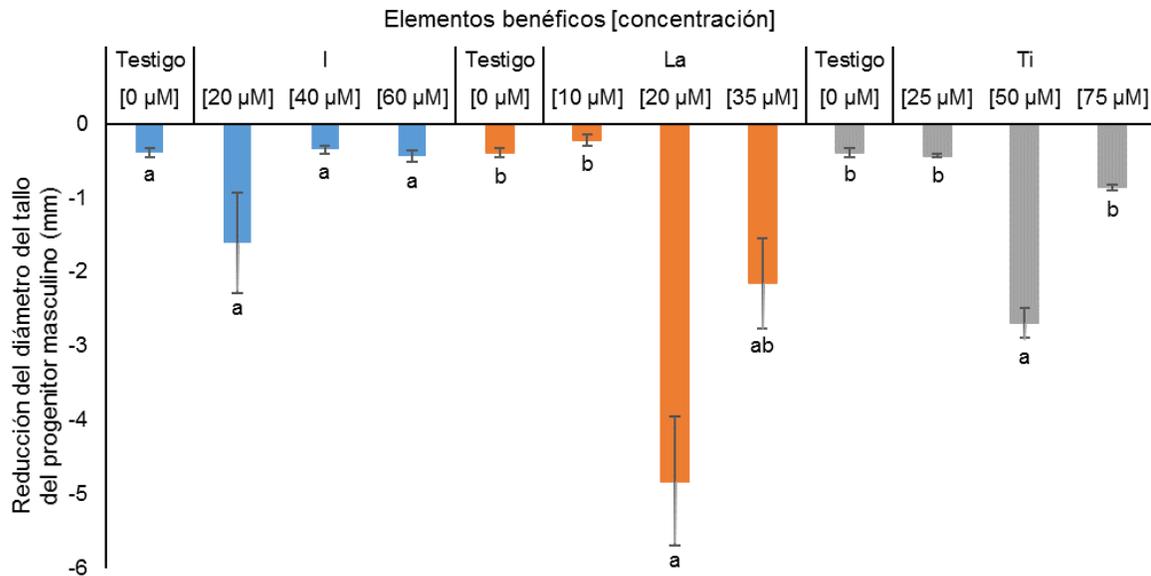


Figura 43. Reducción del diámetro del tallo en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Respecto a la reducción del diámetro del tallo en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252, aunque no se tuvieron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, numéricamente se observó que las medias más altas se obtuvieron en los tratamientos I [60 μ M] y Ti [50 μ M]. La media más baja se obtuvo en el testigo (**Figura 44**).

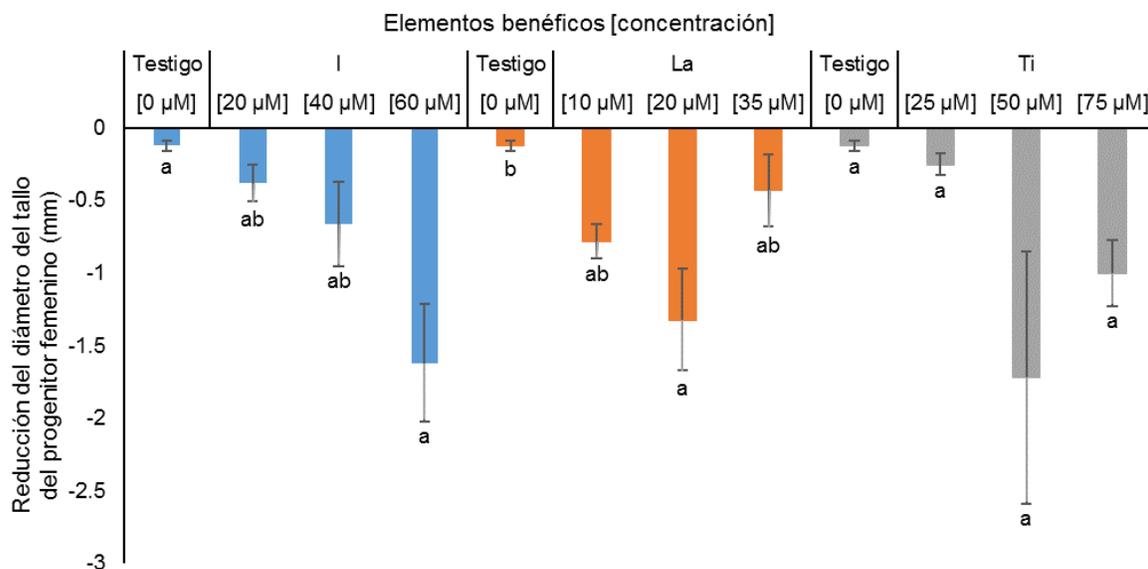


Figura 44. Reducción del diámetro del tallo en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.2.6. Variables evaluadas en poscosecha

3.3.2.6.1. Peso seco del raquis central

En el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 no se observaron efectos estadísticos significativos de los tratamientos en la variable peso seco del raquis central (**Figura 45**).

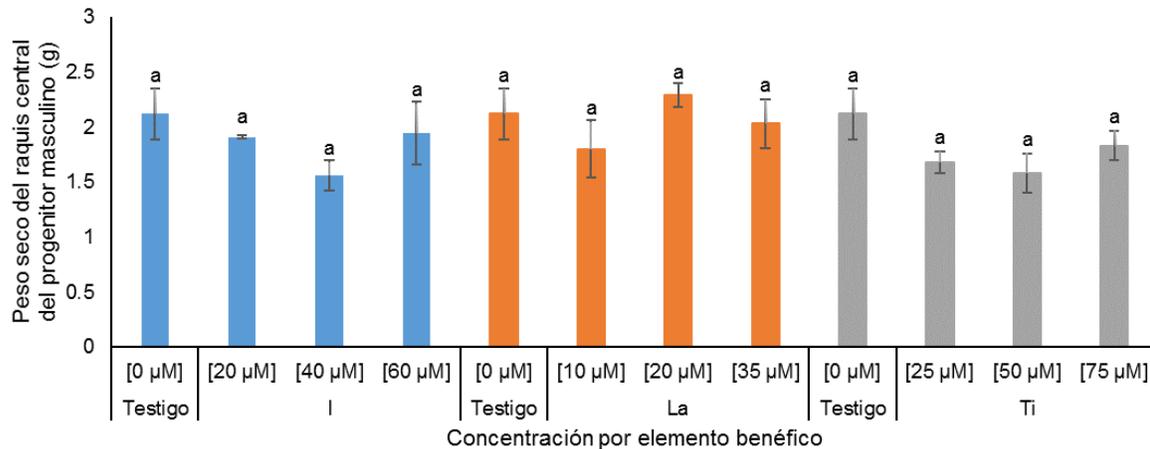


Figura 45. Peso seco del raquis central en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el progenitor femenino de este mismo cruzamiento (HOCP 93-746 x Mex 58-418), todas las medias de las plantas tratadas tanto con I como con La y Ti, fueron superiores que el testigo (**Figura 46**), lo que indica que cualquiera de los elementos benéficos puede mejorar esta variable.

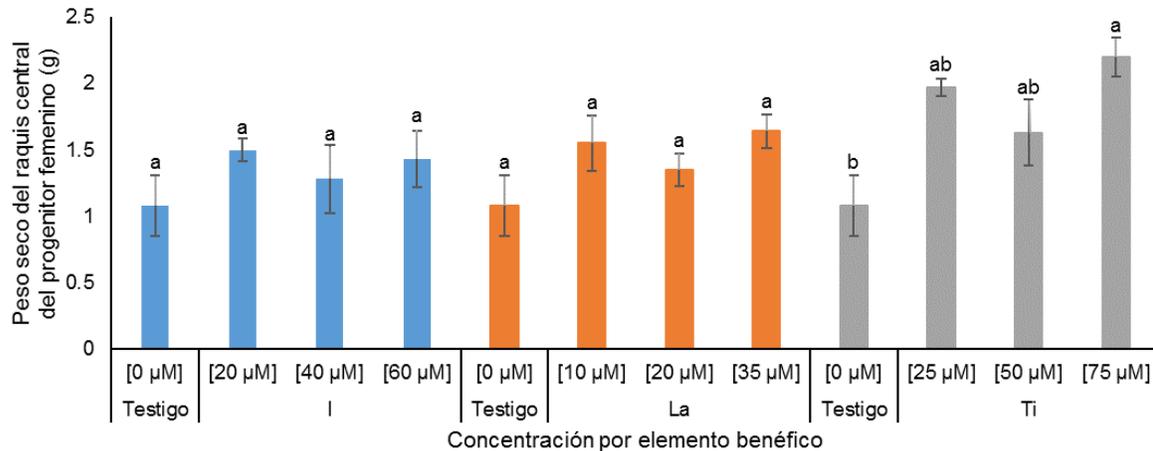


Figura 46. Peso seco del raquis central en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.2.6.2. Peso seco del fuzz

Los tratamientos probados no tuvieron efecto significativo en el peso seco del fuzz en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 (**Figura 47**).

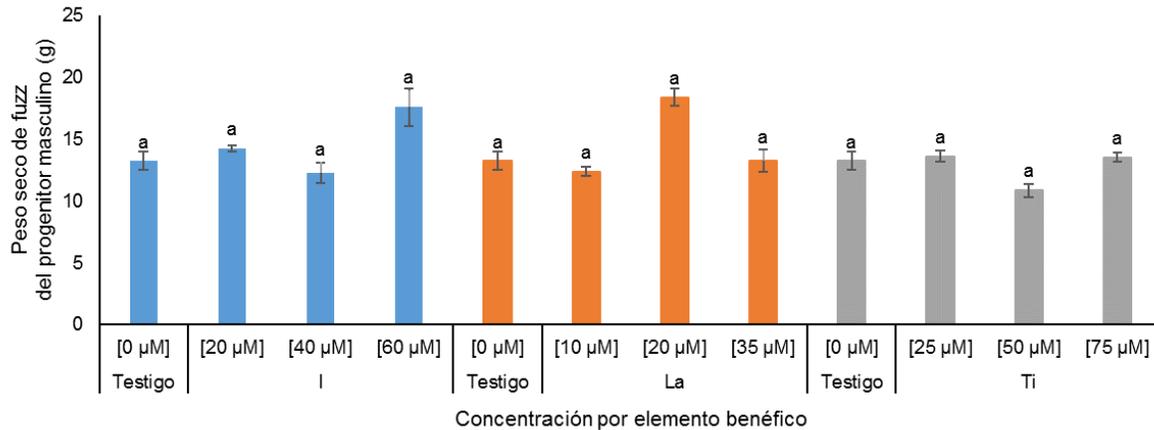


Figura 47. Peso seco del fuzz en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.2.6.3. Longitud de panícula del progenitor femenino

Tampoco se observaron efectos estadísticos significativos sobre la longitud de la panícula en el progenitor femenino de este mismo cruzamiento (HOCP 93-746 x Mex 58-418) (**Figura 48**).

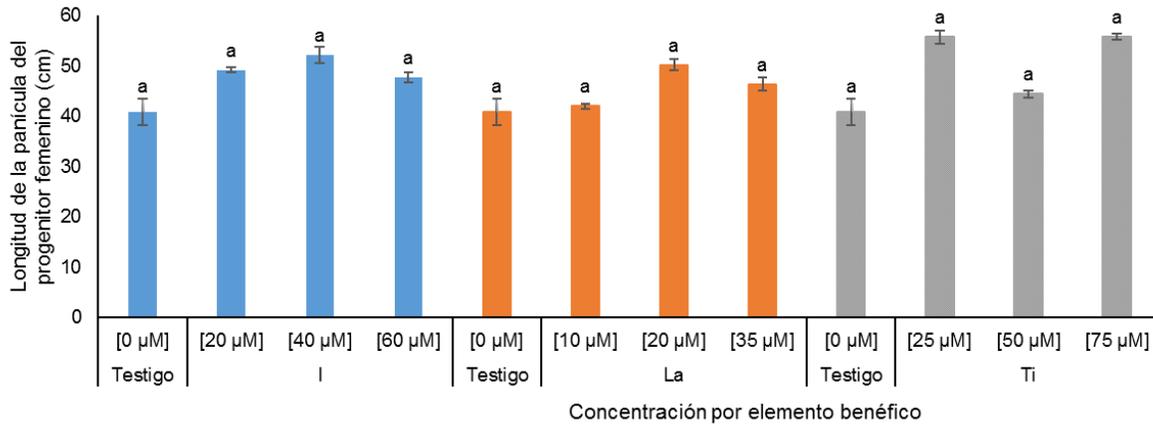


Figura 48. Longitud de panícula del progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio (Ti) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.2.6.4. Impurezas y peso final durante el proceso poscosecha

Respecto a las impurezas y peso final durante el proceso de poscosecha de la semilla botánica o fuzz en el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio, se observó que la media más alta se registró al aplicar 20 μ M La, y la más baja con 10 μ M I. Sin embargo, las variables peso del fuzz después del despeluzado, peso de semillas vanas y otras impurezas no fueron afectadas significativamente por ninguno de los tratamientos probados (**Cuadro 6**).

Para el caso de las variables peso de impurezas y peso del fuzz después del sopleado, si hubo efecto de los tratamientos, ya que el tratamiento con 20 μ M La registró la variable más alta para peso de impurezas, y con 10 μ M La se registró la media más alta para peso del fuzz después del sopleado. Los tratamientos con Ti disminuyeron significativamente la primera de estas dos últimas variables, y el yodo lo hizo con la segunda variable (**Cuadro 6**).

Cuadro 6. Impurezas y peso final durante el proceso de postcosecha de la semilla botánica fuzz en el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de yodo (I), lantano (La) y titanio a la solución aséptica.

Elemento benéfico [concentración]	PFDD1 (g)	PFDD2 (g)	PI1 (g)	PFDS (g)	PSVI2 (g)
Testigo [0 µM]	14.4±0.05a	2.6±0.05a	11.8±0.10a	2.6±0.13a	0.0±0.01a
I [20 µM]	13.1±0.05c	2.4±0.10a	10.7±0.15b	2.2±0.03a	0.2±0.12a
I [40 µM]	14.1±0.05b	2.4±0.07a	11.7±0.04a	2.4±0.06a	0.0±0.01a
I [60 µM]	14.7±0.05a	2.4±0.13a	12.3±0.12a	2.4±0.16a	0.0±0.00a
Testigo [0 µM]	14.4±0.05b	2.6±0.05b	11.8±0.10b	2.6±0.13c	0.0±0.01a
La [10 µM]	13.5±0.05c	4.0±0.03a	9.5±0.05d	4.0±1.49a	0.0±0.01a
La [20 µM]	15.5±0.05a	3.1±0.06b	12.5±0.11a	3.1±0.06b	0.0±0.01a
La [30 µM]	13.0±0.05d	2.7±0.16b	10.2±0.17c	2.7±0.07bc	0.0±0.01a
Testigo [0 µM]	14.4±0.05a	2.6±0.05a	11.8±0.10a	2.6±0.13b	0.0±0.01a
Ti [25 µM]	13.3±0.05b	4.4±1.49a	8.9±1.53a	2.7±0.05b	1.7±1.45a
Ti [50 µM]	12.7±0.05c	2.8±0.06a	9.9±0.03a	2.8±0.05b	0.0±0.01a
Ti [75 µM]	13.0±0.05bc	3.6±0.07a	9.4±0.06a	3.5±0.08a	0.1±0.06a

PFDD1: Peso del fuzz después del desgrane de la hembra; PFDD2: Peso del fuzz después del despeluzado; PI1: Peso de impurezas; PFDS: Peso del fuzz después del sopleteado; PSVI2: Peso de semillas vanas y otras impurezas. Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.2.7. Variables de germinación

Se utilizó la semilla proveniente del progenitor femenino para la evaluación de variables de germinación.

3.3.2.7.1. Dinámica de germinación

En el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418, al final del periodo de evaluación, la media más alta de germinación se registró en el testigo, seguida de los tratamientos de 40 μM I y 10 μM La. Las medias más bajas se registraron con los tratamientos 60 μM I, y 20 μM I (**Figura 49**).

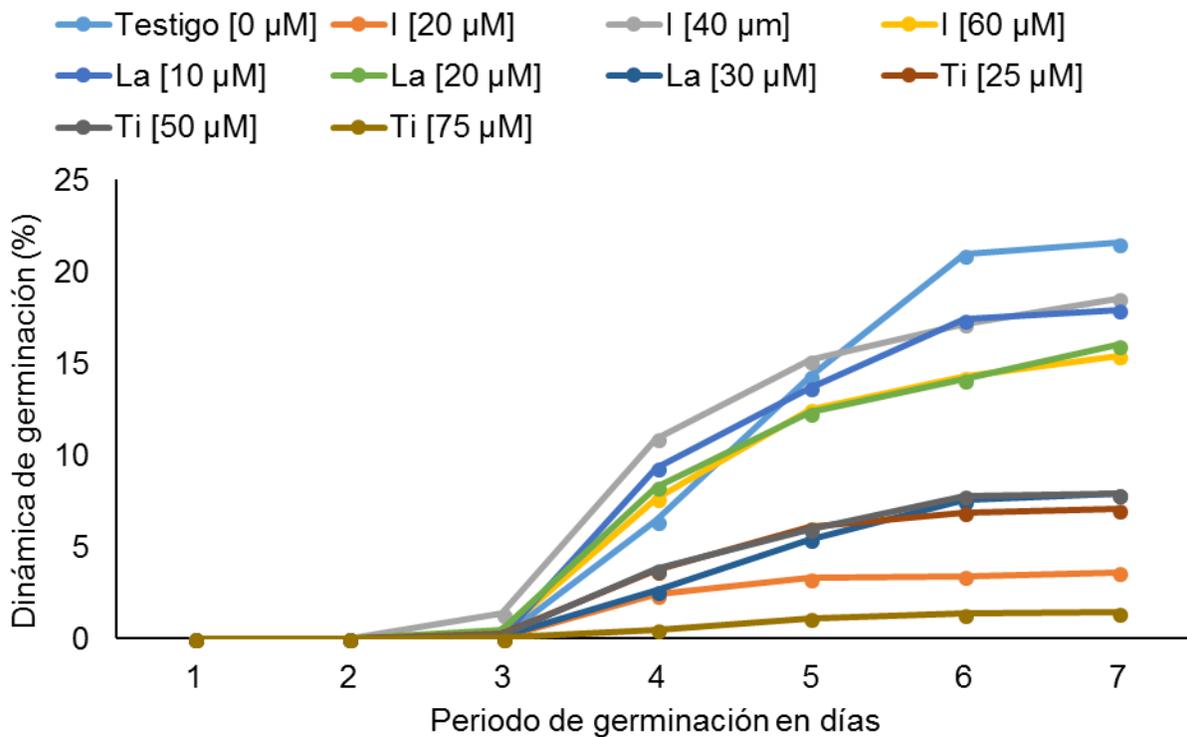


Figura 49. Dinámica de germinación del fuzz del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 en días por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si) a la solución aséptica.

3.3.2.7.2. Porcentaje de germinación

El porcentaje de germinación del fuzz del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 fue mayor en el testigo, seguido por los tratamientos donde se aplicó 40 μM I y 10 μM La. Las medias más bajas se registraron con Ti (**Figura 50**).

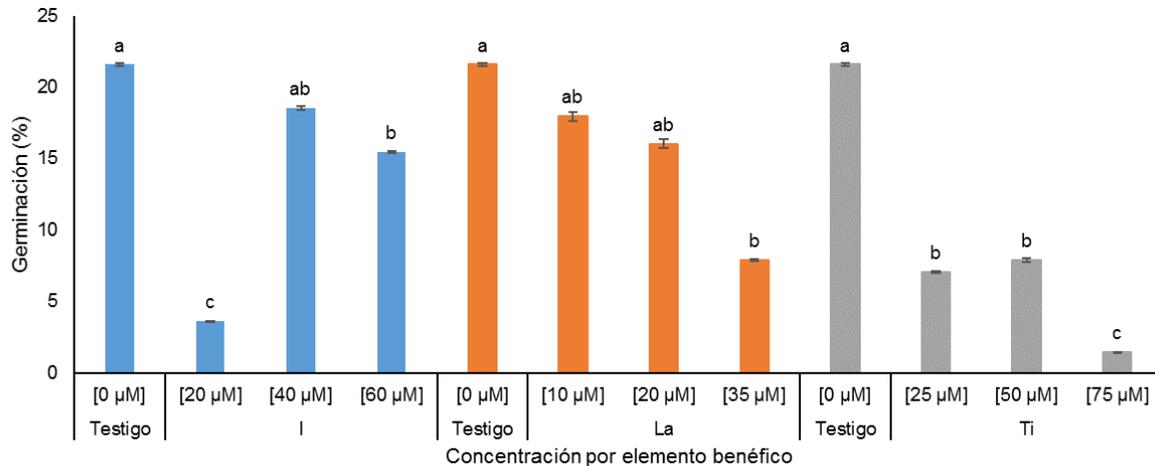


Figura 50. Porcentaje de germinación del fuzz del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 en días por efecto de la aplicación de aluminio (Al) y silicio (Si). Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.3. Germinación media: Cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743

3.3.3.1. pH y CE de la solución aséptica

Los valores de pH de la solución aséptica fueron más altos en las soluciones con Si y Ti, y los más bajos se registraron en las soluciones con Al, I y La, así como en el testigo (**Cuadro 7**).

Cuadro 7. Valores de pH de la solución aséptica durante el periodo de cruzamiento (12 días) para CC 93-3826 x CP 80-1743.

Elemento benéfico [concentración]	pH	Mín	Máx
Testigo [0 µM]	2.62±0.03b	2.57	2.68
Al [50 µM]	2.62±0.03b	2.55	2.70
Al [100 µM]	2.63±0.02b	2.58	2.66
Al [150 µM]	2.65±0.02a	2.60	2.70
Testigo [0 µM]	2.62±0.03d	2.57	2.68
I [20 µM]	2.67±0.03a	2.62	2.75
I [40 µM]	2.66±0.03b	2.61	2.75
I [60 µM]	2.65±0.03c	2.60	2.74
Testigo [0 µM]	2.62±0.03c	2.57	2.68
La [10 µM]	2.68±0.02b	2.64	2.72
La [20 µM]	2.69±0.02a	2.63	2.75
La [30 µM]	2.69±0.02a	2.65	2.74
Testigo [0 µM]	2.62±0.03c	2.57	2.68
Si [5 µM]	2.70±0.04b	2.59	2.77
Si [10 µM]	2.73±0.03a	2.66	2.79
Si [15 µM]	2.73±0.03a	2.65	2.80
Testigo [0 µM]	2.62±0.03d	2.57	2.68
Ti [25 µM]	2.74±0.02c	2.69	2.79
Ti [50 µM]	2.79±0.03a	2.71	2.87
Ti [75 µM]	2.75±0.02b	2.70	2.79

Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Respecto a la conductividad eléctrica, la media más alta se registró en la solución aséptica con 60 µM I, y la más baja con 50 µM Ti (**Cuadro 8**).

Cuadro 8. Valores de conductividad eléctrica (dS m^{-1}) de la solución aséptica durante el periodo de cruzamiento (12 días) para CC 93-3826 x CP 80-1743.

Elemento benéfico [concentración]	CE	Mín	Máx
Testigo [0 μM]	1.30 \pm 0.18d	0.80	1.80
Al [50 μM]	1.60 \pm 0.19b	1.20	2.20
Al [100 μM]	1.67 \pm 0.18a	1.20	2.10
Al [150 μM]	1.55 \pm 0.16c	1.20	1.90
Testigo [0 μM]	1.30 \pm 0.18d	0.80	1.80
I [20 μM]	1.70 \pm 0.24c	1.20	2.40
I [40 μM]	1.78 \pm 0.25b	1.20	2.50
I [60 μM]	1.87 \pm 0.26a	1.30	2.50
Testigo [0 μM]	1.30 \pm 0.18d	0.80	1.80
La [10 μM]	1.48 \pm 0.16b	1.20	1.90
La [20 μM]	1.52 \pm 0.15c	1.20	1.90
La [30 μM]	1.52 \pm 0.18a	1.20	2.10
Testigo [0 μM]	1.30 \pm 0.18b	0.80	1.80
Si [5 μM]	1.37 \pm 0.12a	1.10	1.60
Si [10 μM]	1.32 \pm 0.14b	1.10	1.80
Si [15 μM]	1.33 \pm 0.15b	1.10	1.80
Testigo [0 μM]	1.30 \pm 0.18b	0.80	1.80
Ti [25 μM]	1.27 \pm 0.14c	1.00	1.80
Ti [50 μM]	1.15 \pm 0.20d	0.70	1.80
Ti [75 μM]	1.33 \pm 0.14a	1.10	1.80

Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.3.2. Apertura de flores

En la **Figura 51** se presentan los resultados de apertura de flores de soluciones asépticas con 50 μM Al para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. Se observa que si bien después de 4 d se tuvo la alcanzó la apertura florar de tres tercios en todos los tratamientos y testigos; el tratamiento 50 μM Al, tuvo efecto negativo tanto en el progenitor masculino como en el femenino.

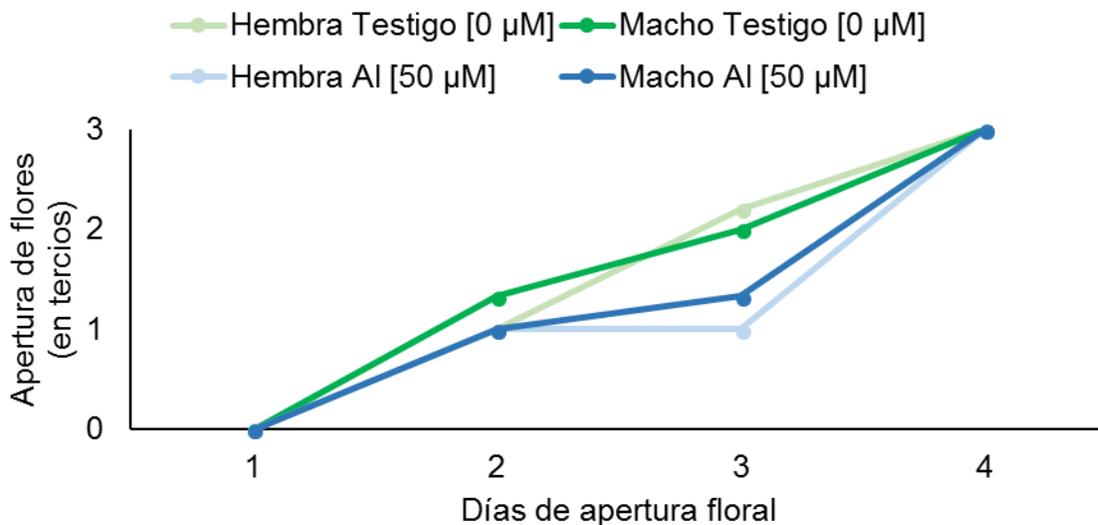


Figura 51. Apertura de flores tratadas con 50 μM Al en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

Al elevar la dosis de Al a 100 μM se observa que el progenitor masculino tratado con Al tiene una apertura floral más elevada que con 50 μM Al, en el día 3 del proceso. Al final, todos los tratamientos mostraron la misma apertura. Este tratamiento tuvo efectos negativos en el progenitor femenino en los días 2 y 3 (**Figura 52**).

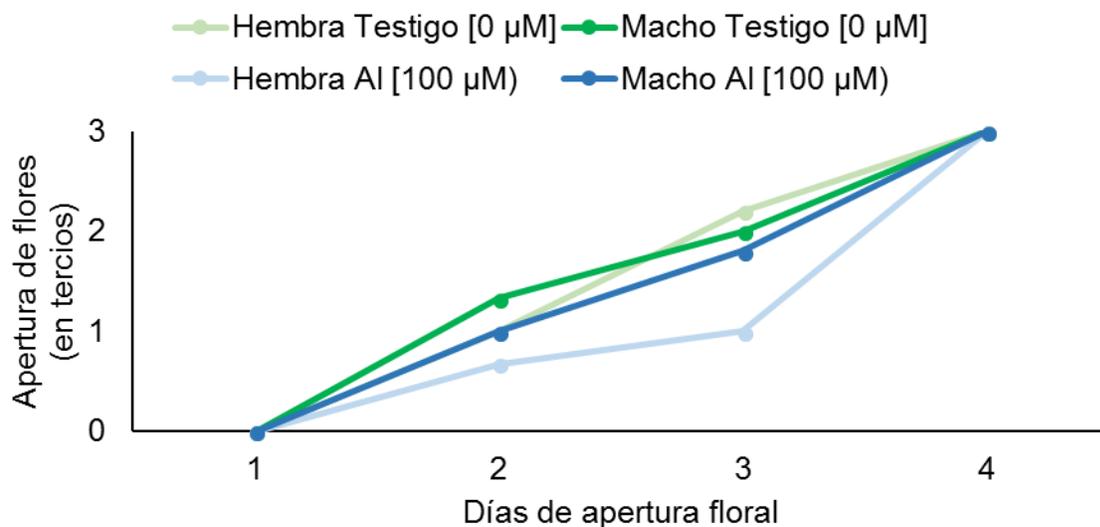


Figura 52. Apertura de flores tratadas con 100 μM AI en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

Al aplicar 150 μM AI a la solución aséptica para los tallos del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, se observan efectos negativos en los días 2 y 3. En el progenitor femenino fueron evidentes los efectos negativos de este tratamiento, dado que la apertura floral de tres tercios se alcanzó después de 6 d (**Figura 53**).

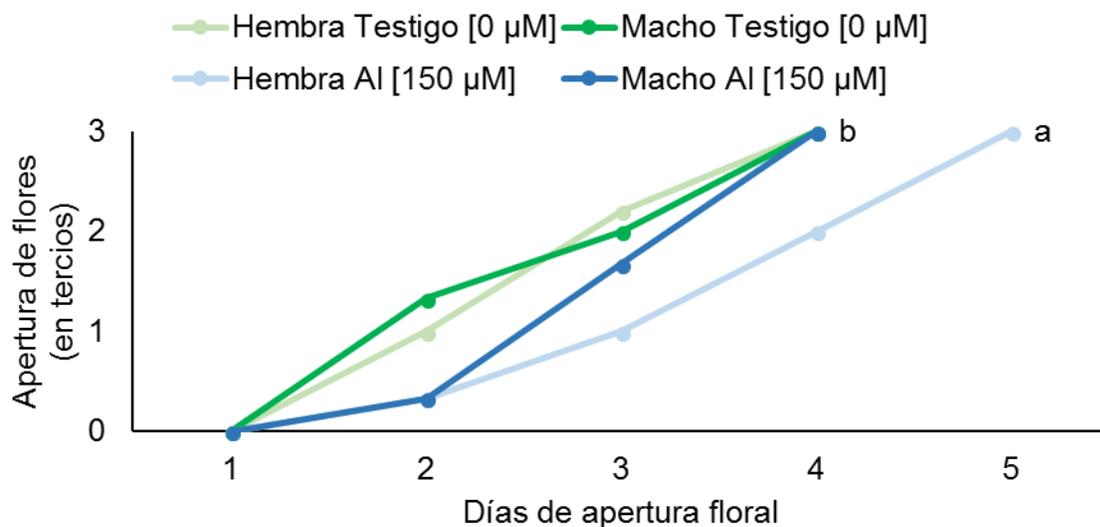


Figura 53. Apertura de flores tratadas con 150 μM AI en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Al aplicar 20 μM I a la solución aséptica se observó un retraso en la apertura floral del progenitor femenino, en el cual se alcanzaron los tres tercios después de 5 d (**Figura 54**).

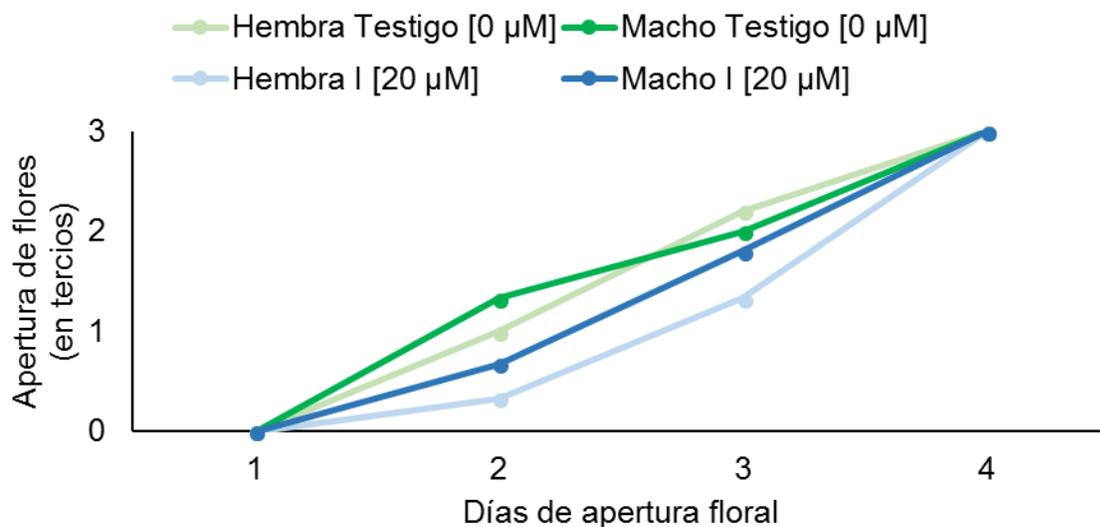


Figura 54. Apertura de flores tratadas con 20 μM I en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

En la **Figura 55** también se observa un comportamiento muy similar al que mostraron los dos tratamientos anteriores, pues la aplicación de 40 μM I retrasó la apertura en el progenitor femenino.

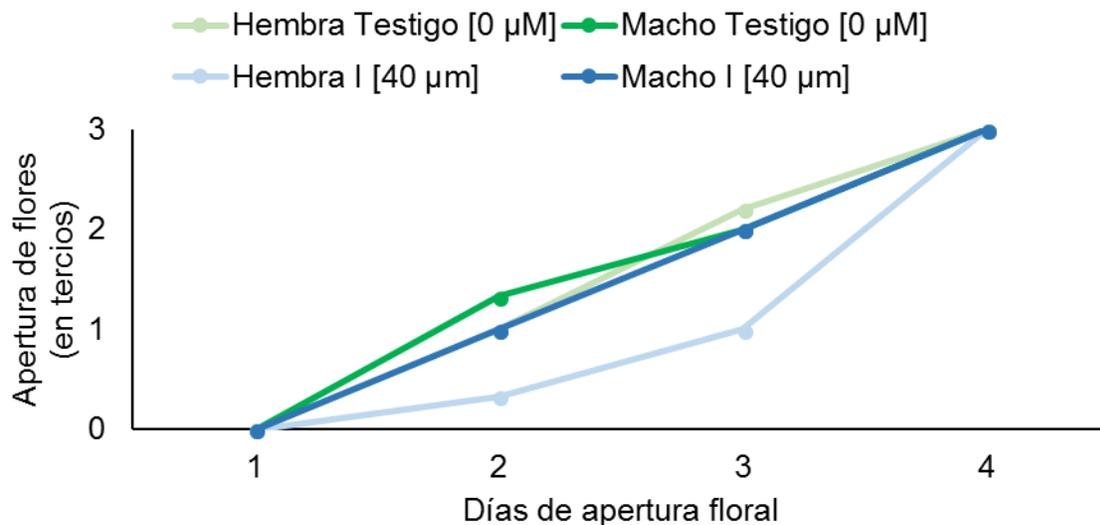


Figura 55. Apertura de flores tratadas con 40 μM I en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

El retraso en la apertura floral del progenitor femenino fue causado por el tratamiento con 60 μM I como se observa en la **Figura 56**.

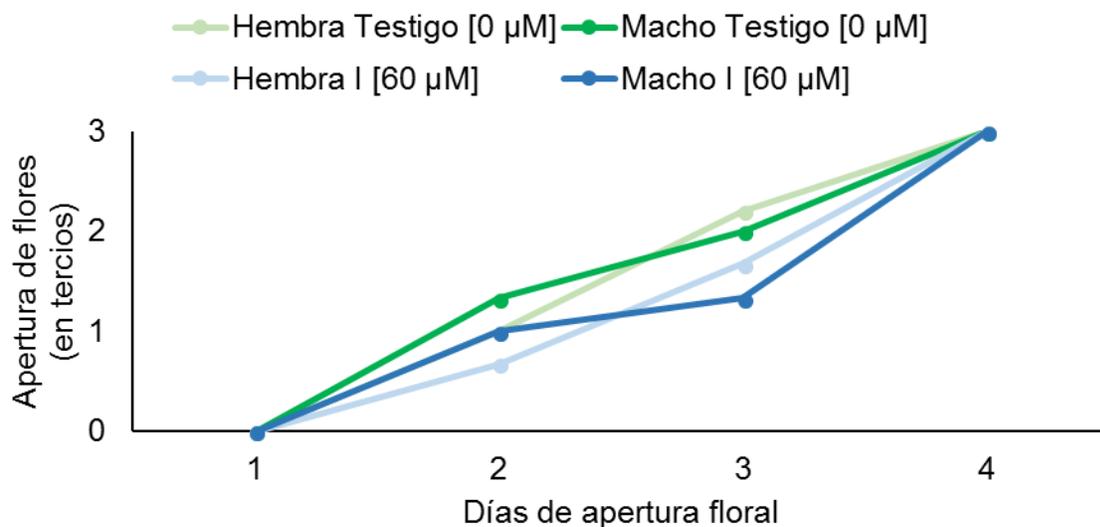


Figura 56. Apertura de flores tratadas con 60 μM I en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

El tratamiento 10 μM La retrasó la apertura del progenitor femenino; asimismo, tuvo efectos negativos en el progenitor masculino dado que solo alcanzó dos tercios de apertura a los 3 d (**Figura 57**).

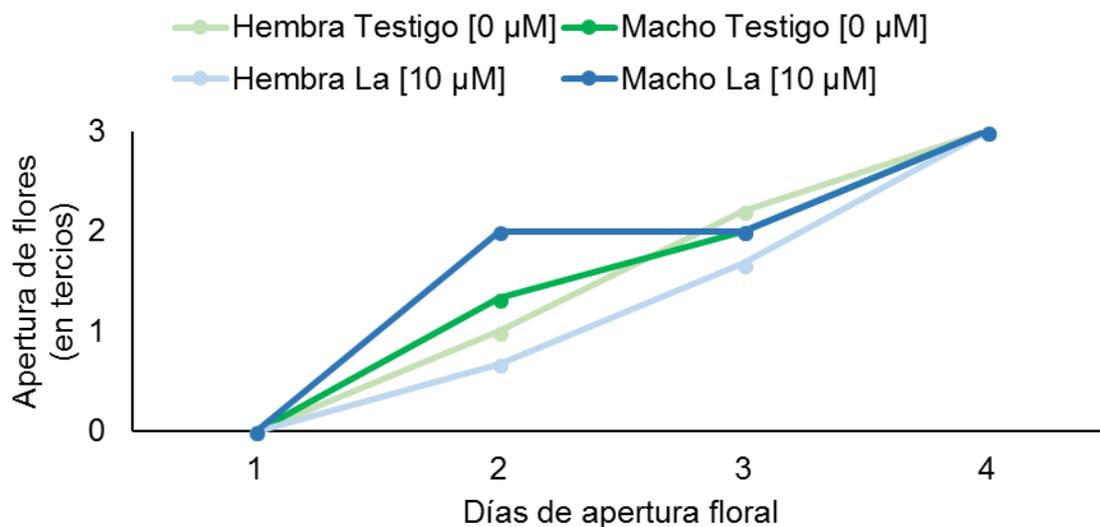


Figura 57. Apertura de flores tratadas con 10 μM La en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

De la misma manera, el tratamiento con 20 μM La en la solución aséptica retrasó la apertura floral en el progenitor femenino (**Figura 58**).

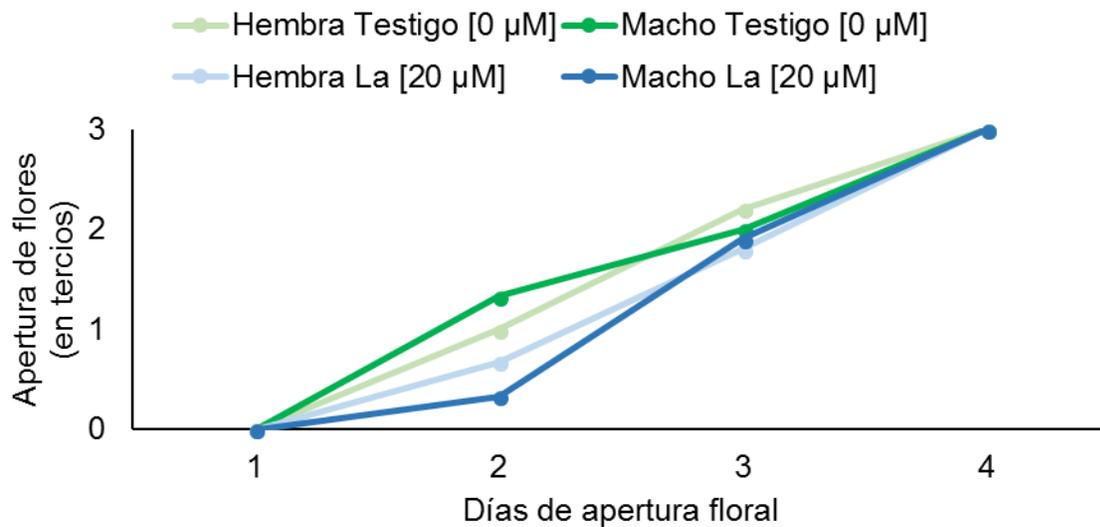


Figura 58. Apertura de flores tratadas 20 μM La en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. No se encontraron diferencias estadísticas por efecto de la concentración del elemento benéfico.

Al tratar al progenitor femenino con 30 μM La se retrasa la apertura floral hasta por 6 d (**Figura 59**).

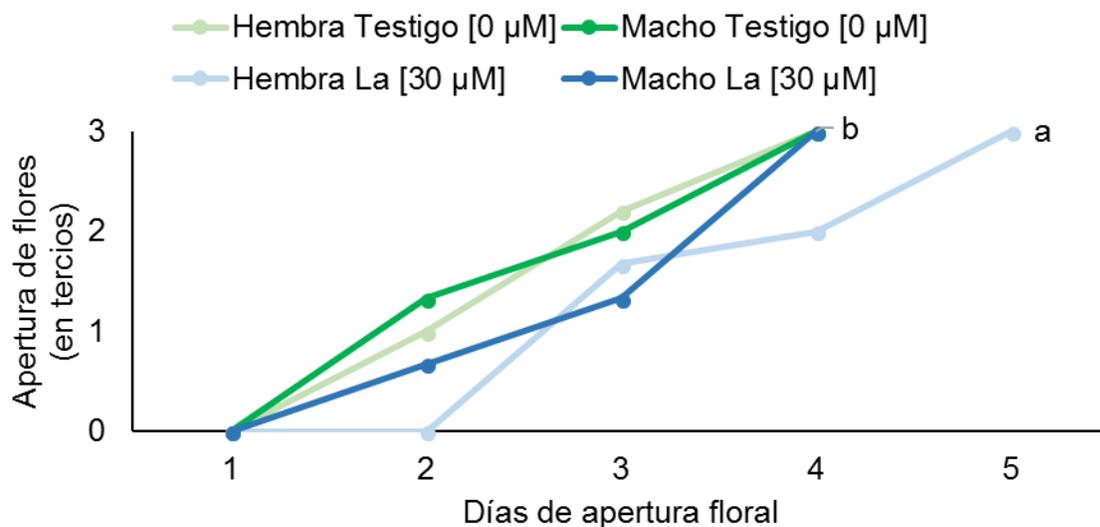


Figura 59. Apertura de flores tratadas con 30 μM La en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, el progenitor femenino tratado con 10 μM Si tuvo un retraso en la apertura floral, pues las plantas testigo completaron su proceso en el día 6. Este efecto también se observa en el progenitor macho, que alcanzó la apertura floral de tres tercios después de 5 d (**Figura 60**).

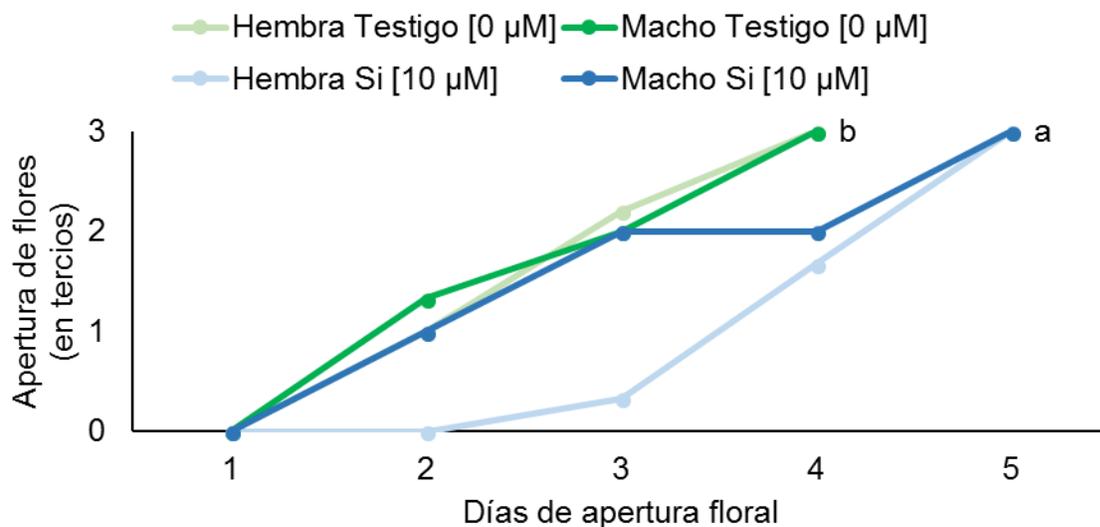


Figura 60. Apertura de flores tratadas con 10 μM Si en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Al elevar la dosis de Si a 15 μM , se observó apertura floral más lenta tanto en el progenitor femenino como en el masculino. En los testigos, la apertura fue más rápida, alcanzándose después de 4 d (**Figura 61**).

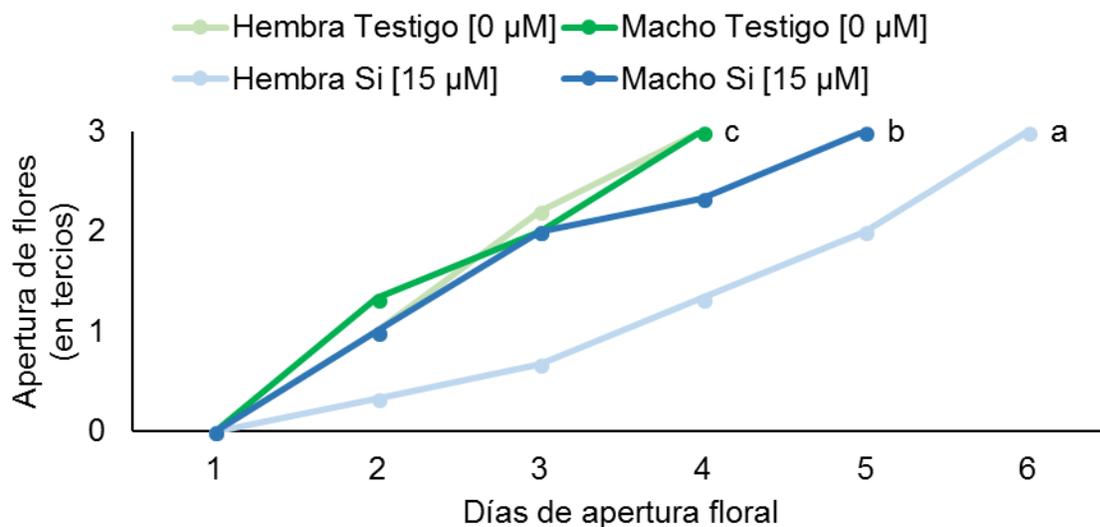


Figura 61. Apertura de flores tratadas con 15 μM Si en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

La aplicación de 25 μM Ti retrasó la apertura floral hasta el día 6 en el progenitor femenino, en tanto que en el masculino no hubo efecto de la aplicación de Ti a este nivel (**Figura 62**).

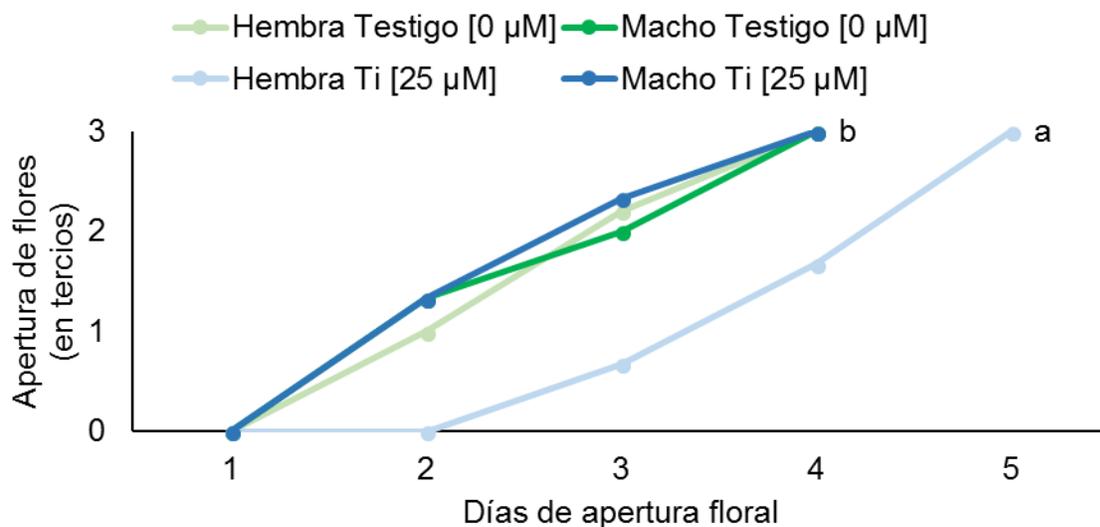


Figura 62. Apertura de flores tratadas con 25 µM Ti en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Al tratar las plantas con 50 µM Ti, en el progenitor femenino se observó aceleración en la apertura floral (3 d). En los demás tratamientos, la apertura floral se prolongó hasta el día 4 (**Figura 63**).

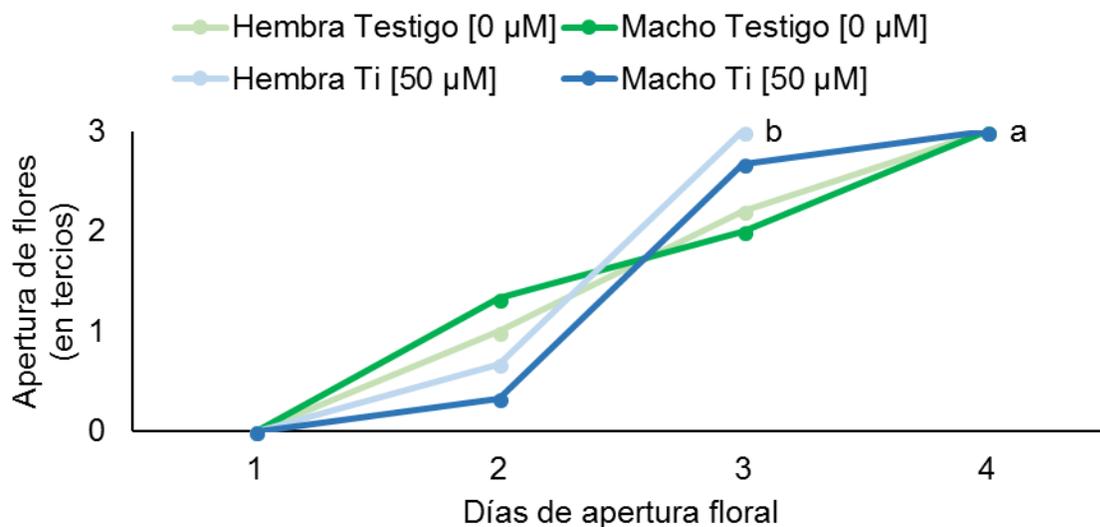


Figura 63. Apertura de flores tratadas con 50 μM Ti en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

El tratamiento con 75 μM Ti aceleró la apertura floral en el progenitor masculino, alcanzándose los tres tercios después de 3 días. En el progenitor femenino y los testigos se alcanzaron igual con 4 días para completar su apertura floral (**Figura 64**).

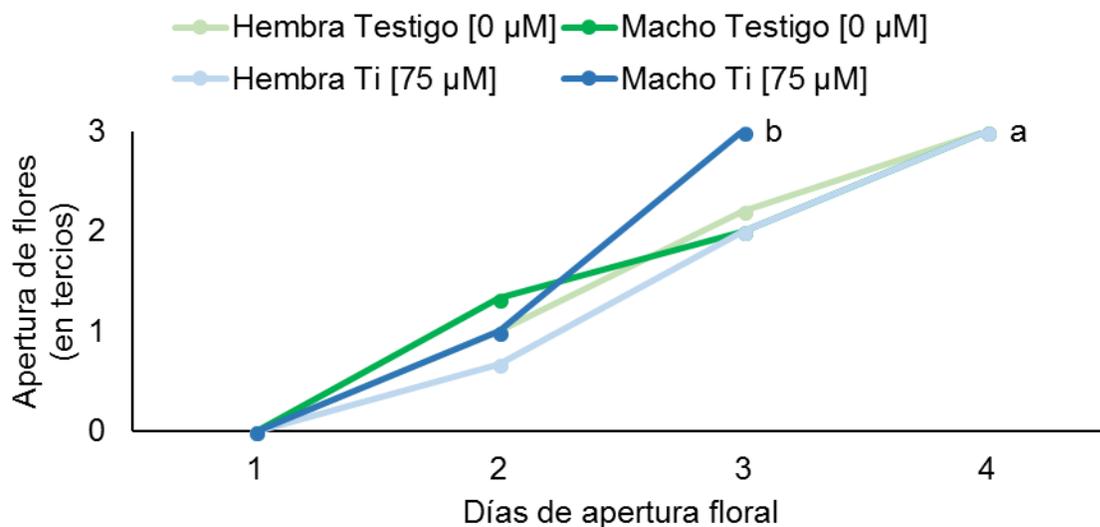


Figura 64. Apertura de flores tratadas con 75 μM Ti en la solución aséptica para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.3.3. Lecturas SPAD

Las unidades SPAD en el progenitor masculino decrecieron a medida que transcurrió el periodo de cruzamiento. A final del periodo (día 11), las medias más altas se observaron en plantas tratadas con 50 μM Al, y las más bajas con 100 μM Al (**Figura 65**).

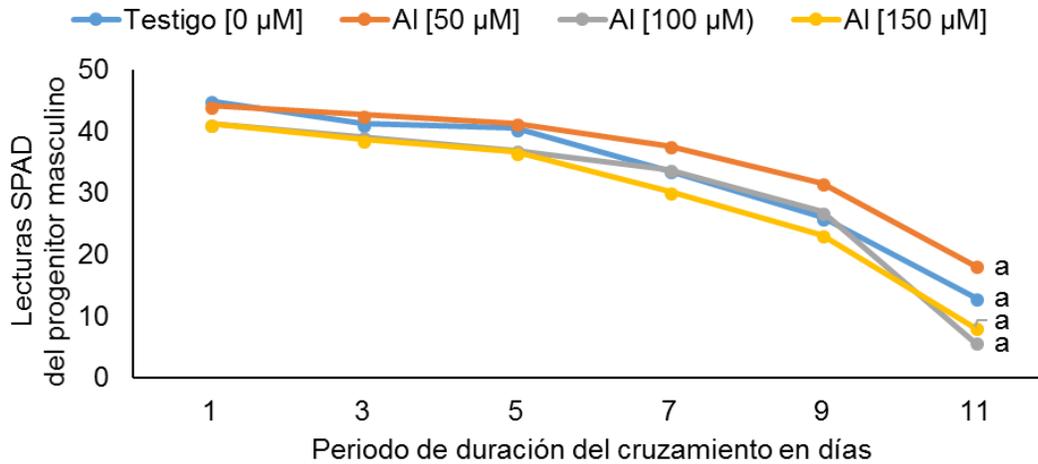


Figura 65. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (0, 50, 100 y 150 μM Al) a la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

La aplicación de yodo modificó las unidades SPAD en el progenitor masculino, sobre todo a partir del día 5 del periodo de cruzamiento. Al final del periodo de evaluación, la media más alta se registró en el testigo, y la más baja en el tratamiento con 20 μM I (**Figura 66**).

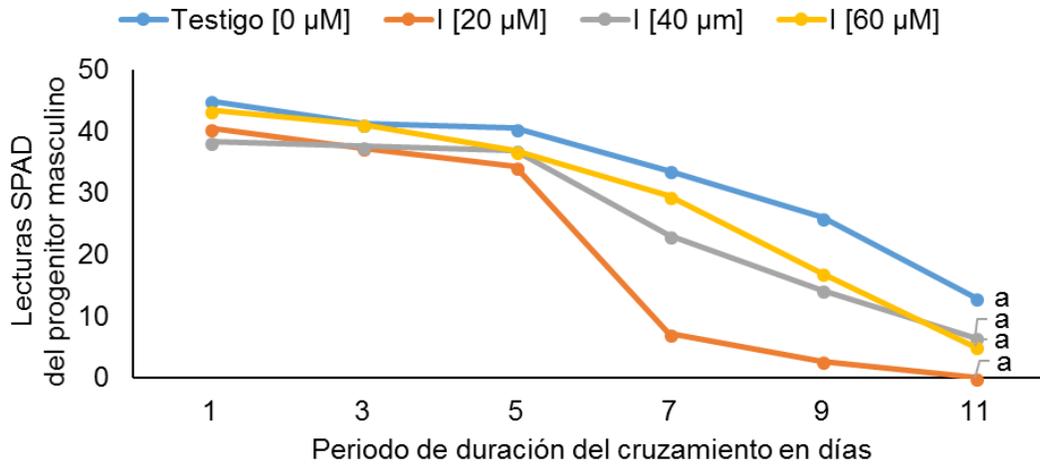


Figura 66. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de yodo (0, 20, 40 y 60 µM I) en la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

En los tratamientos con La en la solución aséptica, hasta el día 5 del periodo de cruzamiento, las lecturas SPAD en el progenitor masculino fueron muy similares. Del día 7 al 11, si se observaron diferencias, mostrando la media más alta el testigo, y la más baja el tratamiento con 30 µM La (**Figura 67**).

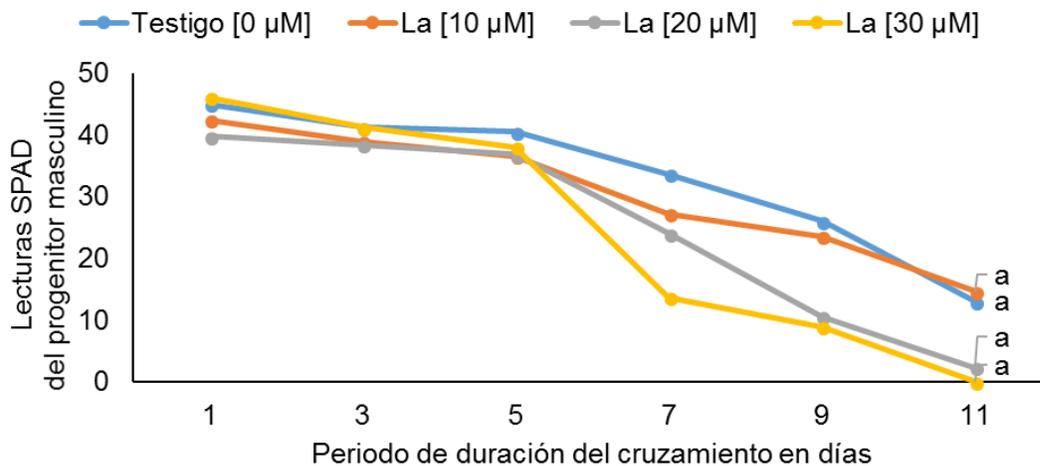


Figura 67. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de lantano (0, 10, 20 y 30 μM La) en la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Los valores de las lecturas SPAD en el progenitor masculino fueron muy similares hasta el día 5 en tallos tratados con silicio. Al final del periodo, la media más alta la presentó el testigo, y la más baja el tratamiento con 5 μM Si (**Figura 68**).

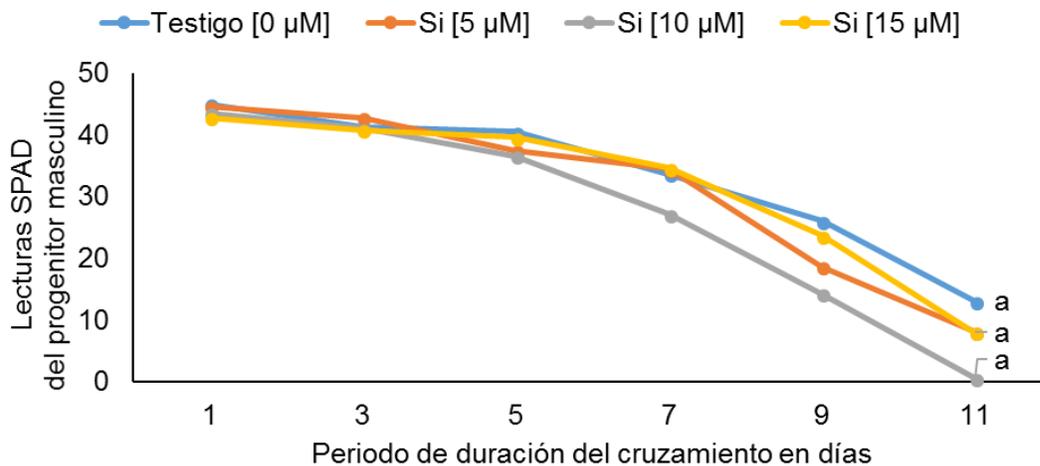


Figura 68. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de silicio (0, 5, 10 y 15 μM Si) en la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

El Ti adicionado a las soluciones asépticas no ejerció efectos muy evidentes en las lecturas SPAD en el progenitor masculino (**Figura 69**).

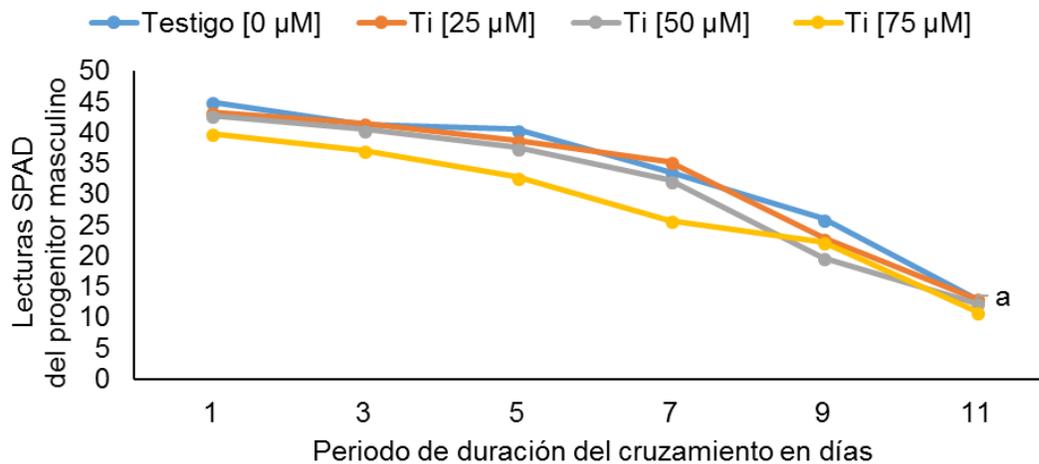


Figura 69. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de titanio (0, 25, 50 y 75 μM Ti) en la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Los efectos de los elementos benéficos evaluados en sus distintas dosis de manera conjunta, en las lecturas SPAD registradas en el progenitor masculino se presentan en la **Figura 70**. Es posible observar que la media más alta en lectura SPAD se observó al aplicar 50 μM Al, y las más bajas con 20 μM I, 30 μM La, y 10 μM Si.

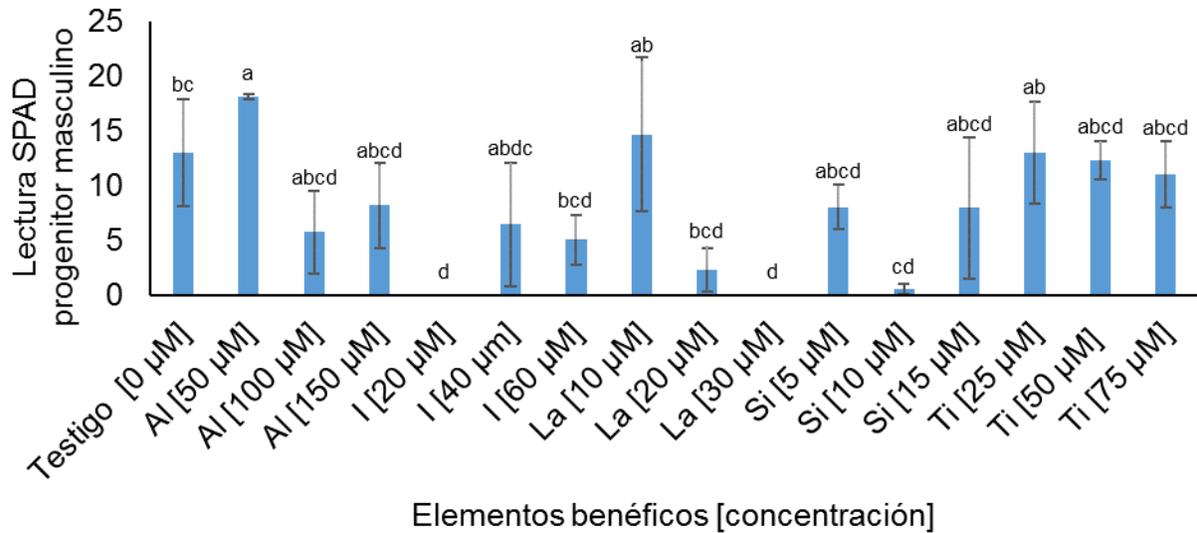


Figura 70. Lecturas SPAD en el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, no se observan efectos marcados de la aplicación de Al en la variable unidades SPAD de las hojas hasta el día 9 de las mediciones durante el periodo de cruzamiento. Al final de las mediciones, la media más alta se presentó en el testigo, y la más baja en el tratamiento de 50 μ M Al (**Figura 71**).

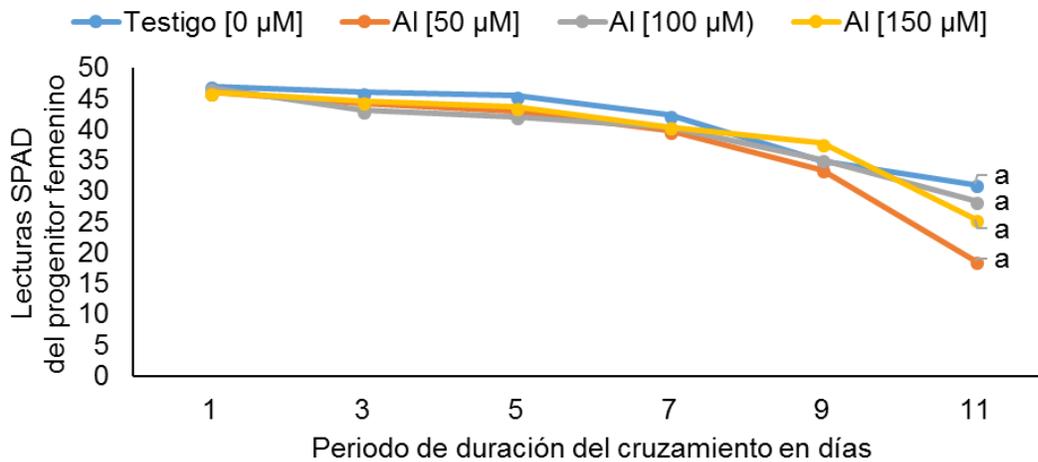


Figura 71. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (0, 50, 100 y 150 μM Al) a la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Al aplicar yodo en este mismo progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, se observan efectos marcados de la aplicación de este elemento, sobre todo a partir del día 5 de las mediciones, y al final del experimento hay una marcada diferencia entre tratamientos, siendo la media más alta en el tratamiento testigo, y la más baja cuando se aplicó 60 μM I (**Figura 72**).

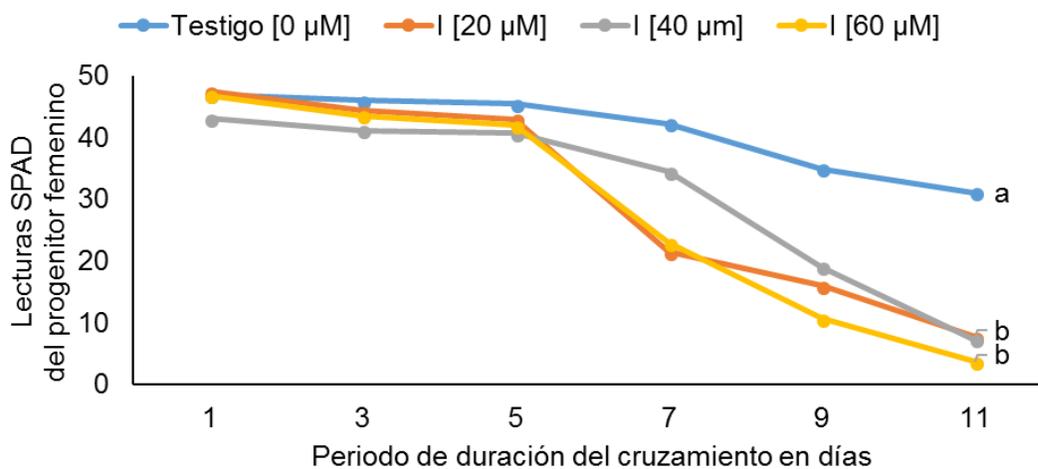


Figura 72. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de yodo (0, 20, 40 y 60 μM I) a la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Al evaluar el efecto del lantano en el progenitor femenino, se observó que hasta el día 9 las lecturas SPAD eran muy similares entre tratamientos. Las diferencias se notaron más al finalizar el estudio al día 11, siendo el tratamiento testigo el que presentó la

media más alta, y el tratamiento con 20 μM La el que generó la media más baja (**Figura 73**).

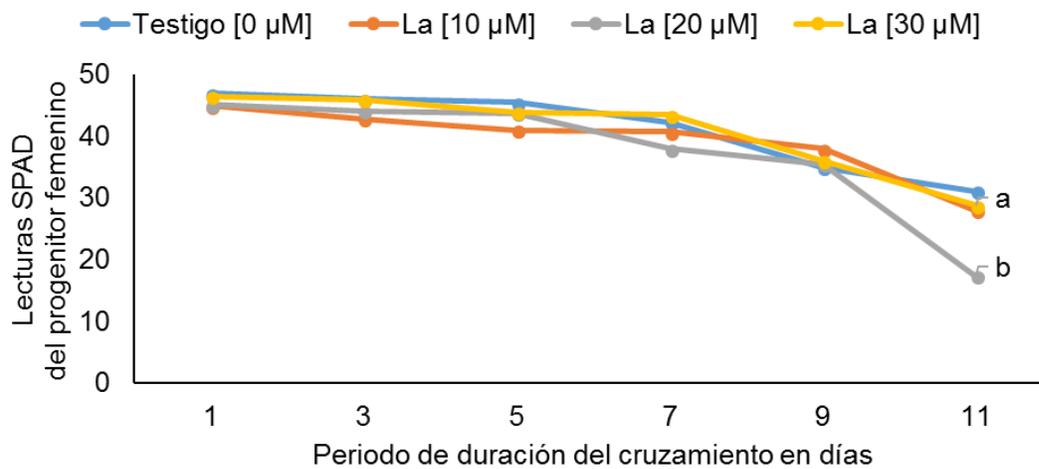


Figura 73. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de lantano (0, 10, 20 y 30 μM La) a la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

La aplicación de silicio generó medias muy similares de lecturas SPAD en el progenitor femenino en los días 1 al 7. En los días 9 y 11 de las mediciones del periodo de cruzamiento se observaron algunas diferencias entre los tratamientos. La media más alta se presentó en el tratamiento con 5 μM Si, y la más baja con 10 μM Si (**Figura 74**).

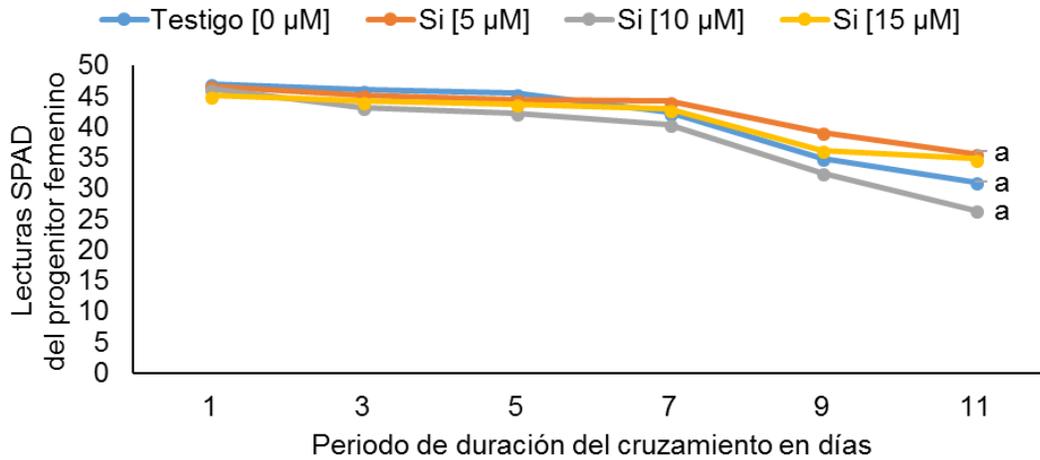


Figura 74. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de silicio (0, 5, 10 y 15 µM Si) a la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Al evaluar el efecto del Ti en las lecturas SPAD en el progenitor femenino, se observó que, desde el inicio de las mediciones, el testigo tenía las medias más altas, y el tratamiento con 75 µM Ti, la más baja (**Figura 75**).

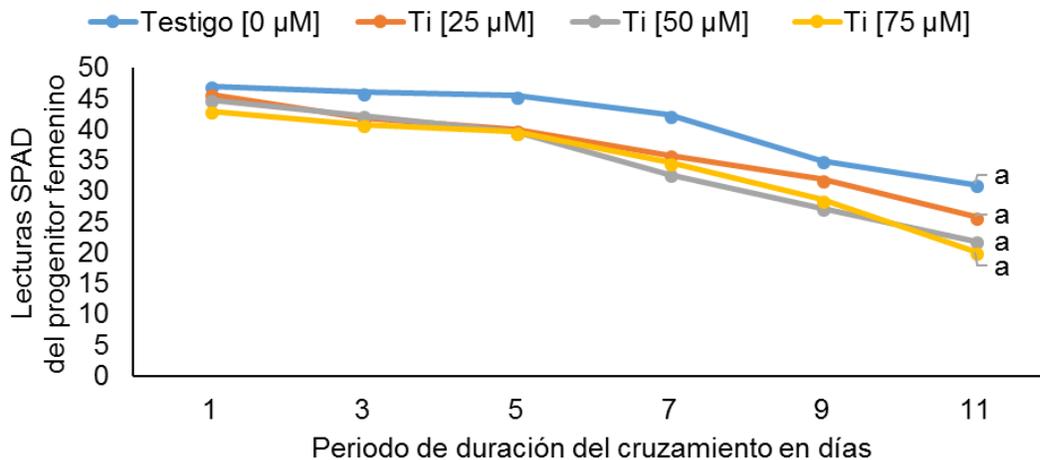


Figura 75. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de titanio (0, 25, 50 y 75 μM Ti) a la solución aséptica. Medias con letras iguales indican ausencia de diferencias estadísticas entre tratamientos por concentración del elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Al comparar los valores de las lecturas SPAD en los progenitores femeninos de todos los tratamientos probados, las medias más altas fueron observadas en el testigo, y en los tratamientos 5 y 15 μM Si. Las más bajas en los tratamientos con yodo (**Figura 76**).

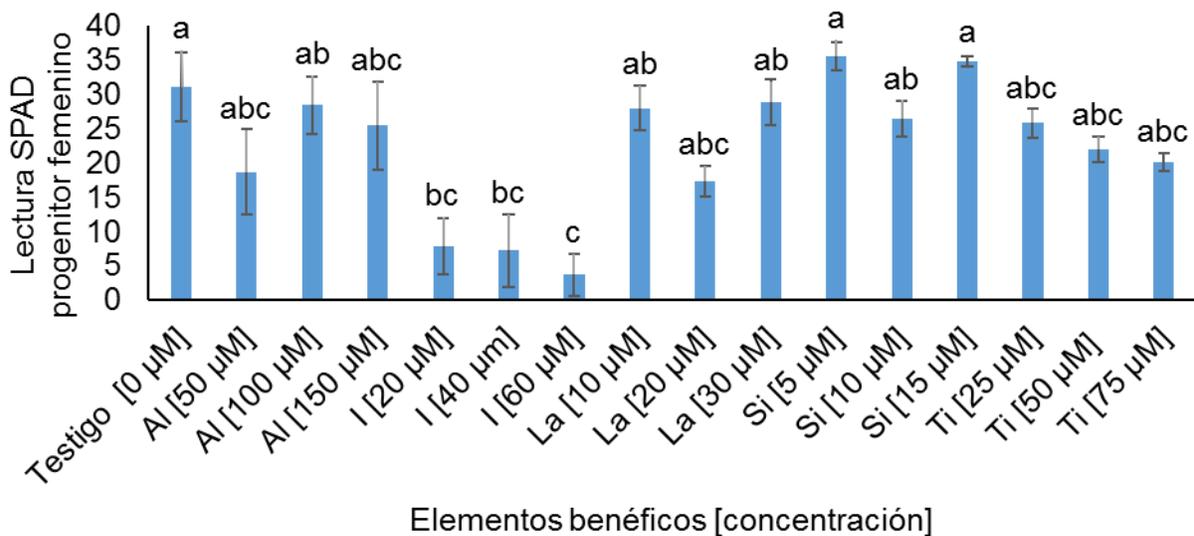


Figura 76. Lecturas SPAD en el progenitor femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) en la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.3.4. Diámetro del raquis central

En el progenitor masculino, la aplicación de 15 μM Si produjo el valor más alto en la reducción del diámetro raquis central, en tanto que la aplicación de 30 μM La produjo el

menor valor, lo que significa que éste último elemento tiende a preservar los tejidos vegetales por más tiempo (**Figura 77**).

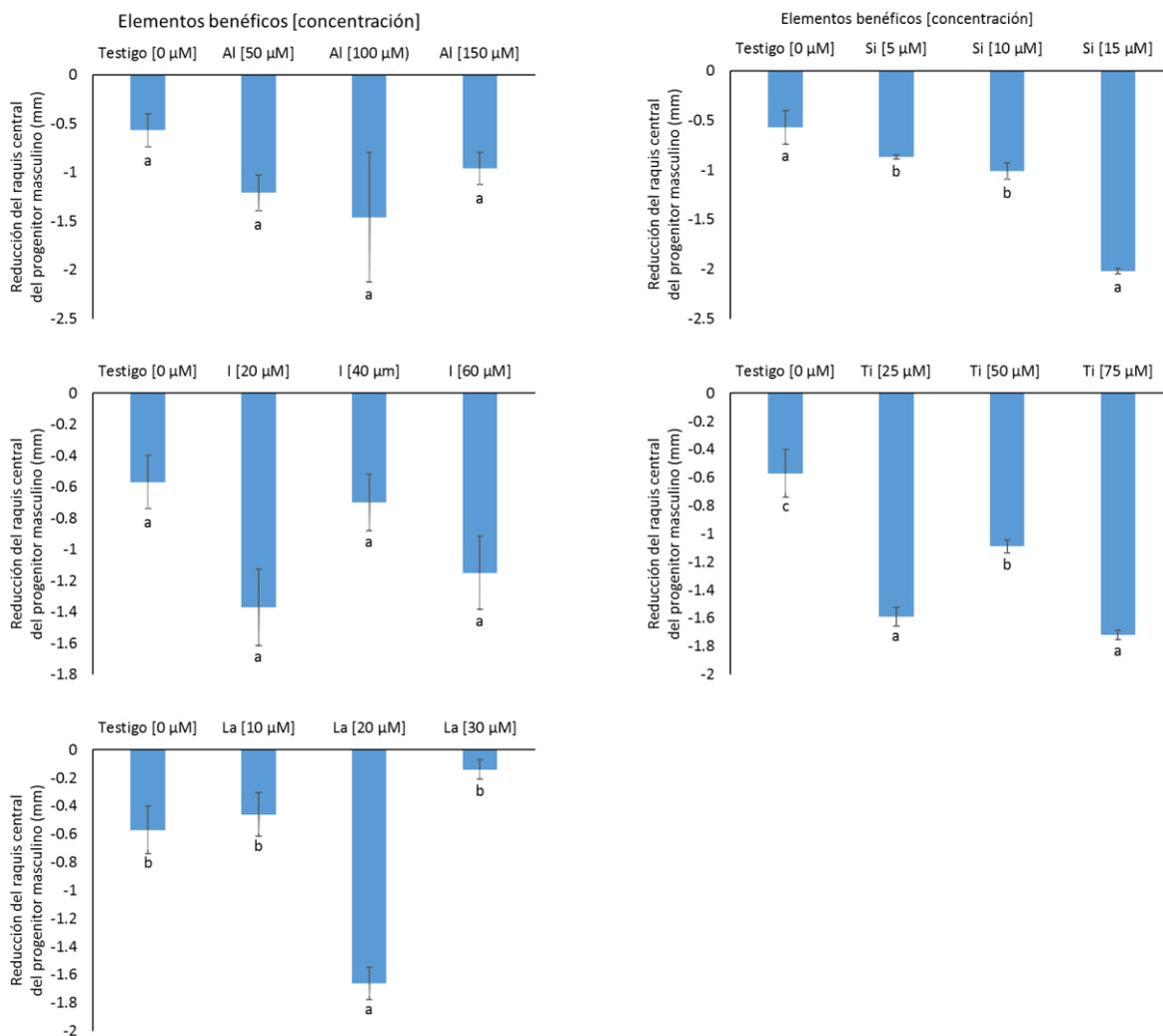


Figura 77. Reducción del raquis central en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti). Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

En cuanto a la reducción del diámetro del raquis central del progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, la media más alta se observó con la aplicación de 25 μM Ti, y en el testigo, en tanto que la media más baja se obtuvo al aplicar 20 μM I (Figura 78).

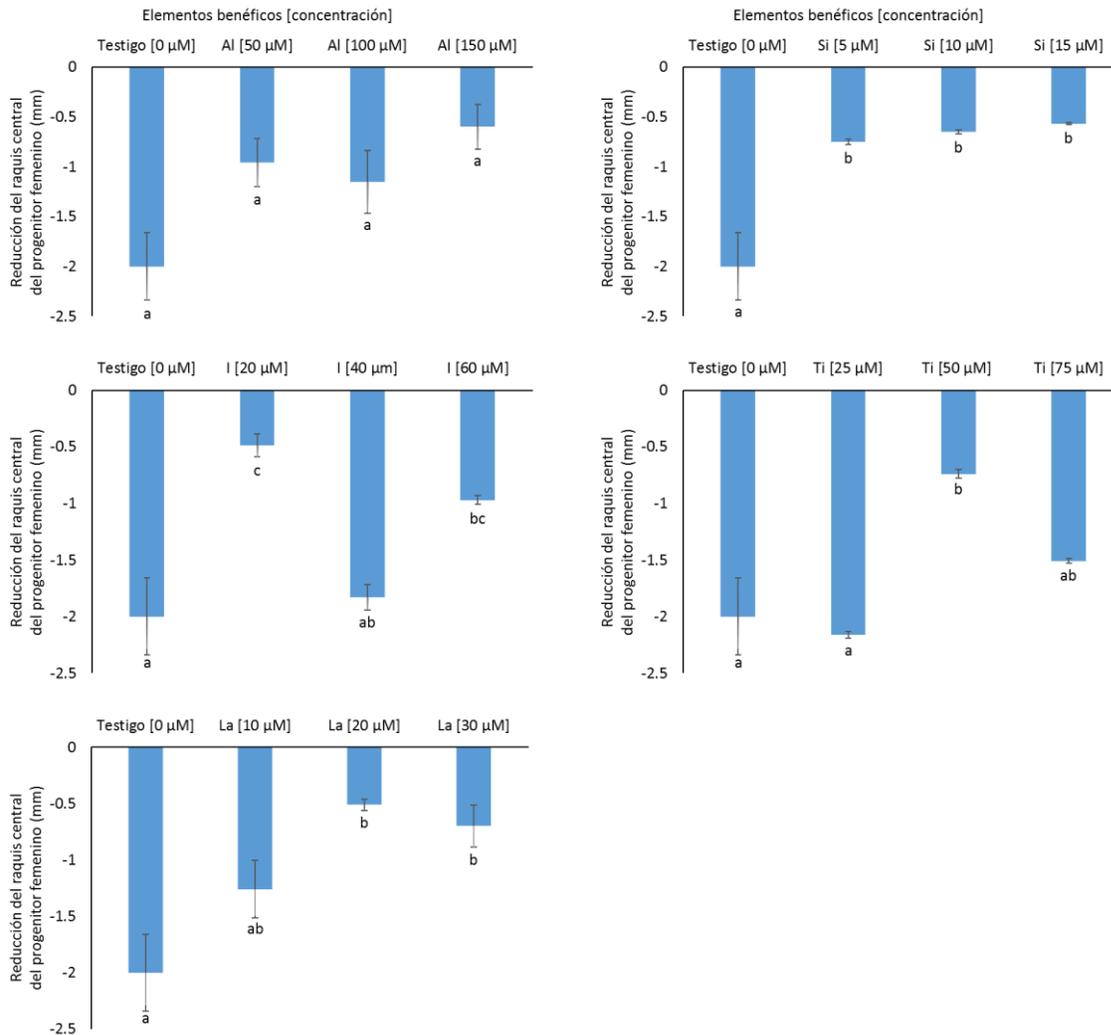


Figura 78. Reducción del raquis central en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti). Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.3.5. Diámetro del tallo

Respecto a la reducción del diámetro del tallo del progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, la media más alta se observó con la aplicación de 100 μM Al, en tanto que la media más baja se obtuvo al aplicar 25 μM Ti y 20 μM La (**Figura 79**).

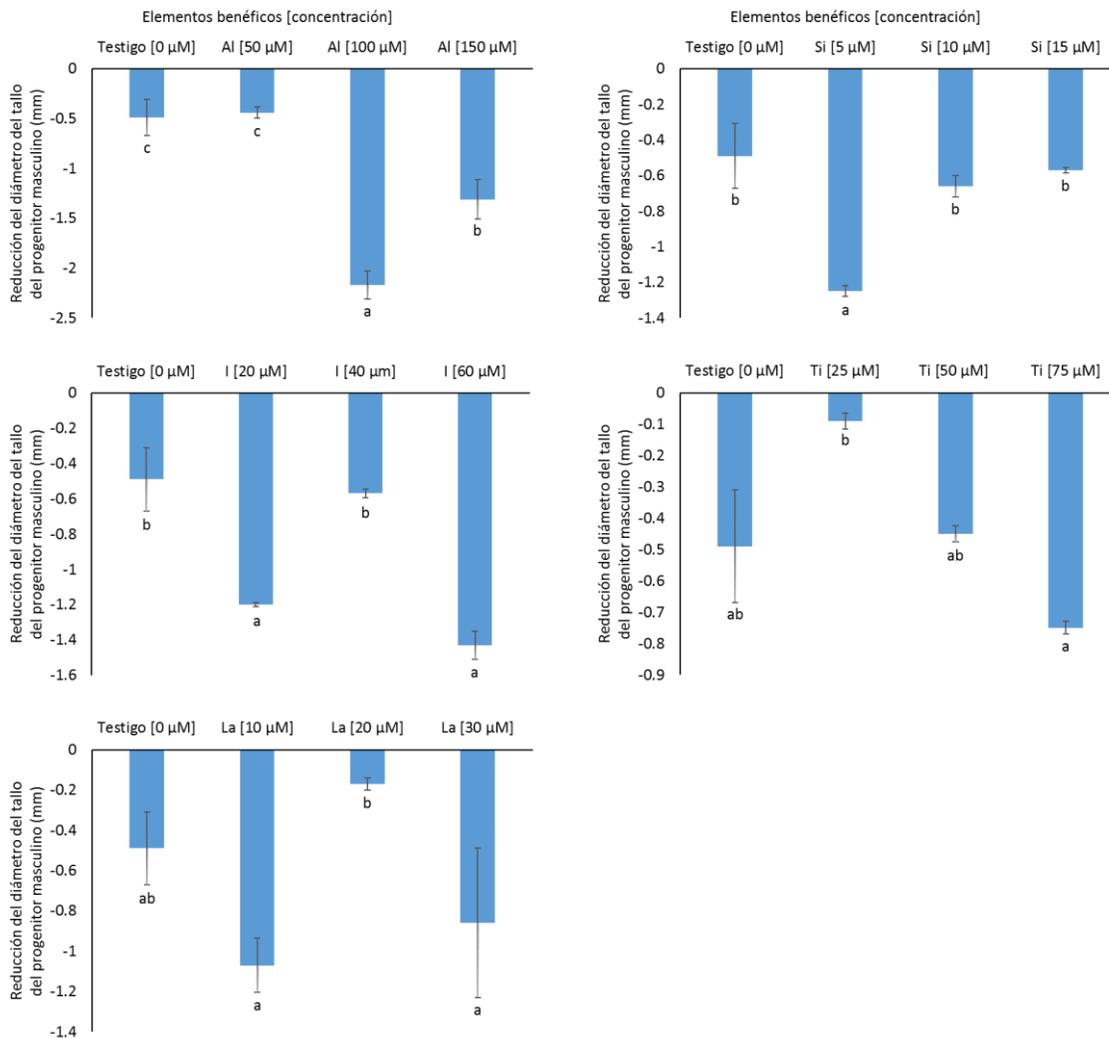


Figura 79. Reducción del diámetro del tallo en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti). Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

Respecto a la reducción del diámetro del tallo del progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, la media más alta se observó con la aplicación de 20 μM La, en tanto que la media más baja se obtuvo al aplicar silicio a dosis bajas y titanio en cualquiera de sus dosis (**Figura 80**).

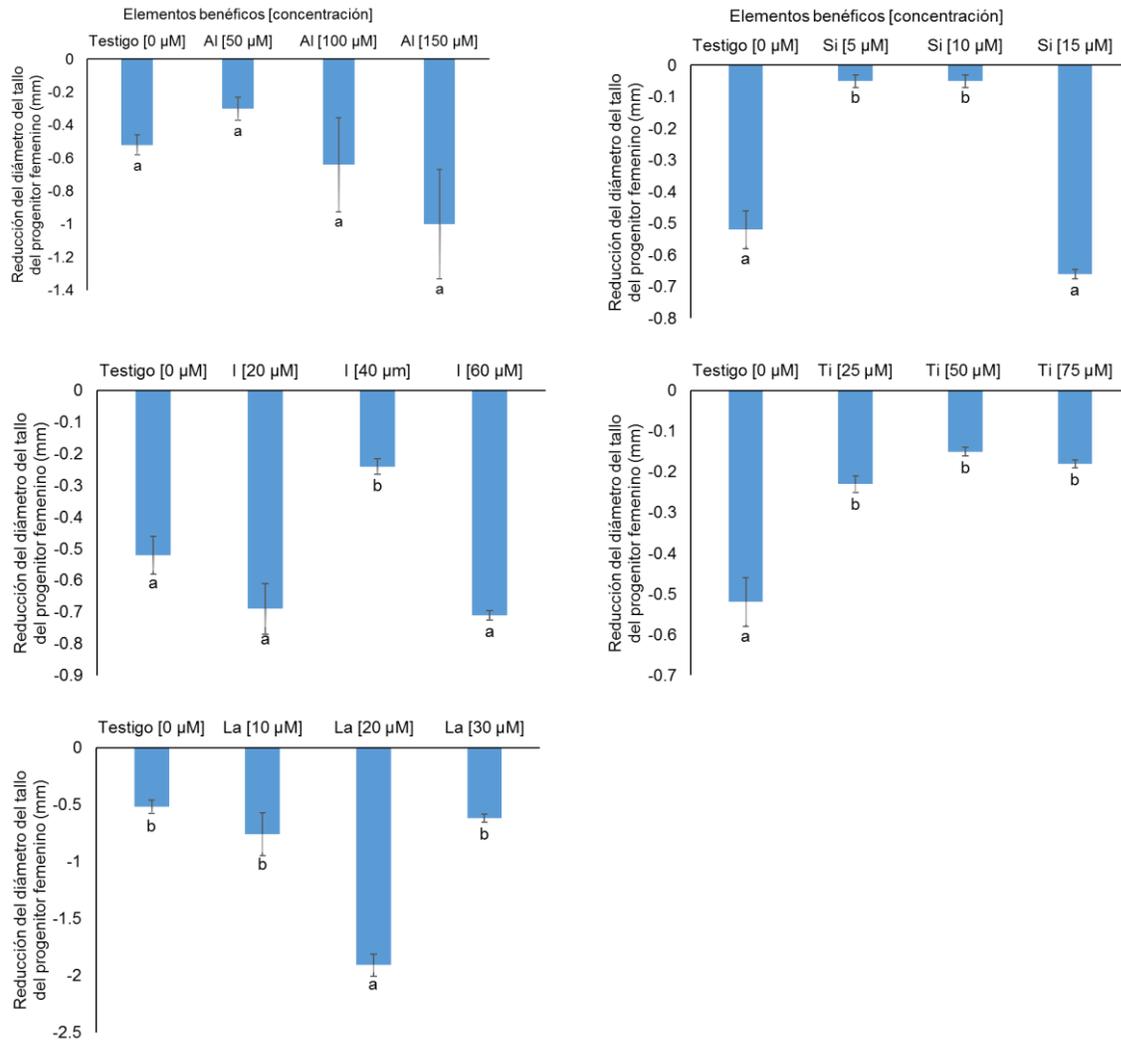


Figura 80. Reducción del diámetro del tallo en el progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti). Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.3.6. Variables evaluadas en poscosecha

3.3.3.6.1. Peso seco del raquis central

El peso seco del raquis central en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 no fue afectado por ninguno de los tratamientos probados (**Figura 81**).

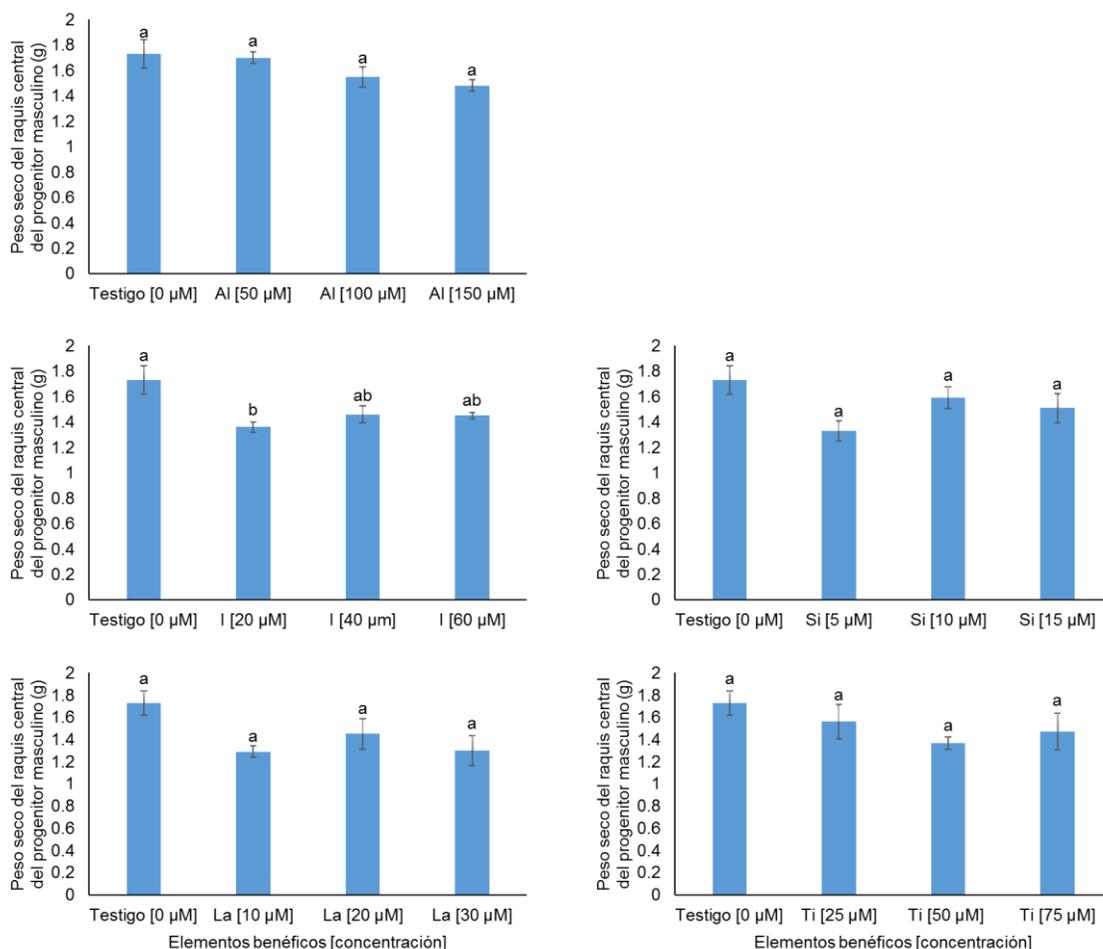


Figura 81. Peso seco del raquis central en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

El peso seco del raquis central del progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 tampoco fue afectado por ninguno de los tratamientos probados (**Figura 82**).

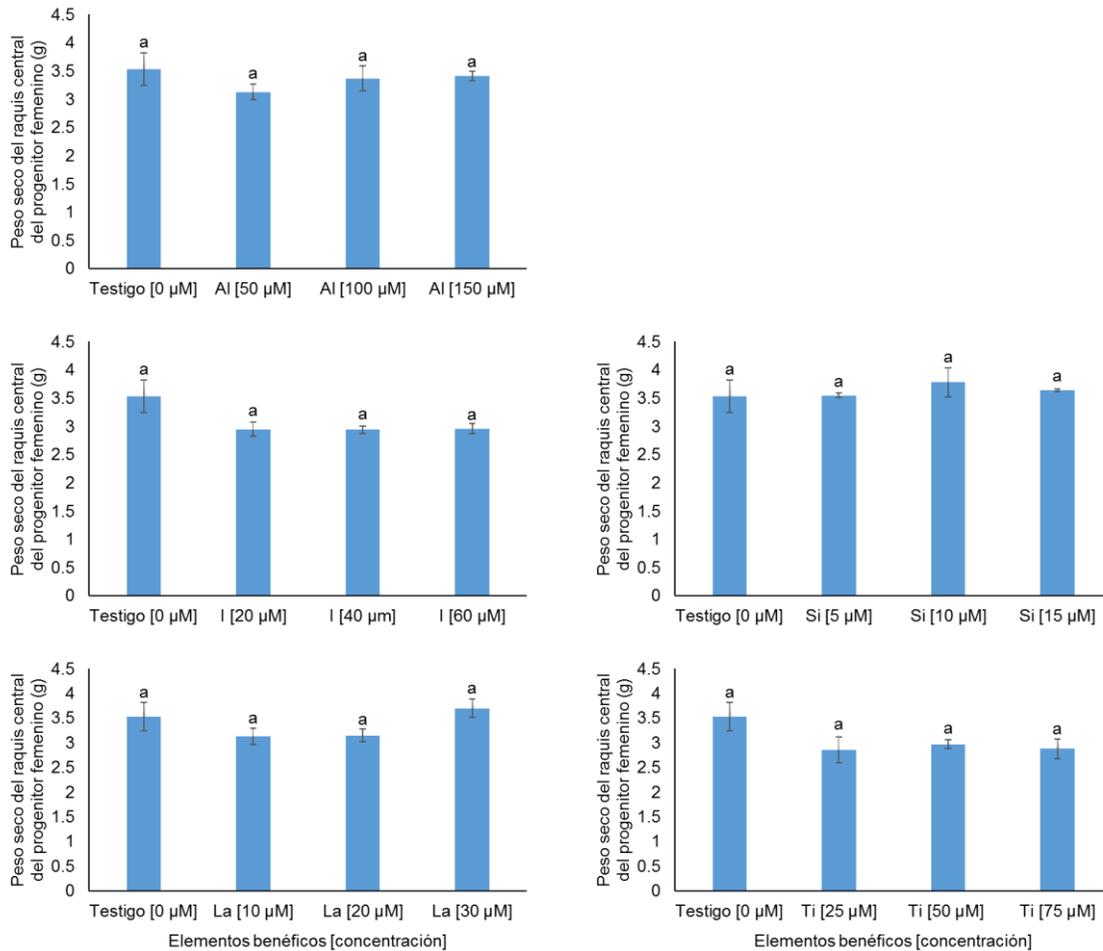


Figura 82. Peso seco del raquis central del progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) a la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.3.6.2. Peso seco de fuzz

El peso seco de fuzz en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 tampoco fue afectado por ninguno de los tratamientos probados (**Figura 83**).

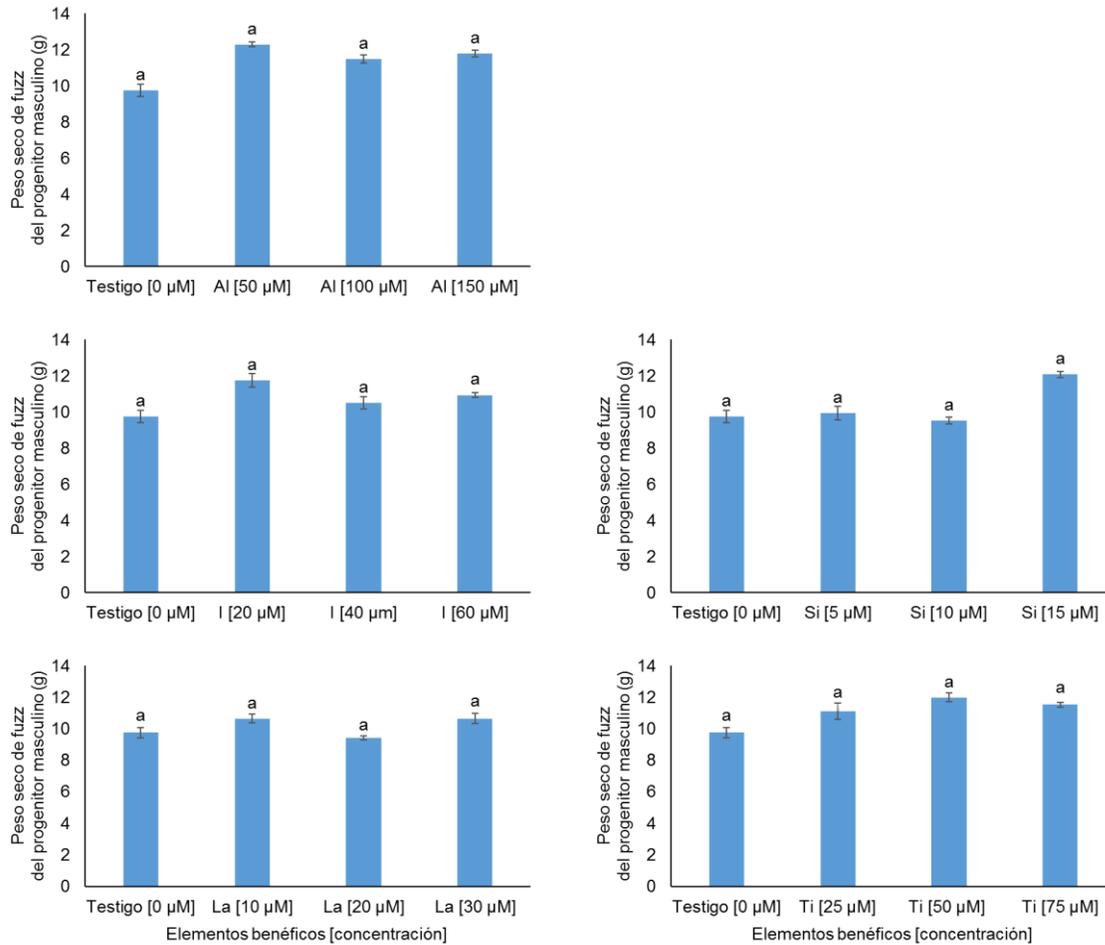


Figura 83. Peso seco del fuzz en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti). Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.3.6.3. Longitud de panícula

La longitud de la panícula en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 no fue afectada por ninguno de los tratamientos probados (**Figura 84**).

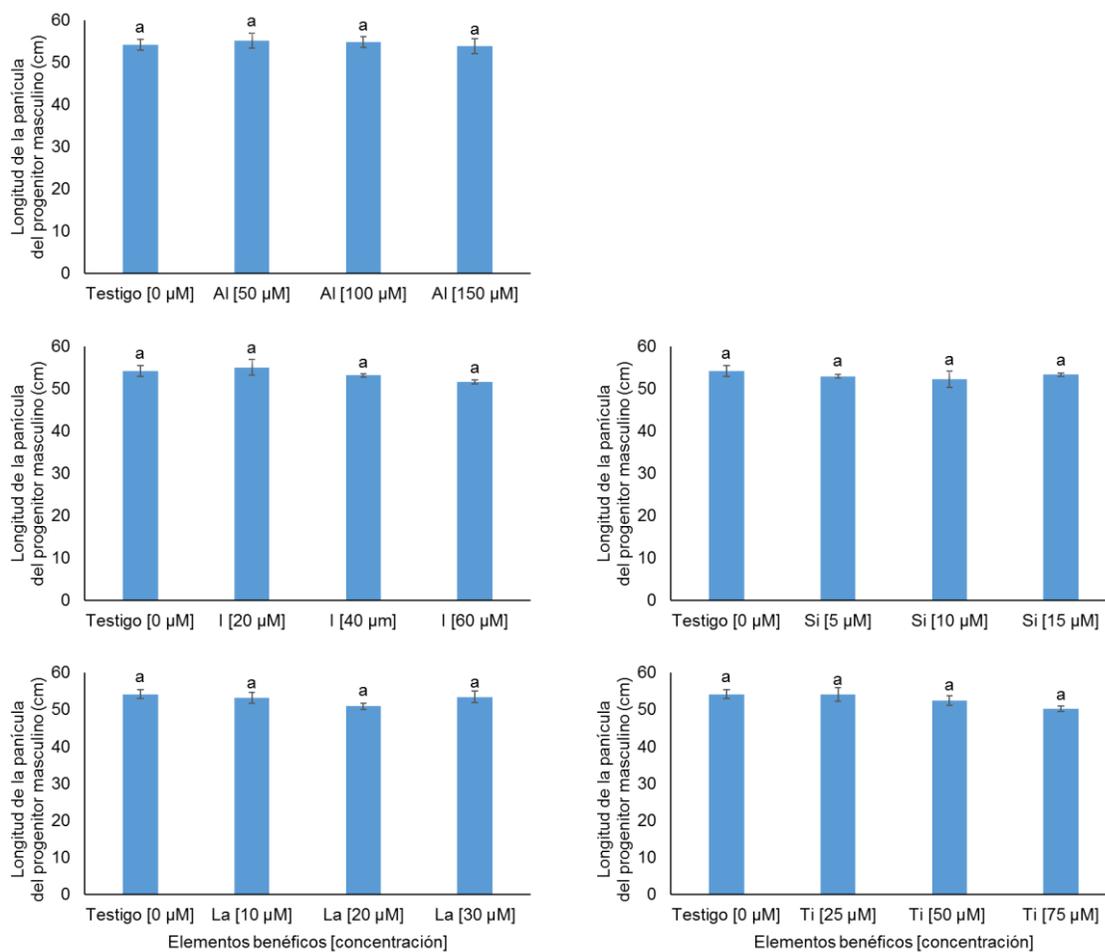


Figura 84. Longitud de la panícula en el progenitor masculino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) en la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

La longitud de la panícula del progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, no fue afectada por ninguno de los tratamientos evaluados (**Figura 85**).

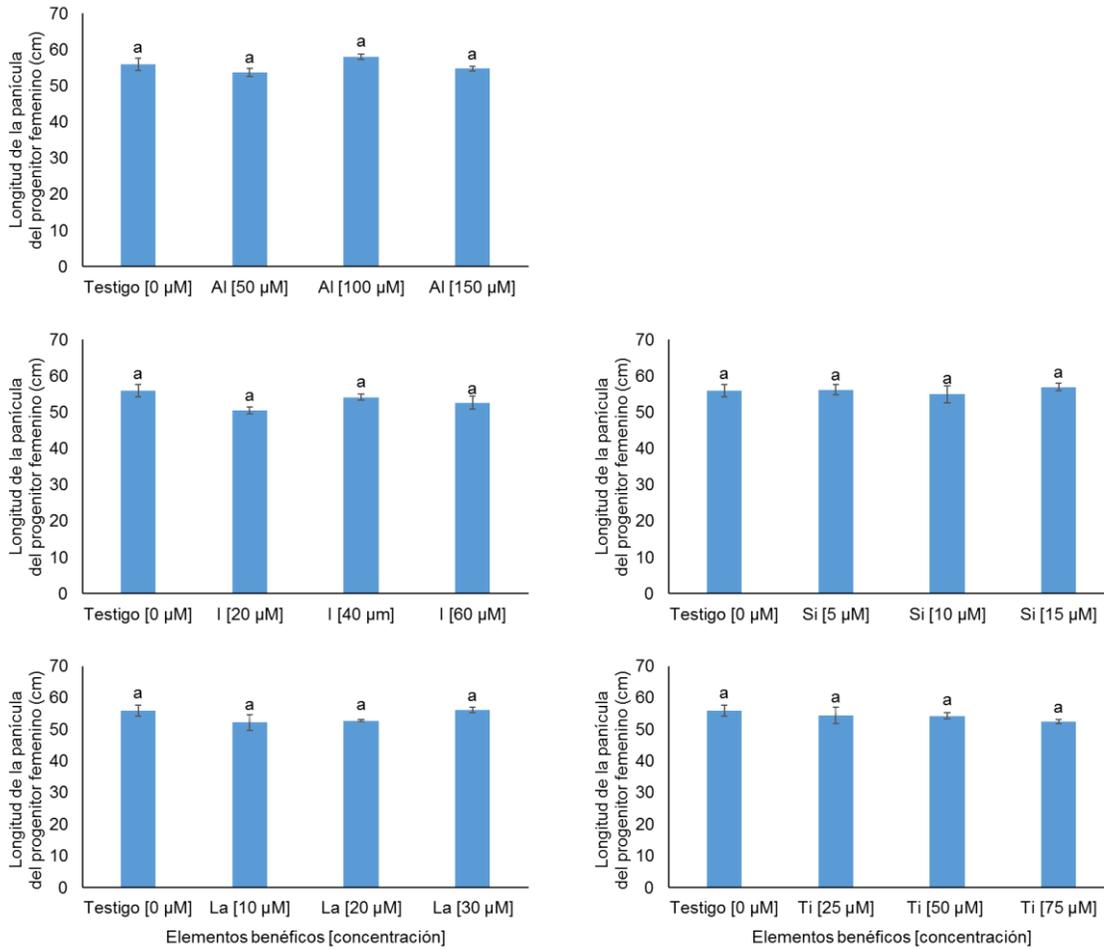


Figura 85. Longitud de la panícula del progenitor femenino del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) en la solución aséptica. Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.3.6.4. Impurezas y peso final durante el proceso poscosecha

En el **Cuadro 9** se muestra la comparación de medias de impurezas y peso final durante el proceso de poscosecha del fuzz del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) a la solución aséptica.

Respecto al peso del fuzz después del desgrane hembra, la media más alta se obtuvo al aplicar 10 μM Si, y la más baja con 15 μM Si. Con relación al peso del fuzz después del despeluzado, la media más alta se observó al aplicar 60 μM I, y la más baja con 50 μM Ti. Respecto a peso de impurezas la aplicación de 25 μM Ti produjo la media más alta, y 75 μM Ti la más baja. El peso de semillas vanas y otras impurezas fue mayor en el tratamiento al aplicar 60 μM I así como 75 μM Ti, y la más baja con 50 μM Al, 150 μM Al, 30 μM La, 15 μM Si y 25 μM Ti (**Cuadro 9**).

Cuadro 9. Impurezas y peso final durante el proceso de postcosecha del fuzz del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) en la solución nutritiva.

Elemento benéfico [concentración]	PFDD1	PFDD2	PI1	PFDS	PSVI2
Testigo [0 µM]	13.7±0.05a	7.3±0.09b	6.4±0.10b	5.0±0.16a	2.4±0.13b
Al [50 µM]	12.6±0.05c	6.1±0.03c	6.5±0.07b	4.5±0.07a	1.6±0.09c
Al [100 µM]	13.2±0.05b	7.9±0.03a	5.3±0.07c	4.7±0.03a	3.2±0.03a
Al [150 µM]	13.0±0.05b	5.0±0.03d	8.1±0.06a	3.5±0.07b	1.4±0.08c
Testigo [0 µM]	13.7±0.05b	7.3±0.09b	6.4±0.10a	5.0±0.16a	2.4±0.13b
I [20 µM]	12.4±0.05c	6.4±0.06c	6.0±0.08ab	4.5±0.08ab	1.9±0.14b
I [40 µM]	12.5±0.05c	6.4±0.10c	6.1±0.05a	4.4±0.06b	1.9±0.12b
I [60 µM]	14.1±0.05a	8.6±0.16a	5.6±0.14b	5.0±0.07a	3.6±0.10a
Testigo [0 µM]	13.7±0.05b	7.3±0.09a	6.4±0.10c	5.0±0.16a	2.4±0.13ab
La [10 µM]	12.0±0.05c	5.0±0.04d	7.0±0.08b	3.1±0.06c	1.9±0.05bc
La [20 µM]	14.3±0.05a	6.7±0.09b	7.6±0.04a	4.3±0.15b	2.4±0.11a
La [30 µM]	12.2±0.05c	6.2±0.08c	6.0±0.13c	4.6±0.05ab	1.6±0.10c
Testigo [0 µM]	13.7±0.05b	7.3±0.09b	6.4±0.10b	5.0±0.16a	2.4±0.13b
Si [5 µM]	13.8±0.05b	8.4±0.14a	5.3±0.16c	4.8±0.06a	3.6±0.09a
Si [10 µM]	14.7±0.05a	7.1±0.02b	7.6±0.07a	4.2±0.09b	2.8±0.10b
Si [15 µM]	11.2±0.05c	4.7±0.07c	6.5±0.12b	3.0±0.05c	1.7±0.12c
Testigo [0 µM]	13.7±0.05a	7.3±0.09a	6.4±0.10b	5.0±0.16a	2.4±0.13b
Ti [25 µM]	12.4±0.05b	4.7±0.11b	7.7±0.16a	3.2±0.04c	1.5±0.07c
Ti [50 µM]	11.9±0.05c	4.3±0.11b	7.6±0.07a	2.5±0.11d	1.8±0.09bc
Ti [75 µM]	12.3±0.05b	7.5±0.15a	4.8±0.20c	3.8±0.01b	3.7±0.14a

PFDD1: Peso del fuzz después del desgrane de la hembra; PFDD2: Peso del fuzz después del despeluzado; PI1: Peso de impurezas; PFDS: Peso del fuzz después del sopleteado; PSVI2: Peso de semillas vanas y otras impurezas. Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.3.3.7. Variables de germinación

Se utilizó la semilla proveniente del progenitor femenino para la evaluación de variables de germinación.

3.3.3.7.1. Dinámica de germinación

Para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, el tratamiento con 5 μM Si estimuló esta variable desde el día 3 del periodo de estudio, y lo mantuvo por encima de los demás tratamientos hasta el final del periodo a los 7 días de evaluación. Por otra parte, los tratamientos con 40 y 60 μM I produjeron las medias más bajas para esta variable, y éstas fueron muy similares al testigo (**Figura 86**).

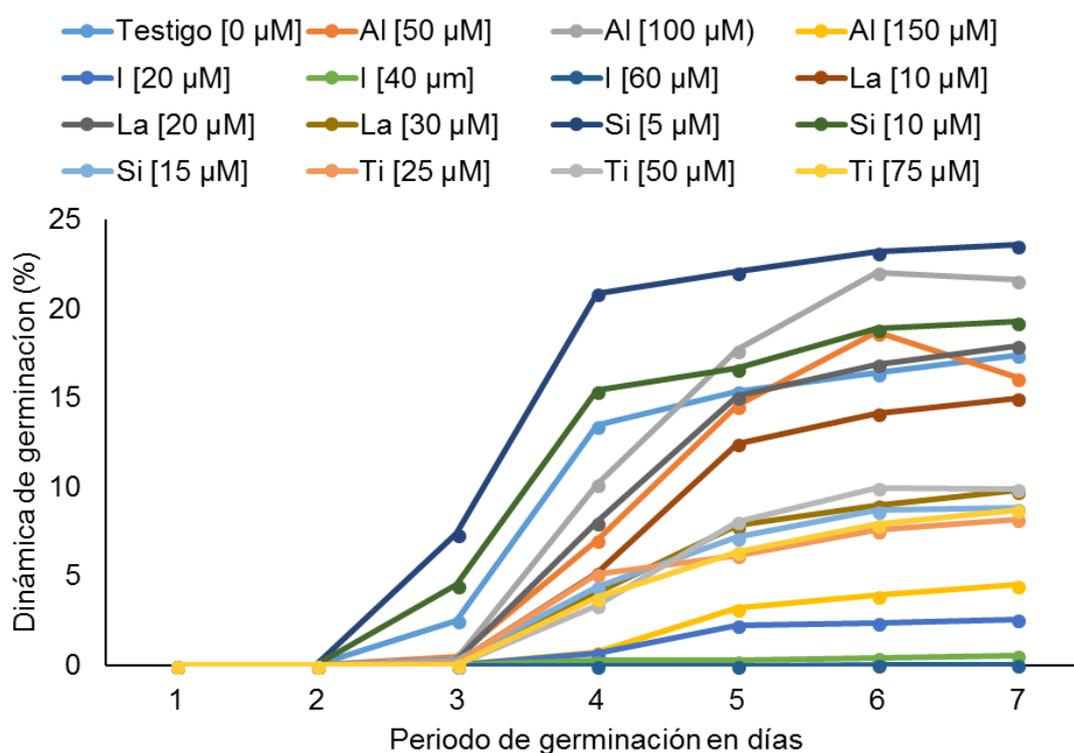


Figura 86. Dinámica de germinación del fuzz del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti) a la solución aséptica.

3.3.3.7.2. Porcentaje de germinación

Al hacer el comparativo del efecto de los tratamientos en el porcentaje de germinación, se observó que al aplicar 100 μM Al, 5 y 10 μM Si, se tuvieron las medias más altas para la variable porcentaje de germinación, en tanto que las medias más bajas se observaron al tratar los tallos con yodo en cualquiera de las concentraciones evaluadas (**Figura 87**).

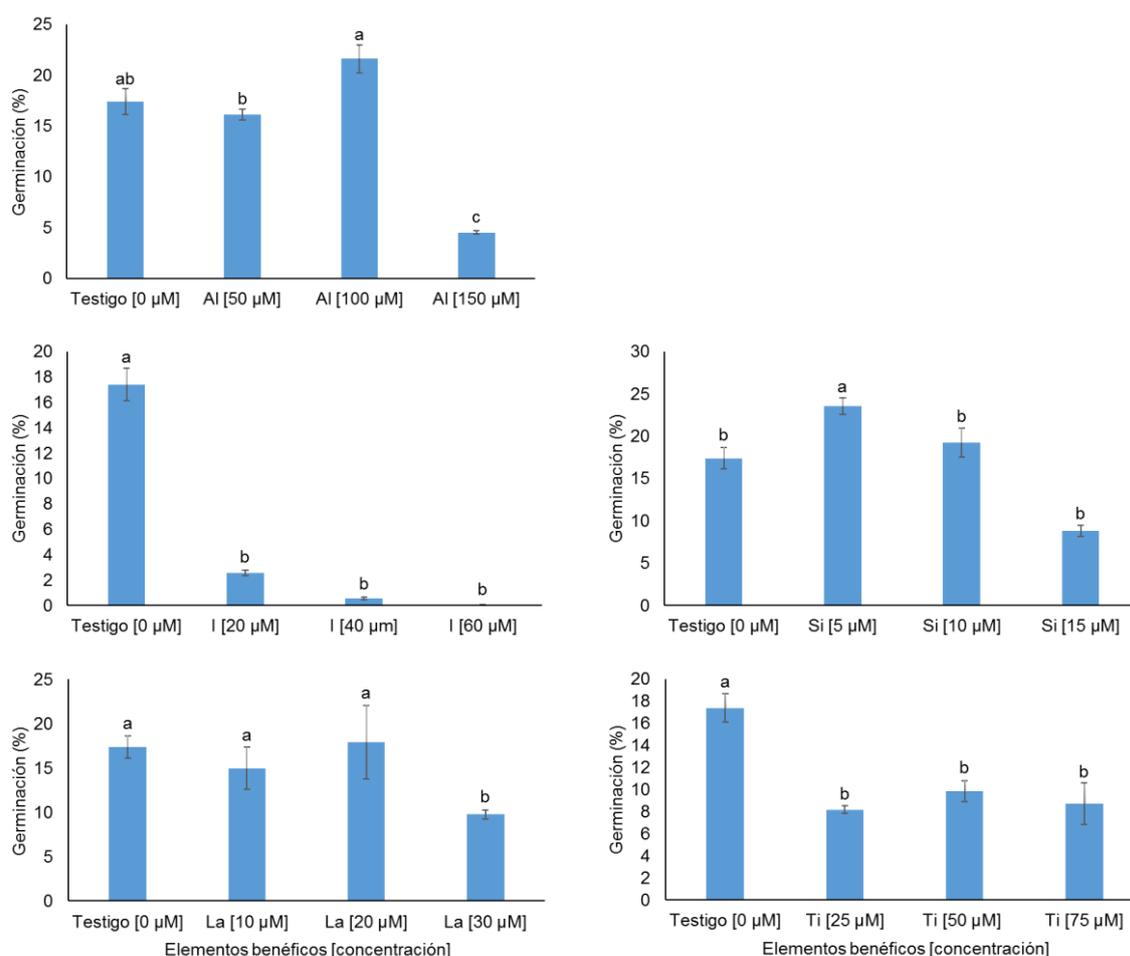


Figura 87. Porcentaje de germinación del fuzz del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 por efecto de la aplicación de aluminio (Al), yodo (I), lantano (La), silicio (Si) y titanio (Ti). Medias \pm DE con letras distintas indican diferencias estadísticas entre concentración por elemento benéfico (Tukey, $P \leq 0.05$).

3.4. Discusión

Es este estudio ha sido posible observar que los diferentes elementos benéficos probados pueden ejercer efectos diferenciales en el proceso de hibridación de caña de azúcar durante y después del cruzamiento, producción de semilla botánica y germinación de la semilla. En lo siguiente se hará un resumen de los resultados de cada elemento estudiado, y se discutirán los datos obtenidos al compararlos con investigaciones similares.

3.4.1. Aluminio

En higuierilla (*Ricinus communis*), el Al no afecta la tasa de germinación de semillas, como consecuencia de la capacidad de esta especie para producir mucílago alrededor del embrión (Silva *et al.*, 2014). Jamal *et al.* (2006) encontraron resultados similares en trigo. En el presente estudio para el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252, se observó que la aplicación de Al tendió a aumentar los valores de pH (**Cuadro 1**) y aumentar o reducir CE (**Cuadro 2**) dependiendo de la concentración de Al en la solución aséptica. En la variable apertura de flores, las concentraciones ensayadas de Al afecto la apertura y sincronización floral en ninguno de los progenitores del cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 (germinación baja) en comparación con el tratamiento testigo (**Figuras 1, 2 y 3**). Por otra parte, en el progenitor masculino las medias para la variable lecturas SPAD en los tratamientos con 100 y 150 μM Al fueron superiores a las mostradas por el testigo y 50 μM Al (**Figura 7**), lo que indica un efecto protector del Al sobre las moléculas de clorofila. De hecho, la media más alta para lecturas SPAD de los elementos probados se observó en el progenitor masculino de este cruzamiento al ser tratado con 100 y 150 μM Al (**Figura 7**). En el progenitor femenino de este mismo cruzamiento, la aplicación de 100 μM Al también aumentó los valores de las unidades SPAD (**Figura 10**). Respecto a la reducción del diámetro del raquis central, los tratamientos ejercieron efectos significativos, la aplicación de 50 μM Al tendió a aumentar el valor de esta variable; seguidas de las concentraciones de 100 y 150 μM Al, aunque mostraron valores superiores al testigo estos no mostraron significancia estadística (**Figura 13**). Sin embargo, las concentraciones 50 y 100 μM

Al mostraron una menor reducción en esta variable, y la concentración 150 μM Al con un valor muy similar al testigo, ninguno de los tratamientos fue estadísticamente significativo (**Figura 14**). En cuanto a la reducción del diámetro del tallo, la aplicación de 50 μM Al aumentó el valor de esta variable, y esta media fue estadísticamente superior al resto de los tratamientos, lo que significa una mayor reducción del diámetro del tallo en el progenitor masculino al ser tratado con 50 μM Al (**Figura 15**). Respecto al progenitor femenino la media más alta respecto a la reducción del tallo se observó al aplicar 150 μM Al, y la más baja con 50 μM Al, la cual fue similar al resto de los tratamientos probados, incluyendo al testigo (**Figura 16**).

El peso del raquis central del progenitor masculino de este cruzamiento aumentó significativamente al incrementar la concentración de Al en la solución aséptica a 150 μM (**Figura 17**); en el progenitor femenino todos los niveles de Al evaluados produjeron medias en esta variable que no son diferentes a la del testigo (**Figura 18**). Respecto al peso seco del fuzz, el Al estimuló esta variable en el macho (**Figura 19**), pero no ejerció efecto en la hembra (**Figura 21**). Con relación a las variables poscosecha, la aplicación de Al no afectó el peso del fuzz después del despeluzado, el peso de impurezas ni el peso de semillas vanas y otras impurezas (**Cuadro 3**). Sin embargo, el Al sí disminuyó el peso del fuzz después del desgrane de la hembra y aumentó el peso del fuzz después del sopleteado, lo que implicó tener semillas de mayor calidad y potencialmente mayor viabilidad (**Cuadro 3**). Asimismo, en el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 (germinación baja), la aplicación de Al no mejoró la dinámica de germinación de la semilla, y las medias fueron inferiores al testigo (**Figura 22**). Aunque el porcentaje de germinación en tallos tratados con Al tuvo valores estadísticamente similares al testigo, éste último tuvo las medias más altas en términos absolutos (**Figura 23**).

En la solución aséptica del cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 (germinación media), el Al tendió a conservar el pH similar al testigo (**Cuadro 7**), en tanto que la CE tendió a aumentar con la aplicación de Al (**Cuadro 8**). El Al tampoco ejerció efectos pronunciados en la apertura floral ni al ser aplicado a 50 ni a 100 μM Al (**Figuras 51 y 52**), pero la aplicación de 150 μM Al retrasó el periodo de apertura de

4 a 5 días (**Figura 53**). En este cruzamiento, la aplicación de 50 μM Al aumentó los valores de las unidades SPAD desde el día 5 y al final del periodo de evaluación (día 11) en el progenitor masculino (**Figura 65**). Por el contrario, en el progenitor femenino el testigo mostró los valores más altos de las lecturas SPAD, y el tratamiento con 50 μM Al fue el más bajo (**Figura 71**).

El Al aumentó las medias respecto a la reducción del raquis central en el progenitor masculino (**Figura 77**), pero disminuyó esta reducción en el femenino (**Figura 78**), en ambos progenitores las concentraciones de Al no fueron estadísticamente significativas. Respecto a la reducción del diámetro del tallo en el progenitor masculino, no hubo efectos consistentes pues mientras la máxima reducción de todos los tratamientos probados se observó al aplicar 100 μM Al, la aplicación de 50 y 150 μM Al tuvieron medias menores a la anterior, y similares al testigo (**Figura 79**) con diferencias estadísticas significativas; esto puede deberse a un posible efecto hormético (Bello-Bello *et al.*, 2017), lo cual habría que ser estudiado a mayor profundidad. En cuanto a la reducción del diámetro del tallo del progenitor femenino, la aplicación de Al no ejerció efectos significativos, en una concentración de 50 μM Al no se incrementa la reducción del tallo, a diferencia de las concentraciones de 100 y 150 μM Al que la tendencia fue a incrementar esta variable, sin mostrar diferencias estadísticas significativas (**Figura 80**).

Las variables peso seco del raquis central de progenitores masculino y femenino (**Figuras 81 y 82**), peso del fuzz del progenitor masculino (**Figura 83**), y longitud de la panícula del progenitor masculino (**Figura 84**) no fueron afectados por los tratamientos en ninguno de los progenitores. El Al disminuyó el peso del fuzz después del desgrane en la hembra, y el peso del Fuzz después del sopleteado; el peso del fuzz después del despeluzado aumentó al aplicar 100 μM Al, y el peso de impurezas fue mayor en panículas tratadas con 150 μM Al, en comparación con el testigo; el peso de semillas vanas y otras impurezas aumentó al aplicar 100 μM Al, pero disminuyó con 50 y 150 μM Al, respecto al testigo (**Cuadro 9**). En este cruzamiento, la dinámica de germinación fue favorecida con 50 y 100 μM Al (**Figura 86**), lo mismo que el porcentaje de germinación (**Figura 87**).

En la pinácea *Picea glauca*, la aplicación de 50-500 μM Al no redujo el porcentaje acumulado de germinación de semillas, disminuyó la capacidad inicial de las plántulas para su establecimiento en el medio de enraizamiento, aunque estimuló su crecimiento, longitud y peso del tallo (Nosko *et al.*, 1988). El Al genera respuestas metabólicas complejas, donde las fitohormonas como el ácido indolacético (IAA) (Tomioka *et al.*, 2012) y el ácido abscísico (ABA) (Moriyama *et al.*, 2016) pueden jugar un papel clave en la regulación del crecimiento vegetal. En conjunto, estas fitohormonas pueden mediar procesos estimuladores o inhibitorios del crecimiento y desarrollo, dependiendo de si las concentraciones del Al son bajas (benéficas) o altas (tóxicas) para la planta (Escobar Sepúlveda *et al.*, 2017). De hecho, en plántulas de soya (*Glycine max*), el Al estimuló la elongación de tallos y raíces, así como la capacidad antioxidante de las plantas (Du *et al.*, 2010). Se ha comprobado que estos estímulos en el crecimiento están mediados por los balances en las concentraciones de hormonas vegetales como ABA, etileno, giberelinas, auxinas, citocininas y brasinoesteroides, mismas que pueden intervenir en la germinación de semillas, además de actuar como reguladores del crecimiento vegetal (Miransari y Smith, 2014). De hecho, en arroz (Moreno-Alvarado *et al.*, 2017) y en *Quercus serrata* (Tomioka *et al.*, 2012) se ha demostrado la existencia de una relación entre el crecimiento promovido por el Al y la síntesis y actividad de diferentes hormonas vegetales involucradas con la germinación de semillas y el crecimiento vegetal. Sin embargo, no se ha comprobado cual es la relación que guarda el Al en la germinación de semillas de caña de azúcar, por lo que el presente estudio es pionero en aportar elementos para descifrar estas incógnitas.

3.4.2. Yodo

Como elemento benéfico, el yodo (I) estimula la síntesis de celulosa y la lignificación del tallo, lo que ayuda a fortalecer la resistencia mecánica de las plantas (Nose *et al.*, 1995). En uno de los primeros estudios sobre el efecto este elemento en la biología de las plantas, Brenchley (1924) reportó que la germinación de semillas de tomate no es afectada por el I, y que el vigor inicial de plantas tratadas y de plantas testigo es similar. Sin embargo, en mostaza, altas concentraciones de I inhiben la germinación, y en cebada, esta inhibición es más pronunciada. En semillas de soya

y girasol tratadas con I, se reduce el deterioro ocasionado por altas temperaturas y humedad en el ambiente. Además, estas semillas muestran menores niveles de daño de membrana, lo que se refleja en mejores porcentajes de germinación y crecimiento inicial de plántulas (Dey(née Pathak) y Mukherjee, 1984). En canola, el tratamiento de semillas con I redujo el deterioro de los tejidos (Powell *et al.*, 2005). Dado que el deterioro de semillas está relacionado con el estrés oxidativo (Sun y Leopold, 1995), la tolerancia al deterioro inducida por este elemento confirma su función como antioxidante o como inductor de mecanismos de defensa contra el estrés oxidativo.

En nuestro estudio, la adición de yodo a la solución aséptica para el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 (germinación baja), no afectó el pH (**Cuadro 4**) ni la CE de la solución aséptica (**Cuadro 5**). En el progenitor masculino, la adición de 20 μM I estimuló la apertura floral al segundo día del periodo de evaluación, en tanto que en el femenino este tratamiento la retrasó un día más que el resto de los tratamientos (**Figura 24**). Con el tratamiento con 40 μM I, la apertura floral se alcanzó en 3 d tanto en el progenitor masculino como en el femenino; es decir se adelantó 1 d en comparación con los testigos (**Figura 25**). En tanto que la concentración de 60 μM I, no ocasionó diferencias estadísticas entre tratamientos (**Figura 26**). El I no modificó los valores de las lecturas SPAD ni al inicio ni al final del periodo de evaluación de esta variable, aunque el testigo mostró un valor ligeramente más bajo que el resto de los tratamientos en el progenitor masculino (**Figura 33**). En el progenitor femenino, hubo una estimulación de esta variable por efecto del tratamiento con 20 μM I del día 5 al 11; al día 13, todos los tratamientos mostraron valores muy similares (**Figura 37**). El I aumentó los valores de la reducción del diámetro del raquis central en el progenitor masculino, al aplicarse a 40 y 60 μM I (**Figura 41**) con significancias estadísticas; en el femenino, las tres concentraciones de I probadas aumentaron los valores de la reducción del diámetro raquis central, siendo superiores al testigo y dos de estas (20 y 60 μM I) diferentes estadísticamente (**Figura 42**). La reducción del diámetro del tallo en el progenitor masculino fue similar al testigo, a excepción del efecto por la concentración de 20 μM I, sin embargo, no hubo efectos del I en esta variable de acuerdo con el análisis estadístico (**Figura 43**). Aunque numéricamente hubo una mayor reducción en el

diámetro del tallo en el progenitor femenino al aplicar 60 μM I, no hubo diferencias estadísticas significativas entre las concentraciones de I, pero si respecto al testigo con la concentración 60 μM I (**Figura 44**). En el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 no se observaron efectos estadísticos significativos del I en la variable peso seco del raquis central (**Figura 45**); en el femenino, el I tendió a aumentar el valor de esta variable respecto al testigo, pero no fueron estadísticamente diferentes (**Figura 46**). El peso seco del fuzz no fue afectado por los tratamientos en el progenitor masculino (**Figura 47**). El peso del fuzz después del desgrane en la hembra se redujo conforme se incrementó la concentración de I aplicada; sin embargo, peso del fuzz después del despeluzado, peso del fuzz después del sopleteado, peso de impurezas y peso de semillas vanas y otras impurezas fueron estadísticamente similares al testigo (**Cuadro 6**). La dinámica de germinación fue superior en el testigo que en todas las concentraciones de I probadas (**Figura 49**), en tanto que el porcentaje de germinación disminuyó al aplicar 20 y 60 μM I, respecto al testigo (**Figura 50**).

En el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 (germinación media), la solución aséptica tuvo un pH similar al testigo (**Cuadro 7**), en tanto que la CE aumentó con la aplicación de I (**Cuadro 8**). En la hembra, los días a apertura floral se prolongaron al aplicar I en cualquiera de las concentraciones probadas (**Figura 54**). Las lecturas SPAD fueron mayores en el testigo de ambos progenitores (**Figuras 66 y 72**). En el progenitor masculino, la reducción del raquis central fue similar entre el testigo y los diferentes niveles de I probados (**Figura 77**), en tanto que, en el femenino, dicha reducción fue menor al tratar los tallos con 20 y 60 μM I con diferencias estadísticas (**Figura 78**). En cuanto al diámetro de tallo en el progenitor masculino, éste tuvo una mayor reducción al aplicar 60 μM I, mientras que, en el femenino, esta reducción fue similar al testigo. Peso seco del raquis central de ambos progenitores (**Figuras 81 y 82**), peso seco del fuzz del progenitor masculino (**Figura 83**) y longitud de la panícula del progenitor masculino (**Figura 84**) no fueron afectados por los tratamientos probados. El peso del fuzz después del desgrane hembra disminuyó con 20 y 40 μM I, pero aumentó con 60 μM I; lo mismo se observó con la variable peso del fuzz después del despeluzado y después del sopleteado, así como con el

peso de semillas vanas y otras impurezas.; el peso de impurezas fue similar al testigo al aplicar 20 y 40 μM I, pero disminuyó con 60 μM I (**Cuadro 9**).

Para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, la aplicación de yodo afectó negativamente tanto la dinámica (**Figura 86**) como el porcentaje de germinación (**Figura 87**).

3.4.3. Lantano

El lantano (La) es considerado un elemento benéfico para las plantas (Trejo-Téllez *et al.*, 2016). La incubación de semillas de arroz con $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ aceleró la germinación e incrementó el vigor y el contenido de clorofilas en las plántulas; además, la actividad de las enzimas alfa-amilasa, proteinasa, lipasa, y otras enzimas hidrolíticas mejoró con la aplicación de lantano (Fashui *et al.*, 2003). Además, cuando las semillas envejecen, la aplicación de La mejora la tasa de germinación, el índice de germinación y el índice de vigor de semillas envejecidas, gracias al estímulo de la respiración y de mecanismos antioxidantes (Fashui *et al.*, 2012). Sin embargo, en *Triticum durum*, el lantano inhibió la germinación (d'Aquino *et al.*, 2009). En plántulas de Pimiento Morrón, el La suministrado a una concentración de 10 μM en la solución nutritiva universal de Steiner, crecidas durante un periodo de 30 d, se pueden obtener los efectos benéficos siguientes: incrementar en un 20% la altura de la planta, el diámetro del brote puede incrementarse en un 9%, y presentar mayor número de botones florales. Se estimular el aumento en número de hojas y por ende el área foliar también fue favorecida, sin que se afectara la acumulación de materia seca al final del experimento. En relación con biomoléculas, se puede estimular la biosíntesis de clorofila a y b, y de azúcares solubles totales. Sin embargo, dependiendo del tiempo de exposición de las plantas con La, se puede incrementar o disminuir la concentración de aminoácidos (García-Jiménez *et al.*, 2017).

En nuestro estudio, el lantano no afectó ni el pH (**Cuadro 4**) ni la CE de la solución aséptica (**Cuadro 5**) en el cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 (germinación baja). Al día 3 del periodo de medición la aplicación de 10 μM La estimuló la apertura floral en el progenitor masculino, pero al final del periodo todos los

tratamientos lograron el mismo nivel en esta variable (**Figura 27**). Al elevar la concentración de La a 20 μM , la apertura floral total tanto en el progenitor masculino como en el femenino se alcanzó después de 3 d, mientras que en los testigos la apertura floral se alcanzó hasta el día 4 (**Figura 28**). En el progenitor masculino, el lantano elevó los promedios de las lecturas SPAD, sobre todo al final del periodo de medición (días 11 y 13) (**Figura 34**), aunque al analizar las medias, estas fueron semejantes al testigo (**Figura 36**); en el progenitor femenino, solo el tratamiento con 10 μM La superó al testigo (**Figura 38**), aunque estadísticamente fueron similares al finalizar las mediciones (**Figura 40**).

En el progenitor masculino, el tratamiento con 30 μM La aumentó significativamente la reducción del diámetro del raquis central (**Figura 42**), mientras que, en el femenino, esta reducción fue similar al testigo (**Figura 43**).

El diámetro de tallo en el progenitor masculino se redujo con la aplicación de 10 μM La pero con valor muy similar al testigo, sin embargo, con las concentraciones 20 y 30 μM La esta reducción de incremento significativamente (**Figura 43**). Para el progenitor femenino la concentración 20 μM La aumento la reducción del diámetro del tallo de manera significativa, seguidas de las concentraciones de 10 y 30 μM La que aunque fueron superiores al testigo estas no mostraron diferencias estadísticas significativas (**Figura 44**). En el HOCP 93-746 x Mex 58-418 no se observaron efectos estadísticos significativos de los tratamientos sobre la variable peso seco del raquis central de ambos progenitores (**Figuras 45 y 46**), peso seco del fuzz del progenitor masculino (**Figura 47**), ni Longitud de panícula del progenitor femenino (**Figura 48**). El peso del fuzz después del desgrane hembra aumentó con 20 μM La, y disminuyó con 10 y 30 μM La; esta misma tendencia se observó para la variable peso de impurezas; el peso del fuzz después del despeluzado no mostró efectos significativos de los tratamientos; el peso del fuzz después del sopleteado aumentó con la aplicación de La; en tanto que el peso de semillas vanas y otras impurezas tampoco fue afectado por los tratamientos (**Cuadro 6**).

Las concentraciones de 10 y 20 μM La aumentaron la tasa de germinación, aunque ésta fue similar al testigo a esas concentraciones, y menor al aplicar 30 μM La (**Figura 50**).

En el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743 (germinación media), el pH (**Cuadro 7**) y la CE de la solución aséptica (**Cuadro 8**) tuvieron un ligero aumento con la aplicación de La, aunque estas diferencias no fueron significativas. En el progenitor masculino de este cruzamiento se observó una estimulación de la apertura floral al día dos, con la aplicación de 10 μM La; sin embargo, en éste no se alcanzaron los tres tercios de apertura flora; mientras que en la hembra prolongó la apertura hasta el día 5 (**Figura 57**). Este retraso en la apertura floral del progenitor femenino también se observó con la aplicación de 20 μM La (**Figura 58**). Al aplicar La se observó una reducción en los valores de las unidades SPAD en el progenitor masculino, siendo más evidentes los decrementos al aplicar 20 y 30 μM La (**Figura 67**). En el progenitor femenino, las medias de los valores de lecturas SPAD de los tratamientos con La fueron similares al testigo (**Figura 73**).

La disminución del raquis central del progenitor masculino mostró efectos significativos pues disminuyó con la concentración de 20 μM La, las otras dos concentraciones de La fueron inferiores e iguales al tratamiento testigo (**Figura 77**). Sin embargo, resultados distintos se observaron en el progenitor femenino, ya que las tres concentraciones de La, favoreciendo una menor reducción en esta variable respecto al testigo, en tanto que las concentraciones 20 y 30 μM La, fueron las que mostraron los menores valores estadísticamente significativos (**Figura 78**). Respecto a la reducción del diámetro del tallo del progenitor masculino, éste se ve menos afectado con la aplicación de 20 μM La, sin embargo, los tallos que estuvieron tratados con 10 y 30 μM La, se vieron afectados negativamente, al reducirse su diámetro en comparación con la concentración de 20 μM La y el testigo (**Figura 79**). Por otra parte, los efectos del La en dicha variable evaluada en el progenitor femenino, mostró efectos contrarios, ya que 20 μM La favoreció la reducción del diámetro del tallo, y las concentraciones 10 y 30 μM La presentaron valores muy similares al testigo e inferiores a la concentración de 20 μM La (**Figura 80**).

Tanto en el progenitor masculino como en el femenino, las variables peso del raquis central (**Figuras 81 y 82**), peso del fuzz y longitud de panícula del progenitor masculino (**Figuras 83 y 84**) no fueron afectadas por los tratamientos de lantano. El peso del fuzz después del desgrane hembra fue contrastante, pues mientras que con 10 y 30 μM La se observó disminución, con 20 μM la se observó aumento respecto al testigo. El peso del fuzz después del despelusado disminuyó con la aplicación de La; el peso de impurezas aumentó; el peso del fuzz después del sopleteado disminuyó, y el peso de semillas vanas y otras impurezas fue similar al testigo (**Cuadro 9**).

Para el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, al La disminuyó la dinámica de germinación respecto al testigo (**Figura 86**), en tanto que el porcentaje de germinación permaneció similar al testigo (**Figura 87**).

3.4.4. Silicio

El silicio (Si) ha sido uno de los elementos benéficos más estudiados en plantas cultivadas. Desde inicios de la década de 1840, se comprobó que este elemento estimula el crecimiento y el desempeño de arroz, trigo, maíz, cebada y caña de azúcar, por lo que, en algunos de estos cultivos, sobre todo en caña de azúcar y arroz, el Si es empleado como fertilizante. Sus efectos benéficos se deben a dos aspectos. Primero el Si fortalece los sistemas de defensa de las plantas frente a enfermedades, plagas y condiciones climáticas desfavorables. En segundo lugar, la aplicación de Si mejora la fertilidad del suelo a través dado que optimiza las propiedades de retención de agua y de disponibilidad de nutrimentos para la planta (Snyder *et al.*, 2006). En tomate, el silicio mejora la germinación de semillas e índice mecanismos de tolerancia al estrés oxidativo (Shi *et al.*, 2014). En *Glycyrrhiza uralensis*, la aplicación de 4 mM Si estimuló la germinación de semillas, en tanto que con la dosis 6 mM Si o superior se inhibió este proceso. Al germinar estas semillas en presencia de 50 a 100 mM NaCl, la aplicación de 4 mM Si incrementó significativamente el índice de vigor de las semillas, pero concentraciones mayores de Si afectaron negativamente esta variable, así como el porcentaje de germinación y la emergencia de las plántulas (Zhang *et al.*, 2015).

En nuestro estudio, en el cruzamiento HOCP 93-746 x CP 96-1252 la aplicación de 10 μM Si aumentó el pH de la solución aséptica respecto al testigo, en tanto que al aplicar 5 y 15 μM Si se mantuvo este valor similar al testigo (**Cuadro 1**). De igual manera, la CE fue similar al testigo en los tratamientos con 5 y 15 μM Si, pero disminuyó al aplicar 10 μM Si (**Cuadro 2**). La apertura floral no observó efectos significativos del Si en ninguna de las concentraciones probadas, y al finalizar el periodo de evaluación todas las medias fueron similares al testigo (**Figura 4**). En ambos progenitores de este cruzamiento se observó una estimulación en los valores de las unidades SPAD en todas las concentraciones de Si probadas (**Figuras 8 y 11**). La aplicación de 5 y 10 μM Si mostraron una menor respuesta a disminuir la reducción del diámetro del raquis central del progenitor masculino en comparación con la concentración de 15 μM Si y el testigo, aunque estadísticamente todos los tratamientos son iguales (**Figura 13**). En el caso del progenitor femenino, todas las concentraciones ensayadas de Si, mostraron un efecto positivo significativo para disminuir la reducción del diámetro del raquis central, para esto la mejor concentración es la de 5 μM Si (**Figura 14**). En relación con la reducción del diámetro del tallo del progenitor masculino, no se mostraron efectos estadísticamente significativos, sin embargo, la tendencia es que una concentración de 5 y 15 μM Si, pueden mitigar esta reducción en comparación con el testigo, sin embargo, una concentración de 10 μM Si, puede incrementar dicha reducción (**Figura 15**). Por otra parte, los resultados observados en el progenitor femenino difieren del masculino, mostrándose diferencias estadísticas significativas. Con 10 y 15 μM Si, se puede reducir dicha reducción en el diámetro del tallo, mientras que con 5 μM Si, dicha variable tiende a incrementarse en comparación con el tratamiento testigo (**Figura 16**). En este mismo cruzamiento, la aplicación de Si aumentó ligeramente el peso del raquis central en ambos progenitores; sin embargo, solo el tratamiento 15 μM Si incrementó el peso del raquis central del progenitor femenino de manera significativa respecto al testigo (**Figuras 17 y 18**). En tanto que el peso del fuzz del progenitor masculino fue mayor con 15 μM Si en comparación con el testigo (**Figura 19**). La longitud de la panícula fue afectada por la aplicación de Si, las mayores longitudes alcanzadas fueron con las concentraciones 5 y 15 μM Si y que fueron estadísticamente significativas (**Figura 21**). En este cruzamiento, la aplicación de 10 μM Si aumentó el peso del fuzz después del desgrane de la

hembra; mientras que, el peso del fuzz después del sopleteado; el peso del fuzz después del despeluzado, el peso de impurezas y el peso de semillas vanas y otras impurezas no fueron afectadas por el Si (**Cuadro 3**).

La dinámica de germinación fue reducida en los tratamientos con Si en comparación con el testigo (**Figura 22**); asimismo, el tratamiento 15 mM Si redujo significativamente el porcentaje de germinación (**Figura 23**).

En el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, el pH de la solución aséptica aumentó con la adición de 10 y 15 μM Si (**Cuadro 7**), mientras que la CE con los tratamientos con Si no fue diferente al testigo (**Cuadro 8**). La adición de Si redujo la velocidad de la apertura floral, y la aumentó un día respecto a los tratamientos testigos en ambos progenitores (**Figura 60**). En el progenitor masculino de este cruzamiento, los valores de las unidades SPAD disminuyeron al aumentar la concentración de Si en la solución, aunque al final fueron estadísticamente similares al testigo (**Figura 68**); lo mismo fue observado en el progenitor femenino (**Figura 74**). La aplicación de 15 μM Si mostró la misma magnitud de reducción del diámetro del raquis central en el progenitor masculino en relación con el tratamiento testigo, con las concentraciones 5 y 10 μM Si, ésta fue menor, pero con significancia igual al tratamiento testigo (**Figura 13**), en tanto que en el femenino esta reducción fue menor por efecto de las concentraciones ensayadas de Si comparadas con el testigo, mostrando el mejor efecto la concentración de 5 μM Si (**Figura 14**). En el progenitor masculino, la reducción del diámetro del tallo fue menor con la concentración de 15 μM Si, y se incrementó con la concentración de 10 μM Si, mientras que la reducción por efecto de la aplicación de 5 μM Si se mantuvo intermedia pero inferior al testigo. La concentración 10 μM Si, mostró el valor estadísticamente diferente entre los tratamientos (**Figura 15**). En relación con esta variable en el progenitor femenino, se mostraron efectos diferentes a los observados en el progenitor masculino, con diferencias estadísticas significativas. La concentración de 5 μM Si, mostró la mayor reducción del tallo, mientras que 10 μM Si la menor reducción y 15 μM Si se mantuvo en un valor intermedio entre las dos anteriores. En este caso las mejores concentraciones para disminuir el riesgo de la reducción del diámetro del tallo son 10 y 15 μM Si (**Figura 16**). En este cruzamiento, las variables peso seco del raquis

central de ambos progenitores no fueron afectados por los tratamientos con Si (**Figuras 81 y 82**); asimismo el peso seco de fuzz y longitud de panícula del progenitor masculinos no fueron afectados por el Si (**Figuras 83 y 84**). El peso del fuzz después del desgrane de la hembra aumentó significativamente al aplicar 10 μM Si; este mismo fenómeno se observó con el peso de semillas vanas y otras impurezas. El peso del fuzz después del despeluzado disminuyó gradualmente a medida que se agregó Si en la solución aséptica. El peso de impurezas aumentó con 10 μM Si, y se redujo con 5 μM Si. El peso del fuzz después del sopleteado se redujo con la aplicación de Si (**Cuadro 9**). La aplicación de 15 μM Si redujo significativamente la dinámica y el porcentaje de germinación en este cruzamiento (CC 93-3826 x CP 80-1743) como se observa en las **Figuras 87 y 88**.

3.4.5. Titanio

El titanio (Ti) tiene efectos biológicos significativos en las plantas, y éstos pueden ser benéficos cuando se aplica a bajas concentraciones, y tóxico a altas concentraciones. Además, se ha determinado que el efecto del Ti es más débil si se aplica al follaje, y más evidentes si se aplica a través de la solución nutritiva a la raíz (Kužel *et al.*, 2003). La caña de azúcar representa uno de los primeros cultivos en los que se ha estudiado el efecto del Ti, lo cual sucedió hace más de 100 años (Pellet y Fribourg, 1905). El efecto benéfico del Ti en plantas puede ser consecuencia de su actividad como catalizador redox (Traetta-Mosca, 1913) y se ha demostrado que el Ti incrementa el contenido de clorofilas en diversas especies de plantas (Němec y Káš, 1923).

En nuestro estudio, la aplicación de Ti no afectó los valores de pH (**Cuadro 4**) ni CE de la solución aséptica (**Cuadro 5**) y la aplicación de 25 μM Ti prolongó el número de días de la apertura floral tanto en el progenitor masculino como en el femenino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 (**Figura 30**). Al aumentar a 50 y 75 μM Ti, la apertura floral fue mayor en el progenitor masculino después de 2 y 3 d (**Figuras 31 y 32**). En el progenitor masculino las medias para la variable lecturas SPAD en los tratamientos con Ti fueron superiores a las mostradas por el testigo, lo que indica un efecto protector del Ti sobre las moléculas de clorofila. De hecho, la media más alta para lecturas SPAD de todos los elementos probados se observó en

el progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 al ser tratado con 75 μM Ti (**Figura 35**). En el progenitor femenino de este mismo cruzamiento, la aplicación de Ti también aumentó los valores de las unidades SPAD, sobre todo con 50 y 75 μM Ti (**Figura 39**). Respecto a la reducción del diámetro del raquis central, tanto en el progenitor masculino y femenino la aplicación de Ti mostró medias semejantes al testigo con significancias estadísticas iguales (**Figuras 41 y 42**), es decir no tuvieron efecto alguno para esta variable. En cuanto a la reducción del diámetro del tallo se observaron efectos diferenciales, pues al aplicar 25 y 75 μM Ti las medias fueron semejantes al testigo, al aplicar 50 μM Ti el valor de la media aumentó, lo que significa una mayor reducción del diámetro del tallo en el progenitor masculino estadísticamente distinto al tratamiento testigo (**Figura 43**). Respecto al progenitor femenino no se observaron diferencias estadísticas entre tratamientos y en todo caso, sin embargo, se mostró una tendencia a incrementarse la reducción del tallo por efecto de las concentraciones de 50 y 75 μM Ti (**Figura 44**). El peso del raquis central del progenitor masculino del cruzamiento HOCP 93-746 x Mex 58-418 no mostró efectos significativos de los tratamientos probados (**Figura 45**); en tanto que en el progenitor femenino tratado con 75 μM Ti tuvo una media más alta que el testigo (**Figura 46**). Respecto al peso seco del fuzz del progenitor macho, éste no fue influenciado por los tratamientos con Ti (**Figura 47**). El peso del fuzz después del desgrane en la hembra fue más bajo en los tratamientos con Ti que en el testigo; mientras que el peso del fuzz después del despeluzado no mostró efecto de los tratamientos con Ti. El peso de impurezas también se redujo al aplicar 25 y 75 μM Ti, en tanto que el peso del fuzz después del sopleteado fue significativamente mayor en el tratamiento 75 μM Si. El peso de semillas vanas y otras impurezas no mostró efectos atribuibles al Ti (**Cuadro 6**). La concentración más elevada de Ti disminuyó la dinámica de germinación, mientras que los niveles bajo y medio fueron inferiores al testigo, lo que implica un efecto negativo del Ti en este indicador (**Figura 49**). Asimismo, la concentración 75 mM Si redujo significativamente el porcentaje de germinación (**Figura 50**).

En el cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, la aplicación de Ti aumentó el pH de la solución aséptica respecto al testigo (**Cuadro 7**), en tanto que la CE fue similar al testigo (**Cuadro 8**). En el progenitor femenino de este cruzamiento, la aplicación de 25 μM Ti prolongó la apertura floral a 6 d (**Figura 62**). Al aumentar la dosis de Ti a

50 μM Ti, se observó que la apertura floral de la hembra fue alcanzada en solo 3 d (**Figura 63**). En este cruzamiento las lecturas SPAD fueron muy similares al finalizar el periodo de evaluación en el progenitor masculino (**Figura 69**), en tanto que en el progenitor femenino los valores más altos de lecturas SPAD se tuvieron en el testigo (**Figura 75**). La reducción del raquis central se incrementó con la aplicación de Ti en el progenitor masculino, con las medias más altas por las concentraciones 25 y 75 μM Ti, seguidas de la concentración 50 μM Ti y el testigo, con significancias estadísticas (**Figura 77**). En esta misma variable, el efecto del Ti en el progenitor femenino mostró tendencias distintas al progenitor masculino, ya que con 50 μM Ti se puede disminuir el efecto de reducción del tallo al igual que con la aplicación de 75 μM Ti, pero con 25 μM Ti ésta puede incrementarse, pero no de manera significativa respecto al tratamiento testigo (**Figura 78**). Respecto al cruzamiento CC 93-3826 x CP 80-1743, los tratamientos no afectaron significativamente ninguna de las siguientes variables: peso seco del raquis central de ambos progenitores, Peso seco del fuzz y la longitud de la panícula del progenitor masculino (**Figuras 81 a 85**). En este cruzamiento, el peso del fuzz después del desgrane hembra fue menor en plantas tratadas con Ti en comparación con el testigo, lo mismo que para el caso de la variable peso del fuzz después del sopleteado (**Cuadro 9**). El peso del fuzz después del despeluzado disminuyó con las dosis baja y media de Ti. Respecto al peso de impurezas, el Ti aumentó esta variable con las concentraciones baja y media, pero la aplicación de 75 μM Ti la disminuyó. El peso de semillas vanas y otras impurezas disminuyó con la dosis baja de Ti, pero aumentó con la dosis alta, respecto al testigo (**Cuadro 9**). La aplicación de Ti disminuyó considerablemente la dinámica de germinación del fuzz (**Figura 86**) y el porcentaje de germinación fue menor que el testigo (**Figura 87**).

3.5. Conclusiones

1. El incluir este grupo de elementos benéfico como estrategia nutrimental en el periodo de hibridación de la caña de azúcar puede dar mejoras sustanciales en la fisiología de la planta, producción y germinación de semilla botánica (fuzz).
2. El conocimiento generado en la presente investigación nos permite identificar que pertinencia en el uso de estos elementos benéficos y concentraciones en función del tipo de genotipo a utilizar en el cruzamiento, ya que se identificaron respuesta entre variedades y por tipo de sexo.
3. Los efectos encontrados en las distintas variables evaluadas se traducen en la producción en la producción y mejora de la calidad de la semilla botánica. En el cruzamiento de germinación media, a pesar de los efectos benéficos observados, el resultado del uso de estos elementos no favorece la producción y germinación del fuzz, contrariamente se ve afectado. Sin embargo, en el cruzamiento de germinación media, se observaron respuestas favorables, como es el caso del uso de Al y Si en concentraciones de 100 y 5 μM que mostraron una mayor producción de semillas y porcentajes de germinación más altos.
4. Se recomienda seguir estudiando el efecto de concentración y otras vías de aplicación de elementos benéficos en los programas de hibridación de caña de azúcar.

3.6. Literatura citada

- Alcántar-González G, Sandoval-Villa M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, Estado de México. 156 p.
- Anda M, Suryani E, Husnain Subardja D. 2015. Strategy to reduce fertilizer application in volcanic paddy soils: nutrient reserves approach from parent materials. *Soil Tillage Research* 150: 10-20. doi: 10.1016/j.still.2015.01.005
- Ayala-Villegas MJ, Ayala-Garay OJ, Aguilar-Rincón VH, Corona-Torres T. 2014. Evolución de la calidad de semillas de *Capsicum annuum* L. durante su desarrollo en el fruto. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 37: 79-87.
- Bello-Bello JJ, Chávez-Santoscoy RA, Lecona-Guzma CA, Bogdanchikova N, Salinas-Ruiz J, Gómez-Merino FC, Pestryakov A. 2017. Hormetic response by silver nanoparticles on *in vitro* multiplication of sugarcane (*Saccharum* spp. cv. Mex 69-290) using a temporary immersion system. *Dose Response* 15:1-9. doi: 10.1177/1559325817744945
- Blasco B, Leyva R, Romero L, Ruiz JM. 2013. Iodine effects on phenolic metabolism in lettuce plants under salt stress. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 61: 2591-2596.
- Blasco B, Ríos JJ, Leyva R, Cervilla LM, Sánchez-Rodríguez E, Rubio-Wilhelmi M M, Rosales MA, Ruiz JM, Romero L. 2011. Does iodine biofortification affect oxidative metabolism in lettuce plants? *Biological Trace Element Research* 142: 831-842.
- Bojórquez-Quintal E, Escalante-Magaña C, Echevarría-Machado I and Martínez-Estévez M. 2017. Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils. *Frontiers in Plant Science* 8:1767. doi: 10.3389/fpls.2017.01767
- Brenchley WE. 1924. The effect of iodine on soils and plants. *Annals of Applied Biology* 11: 86-111. doi: 10.1111/j.1744-7348.1924.tb05695.
- Brioschi L, Steinmann M, Lucot E, Pierret MC, Stille P, Prunier J, Badot PM. 2013. Transfer of rare earth elements (REE) from natural soil to plant systems: implications for the environmental availability of anthropogenic REE. *Plant and Soil* 366: 143-163.

- Carvajal M, Martínez-Sánchez F, Alcaraz CF. 1994. Effect of Ti(IV) on some indicators of physiological activity in *Capsicum annuum* L. Journal of Horticultural Science 69: 427-432. doi: 10.1080/14620316.1994.11516471
- Chaturvedi N, Gannavarapu R, Kumar-Dhal N. 2014. Effect of lanthanum on the growth and physiological activities of *Zea mays*, *Vigna radiata* and *Vigna mungo*. International Journal of Environmental Science 4: 653-659. doi: 10.6088/ijes.2014040 404505
- CIDCA. 2017. Programa de variedades. Disponible en: <http://www.cniaa.mx/Cidca.aspx>
- Clune TS, Copeland L. 1999. Effects of aluminium on canola roots. Plant and Soil 216: 27-33. doi: 10.1023/A:1004789014255
- CONAGUA. 2016. Precipitación pluvial media histórica y total anual en el Estado de Chiapas. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/OCFS07/Contenido/Documentos/mediasgrfs.htm>
- Cooke J, Leishman MR. 2011. Is plant ecology more siliceous than we realise? Trends in Plant Science 16: 61-68. doi: 10.1016/j.tplants.2010.10.003
- d'Aquino L, de Pinto MC, Nardi L, Morgana M, Tommasi F. 2009. Effect of some light rare earth elements on seed germination, seedling growth and antioxidant metabolism in *Triticum durum*. Chemosphere 75: 900-905. doi:10.1016/j.chemosphere.2009.01.026
- Dai JL, Zhu YG, Zhang M, Huang YZ. 2004. Selecting iodine-enriched vegetables and the residual effect of iodate application to soil. Biological Trace Element Research 101: 265-276.
- Daood HG, Biacs P, Fehér M, Hajdu F, Pais I. 1988. Effect of titanium on the activity of lipoxygenase. Journal of Plant Nutrition 11: 505-516. doi: 10.1080/01904168809363818
- de Oliveira C, Ramos SJ, Siqueira JO, Faquin V, de Castro EM, Amaral DC, Techio VH, Coelho LC, Silva PH, Schnug E, Guilherme LR. 2015. Bioaccumulation and effects of lanthanum on growth and mitotic index in soybean plants. Ecotoxicology and Environmental Safety 122: 136-44. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.07.020

- Dey(née Pathak) G, Mukherjee RK. 1984. Iodine treatment of soybean and sunflower seeds for controlling deterioration. *Field Crop Research* 9: 205-213. doi: 10.1016/0378-4290(84)90026-1
- Dragišić-Maksimović J, Mojović M, Maksimović V, Römheld V, Nikolic M. 2012. Silicon ameliorates manganese toxicity in cucumber by decreasing hydroxyl radical accumulation in the leaf apoplast. *Journal of Experimental Botany* 63: 2411-2420. doi: 10.1093/jxb/err359
- Du B, Nian H, Zhang Z, Yang C. 2010. Effects of aluminum on superoxide dismutase and peroxidase activities, and lipid peroxidation in the roots and calluses of soybeans differing in aluminum tolerance. *Acta Physiologia Plantarum* 32: 883-890.
- Dumon JC, Ernst WHO. 1988. Titanium in plants. *Journal of Plant Physiology* 133: 203-209.
- Earnshaw A, Greenwood N. 1997. Titanium, zirconium and hafnium. *In* Greenwood NN, Earnshaw A (Eds). *Chemistry of the Elements*. Second Edition. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. pp. 954-975. doi: 10.1016/B978-0-7506-3365-9.50027-4
- Escobar-Sepúlveda HF, Trejo-Téllez LI, García-Morales S, Gómez-Merino FC. 2017. Expression patterns and promoter analyses of aluminum-responsive NAC genes suggest a possible growth regulation of rice mediated by aluminum, hormones and NAC transcription factors. *PLoS ONE* 12(10): e0186084. doi: 10.1371/journal.pone.0186084
- Exley C. 2015. A possible mechanism of biological silicification in plants. *Frontiers in Plant Science* 6:85310.3389/fpls.2015.00853
- Fashui H, Ling W, Chao L. 2003. Study of lanthanum on seed germination and growth of rice. *Biological Trace Element Research* 94: 273-286. doi: 10.1385/BTER:94:3:273
- Fashui H, Zhenggui W, Guiwen Z. 2012. Effect of lanthanum on aged seed germination of rice. *Biological Trace Element Research* 75: 205-213. doi: 10.1385/BTER:75:1-3:205
- Flores-Revilla C. 2012. *Proyectos: Avances y Resultados 2012*. Disponible en: http://www.caneros.org.mx/site_caneros/descargas/pleno_gdl/04_PONENCIA_ESTACIONES_HIBRIDACION.pdf

- Gallardo AF, Pino BM, Alvear MZ, Borie BF. 2005. Efecto del aluminio en la producción de materia seca y en la actividad nitrato reductasa de dos variedades de trigo, creciendo en soluciones nutritivas. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 5: 30-36.
- Gao QH, Wang XF, Shi QH, Yang FJ, Wei M. 2008. Effects of lanthanum on the plant growth and leaf anti-oxidative enzyme activities of cucumber seedlings under nitrate stress. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*.19: 976-980.
- García-Jiménez A, Gómez-Merino FC, Tejeda-Sartorius O and Trejo-Téllez LI. 2017. Lanthanum Affects Bell Pepper Seedling Quality Depending on the Genotype and Time of Exposure by Differentially Modifying Plant Height, Stem Diameter and Concentrations of Chlorophylls, Sugars, Amino Acids, and Proteins. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00308>
- Ghanati F, Morita A, Yokota H. 2005. Effects of aluminium on the growth of tea plant and activation of antioxidant system. *Plant and Soil* 276: 133-141.
- Guerriero G, Hausman JF, Legay S. 2016. Silicon and the plant extracellular matrix. *Frontiers in Plant Science* 7:463. doi: 10.3389/fpls.2016.00463
- Hrubý M, Cígler P, Kužel S. 2002. Titanium in plant nutrition. The contribution to understanding the mechanism of titanium action in plants. *Journal of Plant Nutrition*. 25: 577-598.
- Hu Z, Richter H, Sparovek G, Schnug E. 2004. Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: A review. *Journal of Plant Nutrition* 27: 183-220.
- INAFED. 2016. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Tuxtla Chico. Disponible en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM07chiapas/municipios/07102a.html>
- Jamal SN, Zafar Iqbal M, Athar M 2006. Phytotoxic effect of aluminum and chromium on the germination and early growth of wheat (*Triticum estivum*) varieties. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 3: 53-58. doi: 10.1007/BF03325907
- Jamali B, Rahemi M. 2011. Carnation flowers senescence as influenced by nickel, cobalt and silicon. *Journal of Biological and Environmental Science* 5: 147-152.

- Jowkar MM, Khalighi A, Kafi M, Hassanzadeh N. 2013. Evaluation of aluminum sulfate as vase solution biocide on postharvest microbial and physiological properties of 'Cherry Brandy' rose. *Acta Horticulturae* 1012: 615-626. doi: 10.17660/ActaHortic.2013.1012.83
- Juárez-Hernández MJ, Baca-Castillo GA, Aceves-Navarro LA, Sánchez-García P, Tirado-Torres JL, Sahagún-Castellanos J, Colinas-de-León MT. 2006. Propuesta para la formulación de soluciones nutritivas en estudios de nutrición vegetal. *Interciencia* 31: 246-253.
- Kato S, Wachi T, Yoshihira K, Nakagawa T, Ishikawa A, Takagi D, Tezuka A, Yoshida H, Yoshida S, Sekimoto H, Takahashi M. 2013. Rice (*Oryza sativa* L.) roots have iodate reduction activity in response to iodine. *Frontiers in Plant Science* 4:227. doi: 10.3389/fpls.2013.00227
- Keeping MG. 2017. Uptake of silicon by sugarcane from applied sources may not reflect plant-available soil silicon and total silicon content of sources. *Frontiers in Plant Science* 8:760. doi: 10.3389/fpls.2017.00760
- Kelemen G, Keresztes A, Bacsy E, Feher M, Fodor P, Pais I. 1993. Distribution and intracellular localization of titanium in plants after titanium treatment. *Food Structure* 12:8. Available at: <https://digitalcommons.usu.edu/foodmicrostructure/vol12/iss1/8>
- Kidd PS, Proctor J. 2000. Effects of aluminium on the growth and mineral composition of *Betula pendula* Roth. *Journal of Experimental Botany* 51: 1057-1066.
- Kiferle C, Gonzali S, Holwerda HT, Ibaceta RR, Perata P. 2013. Tomato fruits: a good target for iodine biofortification. *Frontiers in Plant Science* 4:205. doi: 10.3389/fpls.2013.00205.
- Kingston G. 2014. Mineral nutrition of sugarcane. *In* Moore P, Botha FC (Eds.). Wiley-Blackwell. Oxford, UK. pp. 85-120.
- Kinraide TB. 1997. Reconsidering the rhizotoxicity of hydroxyl, sulphate and fluoride complexes of aluminum. *Journal of Experimental Botany* 48: 1115–1124.
- Kleiber T, Markiewicz B. 2013. Application of “Tytanit” in Greenhouse Tomato Growing. *Acta Scitiarum Polonorum Hortorum Cultus*. 12: 117-126.
- Kochian LV, Hoekenga OA, Piñeros MA. 2004. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency.

- Annual Review of Plant Physiology 55: 459-493. doi: 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655
- Kochian LV. 1995. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. 46: 237-260. doi: 10.1146/annurev.pp.46.060195.001321
- Konishi K, Tsuge T. 1936. Inorganic constituents of green-manure crops. Journal of the American Chemical Society. 12: 916-930.
- Korndörfer GH, Lepsch I. 2001. Effect of silicon on plant growth and crop yield. In Datnoff LE, Snyder GH, Korndörfer GH (Eds.). Studies in Plant Science. pp. 133-147. doi: 10.1016/S0928-3420(01)80011-2
- Korndörfer GH, Pereira HS, Camargo MS. 2002. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. STAB 21: 6-9.
- Kužel S, Cígler P, Hrubý M, Vydra J, Pavlikova D, Tlustoš P. 2007. The effect of simultaneous magnesium application on the biological effects of titanium. Plant Soil and Environment 53: 16-23.
- Kužel S, Hrubý M, Cígler P, Tlustoš P, Van PN. 2003. Mechanism of physiological effects of titanium leaf sprays on plants grown on soil. Biological Trace Element Research 91: 179-189.
- Landell MGA, Bressiani JA. 2010. Melhoramento genético e manejo varietal. In Cana-de-açúcar. Dinardo-Miranda LL, Vasconcelos ACM, Landell MGA (Eds). Instituto Agronomico Campinas. pp. 101-176.
- Landini M, Gonzali S, Kiferle C, Tonacchera M, Agretti P, Dimida A, Vitti P, Alpi A, Pinchera A, Perata A. 2012. Metabolic engineering of the iodine content in *Arabidopsis*. Scientific Reports 2:338. doi: 10.1038/srep00338
- Liang Y, Nikolic M, Bélanger R, Gong H, Song A. 2015. Silicon in Agriculture. From Theory to Practice. Springer. Dordrecht, The Netherlands.
- Liu D, Wang X, Zhang X, Gao Z. 2013. Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings. Plant Soil and Environment 59: 196-200.
- Liu L. 1965. Sugarcane crossing technique. Proceeding of international Society of Sugar Cane Technologists. 12: 819:822.
- Liu M, Hasenstein KH. 2005. La³⁺ uptake and its effect on the cytoskeleton in root protoplasts of *Zea mays* L. Plant Physiology 220: 658-666.

- Luyckx M, Hausman J-F, Lutts S and Guerriero G. 2017. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. *Frontiers in Plant Science* 8:411. doi: 10.3389/fpls.2017.00411
- Lyu S, Wei X, Chen J, Wang C, Wang X, Pan D. 2017. Titanium as a beneficial element for crop production. *Frontiers in Plant Science* 8:597. doi: 10.3389/fpls.2017.00597
- Ma JF, Takahashi E. 2002. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Ma JF, Yamaji N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science* 11:392-397.
- Ma JJ, Ren YJ, Yan LY. 2014. Effects of spray application of lanthanum and cerium on yield and quality of chinese cabbage (*Brassica chinensis* L) based on different seasons. *Biological Trace Element Research* 160: 427-432.
- Machado-Junior GR. 2002. Sugarcane varieties. *Sugarcane Journal* 66: 6-7.
- Maguire JD. 1962. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science* 2: 176-177.
- Mahmoodzadeh H, Nabavi M, Kashefi H. 2013. Effect of nanoscale titanium dioxide particles on the germination and growth of canola (*Brassica napus*). *Journal of Ornamental and Horticultural Plants* 3: 25-32.
- Marschner H. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Third Edition. Academic Press. London, UK.
- Martínez-Sánchez F, Núñez M, Amoros A, Giménez JL, Alcaraz CF. 1993. Effect of titanium leaf spray treatments on ascorbic acid levels of *Capsicum annuum* L. fruits. *Journal of Plant Nutrition* 16: 975-981. doi: 10.1080/01904169309364586
- Martínez-Solis J, Virgen-Vargas J, Peña-Ortega MG, Romero AS. 2010. Índice de velocidad de emergencia en líneas de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1: 288-303.
- McCray JM, Rice RW, Ezenwa IV. 2005. Sugarcane leaf tissue sample preparation for diagnostic analysis. IFAS Extension. University of Florida. 1-4. Disponible en: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/files/SC/SC07600.pdf>
- Medrano-Macías J, Leija-Martínez P, González-Morales S, Juárez-Maldonado A and Benavides-Mendoza A. 2016. Use of Iodine to biofortify and promote growth

- and stress tolerance in crops. *Frontiers in Plant Science* 7:1146. doi: 10.3389/fpls.2016.01146
- Meyer JH, Keeping MG. 2000. Review of research into the role of silicon for sugarcane production. *Proceedings of the South African Sugarcane Technologists Association* 74: 29-40
- Miransari M, Smith DL. 2014. Plant hormones and seed germination. *Environmental and Experimental Botany* 99: 110-121. doi: 10.1016/j.envexpbot.2013.11.005
- Mitani N, Ma JF. 2005. Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of Experimental Botany* 56: 1255-1261.
- Moreno-Alvarado M, García-Morales S, Trejo-Téllez LI, Hidalgo-Contreras JV and Gómez-Merino FC. 2017 Aluminum enhances growth and sugar concentration, alters macronutrient status and regulates the expression of *NAC* transcription factors in rice. *Frontiers in Plant Science* 8:73. doi: 10.3389/fpls.2017.00073
- Moriyama U, Tomioka R, Kojima M, Sakakibara H, Takenaka C. 2016. Aluminum effect on starch, soluble sugar, and phytohormone in roots of *Quercus serrata* Thunb. seedlings. *Trees* 30: 405-413.
- Němec A, Káš V. 1923. Studien über die physiologische Bedeutung des Titans im Pflanzenorganismus. *Biochemie Zeitung* 140: 583-590.
- Norman DJ, Chen J. 2011. Effect of foliar application of titanium dioxide on bacterial blight of geranium and *Xanthomonas* leaf spot of poinsettia. *HortScience* 46: 426-428.
- Nose M, Bernards MA, Furlan M, Zajicek J, Eberhardt TL, Lewis NG. 1995. Towards the specification of consecutive steps in macromolecular lignin assembly. *Phytochemistry* 39: 71-79.
- Nosko P, Brassard P, Kramer JR, Kershaw KA. 1988. The effect of aluminum on seed germination and early seedling establishment, growth, and respiration of white spruce (*Picea glauca*). *Canadian Journal of Botany* 66:2305-2310. Doi: 10.1139/b88-313
- Osaki MT, Watanabe T, Tadano T. 1997. Beneficial effect of aluminum on growth of plants adapted to low pH soils. *Soil Science and Plant Nutrition* 43: 551-563.
- Pais I. 1983. The biological importance of titanium. *Journal of Plant Nutrition* 6: 3-131. doi: 10.1080/01904168309363075
- Pellet H, Fribourg C. 1905). Titanium. *Annales de la Science Agronomique* 10:20-84.

- Pilon-Smits EA, Quinn CF, Tapken W, Malagoli M, Schiavon M. 2009. Physiological functions of beneficial elements. *Current Opinion on Plant Biology* 12: 267-274. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.009>
- Pilon-Smits EAH, Quinn CF, Tapken W, Malagoli M, Schiavon M. 2009. Physiological functions of beneficial elements. *Current Opinion in Plant Biology* 12: 267-274.
- Piñeros MA, Shaff JE, Manslank HS, Carvalho Alves VM, Kochian LV. 2005. Aluminum resistance in maize cannot be solely explained by root organic acid exudation. A comparative physiological study. *Plant Physiology* 137: 231-241.
- Poschenrieder C, Cabot C, Martos S, Gallegos B, Barceló J. 2013. Do toxic ions induce hormesis in plants? *Plant Science* 212: 15-25.
- Poschenrieder C, Gunsé B, Corrales I, Barceló J. 2008. A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. *Science Of The Total Environment* 400: 356-368.
- Powell AA, Corbineau F, Franca-Neto J, Léchappé J, Mesterhazy A, Noli E, Pritchard HW, Tarp G. 2005. Towards the future in seed production, evaluation and improvement. *Seed Science and Technology* 33: 265-281. doi: 10.15258/sst.2005.33.2.01
- Ramírez-Martínez M, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Castillo-González AM, Hernández-Ríos I, Hernández-Acosta E. 2012. Bioacumulación de potasio, calcio y lantano en tulipán tratado con lantano. *Terra Latinoamericana*. 30: 229-238.
- Roselló M, Poschenrieder C, Gunsé B, Barceló J, Llugany M. 2015. Differential activation of genes related to aluminium tolerance in two contrasting rice cultivars. *Journal of Inorganic Biochemistry* 152: 160-166.
- Rouphael Y, Cardarelli M, Rea E, Battistelli A, Colla G. 2006. Comparison of the subirrigation and drip-irrigation systems for greenhouse zucchini squash production using saline and nonsaline nutrient solutions. *Agricultural and Water Management*. 82: 99-117.
- Ryan PR, DiTomaso JM, Kochian LV. 1993. Aluminium toxicity in roots: an investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap. *Journal of Experimental Botany* 44: 437-446.

- Salgado-García S, Lagunes-Espinoza LC, Núñez-Escobar R, Ortiz-García CF, Bucio-Alanis L, Aranda-Ibañez E. 2013. Caña de azúcar. Producción sustentable. Mundi-Prensa-Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. 528 p.
- Savant NK, Korndörfer GH, Datnoff LE, Snyder GH. 1999. Silicon nutrition and sugarcane production: a review. *Journal of Plant Nutrition* 22: 1853-1903. doi: 10.1080/01904169909365761
- Sentíes-Herrera HE, Gómez-Merino FC, Valdez-Balero A, Silva-Rojas HV, Trejo-Téllez LI. 2014. The agro-industrial sugarcane system in Mexico: Current status, challenges and opportunities. *Journal of Agricultural Science* 6: 26-54. doi: <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v6n4p26>
- Sentíes-Herrera HE, Gómez-Merino FC. 2014. New guidelines on the genetic improvement of sugarcane (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad* 7: 9-15
- Sentíes-Herrera HE, Trejo-Telléz LI, Gómez-Merino FC, Flores-Revilla C, Loyo-Joachin R, Comité Técnico Administrativo del CIDCA, A. C. 2016. Elementos benéficos en la hibridación de caña de azúcar (*Saccharum* spp.): Efectos en la fisiología del progenitor femenino durante el cruzamiento y postcosecha. XXXVIII Convención ATAM 70º Aniversario. 10º Congreso ATALAC. Boca del Río, Veracruz, México. Agosto 31 Septiembre 2 de 2016.
- Sentíes-Herrera HE, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC. 2017. The Mexican sugarcane production system: History, current status, and new trends. In *Sugarcane: Production systems, uses and economic importance*, ed. R. Murphy, 39–71. New York, NY: Nova Science Publishers.
- Serrano-Altamirano V, Díaz-Padilla G, López-Luna A, Cano-García MA, Báez-Gonzalez AD, Garrido-Gonzalez ER. Estadísticas climatológicas básicas del Estado de Chiapas (período 1961-2003). Centro de Investigación Regional Pacifico Sur - Campo Experimental Centro Chiapas. Libro Técnico 1. INIFAP, 2006. p. 186.
- Shi QH, Bao ZY, Zhu ZJ, He Y, Qian QQ, Yu JQ. 2005. Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. *Phytochemistry* 66: 1551-1559.
- Shi Y, Zhang Y, Yao H, Wu J, Sun H, Gong H. 2014. Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under

- water deficit stress. *Plant Physiology and Biochemistry* 78: 27-36. doi: 10.1016/j.plaphy.2014.02.009
- Silva CE, Martínez F, Madrid C, León T. 2013. La floración en caña de azúcar, su manejo para mejoramiento genético y en la producción comercial. III Congreso AETA, Sep.18-20 del 2013. Guayaquil-Ecuador. pp.1-9.
- Silva GE, Ramos FT, de Faria AP, França MG. 2014. Seeds' physicochemical traits and mucilage protection against aluminum effect during germination and root elongation as important factors in a biofuel seed crop (*Ricinus communis*). *Environmental Science and Pollution Research* 21: 11572-11579. doi: 10.1007/s11356-014-3147-6.
- Skovran E, Martínez-Gómez NC. 2015. Just add lanthanides. *Science* 348: 862-863. doi: 10.1126/science.aaa9091
- Snyder GH, Matichenkov VV, Datnoff LE. 2006. Silicon. *In* Baker A, Pilbeam D (eds.). *Handbook of Plant Nutrition*. Taylor and Francis, Boca Ratón, pp. 551-568.
- Sobrevilla-Solís JA, López-Herrera M, López-Escamilla AL, Romero-Bautista L. 2013. Evaluación de diferentes tratamientos pregerminativos y osmóticos en la germinación de semillas *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston. *Estudios científicos en el estado de Hidalgo y zonas aledañas*. Paper 12. Disponible en: <http://digitalcommons.unl.edu/hidalgo/12>
- Steiner AA. 1966. The influence of the chemical composition of a nutrient solution on the production of tomato plants. *Plant and Soil* 24: 454-466.
- Steiner AA. 1968. Soiless culture. *Proceeding of the 6th colloquium of International Potash Institute*. Florence Italy. Published by: Int. Potash Inst. Berne Switzerland. pp. 324-341.
- Steiner AA. 1973. The selective capacity of tomato plants for ions in a nutrient solution. *Proceedings of the 3th International Congress on Soiless Culture*. IWOSC. Sassari, Italy. pp. 43-54.
- Sun WQ, Leopold AC. 1995. The Maillard reaction and oxidative stress during aging of soybean seeds. *Physiologia Plantarum* 94: 94-104. doi: 10.1111/j.1399-3054.1995.tb00789.x
- Takahashi E, Ma JF, Miyake Y. 1990. The possibility of silicon as an essential element of higher plants. *Comments on Agricultural and Food Chemistry* 2: 99-122.

- Thomas PJ, Carpenter D, Boutin C, Allison JE. 2014. Rare earth elements (REEs): effects on germination and growth of selected crop and native plant species. *Chemosphere* 96: 57-66
- Tomioka R, Takenaka C, Maeshima M, Tezuka T, Kojima M, Sakakibara H. 2012. Stimulation of root growth induced by aluminum in *Quercus serrate* Thunb. is related to activity of nitrate reductase and maintenance of IAA concentration in roots. *American Journal of Plant Science* 3: 1619-1624.
- Traetta-Mosca F. 1913. Titanium and the rare metals in the ash of the leaves of Kentucky tobacco cultivated in Italy. *Gazzetta Chimica Italiana* 43: 437-440.
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Alcántar-González G. 2016. Elementos benéficos: potencialidades y limitantes. *In* Nutrición de Cultivos. Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC (Eds). Mundi-Prensa, México. pp. 59-101.
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC. 2007. Respuestas fisiológicas y bioquímicas de plantas de tabaco a concentraciones de aluminio en invernadero. *Terra Latinoamericana* 25: 251-259.
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC. 2012. Nutrient solutions for hydroponic systems. *In* Hydroponics - A Standard Methodology for Plant Biological Researches. Asao, T. (Ed.). pp. 1-22. ISBN: 978-953-51-0386-8. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/hydroponics-a-standardmethodology-for-plant-biological-researches/nutrient-solutions-for-hydroponic-systems>
- Tyler G. 2004. Rare earth elements in soil and plant systems. A review. *Plant and Soil* 267: 191-206. doi: 10.1007/s11104-005-4888-2
- Urrestarazu GM. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. Ediciones Mundi-Prensa. España.
- Vaculík M, Landberg T, Greger M, Luxová M, Stoláriková M, Lux A. 2012. Silicon modifies root anatomy, and uptake and subcellular distribution of cadmium in young maize plants. *Annals of Botany* 110: 433-443.
- Wang CR, Xiao JJ, Tian Y, Bao X, Liu L, Yu Y. 2012. Antioxidant and prooxidant effects of lanthanum ions on *Vicia faba* L. seedlings under cadmium stress, suggesting ecological risk. *Environmental Toxicology and Chemistry* 31, 1355-1362. doi: 10.1002/etc.1816

- Wang L, Wang W, Zhou Q, Huang X. 2014. Combined effects of lanthanum (III) chloride and acid rain on photosynthetic parameters in rice. *Chemosphere* 112: 355-361.
- Wang Z, Zhang X, Mu Y. 2008. Effects of rare-earth fertilizers on the emission of nitrous oxide from agricultural soils in China. *Atmosphere and Environment* 42: 3882-3887
- Watanabe T, Jansen S, Osaki M. 2005. The beneficial effect of aluminium and the role of citrate in Al accumulation in *Melastoma malabathricum*. *The New Phytologist* 165: 773-780.
- Wojcik P, Wojcik M. 2001. Growth and nutrition of M.26 Emla apple rootstock as influenced by titanium fertilization. *Journal of Plant Nutrition* 24: 1575-1588. doi: 10.1081/PLN-100106022
- Xiao-Dong W, Ou-yang C, Zhe-ren F, Gao S, Chen F, Tang L. 2010. Effects of exogenous silicon on seed germination and antioxidant enzyme activities of *Momordica charantia* under salt stress. *Journal of Animal and Plant Science* 6: 700- 708.
- Xiao-dong W, Ou-yang C, Zhe-ren F, Gao S, Chen F, Tang L. 2010. Effects of exogenous silicon on seed germination and antioxidant enzyme activities of *Momordica charantia* under salt stress. *Journal of Animal and Plant Sciences* 6: 700- 708.
- Yang Q, Li Y, Wang L, Zhou Q, Huang Z. Effect of lanthanum(III) on the production of ethylene and reactive oxygen species in soybean seedlings exposed to the enhanced ultraviolet-B radiation. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 104: 152-159
- Zeng Q, Zhu JG, Cheng HL, Xie ZB, Chu HY. 2006. Phytotoxicity of lanthanum in rice in haplic acrisols and cambisols. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 64: 226-233
- Zhang X, Humphries A, Auricht G. 2007. Genetic variability and inheritance of aluminium tolerance as indicated by long root regrowth in lucerne (*Medicago sativa* L.). *Euphytica* 157: 177-184.
- Zhang XH, Zhou D, Cui JJ, Ma HL, Lang DY, Wu XL, Wang ZS, Qiu HY, Li M. 2015. Effect of silicon on seed germination and the physiological characteristics of *Glycyrrhiza uralensis* under different levels of salinity. *The Journal of*

Horticultural Science and Biotechnology 90: 439-443. doi:
10.1080/14620316.2015.11513207

Ziaei N, Rezaiatmand Z, Ranjbar M. 2014. Study of aluminum toxicity on photosynthetic pigment, soluble sugars and proline contents in two sunflower varieties. Research on Crop Ecophysiology. 9: 105-113.

CAPÍTULO IV

Relaciones Macronutrimientales y Crecimiento de Caña De Azúcar en Condiciones de Invernadero

Resumen

Este estudio tuvo el objetivo de evaluar tres relaciones macronutrimientales (RM) en el crecimiento, desarrollo, y concentración nutrimental de caña de azúcar variedad CP 72-2086. La investigación se realizó en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, México (19° 29' N, 98° 53' O y una altitud de 2250 m) en invernadero. Se estableció un experimento completamente al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos en estudio fueron tres relaciones macronutrimientales a partir de la solución nutritiva universal de Steiner (RM 100%) y dos relaciones donde se disminuyó e incrementó la concentración de los nutrimentos N, P, K y Mg en un 25%, para dar origen a las RM 75% y RM 125%, respectivamente. Se evaluaron parámetros de crecimiento, desarrollo y de concentración nutrimental. Los resultados derivados de parámetros de crecimiento mostraron que a los 30 d después de iniciados los tratamientos, las RM no tuvieron un efecto en la mayoría de las variables evaluadas; sin embargo, la RM 75% incrementó la altura del tallo y el peso fresco del tallo, mientras que la RM 100% disminuyó el peso fresco del tallo. A los 60 d de tratamiento, la RM 100% incrementó de manera significativa la altura de planta y de tallo, el diámetro del tallo, peso fresco del tallo, vaina y hojas, así como en los pesos secos de tallo, vaina y hojas. Dicha relación también aumentó el área foliar pero disminuyó el valor de las lecturas SPAD. A los 90 d de tratamiento, la RM 125% mostró los mejores resultados, al incrementar la altura de la planta, la altura del tallo, el peso fresco del tallo y vainas, así como el peso seco del tallo, vainas y hojas. En lo que respecta a concentración nutrimental, se mostraron diferencias estadísticas significativas en la concentración de macro y micronutrimientos en los tres periodos de evaluación por órgano analizado debido al efecto de las RM. A los 30 d de tratamiento en raíz, la RM 75% aumentó la concentración de Ca y S, mientras que las de Fe y B se incrementaron con la RM 100%. Con la RM 125% se favorece la concentración de P. A los 60 d, la RM 75% incrementa concentraciones de Ca y Mn, mientras que las de K y Cu se aumentan con la RM 125%. A los 90 d, la RM 125% es la única que mostró incrementos para los nutrimentos Ca, S y Mn. Para el caso del tallo, la concentración nutrimental fue

favorecida a los 30 y 60 d por dos RM. Para los nutrimentos Ca, Mg, S y Fe se incrementaron en esos dos periodos por las RM 75%, y Mn por la RM 100%. Sin embargo, para los 90, la RM 75% incrementó las concentraciones de N, Cu y B, mientras que con la RM 100% se favoreció la de Mn. Con relación a la concentración nutrimental de las vainas, ésta mostró cambios significativos a los 30 d; la RM 125% incrementó solo la concentración de N, mientras que la RM 100% aumentó las concentraciones de P, K, S y Mn, y la RM 75% afectó positivamente las de Mg y Cu. Sin embargo, a los 90 d después de aplicados los tratamientos, las concentraciones de macro y micronutrimentos no fueron diferentes entre tratamientos. La concentración nutrimental de hojas mostró cambios por la RM 100% al incrementar los valores de concentración de Ca y Mg a los 30 d. Para el periodo siguiente de evaluación, la RM 75% incrementó las concentraciones de P, Ca, Mg, S y B, mientras que la RM 100% solo las de K y Mn. La RM 125% aumentó las concentraciones de P, K y Fe. A los 90 d, la RM 75% incrementó las concentraciones de Mg, Zn y B, la RM 100% Mn y la RM 125% las de P, K, Mg y Zn. De este estudio se concluye que la solución nutritiva universal de Steiner puede usarse en concentraciones mayores al 100%, con efectos positivos en el crecimiento de la caña de azúcar, y con efectos significativos en el aumento de las medias de variables determinantes para el rendimiento y en la concentración nutrimental en diferentes órganos.

Palabras clave: Caña de azúcar, potencial osmótico de la solución nutritiva, crecimiento, desarrollo, concentración nutrimental.

Chapter IV

Macronutrient Relations and Growth of Sugarcane in Greenhouse Conditions

Abstract

This study aimed at evaluating three macronutrient relationships (RM) in the growth, development, and nutritional concentration of sugarcane variety CP 72-2086. The research was carried out in the Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Mexico (19° 29 'N, 98° 53' W and an altitude of 2250 m) in greenhouse. A completely randomized experiment with four repetitions was established. The treatments under study were three macronutrient relationships from the Steiner's universal nutrient solution (100% RM) and two relationships where it decreased and increased the concentration of nutrients N, P, K and Mg by 25%, to give origin at RM 75% and RM 125%, respectively. Growth, development and nutritional concentration parameters were evaluated. The results derived from growth parameters showed that at 30 d after the treatments started, the RM tested did not have an effect in most of the variables evaluated; however, the RM 75% increased the height of the stem and the fresh weight of the stem, while the RM 100% decreased the fresh weight of the stem. At 60 d of treatment, the 100% RM significantly increased plant and stem height, stem diameter, fresh weight of the stem, pod and leaves, as well as the dry weights of stem, pod and leaves. This relationship also increased the leaf area but decreased the value of the SPAD readings. At 90 d of treatment, the RM 125% showed the best results, increasing the height of the plant, the height of the stem, the fresh weight of the stem and pods, as well as the dry weight of the stem, pods and leaves. Regarding nutrient concentration, significant statistical differences were shown in the concentration of macro and micronutrients in the three periods of evaluation by organ analyzed due to the effect of the RM. At 30 d of root treatment, the RM 75% increased the concentration of Ca and S, while those of Fe and B increased with the RM 100%. With the RM 125% the concentration of P is favored. At 60 d, the RM 75% increased Ca and Mn concentrations, while those of K and Cu increased with the RM 125%. At 90 d, the RM 125% is the only one that showed increases for the nutrients Ca, S and Mn. For the case of the stem, the nutritional concentration was favored at 30 and 60 d by two RM. For nutrients Ca, Mg, S and Fe were increased in those two periods by the RM 75%, and Mn by the RM 100%.

However, for the 90s, the RM 75% increased the concentrations of N, Cu and B, while with the Mn 100% the Mn was favored. In relation to the nutritional concentration of the pods, it showed significant changes at 30 d; MRI 125% increased only the concentration of N, while RM 100% increased the concentrations of P, K, S and Mn, and RM 75% positively affected those of Mg and Cu. However, at 90 d after the treatments were applied, the concentrations of macro and micronutrients were not different between treatments. The nutritional concentration of leaves showed changes by 100% RM by increasing the concentration values of Ca and Mg at 30 d. For the following period of evaluation, the RM 75% increased the concentrations of P, Ca, Mg, S and B, while the RM 100% increased only those of K and Mn. RM 125% increased the concentrations of P, K and Fe. At 90 d, the RM 75% increased the concentrations of Mg, Zn and B, the Mn 100% Mn and the RM 125% those of P, K, Mg and Zn. From this study it is concluded that Steiner's universal nutrient solution can be used in concentrations greater than 100%, with positive effects on the growth of sugarcane, and with significant effects on the increase of the means of determining variables for yield and in the nutritional concentration in different organs.

Keywords: Sugarcane, osmotic potential of the nutritive solution, growth, development, nutritional concentration.

4.1. Introducción

El conocimiento de las diferentes etapas fenológicas del cultivo de caña de azúcar permite dar un manejo eficiente durante su ciclo de vida. Dichas etapas, están definidas por una carga genética propia de la planta e influenciadas por condiciones climáticas y edáficas predominantes en el entorno que son crecidas (Solórzano, 2003). En el caso particular del manejo nutrimental, se deben además considerar los parámetros de crecimiento y la dinámica de acumulación de nutrientes (Rengel, 2004).

La caña de azúcar es un cultivo de gran importancia en las zonas tropicales y subtropicales del mundo, empleado para producir recursos energéticos estratégicos como azúcar y etanol (Wiedenfled y Enciso, 2008). Es una planta C4 con una extraordinaria eficiencia en la conversión de energía solar en biomasa (Gascho *et al.*, 1993; Wiedenfled, 2000), capaz de extraer y agotar rápidamente los nutrientes del suelo (Wood, 1990); en consecuencia, el conocimiento de los patrones de absorción permite identificar los momentos de mayor demanda a fin de realizar un oportuno suministro de nutrientes esenciales para la optimización del rendimiento.

4.1.1. Marco Teórico

4.1.1.1. Requerimientos nutrimentales en plantas superiores

Una de las cuestiones principales en la fertilización y nutrición de un cultivo es conocer las necesidades de éste y validar el estado nutricional del mismo, ya sea para corregir deficiencias o garantizar la productividad del cultivo y para ello existen varias herramientas como es el diagnóstico visual, diagnóstico foliar, extracción nutrimental y la expectativa de producción del cultivo en un determinado suelo (Dias y Rossetto, 2006).

Si bien la nutrición puede modificar las características morfológicas y el crecimiento de las plantas, se han propuesto un gran número de fórmulas y requerimientos para llegar a cubrir las necesidades nutrimentales. Por lo cual, una manera de investigar que nutrientes y en qué proporción dan los mejores resultados en el rendimiento final del cultivo, es el estudio de soluciones nutritivas de manera sistemática, lo cual permite evaluar un número finito de combinaciones posibles (Steiner, 1961).

Existe una relación mutua entre aniones y cationes para que se lleve a cabo el buen funcionamiento del organismo vegetal, esto dependerá del equilibrio fisiológico de la solución nutritiva (Yágodin, 1986). De acuerdo con Steiner (1961), lo que más influye en la solución nutritiva es la relación mutua de aniones ($\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{SO}_4^{2-}$) y cationes ($\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), concentración total de iones y el pH. La solución nutritiva universal está constituida de: NO_3^- , 12 mol_c m⁻³; H_2PO_4^- , 1 mol_c m⁻³; SO_4^{2-} , 7 mol_c m⁻³; K^+ , 7 mol_c m⁻³; Ca^{2+} , 9 mol_c m⁻³; y Mg^{2+} , 4 mol_c m⁻³, cuando el potencial osmótico es -0.072 MPa y el pH es 6.5 (Steiner, 1984). Sin embargo, las necesidades nutrimentales de los vegetales dependen de factores como: especie, variedad, etapa fenológica (Steiner, 1973, 1984; Carpena *et al.*, 1987) y ambiente físico en que se desarrolla la planta, el cual afecta la tasa de absorción y la distribución de nutrimentos dentro de la misma, además de la tasa de crecimiento (Adams, 1999).

Con base en los criterios de Steiner (1984) para las soluciones nutritivas, puede modificarse la relación porcentual de cualquier ion, manteniendo las relaciones mutuas entre cationes y entre aniones y la cantidad total de iones. Tal modificación debe hacerse dentro de ciertos límites de concentración relativa de los iones involucrados. De otra manera, la interacción entre los mismos puede influenciar fuertemente la absorción y la distribución o función de algún nutrimento en la planta y, con ello, inducir deficiencias o toxicidades y, en consecuencia, modificar negativamente su crecimiento (Schwarz, 1995). En paralelo a lo anterior, el análisis de crecimiento es una aproximación cuantitativa para entender el crecimiento de una planta o de una población de plantas bajo condiciones ambientales naturales o controladas (Clavijo, 1989).

El análisis de crecimiento ha sido usado ampliamente para el estudio de los factores que influyen el desarrollo de la planta y el rendimiento, a través del seguimiento de la acumulación de materia seca durante el tiempo (Gardner *et al.*, 1985). El análisis de crecimiento ha sido practicado de dos maneras distintas, la primera denominada análisis clásico, contempla medidas hechas a intervalos relativamente largos de tiempo usando un gran número de plantas; la segunda denominada análisis funcional, comprende medidas a intervalos de tiempo más frecuentes con un pequeño número de plantas y usa el método de regresión (Hunt, 1978).

4.1.1.2. Nutrición en caña de azúcar

La caña de azúcar es un cultivo con altos requerimientos nutrimentales, por lo que se requiere de dosis de fertilizantes de macro y micronutrientes para cubrir su demanda. El ser una planta C4 con una extraordinaria capacidad de producción de biomasa que va desde los 65 t ha⁻¹ hasta un potencial genético de 805 t ha⁻¹ y entre un 20 a 35% de materia seca (Sentíes-Herrera *et al.*, 2014), implica una extracción y requerimientos nutrimentales muy altos, sobre todo de potasio y silicio, seguidos de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes (Velasco-Velasco, 2014).

4.2. Materiales y Métodos

4.2.1. Ubicación del experimento y condiciones experimentales

La presente investigación se realizó en condiciones de invernadero en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, cuyas coordenadas geográficas son 19° 28' 05" latitud norte y 98° 54' 09" longitud oeste, a una altitud de 2,220 m.

El periodo de duración del experimento fue de mayo a septiembre de 2016. El invernadero utilizado fue de tipo asimétrico con estructura de metal y cubierta de plástico, con malla anti-áfidos en las paredes laterales y cubierta Ground Cover blanca sobre la superficie del suelo.

Se usaron vitro plantas de caña de azúcar de la variedad CP 72-2086 provenientes de la Biofábrica Vitromotz. La plantación de las plántulas de caña de azúcar se realizó empleando como sustrato tezontle rojo (granulometría de 2 a 5 mm), en bolsas para vivero de 25 x 25 cm con fuelle. Antes del trasplante, el tezontle fue desinfectado con una solución de NaClO al 3%. Posteriormente se realizaron tres lavados con agua acidulada (pH 5.5).



Figura 1. Vitroplántula de caña de azúcar

Antes del trasplante, las plántulas, fueron lavadas a raíz desnuda, y se realizó una poda de formación (**Figura 1**). Después del trasplante, las plántulas fueron regadas nueve veces al día (7:00, 9:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00, 17:00 y 18:00 h) con las diferentes soluciones modificadas a partir de la solución universal Steiner (Steiner, 1984) que fueron evaluadas en esta investigación. El pH de las soluciones fue ajustado a 5.5 con H_2SO_4 concentrado. Las soluciones nutritivas fueron preparadas con fertilizantes de alta pureza.

4.2.2. Sistema de riego

Se tuvieron tres tanques con capacidad de 1,100 L, a los cuales se les instaló una bomba, tubería de conducción de la solución con retorno al tanque y filtro de malla, la salida para la conexión de una manguera de 16 mm. En la manguera de 16 mm se realizaron perforaciones para colocar goteros autocompensantes de $8 L h^{-1}$. A cada gotero se le colocó un distribuidor de cuatro salidas. En cada salida se colocó micro tubing y una estaca para ser fijados en la bolsa a un lado de la plántula. Las bombas utilizadas fueron de $\frac{1}{2}$ HP y salida de 1" y éstas fueron conectadas a un temporizador, para el programar los intervalos y tiempo de duración de cada riego.

4.2.3. Diseño de las soluciones nutritivas evaluadas

Se partió de la solución universal de Steiner (Steiner, 1984), para el diseño de las relaciones de macronutrientes, RM (**Cuadro 1**). La composición base fue la siguiente en $mol_c m^{-3}$: $12 NO_3^-$, $1 H_2PO_4^-$, $7 SO_4^{2-}$, $7 K^+$, $4 Mg^{2+}$ y $9 Ca^{2+}$, con un potencial osmótico es de -0.072 MPa. Se aumentó y se redujo en una misma proporción (25%) los $mol_c m^{-3}$ para los iones siguientes: NO_3^- , $H_2PO_4^-$, K^+ y Mg^{2+} . Las relaciones finales se muestran en el **Cuadro 1**. Como fuente de

micronutrientes, se utilizó el producto comercial Tradecorp AZ a razón de 0.066 g L⁻¹, equivalente en mg L⁻¹ a: 4.988 Fe; 2.328 Mn; 0.466 Zn; 0.186 Cu; 0.432 B; y 0.173 Mo. El potencial osmótico de las soluciones nutritivas se ajustó a -0.072 MPa, es decir, una conductividad eléctrica (CE) de 2 dS m⁻¹; las concentraciones después del ajuste se presentan en el **Cuadro 2**. El pH se ajustó entre 5.5 y 6 con H₂SO₄.

Cuadro 1. Relaciones macronutrientales evaluadas que se formularon a partir de la solución nutritiva universal Steiner.

	Aniones			Cationes		
	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Soluciones	mol _c m ⁻³					
Relación 1 (25% abajo=75%)	9.00	0.75	7.00	5.25	9.00	5.00
Solución universal Steiner (100%)	12.00	1.00	7.00	7.00	9.00	4.00
Relación 1 (25% arriba=125%)	15.00	1.25	7.00	8.75	9.00	3.00

Cuadro 2. Ajuste de las relaciones macronutrientales evaluadas que se formularon a partir de la solución nutritiva universal Steiner.

		Aniones			Cationes		
		NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Soluciones		mol _c m ⁻³					
Relación 1 (abajo=75%)	1	11.2	0.9	8.7	6.3	10.8	3.6
Solución universal Steiner (100%)		12.00	1.00	7.00	7.00	9.00	4.00
Relación 2 (25% arriba=125%)		12.6	1	5.9	7.5	7.7	4.3

4.2.4. Diseño experimental

El diseño experimental fue completamente al azar, con cuatro repeticiones. La unidad experimental consistió en una vitroplántula en una bolsa de 35 x 35 cm, llenadas con sustrato tezontle de 2 a 5 mm de granulometría.

4.2.5. Variables evaluadas

4.2.5.1. Variables agronómicas, fisiológicas y nutritivas

Las evaluaciones se realizaron a los 30, 60 y 90 d después de iniciado los tratamientos. Durante el desarrollo del cultivo se cuantificaron las variables agronómicas siguientes: número total de tallos, número de hijos, altura de planta (de la base a la hoja más larga), diámetro de tallo (al centro del tallo), altura de tallo (de la base al último collar visible), número de hojas desarrolladas y en desarrollo, pesos frescos de raíz, tallos, vainas y hojas; peso seco de raíz, tallos, vainas y hojas. Para algunas variables se tomaron por tipo de tallo, para lo cual se consideraron tres tipos de emisión, primera, segunda y tercera. Lo anterior significa, que se identificaron aquellos tallos que emergieron al inicio del periodo de evaluación, a mitad del periodo y al final de este. Cada periodo de valuación fue de 30 días.

La concentración de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B por órgano (hojas, tallos y raíz), siguiendo la metodología propuesta por Alcántar-González y Sandoval-Villa (1999).

El índice de área foliar se evaluó a los 30, 60 y 90 d después de iniciado los tratamientos. Se realizaron mediciones destructivas y el área foliar se midió con un integrador LI-COR LI3100C. Así mismo, las lecturas SPAD se evaluaron en la última hoja con el collar visible a la mitad de la lámina foliar utilizando un medidor Minolta SPAD 502.

4.2.6. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos consistió en un análisis de varianza y prueba de comparación de medias (Tukey, $P \leq 0.05$) efectuados con el programa estadístico Statistical Analysis System SAS versión 9.0 (SAS Institute, 1990).

4.3. Resultados

4.3.1. Caracterización inicial de las vitroplántulas de caña de azúcar variedad CP 72-2086

En el **Cuadro 3** se presentan las principales características de las plántulas de caña de azúcar al inicio del experimento. Algunas de las variables aquí presentadas requirieron muestreos destructivos.

Cuadro 3. Caracterización inicial de las vitroplántulas de caña de azúcar variedad CP 72-2086.

Variables	Relaciones macronutrimientales (%)		
	75	100	125
Altura de planta (cm)	31.4 ± 1.05	33.5 ± 2.00	33.1 ± 1.27
Diámetro del tallo (mm)	4.7 ± 0.16	4.7 ± 0.19	4.9 ± 0.24
Altura del tallo al último collar visible (cm)	10.8 ± 0.52	11.8 ± 0.53	12.8 ± 0.32
Hojas desarrolladas (#)	3.7 ± 0.29	4.0 ± 0.00	3.0 ± 0.00
Hojas en desarrollo (#)	2.0 ± 0.00	2.3 ± 0.29	2.3 ± 0.29
Peso fresco de raíz (g)	1.7 ± 0.19	1.8 ± 0.18	1.7 ± 0.12
Peso fresco del tallo (g)	1.8 ± 0.13	2.0 ± 0.12	2.1 ± 0.18
Peso fresco de hojas (g)	1.0 ± 0.06	1.2 ± 0.08	1.0 ± 0.08
Peso seco de raíz (g)	0.3 ± 0.03	0.3 ± 0.04	0.3 ± 0.01
Peso seco del tallo (g)	0.3 ± 0.02	0.3 ± 0.03	0.3 ± 0.02
Peso seco de hojas (g)	0.2 ± 0.03	0.2 ± 0.01	0.2 ± 0.06
Área foliar (cm ²)	23.2 ± 0.81	24.2 ± 1.68	22.1 ± 2.44
Lecturas SPAD	26.2 ± 2.04	22.1 ± 4.96	24.0 ± 3.05

4.3.2. Primera evaluación: 30 días después del inicio de tratamientos

4.3.2.1. Número total de tallos

El número de tallos se incrementó a 15 en promedio para los primeros 30 días de tratamiento, la suma de tallos emergidos más el inicial hacen un promedio de 16 tallos totales en plantas de las tres relaciones macronutrimientales evaluadas; por tanto, no se observaron valores distintos desde el punto de vista estadístico (**Figura 2**).

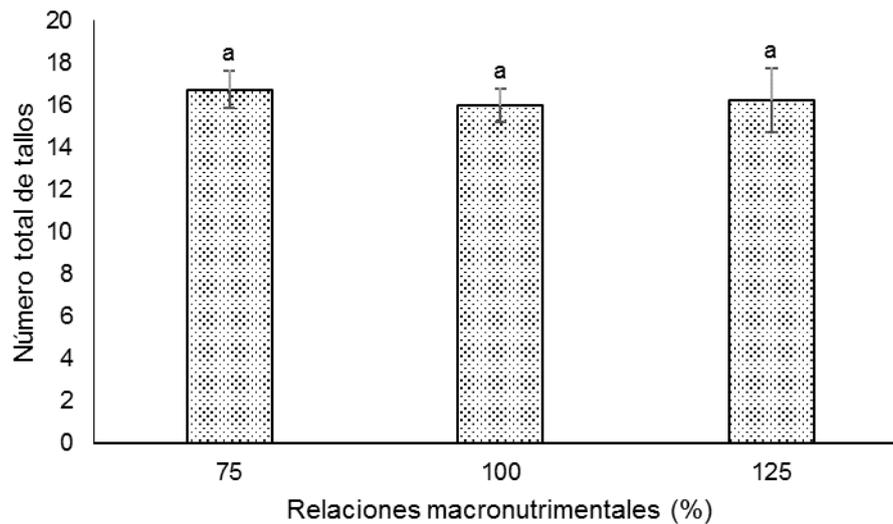


Figura 2. Número total de tallos después de 30 ddt con las distintas relaciones macronutrientales. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.2. Número de hijos

La cantidad de hijos inducidos en el rizoma que no salieron a la superficie del suelo no mostró valores estadísticamente distintos entre las RM. Sin embargo, se observó una tendencia a un mayor número de hijos inducidos por una concentración baja de la RM (75%), con un total de 10 hijos en promedio (**Figura 3**).

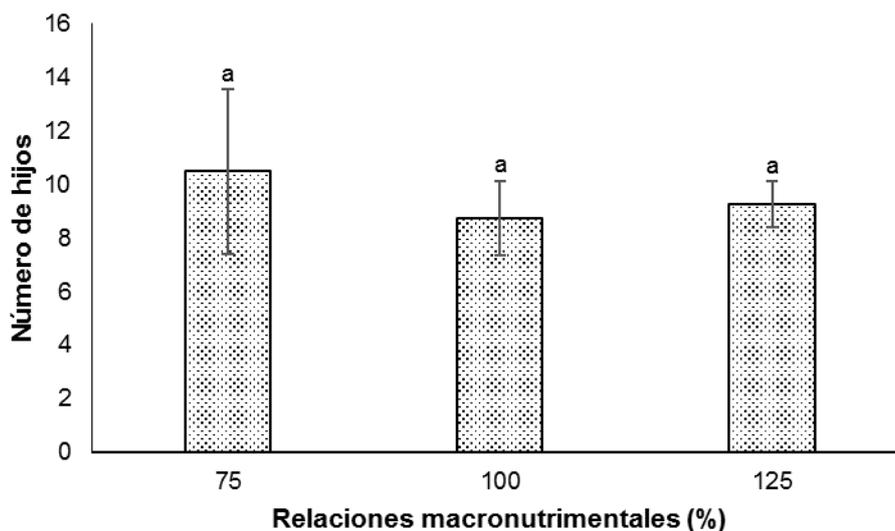


Figura 3. Inducción de hijos (brotes del rizoma sin que salieran a la superficie del suelo) por efecto de las relaciones macronutrientales durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.3. Altura de planta

La altura de planta a los 30 días de tratamiento se midió en los tallos de para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos más no por efecto de las RM (**Figura 4**). La altura promedio de los tallos de 1ra emisión fue de los 70 cm, la de los tallos de 2da emisión alcanzaron valores promedios de 47 cm y finalmente los de 3ra emisión mostraron una altura de 20 cm.

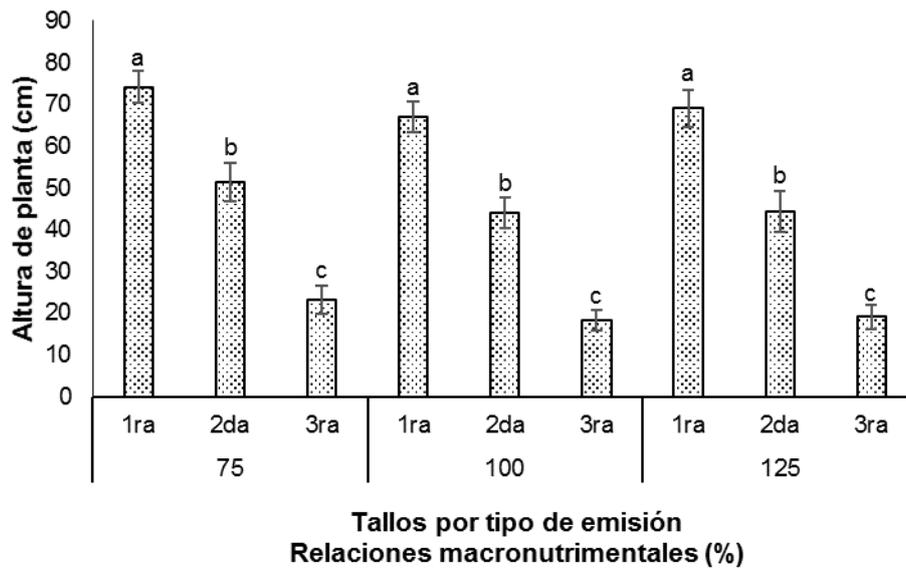


Figura 4. Altura de planta por efecto de las relaciones macronutrimenales (RM) durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.4. Diámetro del tallo

El diámetro del tallo a los 30 días de tratamiento se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos más no por efecto de las RM (**Figura 5**). El diámetro promedio para los tallos de 1ra emisión fue de 8 mm, los tallos de 2da emisión alcanzaron valores promedios de 6 mm y finalmente los tallos de 3ra emisión mostraron un diámetro medio de 4 mm.

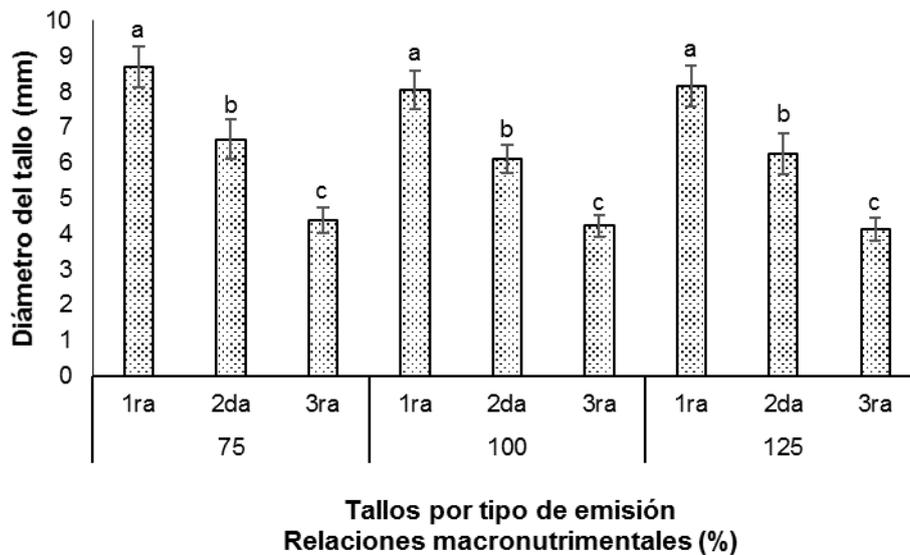


Figura 5. Diámetro del tallo por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.5. Altura de tallo al último collar visible

La altura del tallo al último collar visible a los 30 ddt se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y entre las RM evaluadas (**Figura 6**). La altura de los tallos de 1ra emisión mostró diferencias significativas entre las RM. Plantas tratadas con la RM 75% fueron significativamente más altas que el resto. Los tallos de 2da y 3ra emisión alcanzaron valores promedios de 9 y 7 cm respectivamente, sin mostrar diferencia estadística significativa entre RM.

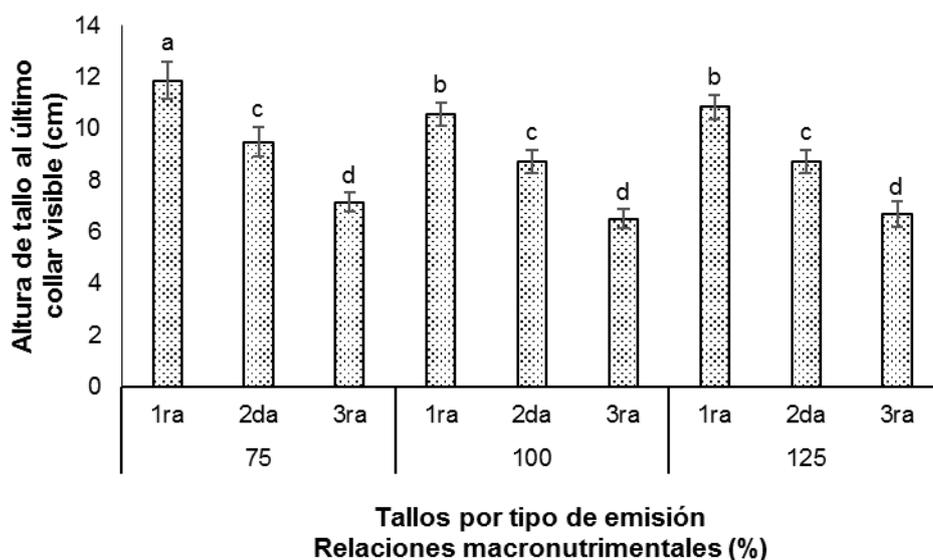


Figura 6. Altura del tallo al último collar visible por efecto de las relaciones macronutrimenales durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.6. Hojas desarrolladas

Las hojas desarrolladas a los 30 días de tratamiento se midieron en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos más no por efecto de las RM (**Figura 7**). Las hojas desarrolladas promedio para los tallos de 1ra emisión fueron de 5, para los tallos de 2da emisión alcanzaron valores de 3 y finalmente los tallos de 3ra emisión mostraron 2 hojas desarrolladas.

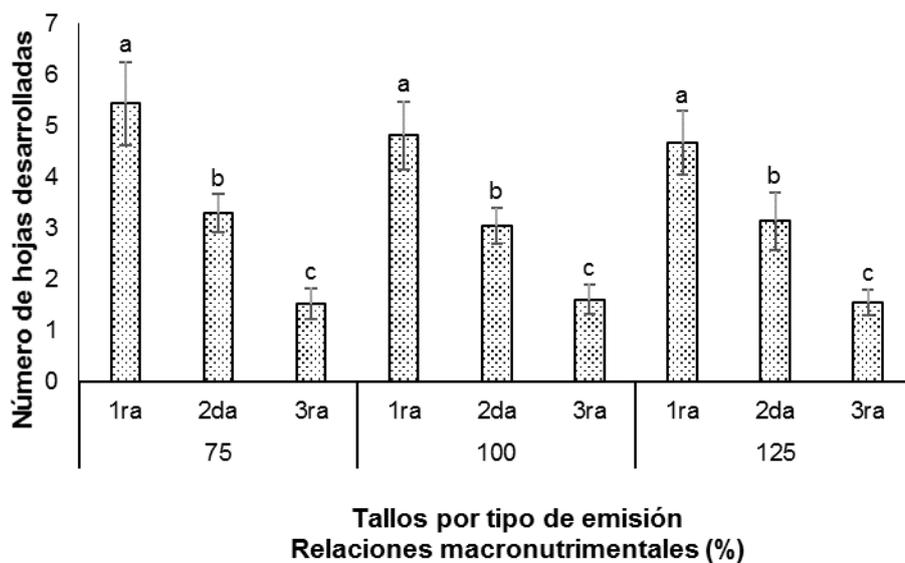


Figura 7. Hojas desarrolladas por efecto de las relaciones macronutrientales durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.7. Hojas en desarrollo

Las hojas en desarrollo a los 30 días de tratamiento se midieron en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos más no por efecto de las RM (**Figura 8**). Las hojas en desarrollo promedio para los tallos de 1ra y 2da emisión fueron de 2, y para los tallos de 3ra emisión mostraron 1.5 hojas desarrolladas.

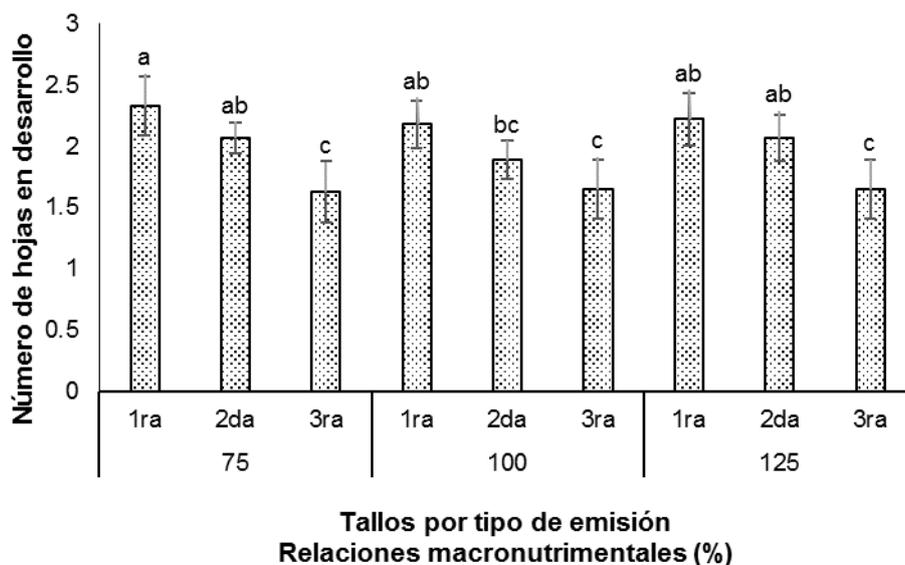


Figura 8. Hojas en desarrollo por efecto de las relaciones macronutrientales durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.8. Peso fresco de raíz

El peso fresco de la raíz no mostró diferencias significativas entre RM. Sin embargo, en la **Figura 9**, se muestra una tendencia en forma de U que indica que, a una baja y alta concentración de nutrimentos en la solución nutritiva se ve favorecida esta variable, caso contrario con la concentración media que esta reduce el peso fresco de raíz.

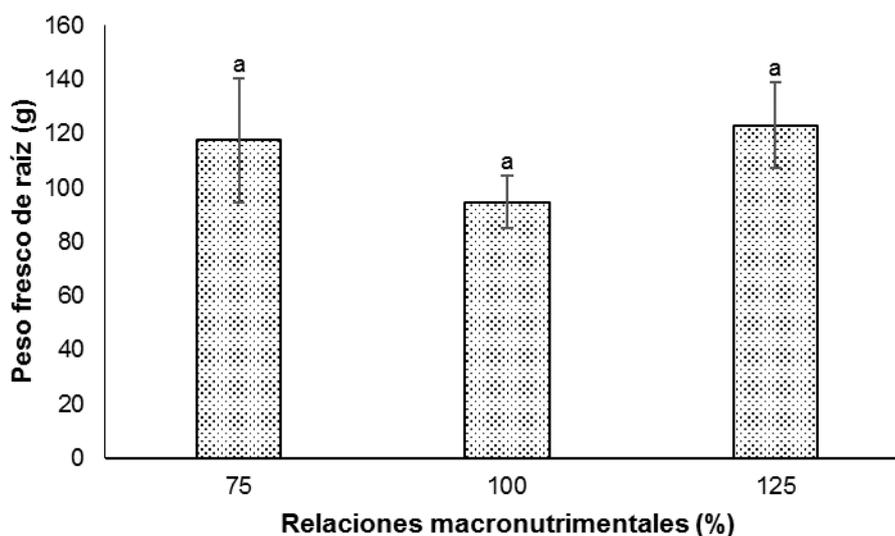


Figura 9. Peso fresco de raíz por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.9. Peso fresco del tallo

El peso fresco del tallo a los 30 días de tratamiento se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 10**). La RM 75% incremento el peso fresco del tallo de manera significativa con respecto a las RM restante que estadísticamente fueron iguales entre ellas. El peso fresco para los tallos de 2da y 3ra emisión fueron estadísticamente iguales entre ellos tanto por tipo de tallo como por RM, con valores promedios de 2.6 y 1.1 g, respectivamente.

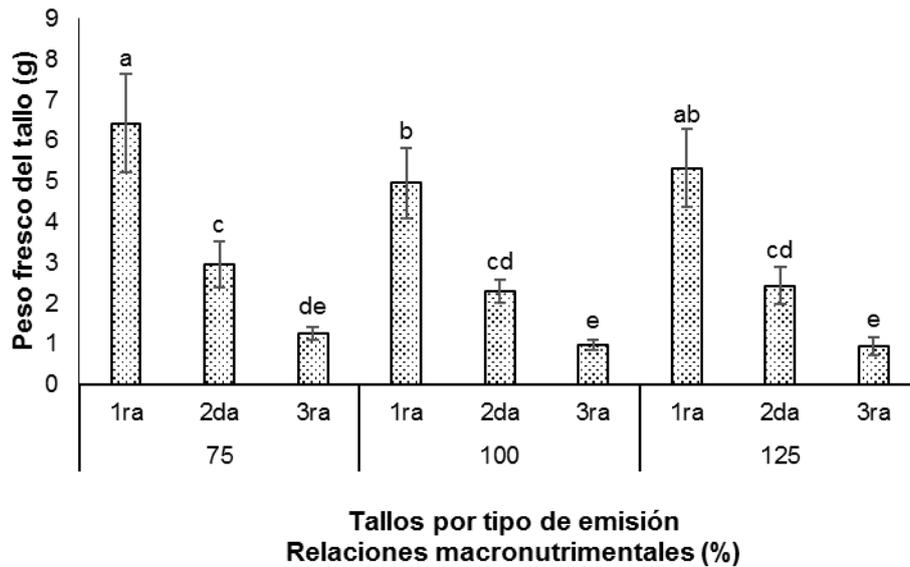


Figura 10. Peso fresco del tallo por efecto de las relaciones macronutrientales durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.10. Peso fresco de hojas

El peso fresco de hojas a los 30 días de tratamiento se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 11**). La RM 75% incremento el peso fresco de hojas de manera significativa con respecto a las RM restante que estadísticamente fueron iguales entre ellas. El peso fresco para los tallos de 2da y 3ra emisión fueron estadísticamente iguales entre ellos tanto por tipo de tallo como por RM, con valores promedios de 2.8 y 0.5 g, respectivamente.

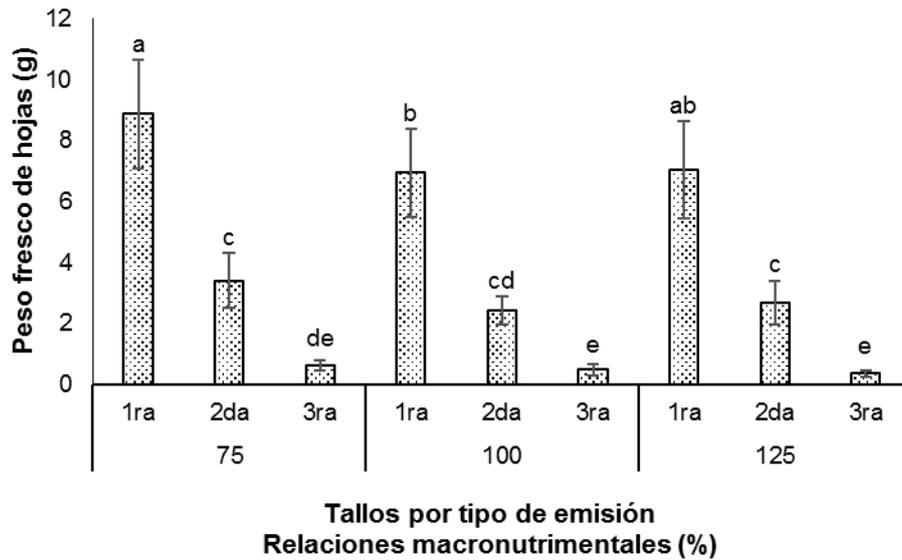


Figura 11. Peso fresco de hojas por efecto de las relaciones macronutrientales durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.11. Peso seco de raíz

El seco de la raíz no mostró diferencias significativas entre RM. Sin embargo, en la **Figura 8**, se muestra una tendencia en forma de u que indica que, a una baja y alta concentración de nutrientes en la solución nutritiva se ve favorecida esta variable, caso contrario con la concentración media que esta reduce la biomasa seca como sucedió en la variable de peso fresco de la raíz (**Figura 12**).

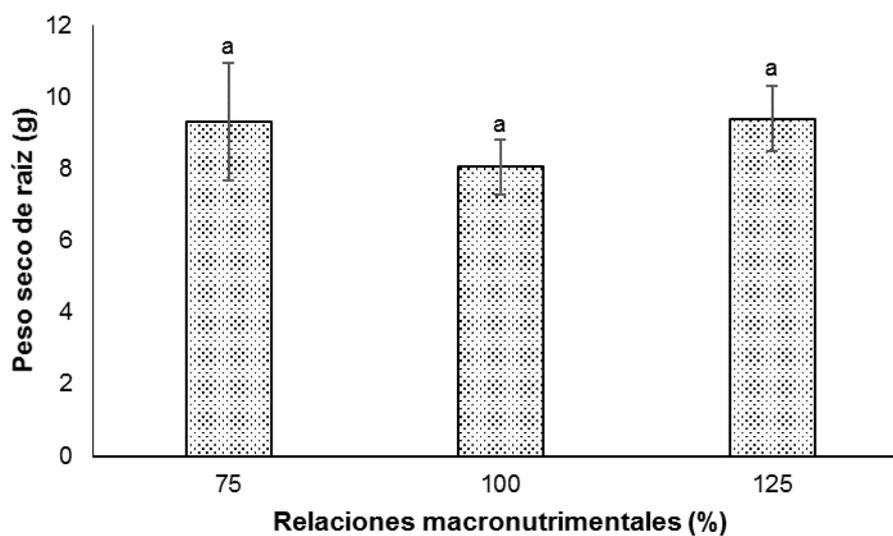


Figura 12. Peso seco de raíz por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.12. Peso seco del tallo

El peso seco del tallo a los 30 días de tratamiento se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable no mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 13**).

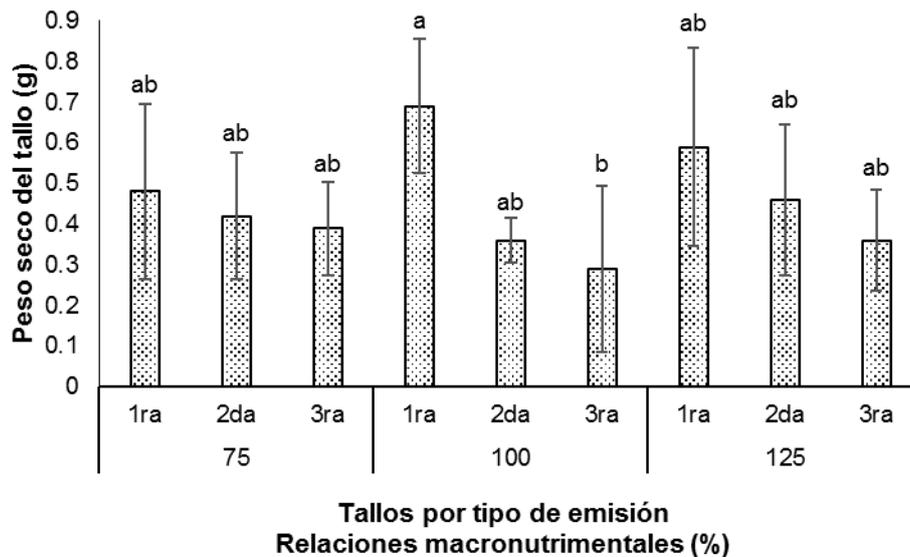


Figura 13. Peso seco del tallo por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.13. Peso seco de hojas

El peso seco de hojas a los 30 días de tratamiento se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable no mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 14**).

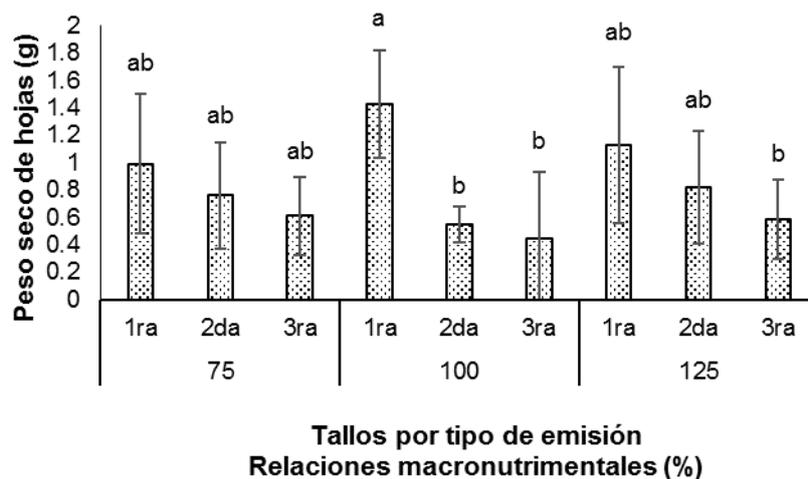


Figura 14. Peso seco de hojas por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.14. Área foliar

El área foliar a los 30 días de tratamiento se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable no mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 15**).

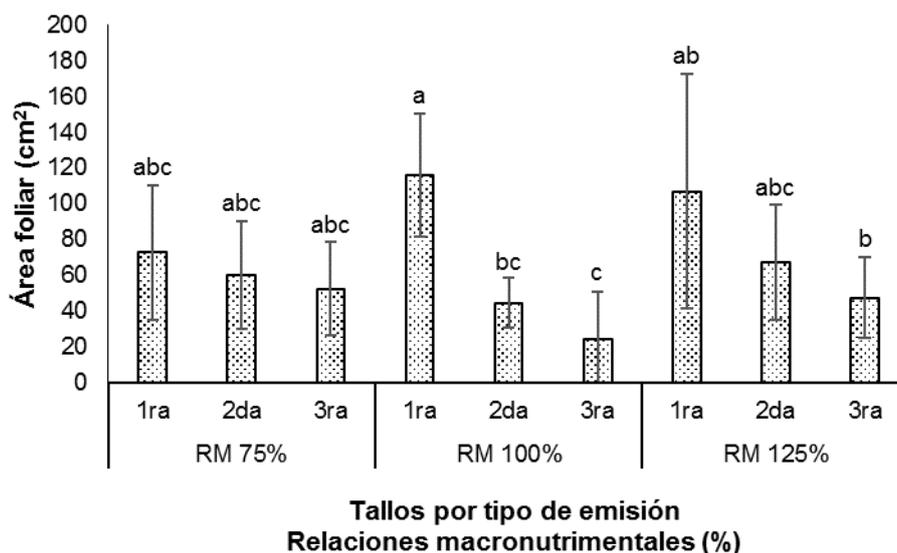


Figura 15. Área foliar por efecto de las relaciones macronutrientales durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.2.15. Lecturas SPAD

Las lecturas SPAD no mostraron diferencias significativas entre RM. Sin embargo, en la **Figura 16**, se muestra una tendencia en forma de u que indica que, a una baja y alta concentración de nutrimentos en la solución nutritiva se ve favorecida esta variable, caso contrario con la concentración media que esta reduce las lecturas SPAD.

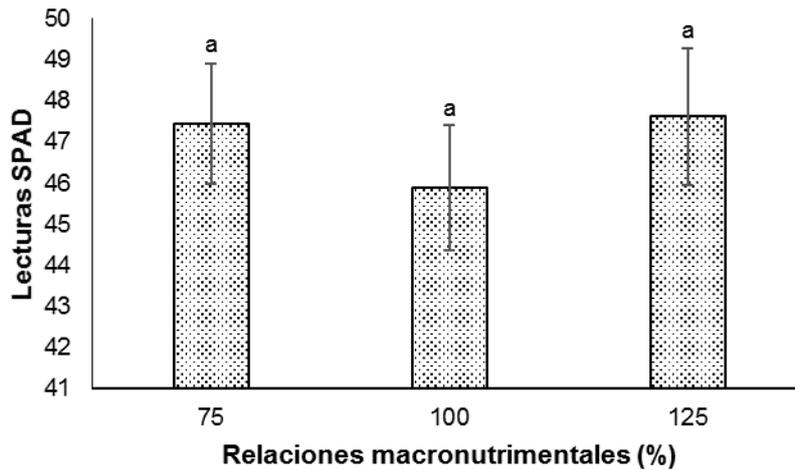


Figura 16. Lecturas SPAD por efecto de las relaciones macronutrientales durante 30 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3. Segunda evaluación: 60 días después del inicio de tratamientos

4.3.3.1. Número total de tallos

La población de tallos se incrementó en promedio entre 24 y 26 después de 60 ddt, sin mostrar valores estadísticamente diferentes por efectos de las RM (**Figura 17**).

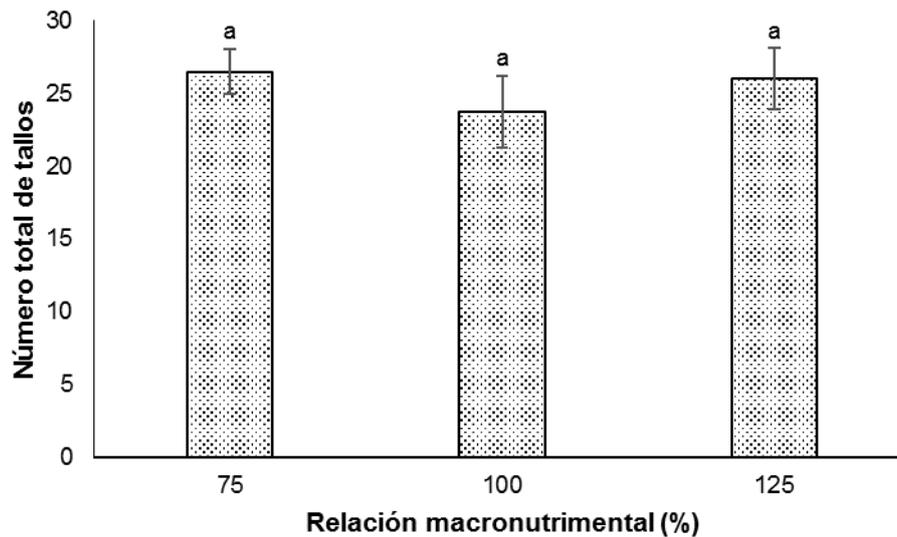


Figura 17. Población de tallos por efecto de las relaciones macronutrientales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.2. Número de hijos

La cantidad de hijos inducidos en el rizoma que no salieron a la superficie del suelo no fue diferente entre las RM, sin embargo, se observó mayor número de hijos inducidos por una alta RM (125%), con un total de 9 hijos en promedio (**Figura 18**).

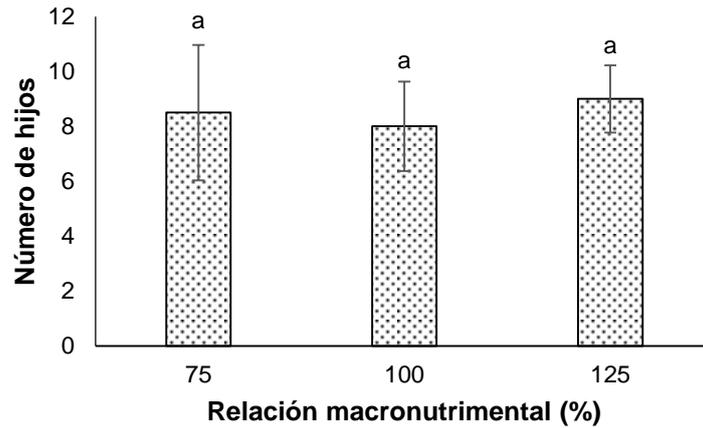


Figura 18. Inducción de hijos (brotes del rizoma sin que salieran a la superficie del suelo) por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.3. Altura de planta

La altura de planta a los 60 ddt se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 19**). La altura máxima para los tallos de 1ra emisión se encontró con la RM 100%, y las alturas para las otras dos RM, fueron muy similares y no fueron diferentes desde el punto de vista estadístico. Esta misma tendencia se observó para la altura de los tallos de 2da emisión, con la RM 100% se mostró la altura significativamente mayor respecto a las RM 75 y 125%. Asimismo, la altura de los tallos de 3ra emisión, con la RM 100% tuvo mayor altura que las dos RM restantes.

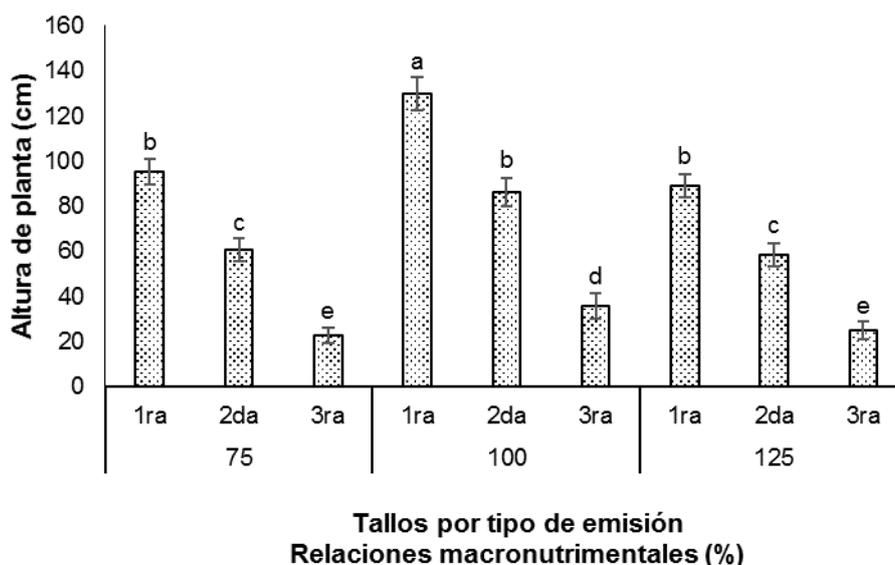


Figura 19. Altura de planta por efecto de las relaciones macronutrientales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.4. Diámetro del tallo

El diámetro del tallo a los 60 días de tratamiento se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 20**). El mayor diámetro del tallo para los tallos de 1ra emisión se registró con la RM 100%, respecto a las dos RM restantes. Esta tendencia se observó también en el diámetro de los tallos de 2da y 3ra emisión; es decir, con la RM 100% se incrementó de manera significativa esta variable.

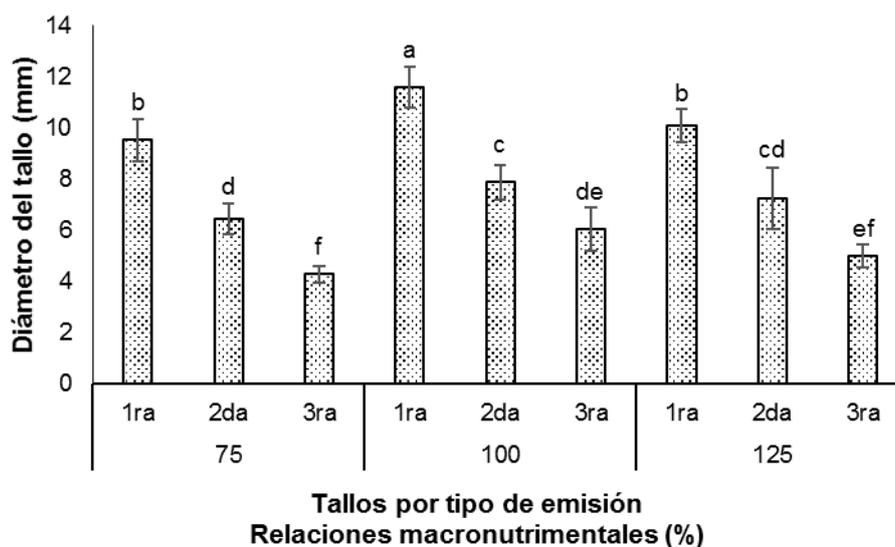


Figura 20. Diámetro del tallo por efecto de las relaciones macronutrimenales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.5. Altura del tallo al último collar visible

La altura del tallo al último collar visible a los 60 ddt se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 21**). La altura de los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión mostró diferencias significativas entre las RM. La RM 100% mostró el valor más alto respecto a las otras dos RM (75 y 125%).

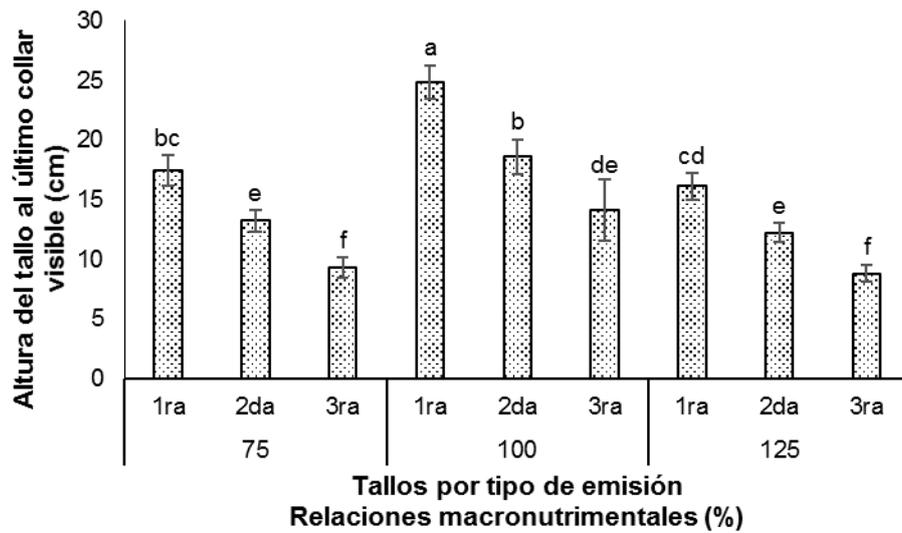


Figura 21. Altura del tallo al último collar visible por efecto de las relaciones macronutrientales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.6. Hojas desarrolladas

Las hojas desarrolladas a los 60 días de tratamiento se midieron en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas solo entre tipos de tallos más no por efecto de las RM (**Figura 22**).

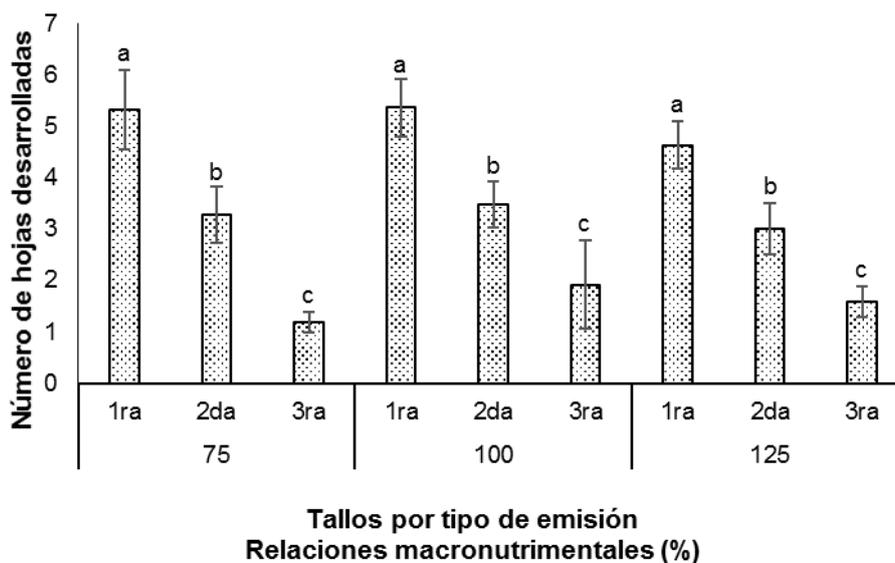


Figura 22. Hojas desarrolladas por efecto de las relaciones macronutrimenales (RM) durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.7. Hojas en desarrollo

El número de hojas en desarrollo a los 60 ddt se midieron en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, los valores de esta variable no mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos ni por las RM (**Figura 23**). El número de hojas en desarrollo promedio para los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión fue de 2.

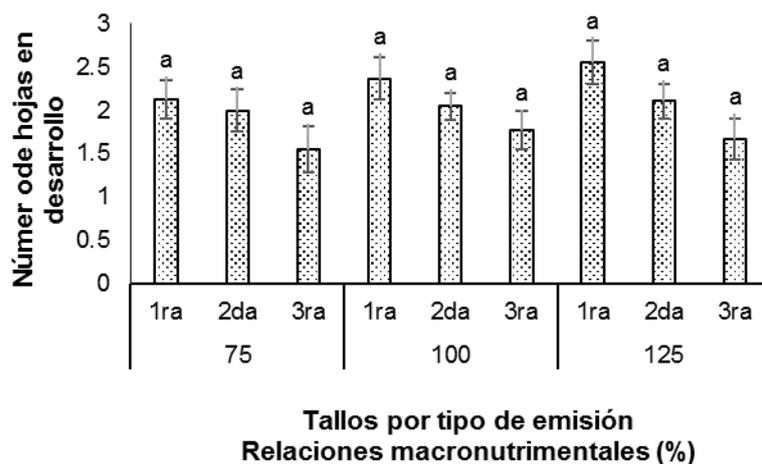


Figura 23. Hojas en desarrollo por efecto de las relaciones macronutrimenales 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.8. Peso fresco de raíz

El peso fresco de la raíz no mostró diferencias significativas entre RM. Sin embargo, en la **Figura 24**, se muestra una tendencia en forma de U que indica que, a una baja y alta concentración de nutrientes en la solución nutritiva se ve favorecida esta variable.

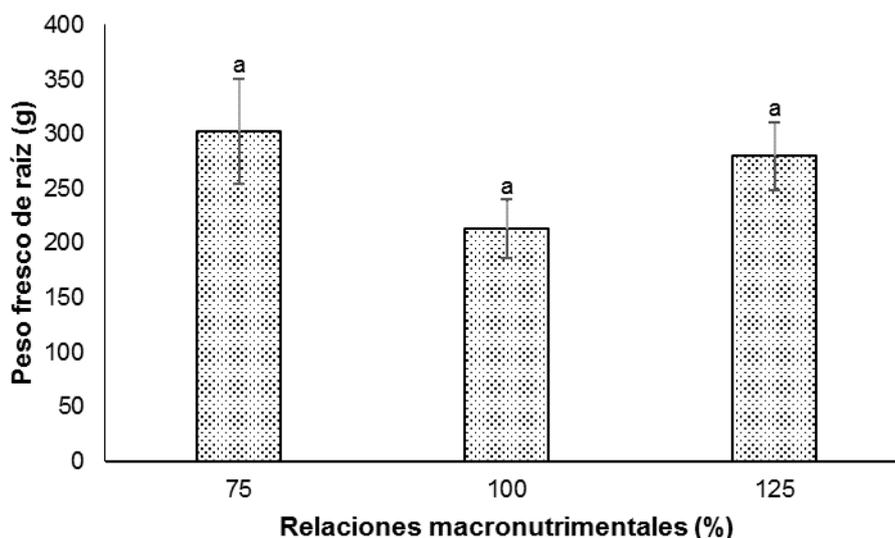


Figura 24. Peso fresco de raíz por efecto de las relaciones macronutrimenales (RM) durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.9. Peso fresco del tallo

El peso fresco del tallo a los 60 ddt se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 25**). El peso fresco del tallo de 1ra emisión fue estadísticamente superior en plantas tratadas con la RM 100%. Para los tallos de 2da emisión, con la RM 100% se tuvieron los valores más altos respecto a las otras dos RM (75 y 125%) que fueron inferiores pero iguales entre ellas estadísticamente. En los tallos de 3ra emisión; se tuvo el mayor peso fresco del tallo con las RM 100% y 125%, respecto a la RM 75%.

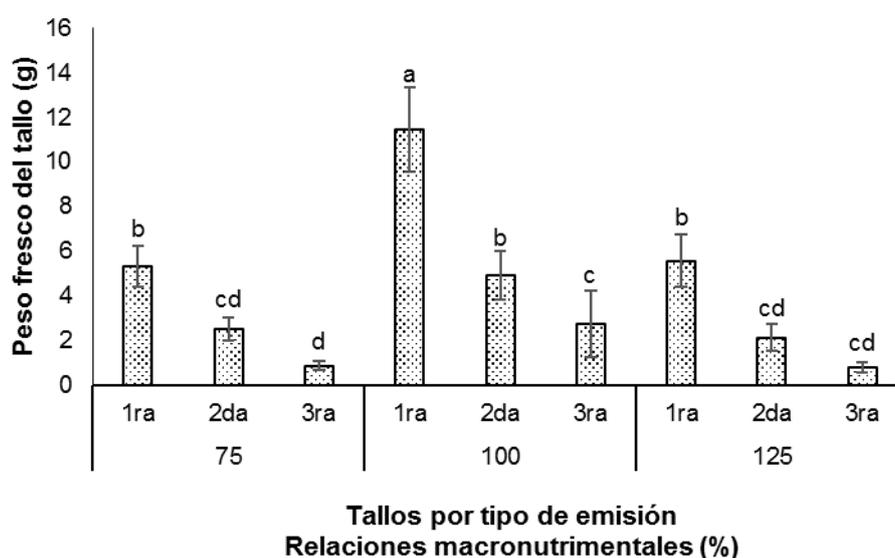


Figura 25. Peso fresco del tallo por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.10. Peso fresco de vaina

El peso fresco de vainas a los 60 ddt mostró diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 26**). El peso fresco de vainas en tallos de 1ra emisión mostró diferencias significativas para las RM. La RM 100% mostró el valor más alto respecto a las otras dos RM (75 y 125%) que fueron inferiores pero iguales entre ellas estadísticamente. Para los tallos de 2da y 3ra emisión no hubo diferencias en el peso de la vaina entre las RM evaluadas.

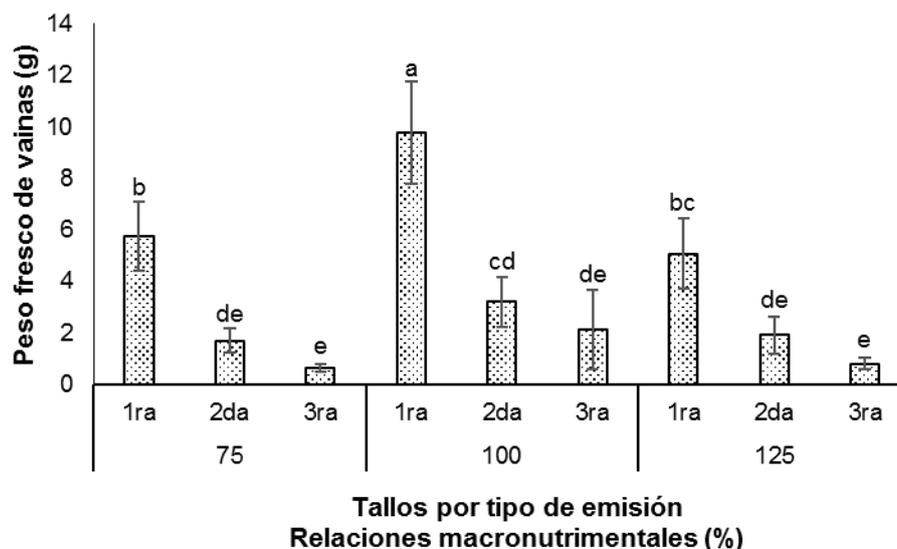


Figura 26. Peso fresco de vainas por efecto de las relaciones macronutrientales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.11. Peso fresco de hojas

El peso fresco de hojas a los 60 ddt solo mostró diferencias estadísticas significativas atribuibles a las RM en los tallos de primera emisión; observándose la media más alta con la RM 100% en comparación con las otras RM evaluadas (**Figura 27**). El peso fresco para los tallos de 2da y 3ra emisión mostraron valores medios de 4.9 y 1.4 g, respectivamente, en todas las RM.

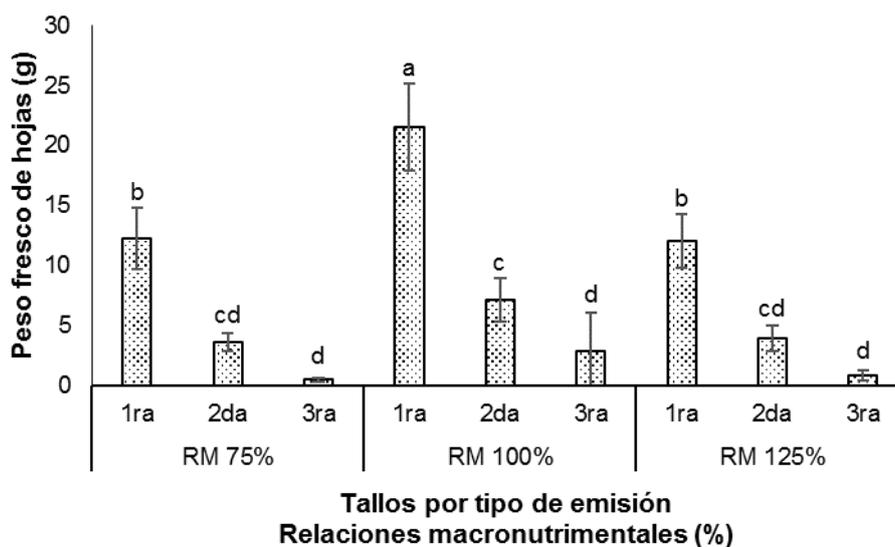


Figura 27. Peso fresco de hojas por efecto de las relaciones macronutrientales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.12. Peso seco de raíz

El peso seco de la raíz no mostró diferencias significativas entre RM. Sin embargo, en la **Figura 28**, se muestra una tendencia en forma de J que indica que, a una baja y alta concentración de nutrientes en la solución nutritiva se ve favorecida esta variable, caso contrario con la concentración media que reduce la biomasa seca como sucedió en la variable de peso fresco de la raíz (**Figura 24**).

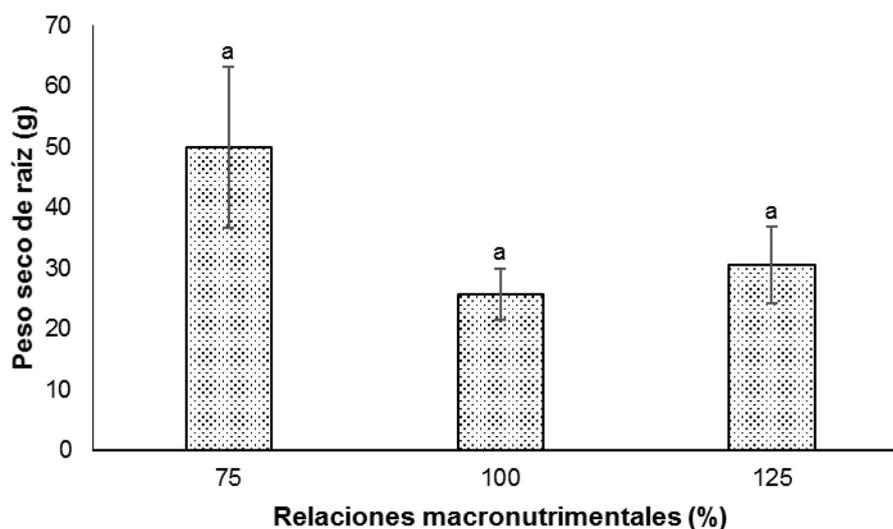


Figura 28. Peso seco de raíz por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.13. Peso seco del tallo

El peso seco del tallo a los 60 ddt se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 29**). La RM 100% incrementó significativamente el peso seco de tallos con respecto a las RM restantes. El peso seco para los tallos de 2da emisión fue superior con la RM 100%, con diferencias estadísticas respecto a las restantes RM evaluadas. El peso seco para los tallos de 3ra emisión mostró la misma tendencia que los de 2da emisión, al incrementarse con la RM 100%, respecto a las restante RM.

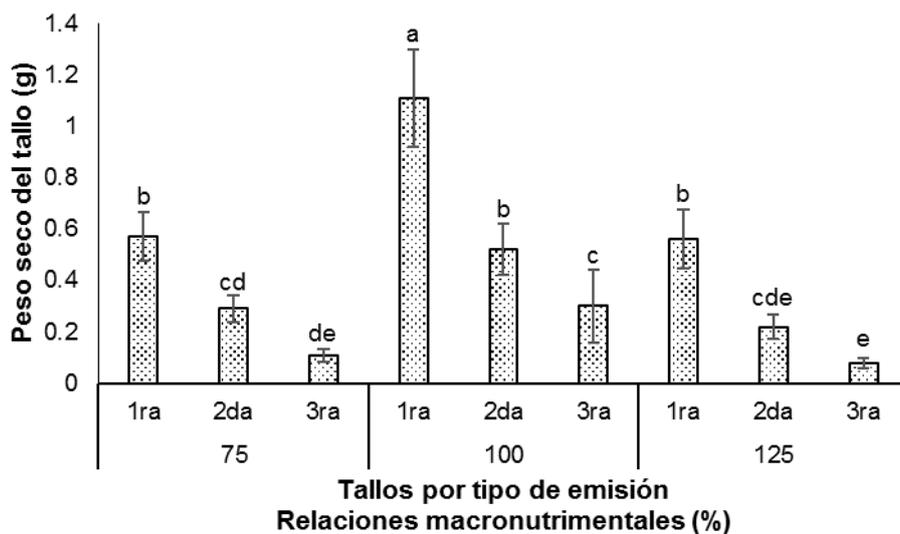


Figura 29. Peso seco del tallo por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.14. Peso seco de vaina

El peso seco de la vaina a los 60 ddt mostró diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 30**). La RM 100% incrementó el peso seco de vainas de manera significativa con respecto a las RM restantes que se evaluaron. Los tallos de 2da y 3ra emisión no fueron estadísticamente diferentes entre RM.

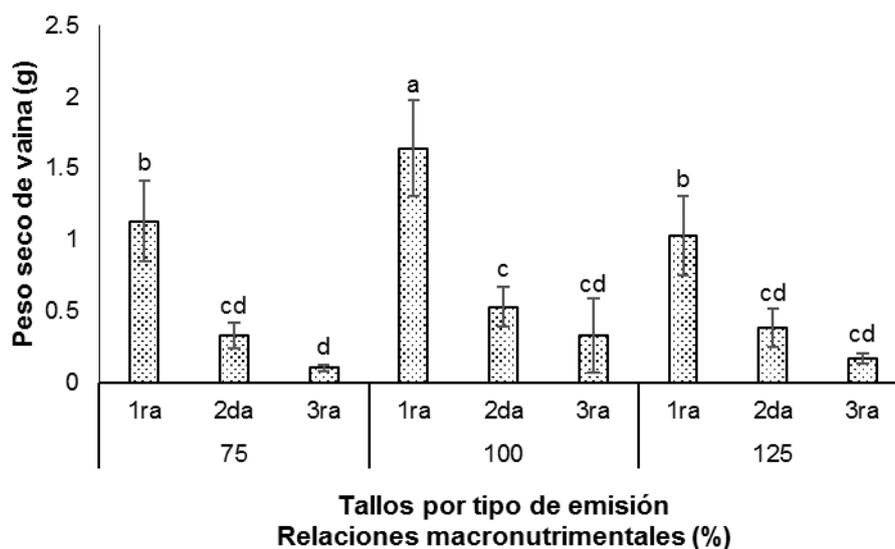


Figura 30. Peso seco vainas por efecto de las relaciones macronutrimenales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.15. Peso seco de hojas

El peso seco de hojas a los 60 ddt solo mostró diferencias entre RM en los tallos de 1ra emisión (**Figura 31**). La RM 100% incrementó el peso seco de hojas en los tallos de 1ra emisión de manera significativa con respecto a las RM restantes.

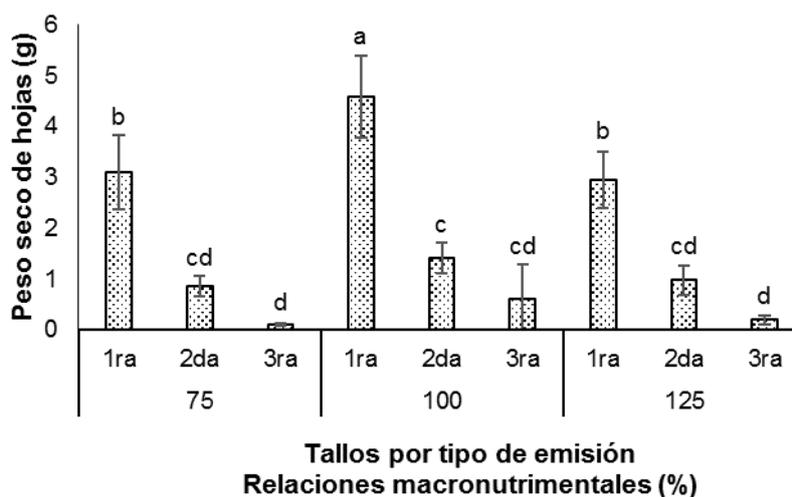


Figura 31. Peso seco de hojas por efecto de las relaciones macronutrimenales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.16. Área foliar

El área foliar a los 60 ddt se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas solo en los de 1ra emisión por efecto de las RM (**Figura 32**). La RM 100% incrementó el área foliar en los tallos de 1ra emisión de manera significativa, con respecto a las RM restantes que estadísticamente fueron iguales entre ellas.

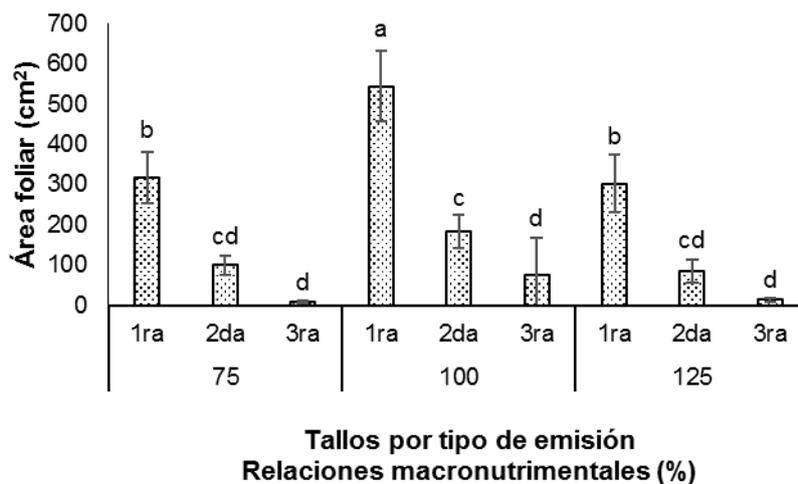


Figura 32. Área foliar por efecto de las relaciones macronutrientales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.3.17. Lecturas SPAD

Las lecturas SPAD mostraron diferencias significativas entre RM. En la **Figura 33**, se muestra una tendencia en forma de U que indica que, a una baja y alta concentración de nutrientes en la solución nutritiva incrementa el valor de esta variable.

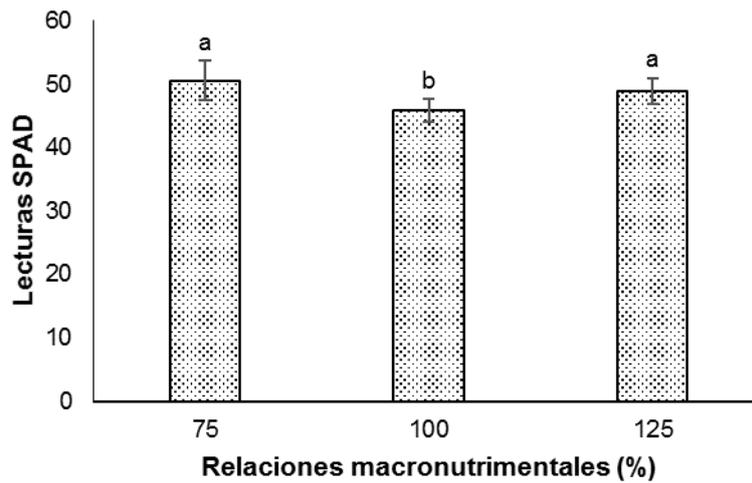


Figura 33. Lecturas SPAD por efecto de las relaciones macronutrientales durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4. Tercera evaluación: 90 días después de iniciados los tratamientos

4.3.4.1. Número total de tallos

Después de 90 ddt, el número total de tallos no mostró efectos significativos atribuibles a las RM evaluadas (**Figura 34**).

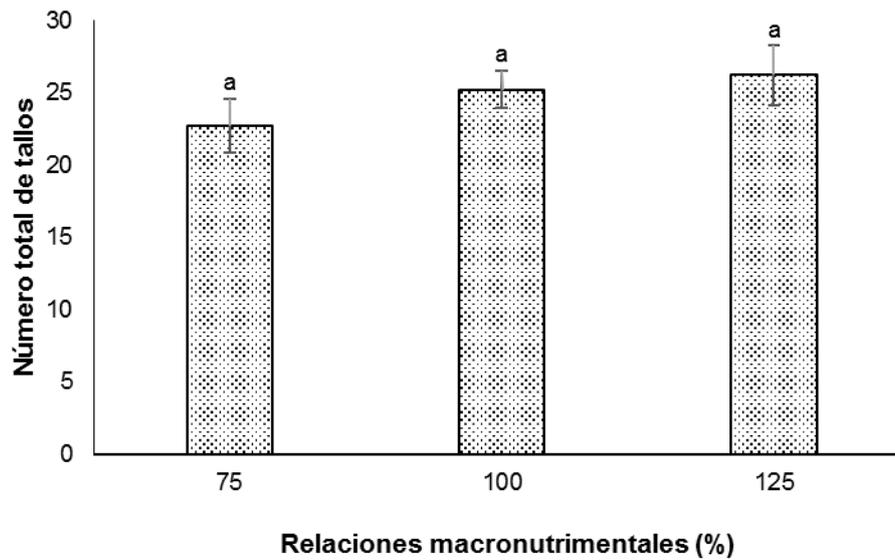


Figura 34. Población de tallos por efecto de las relaciones macronutrientales durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.2. Número de hijos

La cantidad de hijos inducidos en el rizoma que no salieron a la superficie del suelo no mostró diferencias estadísticas en función de las RM; sin embargo, se observó una tendencia a una disminución en el número de hijos inducidos en función de la concentración de la RM (**Figura 35**).

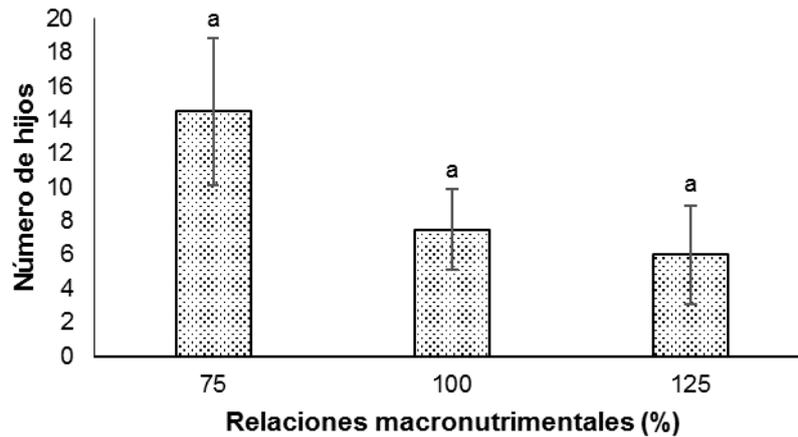


Figura 35. Inducción de hijos (brotes del rizoma sin que salieran a la superficie del suelo) por efecto de las relaciones macronutrientales durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.3. Altura de planta

La altura de planta a los 90 ddt se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable no mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos, pero sí por efecto de las RM (**Figura 36**). Los tallos de 1ra emisión tuvieron mayor altura con la RM 125% en comparación con la RM 75. La altura en tallos de 2da y 3ra emisión no fue diferente entre las RM evaluadas.

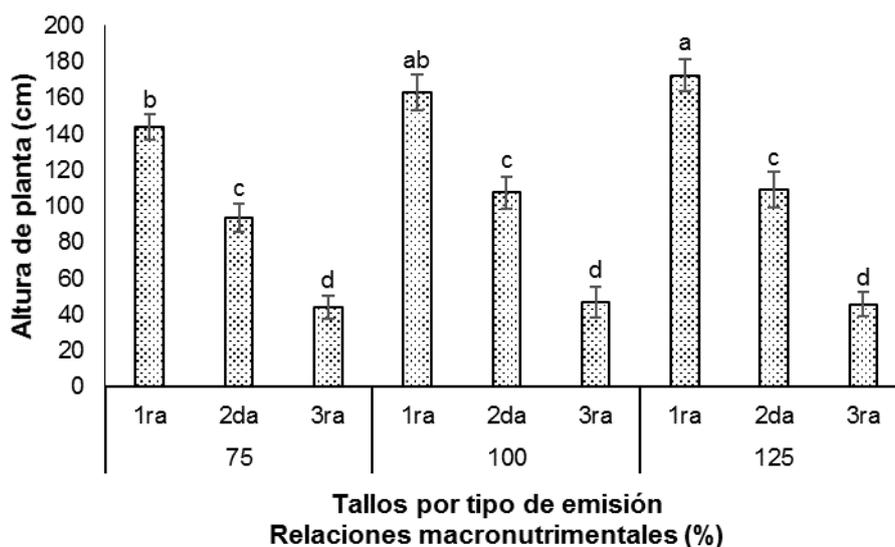


Figura 36. Altura de planta por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.4. Diámetro del tallo

Las RM evaluadas no tuvieron influencia significativa en el diámetro de tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión como se observa en la **Figura 37**. De manera lógica, el mayor diámetro se tuvo en tallos de 1ra emisión.

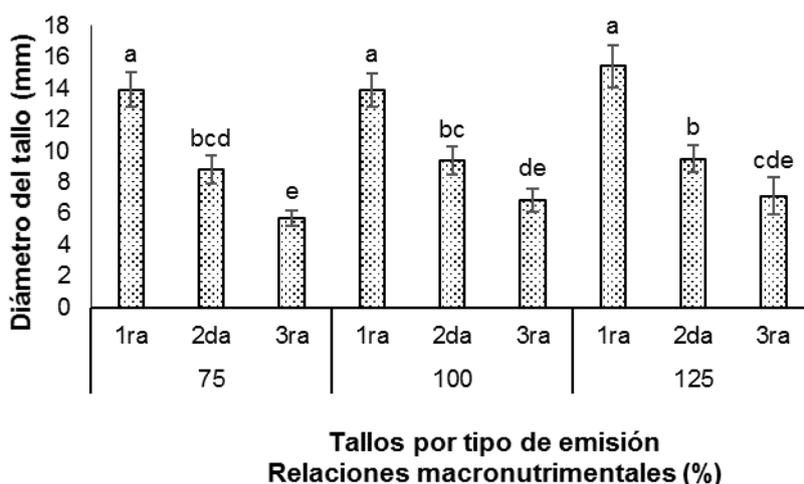


Figura 37. Diámetro del tallo por efecto de las relaciones macronutrientales durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.5. Altura del tallo al último collar visible

La altura del tallo al último collar visible a los 90 ddt fue incrementada de manera significativa solo en tallos de 1ra emisión tratados con la RM 125%, respecto a la RM 75% (**Figura 38**). En lo que refiere a las plantas incluidas en los tallos de la 2da y 3ra emisión, se observó una tendencia de incremento en la altura conforme la RM incrementa.

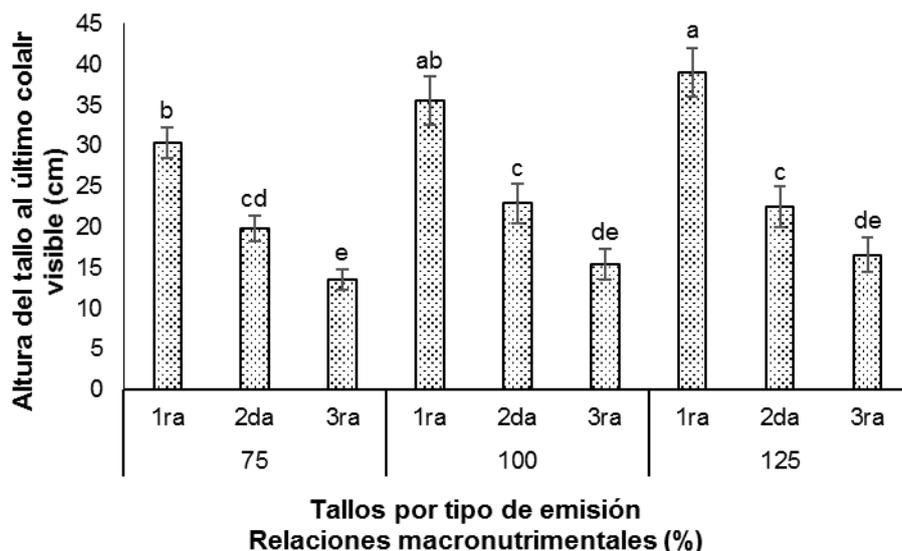


Figura 38. Altura del tallo al último collar visible por efecto de las relaciones macronutrimenales durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.6. Hojas desarrolladas

El número de hojas desarrolladas a los 90 ddt no mostraron diferencias significativas entre RM (**Figura 39**). Las hojas desarrolladas promedio para los tallos de 1ra emisión fueron de 5, los tallos de 2da emisión alcanzaron valores de 3 y finalmente los de 3ra emisión mostraron 2 hojas desarrolladas.

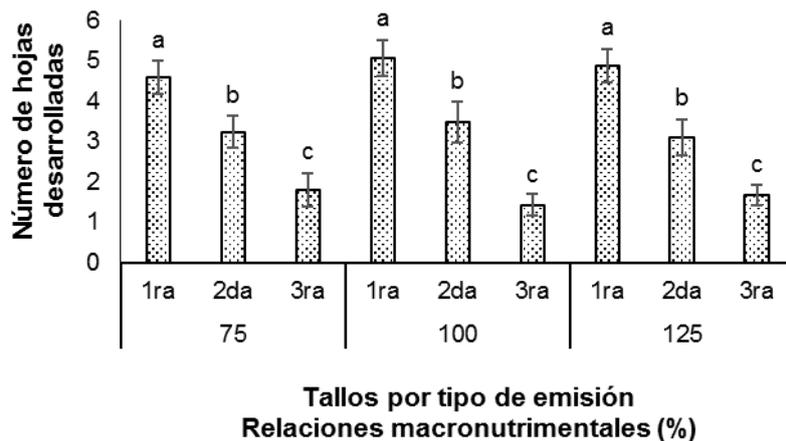


Figura 39. Hojas desarrolladas por efecto de las relaciones macronutrimientales durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.7. Hojas en desarrollo

El número de hojas en desarrollo solo fue diferente desde el punto de vista estadístico por tipo el tipo de tallos emitidos; no así por las RM evaluadas como se observa en la **Figura 40**. Se observa la tendencia de que el número de hojas en desarrollo es mayor en tallos de primera emisión y se va reduciendo en tallos de segunda y tercero emisión.

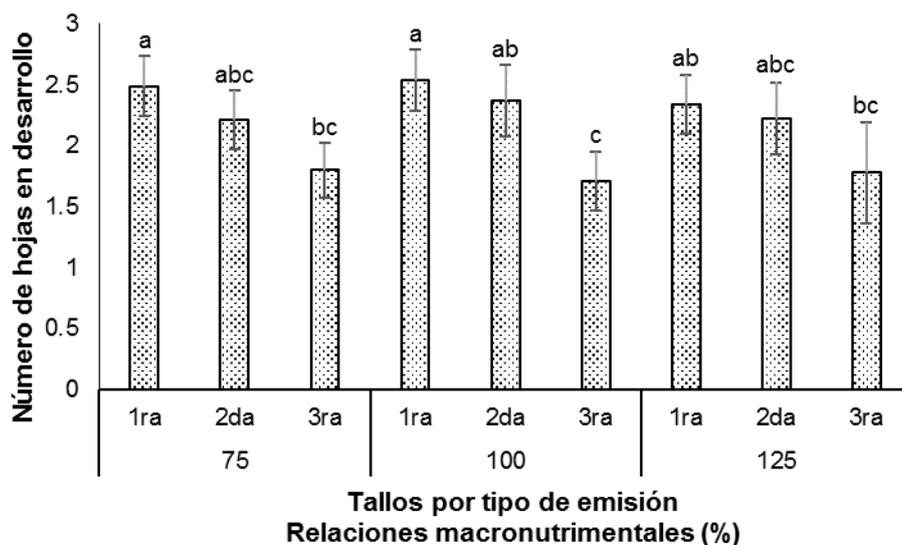


Figura 40. Hojas en desarrollo por efecto de las relaciones macronutrimenales durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.8. Peso fresco de raíz

El peso fresco de la raíz no mostró diferencias significativas entre RM. Sin embargo, en la **Figura 41**, se muestra una asociación positiva entre este variable y la concentración de la RM.

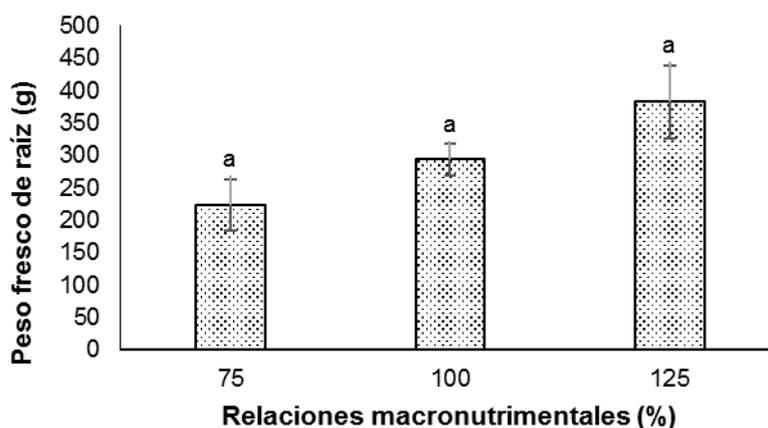


Figura 41. Peso fresco de raíz por efecto de las relaciones macronutrimenales (RM) durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.9. Peso fresco del tallo

El peso fresco del tallo a los 90 días de tratamiento se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 42**). El peso fresco del tallo de 1ra emisión mostró diferencias significativas para las RM; donde, la RM 125% mostró el valor más alto respecto a las otras dos RM (75 y 100%). Para los tallos de 2da y 3ra, tanto por tipo de emisión y por RM, no existió diferencia estadística en el peso fresco de éstos.

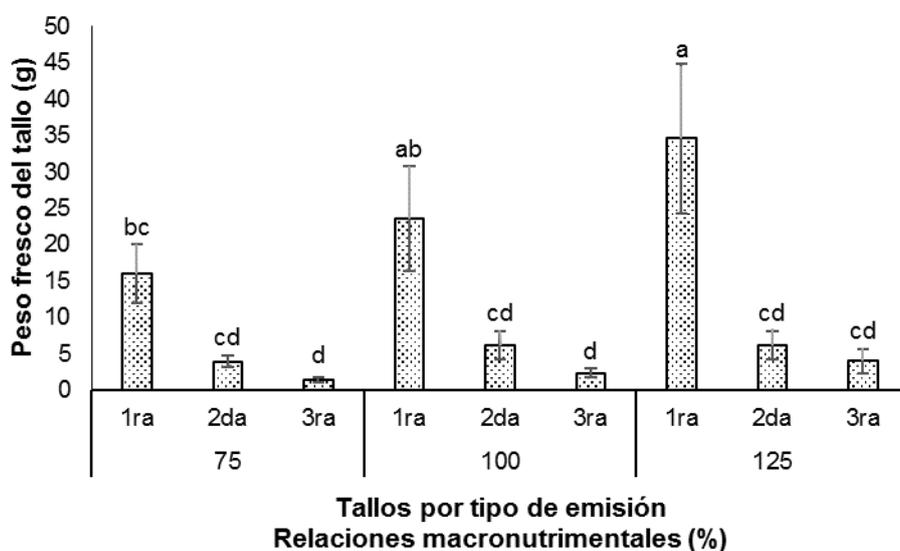


Figura 42. Peso fresco del tallo por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.10. Peso fresco de vaina

El peso fresco de vainas a los 90 días de tratamiento se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 43**). El peso fresco de vaina de tallos de 1ra fue estadísticamente significativo por efecto de las RM. La RM 125% mostró el valor más alto respecto a las otras dos RM (75 y 100%). En los tallos de 2da y 3ra, no se registró diferencia estadística en el peso fresco de vaina.

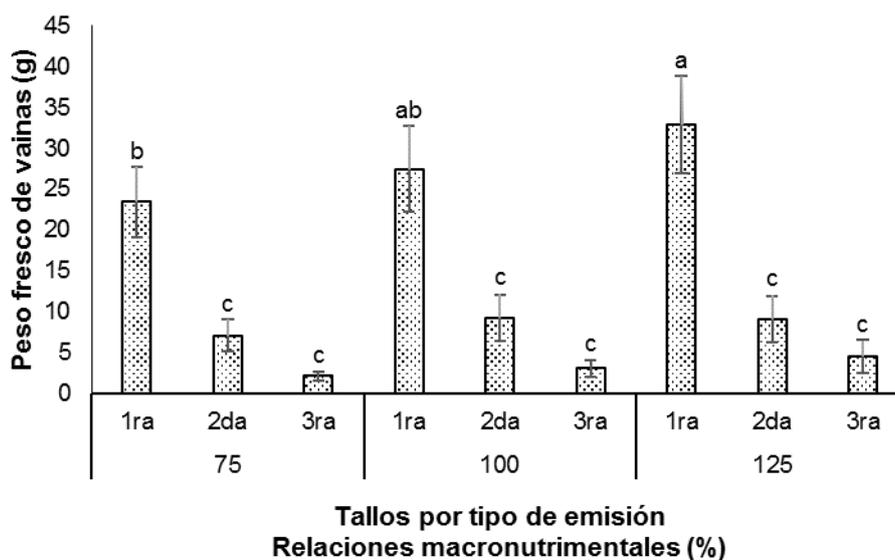


Figura 43. Peso fresco de vainas por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.11. Peso fresco de hojas

El peso fresco de hojas a los 90 días de tratamiento se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos (**Figura 44**). Los tallos de 1ra emisión tuvieron peso fresco de hojas superior que los tallos de 2da y 3ra emisión, independientemente de la relación macronutricional.

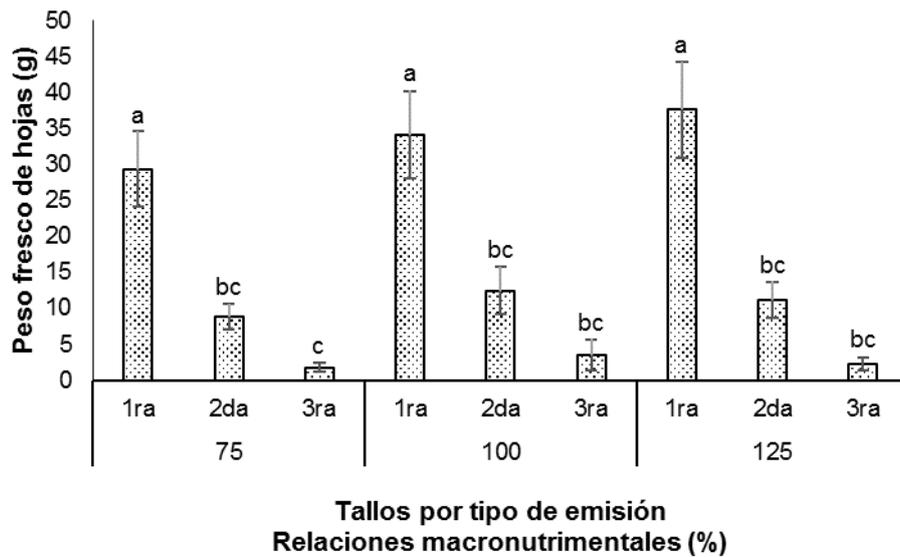


Figura 44. Peso fresco de hojas por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.12. Peso seco de raíz

El seco de la raíz no mostró diferencias significativas entre RM. Sin embargo, en la **Figura 45**, se muestra una tendencia en forma de U invertida que indica que, a una baja y alta concentración de nutrientes en la solución nutritiva no se ve favorecida esta variable, caso contrario con la concentración media que esta aumenta la biomasa seca.

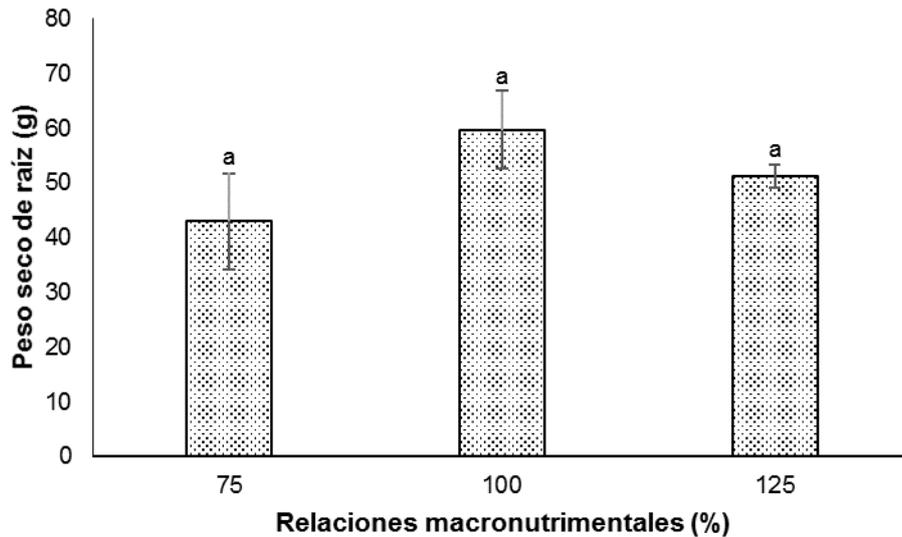


Figura 45. Peso seco de raíz por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 60 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.13. Peso seco del tallo

El peso seco del tallo a los 90 días de tratamiento se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 46**). El peso seco del tallo de 1ra emisión mostró diferencias significativas para las RM. La RM 125% mostró el valor más alto respecto a las otras dos RM (75 y 100%). Los tallos de 2da y 3ra, tanto por tipo de emisión y por RM, no mostraron diferencias estadísticas en el peso seco.

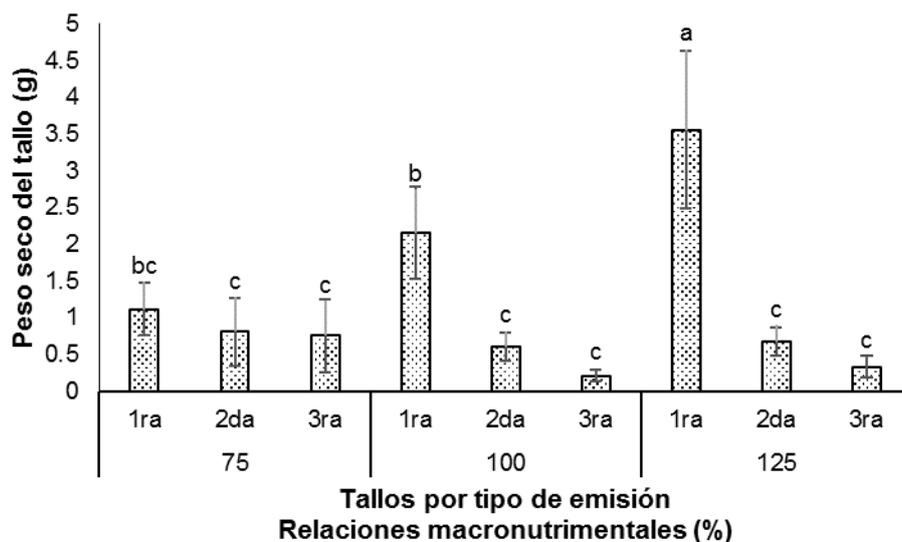


Figura 46. Peso seco del tallo por efecto de las relaciones macronutrimenales (RM) durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.14. Peso seco de vainas

El peso seco de la vaina a los 90 días de tratamiento se midió en los tallos de 1ra, 2da y 3ra emisión, para lo cual, los valores de esta variable mostraron diferencias significativas entre tipos de tallos y por efecto de las RM (**Figura 47**). El peso seco de vaina en tallos de 1ra emisión mostró diferencias significativas para las RM. La RM 125% mostró el valor más alto respecto a las otras dos RM (75 y 100%).

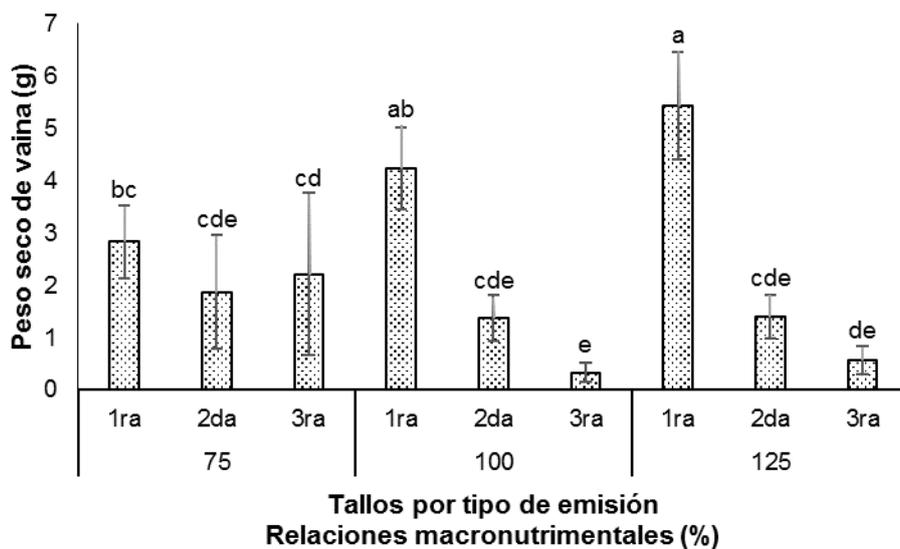


Figura 47. Peso seco vainas por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.15. Peso seco de hojas

El peso seco de hojas de 1ra emisión fue estadísticamente mayor con la RM 125%, respecto a la RM 75%. Por el contrario, el peso seco de hojas de tallos de 3ra emisión fue estadísticamente superior cuando las plantas se trataron con la RM 75%; respecto a las dos RM restantes que fueron evaluadas (**Figura 48**).

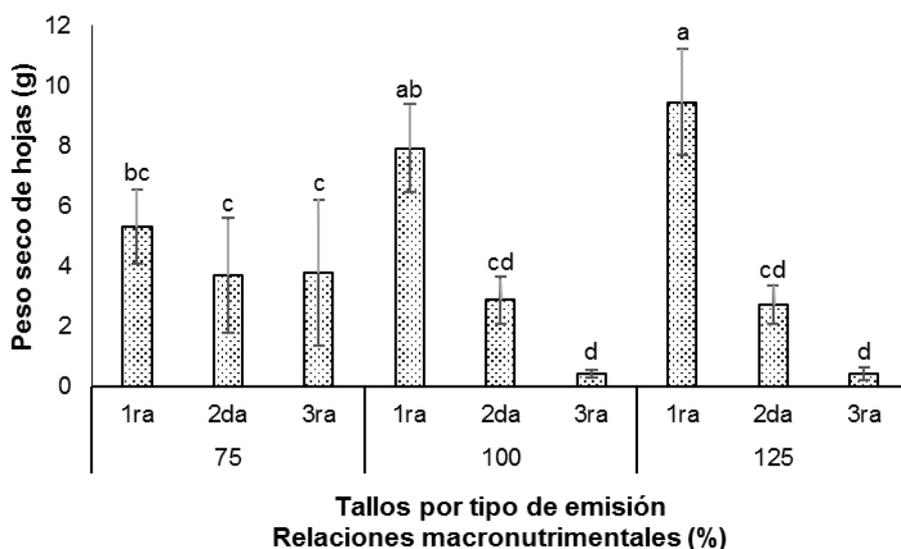


Figura 48. Peso seco de hojas por efecto de las relaciones macronutrimenales (RM) durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.16. Área foliar

Después de 90 ddt, el área foliar, fue mayor en tallos de 1ra emisión, seguida de los tallos de 2da y 3ra emisión, independientemente de la RM utilizada (**Figura 49**). En particular, en el área foliar de tallos de 1ra emisión se observó efecto significativo de las RM, observándose una relación positiva entre esta variable y la concentración de la RM.

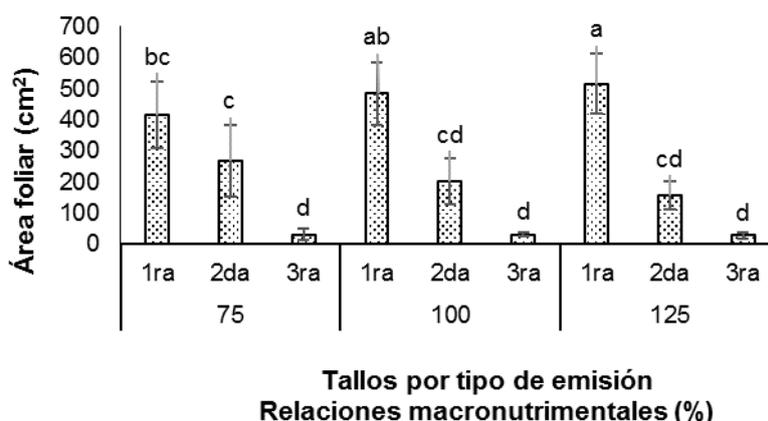


Figura 49. Área foliar por efecto de las relaciones macronutrimenales (RM) durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.4.17. Lecturas SPAD

Las lecturas SPAD no mostraron diferencias significativas entre RM (**Figura 50**); sin embargo, se observa una tendencia proporcional a la concentración de la RM.

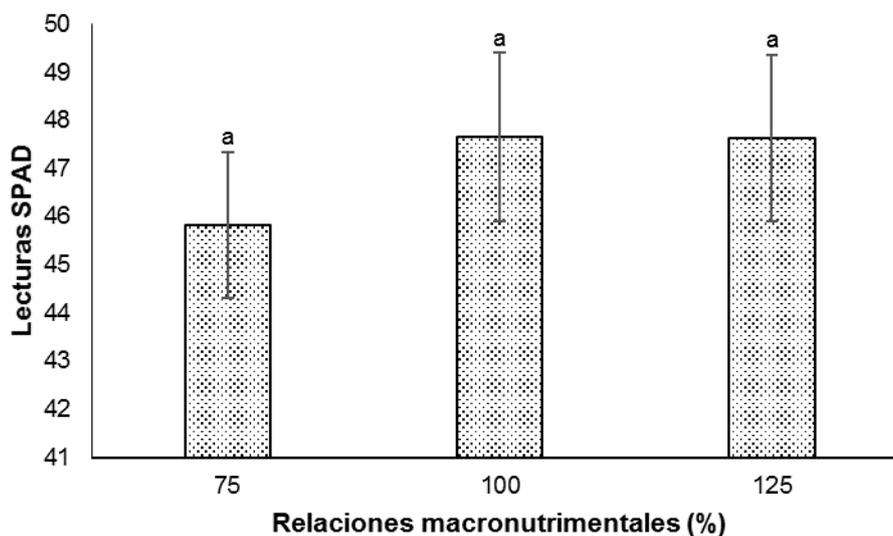


Figura 50. Lecturas SPAD por efecto de las relaciones macronutrientales (RM) durante 90 días de tratamiento. Medias \pm DE con letras distintas en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.5. Concentración nutrimental

4.3.5.1. Concentración inicial en vitroplántulas

Se realizó el análisis nutrimental de las vitroplántulas previo a la aplicación de las relaciones macronutrientales. En el **Cuadro 4**, se presenta los valores de concentración de nutrimentos en cada órgano.

Cuadro 4. Concentración nutrimental de vitroplántulas de caña de azúcar antes del inicio de la aplicación de tratamientos.

Macronutrientes (g kg ⁻¹ peso seco)						
Órgano	N	P	K	Ca	Mg	S
Raíz	12.0 ± 0.49	5.7 ± 0.75	6.7 ± 1.31	9.4 ± 0.99	4.4 ± 0.60	4.3 ± 0.79
Tallo	11.8 ± 0.25	5.7 ± 0.31	19.8 ± 1.60	4.0 ± 0.24	4.0 ± 0.34	5.1 ± 0.34
Hojas	13.7 ± 1.48	4.0 ± 0.23	21.3 ± 0.09	2.2 ± 0.24	1.9 ± 0.09	0.7 ± 0.01

Micronutrientes (mg kg ⁻¹ peso seco)					
Órgano	Fe	Cu	Zn	Mn	B
Raíz	4,199.9 ± 161.86	188.4 ± 26.36	101.9 ± 12.24	201.4 ± 11.93	95.9 ± 14.90
Tallo	143.3 ± 20.36	10.4 ± 0.14	74.5 ± 4.50	15.2 ± 1.31	53.8 ± 3.46
Hojas	134.7 ± 5.65	6.4 ± 0.51	23.3 ± 1.78	11.1 ± 0.22	30.1 ± 2.62

Medias ± DE con letras iguales en cada columna por variable, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.5.2. Concentración nutrimental en raíces

A los 30 d después del inicio de tratamientos, la concentración nutrimental en raíz no mostró cambios para los nutrimentos N, K, Mg, Cu, Zn y Mn por efecto de la aplicación de las RM (**Cuadro 5**). Por otra parte, la RM 75% disminuyó en 15% y 62% la concentración de P, respecto a las RM 100 y 125%. Asimismo, el incremento en la concentración en 25% de la SN (RM125%) aumenta significativamente. La concentración de Ca y S en raíces mostró una tendencia contraria a la de P; es decir, mayor concentración con la menor concentración de la solución nutritiva (RM 25%). En particular, la concentración de Ca en raíces tratadas con la RM 25% fue superior en 12.9 y 22.9% a la registrada con las RM 100 y 125%, respectivamente. Los micronutrimentos Fe y B, presentaron la misma tendencia en los valores de concentración, por efecto de la RM 100% se observaron los valores más altos de 3,305.7 y 41.8 mg kg⁻¹ PS, respectivamente. La RM 75% disminuyó en 45% la concentración de Fe y en 17% la concentración de B. Sin embargo, la RM 125%, a pesar de tener una mayor concentración de nutrimentos en su composición también mostró una disminución de 25% para Fe y de 6% de B, pero no igual a la presentada por la RM 75% (**Cuadro 5**).

A los 60 d después del inicio de tratamiento, la concentración nutrimental en raíz no mostró cambios para los nutrimentos N, P, Mg, S, Fe, Zn y B por efecto de la aplicación de cualquiera de las tres RM (**Cuadro 6**). El K se incrementó de manera proporcional a medida que aumentó la concentración de la RM. Por otra parte, la concentración de Ca no sigue una tendencia que se relacione con los tratamientos. El micronutriente Cu mostró incrementos significativos por efecto de las RM, con la RM 125% se incrementó en 25% respecto con la RM 100%. La concentración de Mn presentó una relación inversa a la concentración de las RM, a medida que incrementó la concentración de la RM, el Mn en raíz disminuyó considerablemente. La reducción estuvo en el orden de 8.8 y 37% para las RM 100% y RM 125%, respecto a las RM 75% que presento la mayor concentración de este micronutriente en raíz (**Cuadro 6**).

A los 90 d del inicio de tratamientos en caña de azúcar, la concentración nutrimental en raíz no mostró cambios para los nutrimentos N, P, K, Mg, Fe, Cu, Zn y B por efecto de las tres RM evaluadas. Los macronutrimentos Ca y S incrementaron su

concentración en la raíz conforme aumentó la concentración de la solución nutritiva. La RM 125% mostró un incremento de 32% en la concentración de Ca, respecto a las dos RM restantes. La concentración de S con la RM 75% disminuyó en 25% respecto a las RM 100%, pero con la RM 125% incrementó un 21%. El micronutriente Mn tuvo las mayores concentraciones con las RM de 75 y 125% **(Cuadro 7)**.

Cuadro 5. Concentración de macronutrientos en raíz de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 30 d después del inicio de los tratamientos.

Macronutrientos (g kg ⁻¹ peso seco)							
RM	N	P	K	Ca	Mg	S	
75%	18.6 ± 1.18a	2.9 ± 0.23b	15.3 ± 1.09a	7.0 ± 0.48a	7.2 ± 0.56a	7.4 ± 0.50a	
100%	18.2 ± 1.12a	3.4 ± 0.50b	15.9 ± 0.89a	6.1 ± 0.73ab	6.9 ± 0.81a	6.7 ± 0.57ab	
125%	18.8 ± 1.04a	4.7 ± 0.29a	17.4 ± 0.93a	5.4 ± 0.42b	6.0 ± 0.40a	5.7 ± 0.30b	
Micronutrientos (mg kg ⁻¹ peso seco)							
RM	Fe	Cu	Zn	Mn	B		
75%	1,818.0 ± 220.14b	18.0 ± 1.06a	26.4 ± 2.23a	240.9 ± 18.98a	34.8 ± 0.48b		
100%	3,305.7 ± 230.95a	17.4 ± 2.24a	28.6 ± 4.34a	256.0 ± 45.48a	41.8 ± 2.81a		
125%	2,485.9 ± 337.47ab	16.7 ± 1.24a	30.4 ± 1.17a	265.9 ± 22.18a	39.2 ± 1.06ab		

Medias ± DE con letras iguales en cada columna por variable, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuadro 6. Concentración de macronutrientos en raíz de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 60 d después del inicio de los tratamientos.

Macronutrientos (g kg ⁻¹ peso seco)							
RM	N	P	K	Ca	Mg	S	
75%	14.0 ± 0.53a	2.3 ± 0.22a	10.5 ± 1.04b	6.4 ± 0.34a	5.9 ± 0.55a	6.2 ± 0.49a	
100%	14.8 ± 2.02a	2.7 ± 0.22a	11.6 ± 0.82ab	4.7 ± 0.45b	5.0 ± 0.46a	5.4 ± 0.50a	
125%	14.7 ± 1.18a	2.8 ± 0.19a	13.2 ± 0.85a	5.9 ± 0.58ab	5.6 ± 0.60a	6.1 ± 0.66a	
Micronutrientos (mg kg ⁻¹ peso seco)							
RM	Fe	Cu	Zn	Mn	B		
75%	2,745.7 ± 78.12a	15.4 ± 0.99ab	27.2 ± 2.41a	308.9 ± 22.12a	33.0 ± 1.31a		
100%	2,193.5 ± 195.07a	12.7 ± 0.82b	26.1 ± 3.10a	281.5 ± 37.58ab	36.0 ± 3.76a		
125%	2,544.0 ± 313.06a	17.3 ± 2.18a	28.1 ± 3.20a	194.7 ± 16.87b	41.1 ± 3.46a		

Medias ± DE con letras iguales en cada columna por variable, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuadro 7. Concentración de macronutrientos en raíz de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 90 d después del inicio de los tratamientos.

Macronutrientos (g kg ⁻¹ peso seco)						
RM	N	P	K	Ca	Mg	S
75%	13.2 ± 0.91a	2.9 ± 0.21a	11.0 ± 1.13a	6.5 ± 0.38b	6.9 ± 0.75a	6.1 ± 1.38b
100%	14.8 ± 0.89a	2.4 ± 0.34a	11.6 ± 1.06a	6.3 ± 0.52b	6.8 ± 0.45a	8.5 ± 0.66ab
125%	14.5 ± 1.46a	2.4 ± 0.13a	10.2 ± 0.69a	9.4 ± 1.22a	8.1 ± 0.82a	10.8 ± 0.87a

Micronutrientos (mg kg ⁻¹ peso seco)					
RM	Fe	Cu	Zn	Mn	B
75%	3,684.4 ± 141.70a	19.2 ± 0.87a	35.7 ± 2.26a	330.8 ± 19.21ab	36.0 ± 1.30a
100%	3,557.7 ± 510.42a	20.0 ± 1.42a	33.7 ± 2.43a	279.7 ± 14.88b	33.5 ± 1.85a
125%	4,113.4 ± 412.90a	21.9 ± 2.63a	32.8 ± 4.13a	383.4 ± 42.88a	34.6 ± 1.93a

Medias ± DE con letras iguales en cada columna por variable, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.5.3. Concentración nutrimental en tallos

Los tratamientos evaluados no afectaron de manera significativa las concentraciones de N, P, K, Cu, Zn y B en tallos de caña de azúcar después de 30 d de tratamiento. Las concentraciones de Ca y Mg fueron superiores en tallos con la RM 75%, respecto al resto de los tratamientos. Asimismo, las concentraciones en tallos de S y Fe fueron mayores con la RM 75% respecto a la RM 125%, con valores superiores en 23 y 29%, respectivamente. En lo que refiere al Mn, la RM 100% mostró la concentración más alta de este nutrimento; la RM 75% produjo una concentración de Mn en tallo menor en 45% y la RM 125% en 32% (**Cuadro 8**).

Después de 60 d del inicio del tratamiento, las concentraciones en tallo de N, P, K, Cu, Zn y B no fueron afectadas por los tratamientos evaluados. La concentración de Ca en tallos con la RM 75% superó en 23.4 y 27.7% a las registradas en las RM 100 y 125%, respectivamente. La misma tendencia observada en Ca se observó para Mg. Las concentraciones de S y Fe en tallos se relacionaron de manera inversa con la concentración de la RM (**Cuadro 9**).

A los 90 d después del inicio de tratamientos, la concentración nutrimental en tallos no mostró cambios para los nutrimentos P, K, Ca, Mg, S y Fe por efecto de la aplicación de cualquiera de las tres RM. El N se vio favorecido por la RM 75%, al incrementar un 14% respecto a las otras dos RM que no mostraron diferencia estadística entre ellas. La concentración de Cu en tallos fue mayor estadísticamente superior en la RM 75% respecto a la RM 100%. La concentración de B en tallos se incrementó significativamente con la RM 75%, en un porcentaje de 14% promedio en comparación con las otras dos RM, las cuales presentaron valor muy similares y estadísticamente iguales (**Cuadro 10**).

Cuadro 8. Concentración de macronutrientos en tallos de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 30 d después del inicio de los tratamientos.

Macronutrientos (g kg ⁻¹ peso seco)						
RM	N	P	K	Ca	Mg	S
75%	50.7 ± 1.74a	7.5 ± 0.55a	31.7 ± 1.83a	4.7 ± 0.34a	4.7 ± 0.39a	5.3 ± 0.42a
100%	44.8 ± 6.91a	6.7 ± 0.51a	34.6 ± 2.76a	3.6 ± 0.16b	3.5 ± 0.26b	4.7 ± 0.44ab
125%	45.4 ± 2.92a	6.7 ± 0.35a	31.1 ± 1.83a	3.4 ± 0.20b	3.7 ± 0.25b	4.1 ± 0.24b
Micronutrientos (mg kg ⁻¹ peso seco)						
RM	Fe	Cu	Zn	Mn	B	
75%	121.2 ± 10.96a	15.4 ± 1.24a	98.7 ± 9.68a	182.8 ± 7.17c	45.4 ± 3.68a	
100%	96.9 ± 14.23ab	12.7 ± 1.38a	92.7 ± 5.90a	330.4 ± 7.63a	41.2 ± 3.70a	
125%	86.2 ± 7.77b	12.4 ± 0.95a	90.8 ± 3.61a	223.4 ± 10.65b	44.3 ± 3.11a	

Medias ± DE con letras iguales en cada columna por variable, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuadro 9. Concentración de macronutrientos en tallos de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 60 d después del inicio de los tratamientos.

Macronutrientos (g kg ⁻¹ peso seco)						
RM	N	P	K	Ca	Mg	S
75%	50.7 ± 1.74a	7.5 ± 0.55a	31.7 ± 1.83a	4.7 ± 0.34a	4.7 ± 0.39a	5.3 ± 0.42a
100%	44.8 ± 6.91a	6.7 ± 0.51a	34.6 ± 2.76a	3.6 ± 0.16b	3.5 ± 0.26b	4.7 ± 0.44ab
125%	45.4 ± 2.92a	6.7 ± 0.35a	31.1 ± 1.83a	3.4 ± 0.20b	3.7 ± 0.25b	4.1 ± 0.24b
Micronutrientos (mg kg ⁻¹ peso seco)						
RM	Fe	Cu	Zn	Mn	B	
75%	121.2 ± 10.96a	15.4 ± 1.24a	98.7 ± 9.68a	182.8 ± 7.17c	45.4 ± 3.68a	
100%	96.9 ± 14.23ab	12.7 ± 1.38a	92.7 ± 5.90a	330.4 ± 7.63a	41.2 ± 3.70a	
125%	86.2 ± 7.77b	12.4 ± 0.95a	90.8 ± 3.61a	223.4 ± 10.65b	44.3 ± 3.11a	

Medias ± DE con letras iguales en cada columna por variable, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuadro 10. Concentración de macronutrientos en tallos de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 90 d después del inicio de los tratamientos.

Macronutrientos (g kg ⁻¹ peso seco)											
RM	N		P		K		Ca		Mg		S
75%	45.4	± 1.27a	8.3	± 0.33a	34.2	± 1.80a	4.0	± 0.19a	4.4	± 0.31a	5.1 ± 0.29a
100%	40.9	± 1.79b	7.5	± 0.59a	31.3	± 2.00a	4.5	± 0.42a	4.0	± 0.46a	5.1 ± 0.45a
125%	37.3	± 1.44b	7.6	± 0.41a	33.8	± 1.13a	4.4	± 0.23a	4.2	± 0.29a	5.7 ± 0.29a
Micronutrientos (mg kg ⁻¹ peso seco)											
RM	Fe		Cu		Zn		Mn		B		
75%	140.4	± 13.26a	17.1	± 1.02a	119.0	± 4.91a	328.3	± 10.34b	46.1	± 1.44a	
100%	130.4	± 10.67a	13.8	± 1.04b	125.4	± 10.36a	354.9	± 19.76a	38.6	± 2.64b	
125%	127.9	± 9.21a	15.7	± 1.20ab	115.3	± 8.16a	296.2	± 10.79b	40.4	± 1.47b	

Medias ± DE con letras iguales en cada columna por variable, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.5.4. Concentración nutrimental en vainas

Después de 60 d del inicio de tratamiento, las concentraciones de Ca, Fe, Zn y B en vainas no fueron influenciadas por las RM evaluadas. La concentración de N en vaina se incrementó por efecto de las RM 75 y 125%, respecto a la RM 100%, con valores porcentuales de 13 y 27%, respectivamente. La concentración de P disminuyó un 19% por efecto de las RM 75 y 125% en ambos casos y fueron estadísticamente iguales. Con esto la RM 100%, obtuvo la concentración más alta de P. Para K, se muestra la misma tendencia que el P, se disminuye el K por efecto de las RM 75 y 125%, en el orden de 22% para ambas RM. El Mg fue incrementado en un 24% por la RM 75%, y las RM restantes mostraron valores iguales compartiendo significancia estadística. El caso de S, también se presentó un decremento por las dos RM 75 y 125%, de un 13 y 24%. El micronutriente Cu, por su parte incrementó su concentración en vaina en 26 y 9% por efecto de las RM 75 y 125%, respecto a la RM 100% que presentó el valor más bajo. Por su parte, el Mn presentó un decremento por efecto de las RM 75 y 125% de 38 y 35%, respecto a la RM 100% que presentó el valor más alto de concentración de Mn (**Cuadro 11**).

A los 90 d del inicio de tratamientos en caña de azúcar, la concentración nutrimental en vainas no mostró cambios para los nutrimentos N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B por efecto de la aplicación de cualquiera de las tres RM (**Cuadro 12**).

Cuadro 11. Concentración de macronutrientos en vainas de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 60 d después del inicio de los tratamientos.

Macronutrientos (g kg ⁻¹ peso)							
RM	N	P	K	Ca	Mg	S	
75%	14.8 ± 1.20ab	3.2 ± 0.15b	21.0 ± 1.55b	3.2 ± 0.20a	3.7 ± 0.47a	3.2 ± 0.17b	
100%	12.8 ± 1.44b	4.0 ± 0.26a	27.1 ± 1.58a	3.2 ± 0.20a	2.8 ± 0.14b	3.7 ± 0.23a	
125%	17.6 ± 2.36a	3.3 ± 0.12b	21.1 ± 1.53b	2.9 ± 0.17a	2.8 ± 0.11b	2.8 ± 0.19b	
Micronutrientos (mg kg ⁻¹ peso)							
RM	Fe	Cu	Zn	Mn	B		
75%	142.1 ± 15.82a	9.2 ± 1.26a	27.7 ± 3.48a	165.7 ± 24.46b	35.6 ± 1.11a		
100%	154.2 ± 16.15a	6.8 ± 0.61b	32.1 ± 6.33a	266.5 ± 21.42a	40.1 ± 2.62a		
125%	132.1 ± 6.97a	7.5 ± 0.40ab	27.9 ± 2.74a	172.3 ± 6.14b	35.7 ± 1.45a		

Medias ± DE con letras iguales en cada columna por variable, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuadro 12. Concentración de macronutrientos en vainas de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, 90 d después del inicio de los tratamientos.

Macronutrientos (g kg ⁻¹ peso seco)							
RM	N	P	K	Ca	Mg	S	
75%	13.8 ± 1.11a	4.2 ± 0.22a	30.4 ± 2.12a	3.6 ± 0.48a	3.2 ± 0.58a	3.4 ± 0.26a	
100%	14.2 ± 1.12a	4.2 ± 0.41a	29.8 ± 3.27a	3.4 ± 0.38a	2.6 ± 0.28a	4.0 ± 0.53a	
125%	12.5 ± 1.22a	3.8 ± 0.25a	26.8 ± 1.86a	3.0 ± 0.21a	2.4 ± 0.12a	3.9 ± 0.40a	
Micronutrientos (mg kg ⁻¹ peso seco)							
RM	Fe	Cu	Zn	Mn	B		
75%	210.1 ± 37.47a	6.3 ± 0.56a	17.8 ± 1.87a	254.8 ± 43.08a	35.9 ± 2.63a		
100%	260.5 ± 48.27a	5.6 ± 0.82a	15.3 ± 1.50a	285.4 ± 29.31a	35.6 ± 4.55a		
125%	248.2 ± 27.44a	5.6 ± 0.67a	14.7 ± 1.65a	242.9 ± 21.57a	34.0 ± 3.16a		

Medias ± DE con letras iguales en cada columna por variable, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.3.5.5. Concentración nutrimental en hojas

Después de 30 d del inicio de tratamientos, la concentración nutrimental en hojas no mostró cambios para los nutrimentos N, P, K, Fe, Cu, Zn, Mn y B por efecto de la aplicación de cualquiera de las tres RM. Las concentraciones foliares de Ca y Mg tuvieron los valores más altos con las R; de 75 y 100% (**Cuadro 13**).

A los 60 d posteriores al inicio de tratamientos, la concentración nutrimental en hojas no mostró cambios para los nutrimentos N, Cu y Zn por efecto de la aplicación de cualquiera de las tres RM. La concentración foliar de P se incrementó por efecto de las RM 75 y 125%, en el orden de 14 y 19%. Las concentraciones foliares de Ca, Mg y S presentaron la media más alta en el tratamiento con la menor RM (75%). En los micronutrimentos, el Fe fue incrementado por efecto de la RM 125%, hasta en un 48% respecto al valor obtenido por la RM 100%. El Mn es incrementado con las RM 75 y 125%, respecto al valor de la RM 100%, en el orden de 42 y 25%. Con respecto con el B, este micronutriente fue incrementado en 22% con la RM 75%, los valores de las otras dos RM, son iguales estadísticamente (**Cuadro 14**).

A los 90 d de la aplicación de tratamientos, la concentración nutrimental en hojas no mostró cambios para los nutrimentos N, Ca, S, Fe y Cu por efecto de la aplicación de cualquiera de las tres RM. La concentración foliar de P y K incrementó significativamente con la mayor RM evaluada. Para el caso de Zn se puede incrementar con las RM 75 y 125%, en el orden de 48 y 37%, respecto a la RM 100%. El caso de Mn, la mayor concentración se obtuvo con la RM 100%, sin embargo, con la RM 75% se disminuye en 17% y con la RM 125% disminuye un 30%. Finalmente, el B se reduce con la RM 125% en el orden de 16% y con las RM 75 y 100% presentaron valores iguales estadísticamente (**Cuadro 15**).

Cuadro 13. Concentración de macronutrientos en hojas de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, a los 30 d después del inicio de los tratamientos.

Macronutrientos (g kg ⁻¹ peso seco)						
RM	N	P	K	Ca	Mg	S
75%	32.0 ± 0.79a	4.2 ± 0.30a	21.7 ± 0.42a	2.7 ± 0.26ab	1.9 ± 0.24ab	0.9 ± 0.03a
100%	31.7 ± 0.85a	4.4 ± 0.24a	22.0 ± 1.00a	3.0 ± 0.24a	2.3 ± 0.16a	0.9 ± 0.03a
125%	32.6 ± 1.04a	4.3 ± 0.40a	21.6 ± 0.42a	2.0 ± 0.29b	1.7 ± 0.21b	0.8 ± 0.06a
Micronutrientos (mg kg ⁻¹ peso seco)						
RM	Fe	Cu	Zn	Mn	B	
75%	173.6 ± 18.73a	8.4 ± 1.20a	28.2 ± 2.00a	176.8 ± 25.38a	27.6 ± 2.09a	
100%	207.5 ± 21.58a	9.3 ± 0.34a	27.7 ± 2.36a	166.7 ± 19.34a	30.1 ± 2.14a	
125%	164.0 ± 17.96a	7.5 ± 0.89a	28.5 ± 2.60a	151.7 ± 15.54a	30.6 ± 2.44a	

Medias ± DE con letras iguales en cada columna por variable, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuadro 14. Concentración de macronutrientos en hojas de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, a los 60 d después del inicio de los tratamientos.

Macronutrientos (g kg ⁻¹ peso seco)						
RM	N	P	K	Ca	Mg	S
75%	30.5 ± 0.80a	4.1 ± 0.25a	20.6 ± 0.72b	3.3 ± 0.17a	2.4 ± 0.09a	1.0 ± 0.03a
100%	32.6 ± 0.94a	3.6 ± 0.10b	22.7 ± 0.66a	2.7 ± 0.14b	1.8 ± 0.04c	0.8 ± 0.03b
125%	30.8 ± 0.25a	4.3 ± 0.11a	24.3 ± 0.56a	3.0 ± 0.15ab	2.2 ± 0.05b	0.9 ± 0.04b
Micronutrientos (mg kg ⁻¹ peso seco)						
RM	Fe	Cu	Zn	Mn	B	
75%	164.9 ± 11.73b	8.2 ± 0.42a	26.9 ± 2.53a	122.5 ± 5.27c	31.7 ± 1.93a	
100%	132.6 ± 7.94b	7.6 ± 0.38a	25.1 ± 0.51a	212.7 ± 13.15a	24.6 ± 1.53b	
125%	257.1 ± 23.10a	8.4 ± 0.43a	26.4 ± 2.22a	160.1 ± 13.86b	24.6 ± 2.18b	

Medias ± DE con letras iguales en cada columna por variable, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuadro 15. Concentración de macronutrientos en hojas de caña de azúcar var. CP 72-2086 crecida en invernadero, a los 90 d después del inicio de los tratamientos.

Macronutrientos (g kg ⁻¹ peso seco)						
RM	N	P	K	Ca	Mg	S
75%	27.0 ± 0.51a	2.7 ± 0.11b	16.9 ± 0.69b	2.9 ± 0.34a	1.8 ± 0.14a	0.8 ± 0.05a
100%	27.7 ± 1.43a	2.9 ± 0.05b	18.0 ± 0.36ab	2. ± 0.07a	1.3 ± 0.02b	1.0 ± 0.14a
125%	28.3 ± 0.83a	3.3 ± 0.1a	20.4 ± 1.50a	2.7 ± 0.17a	1.6 ± 0.07a	1.0 ± 0.18a

Micronutrientos (mg kg ⁻¹ peso seco)					
RM	Fe	Cu	Zn	Mn	B
75%	139.6 ± 8.50a	7.3 ± 0.27a	29.1 ± 2.86a	189.7 ± 7.99b	30.7 ± 2.58a
100%	167.7 ± 12.00a	7.3 ± 0.21a	15.0 ± 0.87b	228.9 ± 6.62a	30.0 ± 1.42ab
125%	142.9 ± 16.15a	7.0 ± 0.39a	23.7 ± 1.75a	160.7 ± 10.63c	25.2 ± 1.77b

Medias ± DE con letras iguales en cada columna por variable, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

4.4. Discusión de resultados

La caña de azúcar es un cultivo altamente demandante de nutrientes y requiere considerables dosis de fertilizantes para abastecer sus necesidades, debido a su elevada capacidad de producción de biomasa, que en peso fresco alcanza un valor cercano o superior a 100 t ha⁻¹, lo cual, asociado a la prolongada duración de su ciclo de cultivo, implica una extracción de nutrientes del suelo de entre 800 a 1,500 kg ha⁻¹ cada año, sobresaliendo el potasio (K) y silicio (Si), seguidos de nitrógeno (N), fósforo (P) y otros nutrientes (CONADESUCA, 2015.; Velasco-Velasco, 2014). De acuerdo con Kingston (2014), el entendimiento de los procesos involucrados en la nutrición de la caña de azúcar es necesario para el desarrollo de estrategias de manejo sustentable del cultivo. La sustentabilidad está determinada por la productividad del cultivo y la rentabilidad para el productor, incluyendo una alta calidad del producto y el mantenimiento o mejoramiento de la fertilidad del suelo, en un entorno de mínimo impacto al ambiente.

Un manejo balanceado de la nutrición en caña de azúcar implica que todos los elementos esenciales estén presentes en el ambiente a niveles que no limiten su crecimiento y maduración, evitando tanto deficiencias como excesos. Por ejemplo, la aplicación excesiva de N puede reducir la producción de sacarosa y elevar los contenidos de pigmentos no deseados en los jugos, en tanto que el Ca y Mg en exceso interfieren en la nutrición potásica. Si bien esto es cierto, también se han observado que las variedades de caña de azúcar pueden responder diferencialmente a distintas estrategias de manejo nutrimental (Schultz *et al.*, 2017), por lo que en este estudio se probaron diferentes relaciones nutrimentales en la variedad CP 72-2086, en las etapas iniciales de su crecimiento y desarrollo. De acuerdo con el **Cuadro 3**, las plántulas provenientes de cultivo de tejido y establecidas en sustrato fueron muy homogéneas, lo cual es un requisito indispensable para el establecimiento del experimento y obtener resultados confiables.

A los 30 días después de establecido el experimento, no hubo efecto de los tratamientos en el número de total de tallos (**Figura 2**), ni para el número de hijos

(Figura 3). Este resultado pudo ser debido a que en etapas iniciales del cultivo, aun no pueden ser visibles los efectos de los tratamientos nutrimentales, lo cual también fue observado respecto a las variables altura de planta (Figura 4), diámetro de tallo (Figura 5), hojas desarrolladas (Figura 7), hojas en desarrollo (Figura 8), peso fresco de raíz (Figura 9), peso seco de raíz (Figura 12), peso seco de tallos (Figura 13), peso seco de hojas (Figura 14), área foliar (Figura 15), y lecturas SPAD (Figura 16). Sin embargo, en las variables altura del tallo (Figura 6), peso fresco del tallo (Figura 10), peso fresco de hojas (Figura 11), se redujeron sus valores con las RM 100% y RM125%, lo que indicó un efecto negativo de estos tratamientos.

A los 60 días después de aplicados los tratamientos, las relaciones nutrimentales probadas tampoco afectaron el número total de tallos (Figura 17), número de hijos (Figura 18), número de hojas desarrolladas (Figura 22), y de hojas en desarrollo (Figura 23), peso fresco de raíz (Figura 24), peso seco de raíz (Figura 28), y unidades SPAD (Figura 33). En esta medición fue notoria la diferencia que mostraron las plantas tratadas con la RM100%, especialmente en el incremento en las variables altura de planta (Figura 19), diámetro de tallo (Figura 20), altura de tallo (Figura 21), peso fresco de tallo (Figura 25), peso fresco de vaina (Figura 26), peso fresco de hojas (Figura 27), peso seco de tallo (Figura 29), peso seco de vaina (Figura 30), peso seco de hojas (Figura 31), y área foliar (Figura 32). En esta segunda evaluación es posible observar un mayor número de variables afectadas por los tratamientos, y especialmente estimuladas por el tratamiento con la RM100%.

De forma similar a las dos evaluaciones anteriores, después de 90 ddt, los tratamientos no afectaron las variables número de tallos totales (Figura 34), número de hijos (Figura 35), diámetro de tallo (Figura 37), hojas desarrolladas (Figura 39), hojas en desarrollo (Figura 40), peso fresco de raíz (Figura 41), peso fresco de raíz (Figura 45), ni unidades SPAD (Figura 50). En esta tercera evaluación, fue notorio que el efecto de los tratamientos en el aumento de las otras variables fue proporcional a la concentración de nutrimentos probada. Asimismo, en esta tercera evaluación, las variables que aumentaron fueron altura de planta (Figura 36), altura de tallo (Figura 38), peso fresco de tallo (Figura 42), peso fresco de vaina (Figura

43), peso fresco de hojas (**Figura 44**), peso seco de tallo (**Figura 46**), peso seco de vaina (**Figura 47**), peso seco de hojas (**Figura 48**), y área foliar (**Figura 49**). Es importante notar que las variables peso fresco de raíz (**Figura 41**), peso seco de raíz (**Figura 45**), y lecturas SPAD (**Figura 50**), a pesar de no mostrar diferencias significativas entre tratamientos, mostraron un incremento considerable en las RM100% y RM125%, respecto a la RM75%.

Los resultados de las tres mediciones son coherentes con otros estudios. Por ejemplo, Olivera *et al.* (2010) y Leite *et al.* (2016) demuestran que, al inicio del desarrollo de la caña de azúcar, especialmente durante el establecimiento (2 a 3 meses después de la plantación), la necesidad de nutrimentos no es tan elevada como en las etapas posteriores de gran crecimiento (**Figura 51**).

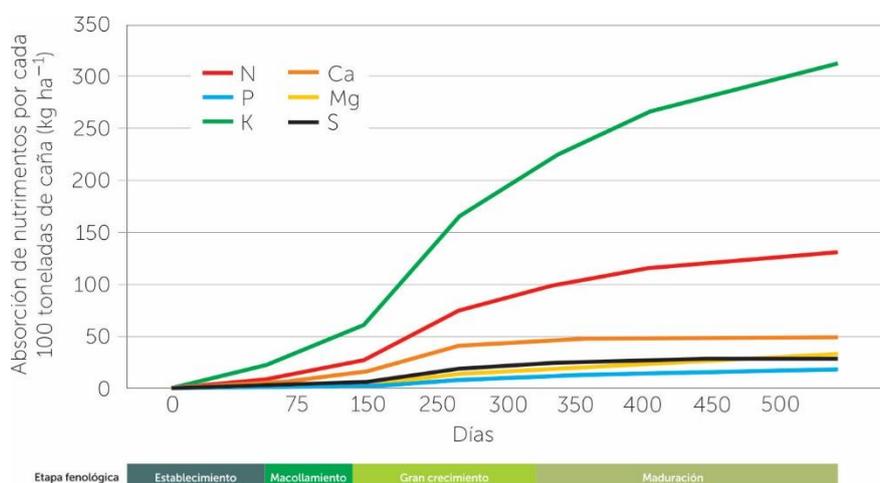


Figura 51. Absorción de macronutrientos por la caña de azúcar de acuerdo con sus etapas fenológicas (modificado de Oliveira, 2011).

De acuerdo con Paul *et al.* (2005), la mayor producción de tallos molederos y el mayor rendimiento en caña fresca se obtuvo cuando se aplicó el 75% de las dosis recomendadas de fertilizantes. Paul y Mannan (2007) mostraron que el mayor rendimiento de caña en fresco se obtiene con las dosis recomendadas de fertilización y la adición de cenizas de arroz.

Los resultados del presente experimento demostraron que los requerimientos nutrimentales aumentaron de acuerdo con la curva de crecimiento, así también se incrementó el número de variables afectadas por los tratamientos, con una tendencia a incrementar las medias a medida que se aumentaba la concentración

nutrimental. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Haifa Chemicals (2014), compañía que recomienda que en ciclo plantilla, se debe aplicar 1 kg N por cada tonelada de caña de azúcar a obtener, y de 1.25 a 1.50 kg N por cada tonelada de caña a obtener en ciclo soca. Para un cultivo de 12 meses, la cantidad total de N debe aplicarse desde el inicio hasta los 3 y 4 meses posteriores a la siembra, y evitar cualquier aplicación de este fertilizante por lo menos 5 meses antes de la cosecha. Wood *et al.* (1996) indican que la acumulación de N en tejido vegetal es más rápida de los 50 a los 120 días posteriores a la siembra en ciclo plantilla, y se completa a los 180 o 200 días en ciclos soca y plantilla, respectivamente. En el caso del P, se recomienda aplicar la totalidad durante la siembra, en tanto que el K debe aplicarse todo al inicio de la siembra en suelos pesados, y en suelos ligeros una mitad al inicio de la plantación y la otra, 6 meses posteriores a la plantación. La mayor demanda de K es entre los 4 y los 2 meses antes de la cosecha, dado que este elemento es requerido por diversas enzimas involucradas en la síntesis de sacarosa, el mantenimiento del intercambio de gases a través de los estomas y el transporte de azúcares a través del floema para su acumulación en el tallo (Kingston *et al.*, 2014). En la **Figura 52** se muestra otro análisis de la tasa de absorción diaria de N, P y K, así como la demanda total de estos nutrientes por la planta en cada etapa fenológica.

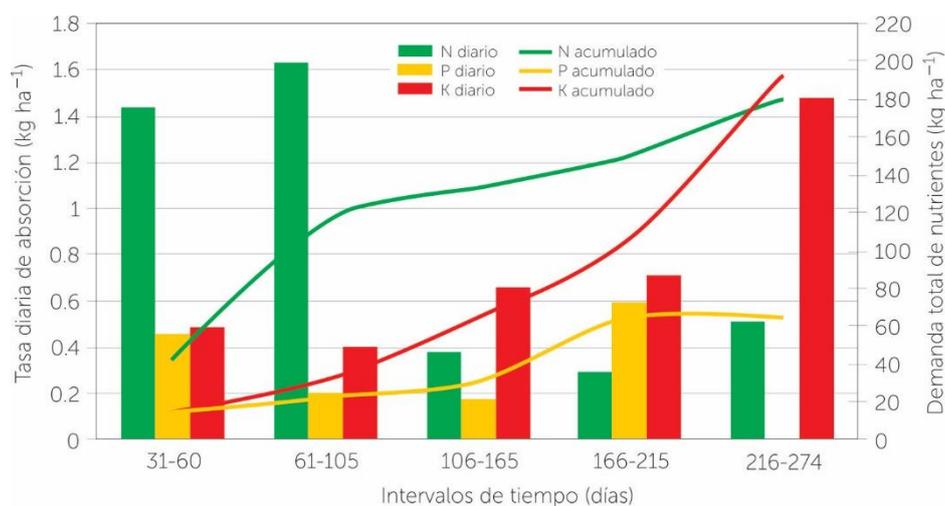


Figura 52. Curva de absorción y demanda de macronutrientes N, P y K por la caña de azúcar de acuerdo con las etapas de desarrollo (modificado de Haifa Chemicals, 2014).

En México, el rendimiento promedio de este cultivo es de 70 t ha⁻¹ en materia verde, muy cercano al promedio mundial, pero lejano a rendimientos de países líderes como Colombia y Guatemala (Sentíes-Herrera *et al.*, 2017a). Sin embargo, de acuerdo con estimaciones de Moore (2009) y Waclawovsky *et al.* (2010), la caña de azúcar puede producir entre 400 y 500 t ha⁻¹ de materia fresca, a través de programas de mejoramiento genético y manejo eficiente del cultivo. De hecho, en suelos bien drenados, fértiles y con disponibilidad de riego, plantaciones de caña de azúcar con densidades de tallos molederos de entre 90,000 y 150,000 t ha⁻¹ (que se obtienen al sembrar de 10,000 a 15,000 tallos por hectárea, cada uno con 2 o 3 yemas) se logran producir entre 200 y 300 t ha⁻¹ de caña en fresco, siempre que se haga un eficiente manejo de la nutrición del cultivo.

En esta investigación se evaluaron tres relaciones nutrimentales: una 25% por debajo de la concentración original (al 75% de la concentración), otra al nivel (al 100% de la concentración) y una tercera 25% por arriba de la concentración original (al 125% de la concentración), tomando como base la solución nutritiva universal de Steiner (Steiner, 1984). De acuerdo con Kingston (2014), un desbalance en el suministro de nutrimentos (ya sea por deficiencia o exceso) puede ocasionar baja calidad en el producto final, alterar la absorción y utilización de nutrimentos, modificar la fertilidad del suelo, y afectar la rentabilidad de las unidades de producción. De hecho, el suministro de altas dosis de Ca y Mg pueden alterar la absorción y aprovechamiento del K, lo cual tiene consecuencias directas tanto en la actividad fotosintética como en el transporte de azúcares vía floema (Alcántar-González *et al.*, 2016). En cualquiera de los casos, hay que tomar en cuenta que la caña de azúcar es un cultivo altamente demandante de nutrimentos, y en sus tallos molederos logra acumular entre 120 y 280 kg N ha⁻¹, 17 a 56 kg P ha⁻¹, de 203 a 560 kg K ha⁻¹, de 300 a 380 kg Si ha⁻¹, de 27 a 55 kg Ca ha⁻¹, de 18 a 57 kg Mg ha⁻¹, de 25 a 48 kg S ha⁻¹, de 5 a 9 kg Fe ha⁻¹, y de 2 a 4 kg Mn ha⁻¹, entre otros (Kingston, 2014; Velasco-Velasco, 2014). Para el caso del calcio, Noble *et al.* (2000) demostraron que este cultivo puede extraer 1.5 kg ha⁻¹ por cada 100 t de caña producida en fresco. De ahí que la capacidad del suelo para abastecer de elementos esenciales al cultivo debe estar soportada por un eficiente suministro de éstos a través de fertilizantes a fin de evitar deficiencias o excesos, y por ende empobrecimiento o contaminación de los suelos. Este suministro debe estar basado

en valores críticos o umbrales de nutrimentos en suelo y tejido vegetal. El valor crítico está asociado a un rendimiento relativo determinado, usualmente del 90 al 95%. El umbral es el valor al cual no se observan respuestas favorables al suministro adicional de algún nutrimento (Kingston, 2014). Además, la demanda de nutrimentos aumenta conforme va creciendo la planta, de acuerdo con los datos mostrados en las **Figuras 51 y 52**, lo cual puede explicar que el aumento en las variables medidas con las RM100% y RM125%.

De acuerdo con Landell y Silva (2004), los atributos agronómicos que más influencia tienen en el rendimiento de la caña de azúcar son la altura, el número y el diámetro de tallos. De ahí que la emisión de tallos jóvenes y rebrotes en caña de azúcar sean dos de los caracteres más importantes en la obtención de mayores rendimientos (Sentíes-Herrera *et al.*, 2017b). Entre más tallos jóvenes tengan las condiciones adecuadas para crecer, mayor será la posibilidad de tener tallos adultos de buena calidad para la cosecha. Aunque al tener un mayor número de tallos maduros el diámetro de éstos tiende a disminuir, al final se tendrá un volumen de cosecha y rendimiento del cultivo mayores. En consecuencia, entre mayor sea el número de tallos emitidos por la planta, mayor será el número de rebrotes en el ciclo de soca, y el rendimiento puede aumentar o al menos mantenerse (Matsuoka y Stolf, 2012). La importancia de esta investigación radica en el hecho de que en las mediciones hechas a los 90 días después del inicio de tratamientos, las variables altura de planta, altura de tallo, peso fresco de tallo, y peso seco de tallo aumentaron conforme se incrementó la concentración nutrimental en la solución nutritiva, lo cual demuestra que la solución universal de Steiner puede aplicarse por arriba del 100% en el cultivo de caña de azúcar en fases tempranas de desarrollo, considerando siempre que el suministro de N es más importante que el de K en estas etapas, y que el K es muy necesario para el transporte de azúcares, por lo que la planta lo requerirá en mayor nivel en la etapa de maduración, más que en la etapa de crecimiento (**Figuras 51 y 52**).

Una de las limitantes de la caña de azúcar es su baja eficiencia en el aprovechamiento del N, con rangos reportados de 6 a 45%, y de 23 a 40% (Kingston, 2014), lo cual puede estar asociado a procesos de pérdida como lixiviación, denitrificación y volatilización. Por ello, el diagnóstico de las necesidades

del cultivo de acuerdo con la etapa de crecimiento es un requisito indispensable para asegurar el uso eficiente de los nutrimentos.

A diferencia del N, el P no se pierde por lixiviación (debido a su menor movilidad y mayor fijación), y las pérdidas más bien son debidas a procesos de erosión del suelo. Por otra parte, el uso excesivo de P puede causar deficiencias de Cu y Zn (Kingston, 2014). Además, el P puede estar presente en el suelo, pero en formas no disponibles. En suelos con pH por encima de 7, el P se fija en forma de fosfato de calcio, en tanto que en suelos con pH por debajo de 5.5 se fija en forma de fosfato de hierro y aluminio. Por tanto, el mantenimiento del pH del suelo entre 5.5 y 6.5 es determinante para el buen aprovechamiento del P por este cultivo. En este experimento, el pH de la solución nutritiva de riego se mantuvo entre 5.5 y 6.0.

El K es un macroelemento que alcanza en tallos molederos de caña de azúcar en cañaverales de Hawái, concentraciones de hasta 560 kg ha⁻¹ (Kingston, 2014). A fin de evitar antagonismos con Ca y Mg, la recomendación es mantener una relación [Ca+Mg]/[K] por debajo de 20 mg kg⁻¹ de suelo (Donaldson *et al.*, 1990).

En este estudio, los macronutrimentos Ca y S se mantuvieron constantes en la solución nutritiva de riego. El Ca es requerido para la división celular y permite elevar el pH en suelos ácidos, y reducir la toxicidad por Al y Mg. Sin embargo, en exceso, este elemento puede reducir la disponibilidad de Cu, Fe y Zn, y la absorción de K (Kingston, 2014). El S es indispensable en la síntesis de metionina y cisteína, y por tanto de proteínas. Además, este elemento es crítico en la actividad de la enzima nitrato reductasa, y en la formación de la molécula de clorofila. Por último, el Mg ocupa el centro de la molécula de clorofila, y por tanto es determinante en la actividad fotosintética y el rendimiento de la planta. Además, el Mg es determinante para la actividad de la ATP-sintasa, lo que le da un papel preponderante en la generación de energía en la célula vegetal. En un eficiente manejo nutrimental, se debe guardar una relación Ca:Mg de 3:1 (Santo *et al.*, 2000). En este experimento, solo la RM125% mantuvo una relación Ca:Mg de 3:1; en las otras dos RM, este coeficiente fue menor, lo que implicaría tratamientos menos apropiados para este cultivo. De hecho, en las mediciones a los 60 y 90 días después de la aplicación de los tratamientos, el tratamiento con la RM125% mostró medias más altas en varios

de los parámetros evaluados, incluyendo indicadores de tallo que resultan determinantes en el incremento de rendimientos en caña de azúcar.

4.5. Conclusiones

De este estudio se concluye que la solución nutritiva universal de Steiner puede usarse en concentraciones mayores al 100% de su nivel original, con efectos positivos en el crecimiento de la caña de azúcar, y con efectos significativos en el aumento de las medias de variables determinantes para el rendimiento relacionadas con son la altura, el número, y el diámetro de tallos. En futuros estudios, será necesario probar mayores concentraciones de la solución hasta encontrar los niveles críticos y umbrales para diferentes variedades de este cultivo de importancia estratégica para la producción de azúcar, de etanol y de nuevos productos dada su capacidad de ser usada como biofábrica.

4.6. Literatura citada

Adams, P. 1999. Plant nutrition demystified. *Acta Hort.* 481: 341-344.

Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI, Fernández-Pavía L, Rodríguez-Mendoza MN. 2016. Elementos esenciales. *In* Alcántar-González G, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC. Nutrición de cultivos. Fundación Colegio de Postgraduados. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. pp. 23-55.

Alcántar-González, G., y Sandoval-Villa, M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. (Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo), 156 p.

Carpena-Artes, O., Masaguer-Rodríguez, A. y Sarro-Casillas, M. J. 1987. Evaluación de los contenidos minerales de raíz, tallo y hoja de plantas de tomate como índices de nutrición. *Ann. Edafología Agrobiol.* 46: 117-127.

Clavijo, J. 1989. Análisis de crecimiento en malezas. *Revista Comal.* 15: 12-16.

CONADESUCA. 2015. Nutrición del cultivo de caña de azúcar y uso eficiente de fertilizantes. Boletín Técnico Informativo Octubre 2015. CONADESIUCA. Ciudad de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114366/Boletin_Tecnico_Informativo_Octubre_2015.pdf

- Dias, F. L. L. e Rossetto R. 2006. Calagem e adubação de cana-de-açúcar. *In* Segatto, S.V., Pinto, A. S., Jendiroba, E., Nobrega, J. C. M., (Eds.) *Atualização em produção de cana-de-açúcar*. Universidad Moura Lacerda: Ribeirao Preto. pp.107-119
- Donaldson RA, Meyer JH, Wood RA. 1990. Response to potassium by sugarcane grown on base saturated clay soils in the Eastern Transvaal Lowveld. *Proc. South Afr. Sugar Technol. Assoc.* 64: 17-21.
- FIRA. 2007. Caña de azúcar. Análisis de costos cosecha sin quema. http://www.fira.gob.mx/Nd/CANA_DE_AZUCAR-Analisis_de_Costos_cosecha_sin_quema.pdf.
- Gardner, F. P., Pearce, R. B. and Mitchell, R. L. 1985. *Physiology of crop plants*. Iowa State University Press, USA. 325 p.
- Gascho, G. J., D. L. Anderson y J. E. Bowen. 1993. Sugarcane. *In* *Nutrients Deficiencies & Toxicities in Crop Plants*. W. F. Bennett (ed.). APS Press. St. Paul, Minnesota. pp. 37-42.
- Haifa Chemicals. 2014. Using the right fertilizers in order to provide the sugarcane necessities. http://www.haifa-group.com/spanish/knowledge_center/recommendations/field_crops/using_the_right_fertilizers_in_order_to_provide_the_sugarcane_necessities.aspx
- Hernández M. G. I., Salgado G. S., Palma L. D. J., Lagunes E. L. C., Castelán E. M., Ruíz R. O. 2008. Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un gleysol mólico de Chiapas. *Interciencia* 33: 855-860.
- Hunt, R. 1978. *Plant growth analysis*. Edward Arnold Publishers, London. 67 p.
- Kingston G. 2014. Mineral nutrition of sugarcane. *In* Moore PH, Botha FC. *Sugarcane. Physiology, biochemistry and functional biology*. Wiley Blackwell, Ames. pp. 85-120.
- Landell MGA, Silva MA. 2004. As estratégias de seleção da cana em desenvolvimento no Brasil. *Visão Agrícola Piracicaba* 1: 18-23.
- Leite JM, Ciampitti IA, Mariano E, Vieira-Megda MX, Trivelin PCO. 2016. Nutrient partitioning and stoichiometry in unburnt sugarcane ratoon at varying yield levels. *Front. Plant Sci.* 7:466. doi: 10.3389/fpls.2016.00466
- Matsuoka S, Stolf R. 2012. Sugarcane tillering and ratooning: Key factors for a profitable cropping. *In* Goncalvez JF, Correia KD. *Sugarcane: Production,*

- cultivation and uses. Nova Science Publishers. New York, NY, USA. pp. 137-157.
- McCray, J. M., Rice, R. W., and Ezenwa, I. V. 2005. Sugarcane leaf tissue sample preparation for diagnostic analysis. IFAS Extension. University of Florida. 1-4. Disponíble en: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/files/SC/SC07600.pdf>
- Moore PH. 2009. Sugarcane biology, yield, and potential for improvement. *In* Workshop BIOEN on Sugarcane Improvement. San Pablo, Brazil.
- Noble AD, Gillman GP, Ruaysoongan S. 2000. A cation exchange index for assessing degradation of acid soil by further acidification under permanent agriculture in the tropics. *Europ. J. Soil Sci.* 51: 233-243.
- Oliveira ECA, Freire FJ, Oliveira RI, Freire MBGS, Neto DES, Silva MAS. 2010. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 34: 1343-1352. doi: 10.1590/S0100-06832010000400031
- Oliveira ECA. 2011. Balanço nutricional da cana-de-açúcar relacionado à adubação nitrogenada. Ph. D. Dissertation University of São Paulo, Piracicaba. Available at: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-20042011-094249/en.php>
- Paul GC, Mannan MA. 2007. An Integrated Nutrient Management Approach to Improve Sugar Productivity. *Sugar Tech* 9: 28-35. doi: 10.1007/BF02956910
- Paul GC, Rahman MH, Rahman ABMM. 2005. Integrated nutrient management with organic and inorganic fertilizers on productivity of sugarcane ratoon in bangladesh. *Sugar Tech* 7: 20-23. Doi: 10.1007/BF02942523
- Rengel, M. L. 2004. Crecimiento y dinámica de acumulación de nutrientes en maíz en Venezuela. *Informaciones Agronómicas* 53: 5-8.
- Santo LT, Nakahata MH, Ito GP, Schell VP. 2000. Calcium and limiting trials from 1994 to 1998 at HC&S. *Technol. Suppl. Agron. Rep.* 83: 1-20.
- Schultz P, Pereira W, Silva PA, Baldani JI, Boddey RM, Alves BJR, Urquiaga S, Reis VM. 2017. Yield of sugarcane varieties and their sugar quality grown in different soil types and inoculated with a diazotrophic bacteria consortium. *Plant Prod. Sci.* 20: 366-374. doi: 10.1080/1343943X.2017.1374869
- Schwarz, M. 1995. Soilless culture management. *Advanced series in Agricultural Sciences* 24. Springer-Verlag. Berlin, Germany.

- Sentías-Herrera HE, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC. 2017a. The Mexican sugarcane production system: History, current status and news trends. *In* R. Murphy (Ed.). Sugarcane: Production systems, uses and economic importance. Nova Publishers, New York, USA. pp. 39-71.
- Sentías-Herrera HE, Trejo-Téllez LI, Volke-Haller VH, Cadena Íñiguez J, Sánchez-garcía P, Gómez-Merino FC. 2017b. Iodine, silicon, and vanadium differentially affect growth, flowering, and quality components of stalks in sugarcane. *Sugar Tech* 2017. doi: 10.1007/s12355-017-0572-0
- Sentías-Herrera, H. E., Gómez-Merino, F. C., Valdez-Balero, A., Silva-Rojas- H. V., and Trejo-Téllez, L. I. 2014. The agro-industrial sugarcane system in Mexico: current status, challenges and opportunities. *Journal of Agricultural Science*. 6: 26-54.
- Solórzano, P. R. 2003. Crecimiento y nutrición del arroz (*Oryza sativa* L.) en Venezuela. *Informaciones Agronómicas* 51: 1-7.
- Steiner AA. 1984. The universal nutrient solution. *In* Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture. International Society for Soilless Culture. ISOSC. Wageningen, The Netherlands. pp. 633-649.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil* 15: 134-154.
- Steiner, A. A. 1973. The selective capacity of tomato plants for ions in a nutrient solution. pp. 43-53. *In* Proceedings of Thrid International Congress on Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. pp. 633-649. *In* Proceedings of Sixth International Congress on Soilless Culture. International Society for Soilless Culture. Lunteren, The Netherlands.
- Tekalign, T. and Hammes, P. S. 2005. Growth and productivity of potato as influenced by cultivar and reproductive growth II. Growth analysis, tuber yield and quality. *Scientia Horticulturae* 105: 29–44.
- Velasco-Velasco J. 2014. Los biofertilizantes en la producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *Agroproductividad* 7: 60-64.
- Waclawovsky AJ, Sato PM, Lembke CG, Moore PH, Souza GM. 2010. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnol J*. 8: 263-276.

- Wiedenfled, R. P. 2000. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. *Agricultural Water Management* 43 (2): 173-182.
- Wiedenfled, R. y J. Enciso. 2008. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid South Texas. *Agronomy Journal* 100: 665-671.
- Wood AW, Muchow RC, Robertson MJ. 1996. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. III. Accumulation, partitioning and use of nitrogen. *Field Crops Res.* 48: 223-233.
- Wood, R. A. 1990. The roles of nitrogen, phosphorus and potassium in the production of sugarcane in South Africa. *Fertilizer Research* 26: 89-98.
- Yágodin, B. A. 1986. *Agroquímica*. Trad. al español por R. Rincón-Zabaco y F. Vargas-Salazar. Tomo I. Mir. Moscú. Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas.