

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Efecto Bioestimulante de los Extractos de Crucíferas en Semillas
y Plántulas de Maíz y Melón.

Por:

CARLA GARCÍA GALLEGOS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Efecto Bioestimulante de los Extractos de Crucíferas en Semillas
y Plántulas de Maíz y Melón.

Por:

CARLA GARCÍA GALLEGOS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Adalberto Benavides Mendoza

Asesor Principal



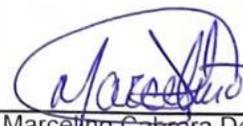
M.C. Wendy Xiomara Sandoval Ortiz

Asesor Principal Externo



Dr. Alberto Sandoval Rangel

Coasesor



Dr. Marcelino Cabrera De La Fuente

Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel

Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2024

DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Carla García G.

Carla García Gallegos

Autor Principal

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios y a la Virgen de Guadalupe, por su inmenso amor y protección durante toda mi trayectoria universitaria. Gracias por iluminar mi camino con su sabiduría, por darme la fuerza y la paz necesarias en los momentos de dificultad y por acompañarme en cada paso de este proceso. A lo largo de todo este tiempo, nunca perdí la fe, porque siempre sentí su presencia y apoyo incondicional. Sin su guía y bendiciones, no hubiera podido llegar hasta aquí. Mi agradecimiento eterno por haberme permitido alcanzar esta meta y por ser mi constante apoyo en este viaje tan importante de mi vida.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi querida Alma Mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y por ser el lugar en el que crecí no solo académicamente, sino también como persona. Gracias por ofrecerme un ambiente lleno de conocimiento, pasión y compromiso, donde siempre encontré el apoyo de docentes, compañeros y personal administrativo. La Universidad ha sido mi segundo hogar, donde aprendí los valores que me han guiado hasta este momento, y gracias a ella hoy soy quien soy. Mi gratitud eterna por todo lo que me ha permitido vivir y aprender en estos años. ¡BUTRES POR SIEMPRE!

Al Departamento de Horticultura, quiero expresar mi más sincero agradecimiento por brindarme el apoyo necesario a lo largo de toda mi formación académica. Gracias por ofrecerme un entorno de aprendizaje enriquecedor, por la oportunidad de crecer profesionalmente y por el compromiso con la excelencia que siempre ha caracterizado a este departamento. Agradezco profundamente a todos los docentes y personal que forman parte de él, por su dedicación, conocimiento y por siempre estar dispuestos a compartir su experiencia y guiarme en cada etapa de mi carrera. Este logro es también gracias a la formación que recibí aquí, un pilar fundamental en mi desarrollo académico y profesional.

A mi querida asesora, Wendy Xiomara Sandoval Ortiz, quiero expresar mi más sincero agradecimiento. Gracias por ser el motor principal que me impulsó a concluir este proyecto. Su apoyo constante, su dedicación y su valiosa orientación fueron fundamentales para llegar hasta aquí. Siempre me brindó confianza en mis capacidades y me enseñó a perseverar en los momentos de dificultad. Su compromiso con mi desarrollo académico y su generosidad al compartir su conocimiento hicieron de este proceso una experiencia enriquecedora. Sin su guía, este logro no habría sido posible. Gracias por ser una gran mentora.

Al Dr. Alberto Sandoval Rangel, quiero expresar mi más profundo agradecimiento. Fue gracias a su visión y orientación que surgió la idea de realizar este proyecto, y sin su confianza y apoyo constante, no habría sido posible llevarlo a cabo. Desde el inicio, me brindó la oportunidad de explorar y desarrollar mi investigación con libertad, pero también con la guía necesaria para asegurar que fuera un trabajo

riguroso y de calidad. Su conocimiento, paciencia y disposición para ayudarme en cada etapa de este proceso fueron fundamentales para el éxito de este proyecto. Gracias por creer en mí y por ser parte esencial de este logro.

A mis queridos padres, mi más profundo agradecimiento. Gracias por su amor incondicional, su apoyo constante y su confianza en mí, sin importar las dificultades. Su dedicación, sacrificio y enseñanzas me han permitido llegar hasta aquí, y son la base sobre la que se ha construido todo mi esfuerzo. Siempre estuvieron a mi lado, motivándome a seguir adelante en los momentos de incertidumbre y celebrando mis logros con el corazón lleno de orgullo. Este logro es tanto suyo como mío, y les debo todo lo que soy.

Al MC. Raúl Alejandro Ramos Salazar, quiero expresarle mi más sincero agradecimiento. Gracias por su apoyo y orientación durante el desarrollo de mi proyecto. Su conocimiento, dedicación y disposición para ayudarme fueron fundamentales en todo el proceso. Aprecio profundamente la manera en que siempre estuvo dispuesto a brindarme su asesoría, enriqueciendo mi trabajo con su experiencia y sabiduría. Su apoyo no solo ha sido valioso en esta etapa, sino que también me ha dejado grandes lecciones que seguiré aplicando en mi futuro profesional.

A todos mis maestros y docentes, mi más profundo agradecimiento. Cada uno de ustedes ha sido una fuente invaluable de conocimiento, inspiración y motivación a lo largo de mi formación académica. Gracias por su dedicación, por compartir sus sabidurías y por siempre fomentar mi crecimiento tanto profesional como personal. Su paciencia, compromiso y pasión por enseñar han dejado una huella imborrable en mí. Este logro es reflejo del esfuerzo y la enseñanza que me brindaron, y siempre llevaré sus enseñanzas conmigo. Gracias por ser parte fundamental de este camino.

A Alexa Sandoval y Marisol Sandoval, les agradezco profundamente por su valiosa ayuda en el trabajo experimental de este proyecto. Su dedicación, esfuerzo y apoyo fueron fundamentales para la realización de las pruebas y el avance de esta investigación. Sin su colaboración, muchas de las etapas del trabajo no habrían sido posibles. Gracias por su paciencia, por estar siempre dispuestas a colaborar y por compartir sus conocimientos y habilidades. Este logro también es fruto de su compromiso y trabajo en equipo.

A mis queridos amigos Ana, Adrián, Benjamín, Bernardo y Vistrain, mi eterno agradecimiento. Desde el primer día que llegué a la universidad, ustedes han sido mi apoyo constante, mis compañeros de risas y desvelos, y mi fuerza en los momentos más difíciles. Han estado a mi lado en cada paso, en cada desafío, y me han motivado a seguir adelante cuando la incertidumbre y el cansancio me invadían. Gracias por ser mi familia elegida, por hacerme sentir que nunca estaba sola en este camino. Este logro no solo es mío, sino de todos nosotros, por cada conversación, cada consejo, cada momento compartido. ¡Los llevo en el corazón siempre

DEDICATORIA

A mí misma, por la valentía de seguir adelante cuando las cosas se ponían difíciles, por las largas horas de esfuerzo y las noches sin dormir, por la paciencia y la perseverancia que me han traído hasta este momento. Agradezco a la persona en la que me he convertido durante este proceso, a la que no se rindió, que se levantó tras cada tropiezo y que siempre encontró la fuerza para seguir luchando. Esta tesis es un testimonio de mi crecimiento, mi dedicación y mi amor por el conocimiento. Estoy orgullosa de mí misma y de todo lo que he logrado.

A mi madre, Alejandra Gallegos Cárdenas:

Por ser el motor incansable que siempre me ha impulsado a seguir adelante. Aunque la vida nos ha golpeado con dureza, tu valentía y fuerza nos han enseñado a enfrentarla con la cabeza en alto. Has sido mi guía en los momentos más oscuros, la luz que disipa las sombras y me da la certeza de que todo estará bien.

Gracias por darme las lecciones de vida que me han ayudado a superar cada obstáculo, y por ser el ejemplo vivo de que nunca debemos rendirnos. Me diste la esperanza para creer en un mañana mejor, el amor que me impulsó a dar lo mejor de mí y la confianza para descubrir que soy capaz de alcanzar mis sueños. Siempre fuiste mi refugio cálido en los días más fríos.

Soñé tantas veces con este momento, porque a pesar de que el mundo parecía estar en mi contra, tú siempre estuviste a mi lado, siendo mi mayor apoyo y mi más firme creyente. Dios me dio la bendición más grande al tenerte como madre, y no hay palabras suficientes para expresar cuánto te amo y te agradezco.

Con todo mi amor, tu hija.

A mi querido padre, Rogelio García Ayala:

Por ser la luz que encendió el camino de esta aventura, el autor de mis sueños, la fuerza en mi andar. Con tu coraje me enseñaste a enfrentar lo incierto, y con cada reto, descubrí mi propio valor.

Mi Roy, compañero de travesuras y de vida, mi maestro en el arte de cultivar el amor. Recuerdo aquellos días en que, copiloto de tu lado, explorábamos senderos hacia el corazón de la tierra, donde nació mi pasión por la agricultura. Nunca dejaré de agradecerte, por cada lección, por cada abrazo, por mostrarme que en el esfuerzo hay belleza y que, en la adversidad, florece la esperanza.

Sé que has enfrentado muchas adversidades en la vida, y que no ha sido fácil llevar el papel de ser el sustento y jefe de familia. Pero gracias a tu ejemplo, me has hecho una persona de bien, enseñándome que todo sacrificio tiene recompensa.

Te amo padre, más de lo que las palabras pueden decir. Te respeto y te admiro, pues en mis ojos, eres el hombre perfecto, el héroe de mi historia, mi eterno faro en la oscuridad.

A mi hermano, Rogelio García Gallegos, mi querido Titas.

Por ser mi mano derecha, por regalarme una infancia llena de momentos inolvidables y por estar siempre a mi lado, tanto en lo económico como en lo moral. No existen palabras suficientes para expresar mi gratitud por el amor que me has brindado y por el coraje con el que me has empujado a dar lo mejor de mí misma.

Eres más que un hermano; eres mi fiel compañero, mi protector, y el refugio al que siempre corro cuando necesito consuelo y fuerza. A tu lado, sigo siendo esa niña que encuentra seguridad en tus brazos, la que siempre sabe que, pase lo que pase, tú serás la barrera que me defiende ante el mundo entero.

Recuerdo nuestra promesa de llegar lejos, de demostrar que, aunque la vida nos haya hecho sufrir, juntos siempre hemos salido adelante. "Uno para tres y tres para uno," ese lema siempre será nuestro, una prueba del vínculo irrompible que nos une.

Titas, me siento inmensamente orgullosa de ti y de todo lo que hemos logrado. Te quiero y te amo tanto. Siempre serás mi hermano, mi confidente, y mi mayor inspiración.

Con todo mi amor, tu hermana.

A mi hermana, Brenda García Gallegos, mi pequeña güera.

Gracias por ser mi más grande admiradora, la pequeñita de la casa que siempre ha creído en mí. Por ti, me esfuerzo cada día para demostrarte que los sueños se cumplen, que en el querer está el poder. Desde el primer momento, fuiste una pieza clave para que esta etapa de mi vida se realizara de manera satisfactoria.

Te amo, mi pequeña güera, y siempre estaré aquí para protegerte y cuidarte. Tener una porrista como tú ha sido el mejor regalo que la vida me pudo dar; eres y siempre serás mi rayito de esperanza.

Con todo mi amor, tu hermana.

A mi mejor amiga, Ana Daniela Medina Robles.

Aunque no compartimos la misma sangre, nos hemos convertido en hermanas de corazón. Gracias por estar a mi lado desde el principio, por ser mi apoyo incondicional, mi compañera de risas y de desafíos. Juntas superamos todo, nos entendemos con una mirada y compartimos sueños, miedos y victorias. No importa

lo que pase, siempre estaré aquí para ti, porque te considero mi familia. ¡Compa Bladi, gracias por ser parte fundamental de mi vida y de este logro!

A Hugo Octavio Méndez Roblero.

Mi amor, mi compañero de vida. No tengo palabras suficientes para agradecerte todo lo que has hecho por mí. En los momentos en los que sentí que todo se desmoronaba, fuiste tú quien llegó para iluminar mi camino. Tu amor, tu apoyo incondicional y tu fuerza han sido mi refugio y mi mayor motivación. Gracias por darme la esperanza cuando más la necesitaba, por ser mi compañero en cada paso, en cada risa y en cada lágrima. Este logro es también tuyo, porque sin ti, nada de esto hubiera sido posible. Te amo con todo mi corazón y siempre estaré agradecida por tenerte a mi lado.

A mi querido maestro, Felicito Ausencio Díaz Vázquez.

Con gratitud y respeto, dedico estas palabras a quien fue un faro de inspiración durante mi etapa universitaria. Su guía, apoyo y confianza en mí fueron fundamentales para que pudiera culminar este proyecto con satisfacción y alcanzar la meta trazada. Fue usted quien, en los momentos de incertidumbre, me dio la esperanza y la seguridad de que este proyecto no solo era posible, sino que también se podía lograr con excelencia. Su dedicación y sabiduría marcaron una diferencia significativa en mi formación, y hoy, gracias a su enseñanza, puedo ver con claridad el resultado de tanto esfuerzo.

Gracias por haber sido no solo un maestro, sino un mentor invaluable en este camino.

A mis abuelos paternos, Josefina Ayala Velázquez y Sixtos García Velázquez

Ustedes han sido una fuente inagotable de amor, sabiduría y fortaleza en mi vida. Gracias por su apoyo constante, por sus enseñanzas y por siempre estar ahí, guiándome con su ejemplo de sacrificio y dedicación. Su amor incondicional me ha dado la base para crecer y superar cada obstáculo. Este logro es también un homenaje a ustedes, quienes me han enseñado a valorar la familia y la importancia de nunca rendirse. Los llevo siempre en mi corazón.

A mis abuelos maternos, Claudina Cárdenas Campos y Filemón Gallegos

Les debo más de lo que las palabras pueden expresar. Gracias por su amor incondicional, por enseñarme a ser fuerte y por ser siempre un pilar en mi vida. Su sabiduría, paciencia y apoyo han sido fundamentales en cada paso de mi camino. Con su ejemplo me han mostrado lo que significa luchar por nuestros sueños y nunca rendirnos. Este logro es también suyo, pues su amor y su fe en mí siempre me han impulsado a seguir adelante. Los llevo siempre en mi corazón.

Esta tesis también tiene toda mi dedicación para la familia García y la familia Gallegos. A pesar de las circunstancias, siempre han sido parte de mi camino, y aunque el apoyo haya sido limitado, valoro cada momento que compartimos. Esta meta también es un reflejo de mi esfuerzo personal, y sé que de alguna manera cada uno ha sido parte de ella.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO... ¡Error! Marcador no definido.	
AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
I. INTRODUCCIÓN	1
Justificación	2
OBJETIVOS	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
Hipótesis	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Introducción a las Crucíferas	3
2.1.1 Características generales de las plantas de la familia Brassicaceae.	3
2.1.2 Composición química de las crucíferas	3
2.1.3 Propiedades Nutricionales y Beneficios para la Salud de las Crucíferas.....	5
2.1.4 Usos tradicionales y aplicaciones agrícolas de las crucíferas	6
2.2 Bioestimulantes en la agricultura	6
2.2.1 Definición y tipos de bioestimulantes	6
2.2.2 Tipos de bioestimulante	7
2.2.3 Beneficios del uso de los bioestimulantes en los cultivos agrícolas	10
2.3 Efectos de los extractos de crucíferas en el desarrollo de las plantas.....	10
2.3.1 Estudios sobre el efecto de los extractos de crucíferas en el crecimiento vegetal	10
2.3.2 Mecanismos de defensa inducidos por extractos de crucíferas en los cultivos .	11
2.4 Fisiología de semillas de maíz y melón.....	11
2.4.1 Descripción de las etapas de germinación del maíz.....	11

2.4.2	Importancia del mesocotilo en el desarrollo inicial	11
2.4.3	Descripción de las etapas de germinación del melón	12
2.4.4	Tolerancia al estrés abiótico el maíz.....	12
2.4.5	Tolerancia al estrés abiótico el melón.....	12
2.5	Potencial de los extractos de crucíferas en la agricultura sostenible	13
2.5.1	Ventajas del uso de bioestimulantes naturales en comparación con fertilizantes químicos.....	13
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1	Ubicación del experimento	14
3.2	Descripción del proceso experimental.....	14
3.3	Elaboración de subproductos	14
3.3.1	Caracterización de subproductos.....	15
3.4	Experimento No. 1: Prueba In vitro de Seed Priming de semillas de maíz y melón. 16	
3.4.1	Diseño Experimental	17
3.4.2	Tratamientos.....	17
3.4.3	Variables a evaluar	17
3.4.4	Mediciones.....	18
3.4.5	Análisis estadístico	18
3.5	Experimento No. 2: Imbibición de semillas de maíz y melón con germinación en condiciones de invernadero	18
3.5.1	Diseño experimental	18
3.5.2	Tratamientos y variables a evaluar	18
3.5.3	Análisis estadístico	19
3.6	Aplicación foliar en plántulas de melón y maíz	19
3.6.1	Concentraciones de extracto	19
3.6.2	Medición de variables	19
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1	Caracterización de los extractos obtenidos.....	21
4.2	Experimento 1: Seed priming de semillas de maíz y melón in vitro	22
4.2.1	Evaluación del porcentaje de germinación de semillas de maíz y melón In Vitro	22
4.2.2	Desarrollo de estructuras en plántulas germinadas In Vitro	24
4.2.3	Acumulación de biomasa fresca y seca.....	27
4.3	Experimento No. 2: Imbibición de semillas de maíz y melón en invernadero.....	29

4.3.1 Evaluación del porcentaje de germinación de semillas de maíz y melón en invernadero.....	29
4.3.2 Desarrollo de estructuras en plántulas germinadas en invernadero	31
4.3.3 Acumulación de biomasa fresca y seca.....	35
4.4 Prueba de aspersion de extractos de crucíferas en plántulas de maíz y melón	41
4.4.1 Desarrollo de estructuras en plántulas tratadas con aspersiones de extractos de crucíferas	41
4.4.2 Acumulación de biomasa fresca y seca.....	45
V. CONCLUSIÓN	51
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de germinación de semillas de melón con Seed priming de extractos de Crucíferas	23
Figura 2. Porcentaje de germinación de semillas de maíz, con Seed priming con extractos de Crucíferas	23
Figura 3. Valores medios de la Longitud de Radícula de plántulas de melón (A y B) y maíz (C y D) por efecto de la aplicación de diferentes extractos de Crucíferas.....	25
Figura 4. Valores medios de la Longitud de Plúmula (Altura Aérea) de plántulas de melón y maíz por efecto de la aplicación de diferentes extractos de crucíferas.....	26
Figura 5. Medias estadísticas del Peso Fresco y Peso Seco de plántulas de melón por efecto de la aplicación de extractos de Crucíferas.....	27
Figura 6. Medias estadísticas del Peso Fresco y Peso Seco en plántulas de melón por efecto de la aplicación de extractos de Crucíferas	28
Figura 7. Porcentaje de germinación de semillas de melón inbibidas en extractos de crucíferas bajo condiciones de invernadero	29
Figura 8. Porcentaje de germinación de semillas de maíz inbibidas en extractos de crucíferas bajo condiciones de invernadero	30
Figura 9. Comportamiento de las medias estadísticas de la longitud de radícula en plántulas de melón y maíz inbibidas en extractos de crucíferas bajo condiciones de invernadero.....	32
Figura 10. Comportamiento de las medias estadísticas de la longitud de plúmula en plántulas de melón y maíz inbibidas en extractos de crucíferas bajo condiciones de invernadero.....	33
Figura 11. Número de hojas verdaderas desarrolladas en plántulas de melón, como efecto de la imbibición de semillas en extracto de crucíferas.....	34
Figura 12. Comportamiento de diámetro de tallo en plántula de melón y maíz tratadas con extracto de crucíferas por imbibición, en condiciones de invernadero.....	35
Figura 13. Medias estadísticas de la acumulación de biomasa fresca en plúmula de plántulas de melón y maíz bajo condiciones de invernadero	36
Figura 14. Medias estadísticas de la acumulación de biomasa fresca en plúmula de plántulas de melón y maíz bajo condiciones de invernadero	37
Figura 15. Medias estadísticas de la acumulación de biomasa fresca en radícula de plántulas de melón y maíz bajo condiciones de invernadero	39
Figura 16. Medias estadísticas de la acumulación de biomasa seca en radícula de plántulas de melón y maíz bajo condiciones de invernadero	40
Figura 17. Comportamiento de los valores medios de la longitud de raíz en plántulas de maíz y melón tratadas con aspersiones de extractos de crucíferas.....	41
Figura 18. Medias estadísticas de la altura de planta de maíz y melón tratada con aspersiones de extracto de crucíferas.....	43
Figura 19. Media estadística del número de hojas verdaderas desarrolladas en plántula de melón con prueba de aspersiones foliar de extractos de crucíferas	44
Figura 20. Comportamiento de los valores medios del diámetro de tallo en plántula de melón y maíz en prueba de aspersiones de extractos de crucíferas.....	45

Figura 21. Comportamiento de la media estadística del peso fresco de la parte aérea de plántula de melón y maíz en prueba aspersión foliar con extractos de crucíferas	46
Figura 22. Comportamiento de las medias estadísticas de peso seco aéreo en plántula de melón y maíz asperjadas con extractos de crucíferas	47
Figura 23. Comportamiento de las medias estadísticas de peso fresco en raíz de plántula de maíz y melón asperjadas con extractos de crucíferas	48
Figura 24. Comportamiento medio de la variable peso seco de raíz, en plántula de melón y maíz asperjadas con extractos de crucíferas	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Método de cuantificación de metabolitos en extractos de cultivos evaluados.....	15
Tabla 2. Tratamientos aplicados mediante Seed priming en semillas de melón Y maíz cultivadas In Vitro	17
Tabla 3. Determinación de la concentración ideal de extractos de Crucíferas para aplicación foliar	19
Tabla 4. Variables evaluadas en plántulas de maíz y melón con tratamientos foliares.....	19
Tabla 5. Valores medios del contenido de compuestos químicos en los extractos de Crucíferas estudiadas	21

RESUMEN

Los bioestimulantes se definen como sustancias o microorganismos que, al ser aplicados a las plantas, estimulan procesos naturales para mejorar la absorción de nutrientes, la tolerancia al estrés abiótico y la calidad de los cultivos. Diversos estudios han demostrado que los extractos vegetales, particularmente los derivados de cultivos crucíferos como brócoli, repollo y coliflor, funcionan como bioestimulantes eficaces debido a su riqueza en compuestos bioquímicos, incluyendo glucosinolatos, isotiocianatos, antioxidantes, fenoles y flavonoides. Estos compuestos son conocidos por promover el crecimiento vegetal, mejorar la resistencia a condiciones adversas y activar mecanismos de defensa en las plantas.

El objetivo principal de este estudio fue evaluar el impacto de los extractos de las crucíferas aplicados mediante seed priming e imbibición sobre la germinación de semillas, desarrollo de plantas de maíz (*Zea mays*) y melón (*Cucumis melo*), para evaluar sus características bioquímicas y cómo influyen en variables como la tasa de germinación, el crecimiento radicular, altura de plúmula, diámetro de tallo y biomasa. Se trabajó con tres experimentos: prueba de germinación con seed priming, germinación en invernadero por imbibición y aplicaciones foliares en plántula, examinando características morfológicas en los extractos, porcentajes de germinación, longitud de raíz y desarrollo de plúmula, biomasa y otras características.

Se obtuvieron resultados favorables sobresaliendo los extractos etanólicos de brócoli ya que incrementaron significativamente la tasa de germinación, el desarrollo radicular, peso fresco y seco de las plántulas. Las aplicaciones foliares ayudaron en el crecimiento y vigor de las plántulas, por lo que se procede a destacar a las crucíferas como buenos bioestimulantes en sistemas de agrícolas sostenible y promueve una alternativa ante el uso de agroquímicos contribuyendo a una agricultura más ecológica.

Palabras clave: agricultura sostenible, características morfológicas, extractos botánicos, germinación, plántulas, seed priming.

ABSTRACT

Biostimulants are defined as substances or microorganisms that, when applied to plants, stimulate natural processes to improve nutrient uptake, enhance tolerance to abiotic stress, and increase crop quality. A growing body of research indicates that plant extracts—especially those derived from cruciferous crops such as broccoli, cabbage, and cauliflower—are highly effective biostimulants. Their effectiveness is primarily attributed to their abundance of bioactive compounds, including glucosinolates, isothiocyanates, antioxidants, phenols, and flavonoids. These compounds promote plant growth, enhance resistance to adverse conditions, and activate plant defense mechanisms.

The primary objective of this study was to evaluate how cruciferous extracts, applied through seed priming and imbibition, influence seed germination and subsequent development of maize (*Zea mays*) and melon (*Cucumis melo*) plants. The evaluation focused on their biochemical characteristics and their effects on variables such as germination rate, root growth, plumule height, stem diameter, and biomass. Three experiments were conducted: germination test with seed priming, germination in a greenhouse through imbibition, and foliar applications on seedlings. These experiments examined the morphological characteristics of the extracts and measured germination percentages, root length, plumule development, biomass, and other growth parameters.

The results were encouraging, with ethanol-based broccoli extracts showing a particularly strong positive impact. These extracts significantly improved germination rates, root development, and fresh and dry seedling weight. Foliar applications further enhanced seedling growth and vigor. Thus, cruciferous crop extracts are highlighted as effective biostimulants that support more sustainable agricultural practices. They present a viable alternative to conventional agrochemicals, helping to foster an agriculture that is both productive and environmentally responsible.

Keywords: Botanical extracts, germination, morphological characteristics, *seed priming*, sustainable agriculture,

I. INTRODUCCIÓN

Reconociendo la necesidad de establecer un marco legal para la comercialización y regulación de estos productos, el Consejo Europeo de la Industria de Bioestimulantes (EBIC, 2012) definió a los bioestimulantes vegetales como "conteniendo sustancias y/o microorganismos cuya función al ser aplicados a las plantas o la rizósfera es estimular procesos naturales para mejorar o beneficiar la absorción de nutrientes, la eficiencia de los mismos, la tolerancia al estrés abiótico y la calidad del cultivo" (Brown & Saa, 2015).

El impacto negativo de la emergencia climática sobre la seguridad alimentaria resulta de las modificaciones en los extremos de temperatura y la distribución de precipitaciones y humedad atmosférica que ya estamos viviendo desde hace años, los cuales generan diversos estreses en los cultivos. "El uso de bioestimulantes y el desarrollo del conocimiento sobre la bioestimulación forman parte de la transición hacia una agricultura sostenible. Se espera que la cada vez mayor aplicación de bioestimulantes en el sector agrícola aumente por una parte la inocuidad y la calidad nutricional de los alimentos producidos en los campos agrícolas y que, por otro lado, en conjunción con otras técnicas de producción sustentable, pueda mitigar la magnitud de la huella ambiental asociada a la producción de los alimentos para un número creciente de humanos" (Benavides Mendoza & Fuentes Lara, 2022, p. 6).

En diversos estudios de campo se ha observado la eficacia de los residuos o esquilmos de diferentes plantas del género *Brassica* incorporados al suelo para el control de *Fusarium* sp., sin embargo, su aplicación implica usar las plantas de *Brassic*as, como cultivo de rotación, lo cual se dificulta en el sistema de agricultura protegida, por la poca disponibilidad de tiempo (Sandoval Ortiz, 2022).

Destacan los cultivos de *Brassica oleracea* L., por su bajo contenido en grasas, su alta proporción de agua y una gran diversidad de vitaminas y minerales. Asimismo, presentan un elevado contenido en fotoquímicos, como los glucosinolatos, beneficiosos para la salud. Éstos son un grupo de metabolitos secundarios, pertenecientes a los vegetales de la familia de las crucíferas y derivados de aminoácidos (Carvajal Alcaraz et al., 2023).

La presente investigación se enfoca en el deshidratado de esquilmos de diversas crucíferas (brócoli, repollo y coliflor) para lograr una extracción líquida y evaluar el efecto de estas extracciones en la germinación de semillas mediante aplicaciones foliares y "seed priming". Se pretende observar cómo los glucosinolatos afectan el proceso de germinación y contribuyen a la resistencia al estrés abiótico. Además, se explora el potencial del contenido de azufre en *Brassica oleracea* L., utilizado tradicionalmente en la agricultura para el control de enfermedades fúngicas, y su posible influencia en la resistencia de las semillas. En el contexto actual de la agricultura, la búsqueda de métodos que optimicen el rendimiento de los cultivos y mejoren su resistencia a diversas adversidades ha impulsado el interés en el uso de bioestimulantes. Entre estos, los subproductos de las crucíferas han emergido como una potencial herramienta para incrementar la eficiencia agrícola. Sin embargo, el grado exacto en que estos subproductos pueden beneficiar a las plantas, al ser utilizados como bioestimulantes, sigue siendo objeto de investigación.

Este estudio se centra en evaluar los efectos de los subproductos de las crucíferas en las plantas, con el objetivo de determinar hasta qué punto pueden contribuir al mejoramiento de su desarrollo. Además, se investiga si la aplicación de estos subproductos como bioestimulantes podría tener implicaciones negativas en el desarrollo bioquímico y físico de las plantas. La investigación busca ampliar el conocimiento sobre la efectividad y seguridad de los bioestimulantes derivados de las crucíferas, contribuyendo así a una comprensión más profunda de sus posibles aplicaciones en la agricultura sostenible

Justificación

La investigación de los extractos de la familia Brassicaceae en la germinación de semillas de melón y maíz se centra en su aplicación, tanto foliar como en "seed priming", con el objetivo de estimular la resistencia de las plantas frente al estrés abiótico. La importancia de este estudio radica en la posibilidad de mejorar la resiliencia y el rendimiento de cultivos clave mediante la aplicación de extractos naturales, contribuyendo así a prácticas agrícolas más sostenibles y eficaces.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto bioestimulante de extractos de especies de Brassicaceae en la germinación y el crecimiento de plántulas de maíz (*Zea mays*) y melón (*Cucumis melo*) mediante aplicaciones de "seed priming" y foliares.

Objetivos específicos

1. Determinar el efecto de los extractos de crucíferas en la tasa de germinación de semillas de maíz y melón bajo diferentes condiciones de "seed priming".
2. Evaluar el impacto de las aplicaciones foliares de extractos de crucíferas en el crecimiento morfológico de plántulas de maíz y melón, incluyendo altura, biomasa y desarrollo radicular.
3. Analizar la relación entre la concentración de extractos de crucíferas y la actividad enzimática relacionada con el crecimiento y desarrollo de plántulas de maíz y melón.
4. Investigar la relación entre los compuestos bioactivos presentes en los extractos de crucíferas y su capacidad para estimular el crecimiento de plántulas.
5. Comparar la eficacia de diferentes especies de crucíferas en la mejora de parámetros de crecimiento y desarrollo en plántulas de maíz y melón bajo tratamientos de "seed priming" y foliares.

Hipótesis

Los subproductos derivados de especies de Brassicaceae actuarán como bioestimulantes, promoviendo la germinación de semillas y el desarrollo inicial de plántulas, mejorando así su crecimiento y vigor.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Introducción a las Crucíferas

2.1.1 Características generales de las plantas de la familia Brassicaceae.

La familia Brassicaceae, comúnmente conocida como crucíferas, abarca más de 3,700 especies distribuidas en 338 géneros, lo que la convierte en un grupo taxonómico amplio y diverso. Según Shankar et al. (2019), las plantas del género *Brassica* son reconocidas como las más antiguas cultivadas por el ser humano, con registros de cultivo que se remontan al 1500 a.C. Esta larga historia de domesticación subraya la importancia cultural y alimentaria de estas especies.

El consumo de vegetales de *Brassica* es significativo a nivel mundial; se estima que una persona consume aproximadamente 6.3 kg de estos vegetales al año. Dentro de la familia Brassicaceae, se destacan productos de gran relevancia nutricional, tales como el brócoli, las coles de Bruselas, el kale, la mostaza, el repollo, los nabos, la coliflor, el bok choy y el repollo chino. Estos vegetales son reconocidos por su alto contenido en fitoquímicos y vitamina C, contribuyendo así a su popularidad en la dieta humana (Shankar et al., 2019). Además, su notable adaptabilidad ambiental ha facilitado su cultivo y consumo en diversas regiones del mundo. Muchas especies de esta familia se utilizan en la medicina tradicional y en la gastronomía, siendo consideradas también como alimentos funcionales.

Con el fin de mejorar los fitoquímicos que ofrecen beneficios para la salud y aumentar la tolerancia a herbicidas, insectos, plagas del suelo y enfermedades, estas plantas se han incorporado en programas de mejoramiento extensivo. Estos programas tienen como objetivo desarrollar rasgos de valor agregado de interés agronómico (Shankar et al., 2019), lo que resalta la relevancia de la investigación en esta área para contribuir a la sostenibilidad y eficiencia agrícola.

Las hortalizas de la familia Brassicaceae tienen una distribución amplia a nivel mundial, encontrándose en todos los continentes excepto en la Antártida. Según Ramírez et al. (2020), una de las características más destacadas de esta familia botánica es la presencia de diversos metabolitos secundarios que confieren un sabor distintivo y poseen bioactividades interesantes. Entre los metabolitos más estudiados se incluyen los glucosinolatos (GSL) y sus productos de descomposición, como los isotiocianatos y los indoles. Asimismo, estas especies son ricas en compuestos fenólicos, carotenoides y otros grupos de compuestos menos estudiados, como fitoalexinas, terpenos, fitoesteroles y tocoferoles (Ramírez et al., 2020).

2.1.2 Composición química de las crucíferas

Glucosinolatos

Los glucosinolatos son compuestos secundarios ampliamente distribuidos en la familia Brassicaceae, especialmente en el género *Brassica*. Su estructura química

presenta una unidad común conocida como β -D-1-tioglucopiranososa, con el moiety $C_6H_{11}O_5S$, y pueden clasificarse en tres grupos principales: alifáticos, aromáticos e indólicos. Esta clasificación se basa en su origen, pues derivan de aminoácidos alifáticos (metionina, alanina, valina, leucina e isoleucina), aromáticos (tirosina y fenilalanina) o del triptófano (Sun, Zhang, & Chen, 2016).

Entre los compuestos organosulfurados en las crucíferas, los glucosinolatos (GSL) destacan por su papel crucial en las características sensoriales de estas verduras. Estos glucósidos azufrados se liberan al interrumpirse el tejido de la planta, generando productos de descomposición responsables de los sabores intensos y, a menudo, amargos. En el reino vegetal se han identificado más de 120 tipos de glucosinolatos, de los cuales unos 96 se encuentran específicamente en la familia Brassicaceae, siendo varios exclusivos de ciertos géneros o especies (Ramírez et al., 2020).

Aunque los GLSs no son compuestos tóxicos por sí mismos, cuando los tejidos se dañan y pierden compartimentalización celular, las moléculas de GLSs se encuentran con la enzima mirosinasa, la cual los hidroliza, produciendo una aglicona inestable que se transforma espontáneamente en compuestos biológicamente activos como tiocianatos, isotiocianatos (ITCs) y nitrilos. Esta transformación depende de factores como el pH de la célula, la concentración de hierro y las cadenas laterales de los GLSs (Báez-Flores, *et al.*, 2008).

Isotiocianatos

Los isotiocianatos (ITCs) son compuestos derivados del hidrólisis de los glucosinolatos y se consideran responsables de muchos de los efectos protectores observados en las crucíferas (Mithen, 2001; Traka et al., 2010). Entre los ITCs más estudiados se encuentran el 1-ITC-4-(metilsulfinil)-butano, conocido como sulforrafano (SF), el 4-(metiltio) butil ITC o erucina (ER), y el 3-metilsulfinilpropil-ITC, denominado iberina (IB). Estos compuestos se forman a partir del hidrólisis de la glucorrafanina, glucoerucina y glucoiberina, respectivamente (Jadhav et al., 2007). A diferencia de la mayoría de los ITCs, el SF es el más hidrofílico y contribuye poco al sabor, lo que lo convierte en el ITC más extensamente estudiado para descifrar los mecanismos implicados en sus efectos beneficiosos para la salud (Villatoro Pulido, 2011, p. 29).

Adicionalmente, los isotiocianatos poseen una notable actividad antifúngica y son producidos por las Brassicas como parte de su sistema de defensa. Estos compuestos emergen como una alternativa prometedora a los productos químicos tradicionales en el control de infecciones fúngicas en productos agrícolas. Asimismo, es importante destacar que las plantas producen metabolitos secundarios que cumplen diversas funciones, incluyendo su participación en mecanismos de defensa contra depredadores y como sustancias de reserva (Baez-Flores *et al.*, 2008).

El mecanismo mediante el cual los isotiocianatos inhiben el crecimiento de hongos y otros microorganismos no se comprende completamente. No obstante, se han propuesto varias hipótesis que sugieren que los ITCs pueden inactivar enzimas intracelulares a través de la degradación oxidativa de los puentes disulfuro, la inhibición de enzimas metabólicas mediada por el radical tiocianato, así como la desacoplación de la fosforilación oxidativa (Baez-Flores, *et al.*, 2008).

Carotenoides

Además de los glucosinolatos e isotiocianatos, las crucíferas son reconocidas por su riqueza en carotenoides, pigmentos accesorios que se localizan en las estructuras fotosintéticas, principalmente en la membrana de los tilacoides y en la envoltura de los cloroplastos. Los carotenoides predominantes en los cloroplastos de las plantas superiores y las microalgas son el α -caroteno, β -caroteno, luteína, violaxantina, zeaxantina y neoxantina (Villatoro Pulido, 2011,).

En los tejidos humanos, se distinguen dos grupos estructurales de carotenoides. Por un lado, los carotenoides oxigenados, como la luteína, violaxantina, neoxantina y zeaxantina, se conocen como xantófilas; por otro lado, los carotenoides hidrocarbonados, que incluyen β -caroteno, α -caroteno y licopeno, son clasificados como carotenos (Botella-Pavía & Rodríguez-Concepción, 2006; Flores-Pérez & Rodríguez-Concepción, 2012; Brazaityté *et al.*, 2015).

Los carotenoides desempeñan funciones esenciales para la salud humana, que incluyen la eliminación de radicales libres, el fortalecimiento del sistema inmunológico, la supresión del desarrollo del cáncer y la protección de los tejidos oculares. Sin embargo, es importante destacar que cada carotenoide tiene funciones protectoras distintas (Botella-Pavía & Rodríguez-Concepción, 2006; Kopsell & Kopsell, 2006; Brazaityté *et al.*, 2015).

Dado que los carotenoides están íntimamente relacionados con el proceso de fotosíntesis, los factores más significativos que influyen en las variaciones de su contenido son la cantidad y calidad de luz a la que se someten las plantas (Kopsell & Kopsell, 2006; Brazaityté *et al.*, 2015).

2.1.3 Propiedades Nutricionales y Beneficios para la Salud de las Crucíferas

Ungureanu, Fierascu y Fierascu (2022) destacan el valor nutricional de varias especies crucíferas, resaltando sus beneficios para la salud. El brócoli, por ejemplo, es un vegetal con un contenido significativo de glucosinolato, el cual se convierte en sulforafano en el organismo. Este compuesto ayuda a inhibir el crecimiento de células cancerosas y a eliminar toxinas de las células pulmonares, incluyendo

sustancias nocivas de contaminantes y el humo de cigarrillo. Tanto el tallo como las flores del brócoli son comestibles, lo que contribuye a su alto valor nutricional.

Por otro lado, el repollo se describe como un vegetal de bajo contenido calórico pero rico en vitamina C, especialmente en sus hojas exteriores. También contiene vitamina E, provitamina A y vitaminas del grupo B. Su fibra dietética, compuesta principalmente de celulosa y hemicelulosa, es conocida por estimular el sistema digestivo y ayudar a prevenir el estreñimiento, aunque puede causar intolerancias intestinales en algunas personas. Las variedades de repollo más consumidas son el repollo blanco y el rojo, los cuales pueden disfrutarse crudos, cocidos o en encurtidos (Ungureanu et al., 2022).

Finalmente, la coliflor es otro ejemplo de crucífera con importantes propiedades nutricionales. Su estructura está formada por numerosos ramos blancos unidos a un solo tallo, y aunque la coliflor blanca es la más común, existen variedades en tonos verde oscuro, morado, anaranjado, e incluso la variedad romana "Chartreuse Romanesco." La coliflor aporta vitamina C y un conjunto de vitaminas del complejo B, como ácido fólico, ácido pantoténico (B5), piridoxina (B6), tiamina (B1), niacina (B3) y vitamina K, las cuales son esenciales para el organismo, especialmente en la reposición de reservas necesarias para el adecuado funcionamiento corporal. Estas características le confieren un papel en la reducción de riesgos de cáncer y enfermedades cardiovasculares, al disminuir los niveles de triglicéridos y colesterol (Ungureanu et al., 2022).

2.1.4 Usos tradicionales y aplicaciones agrícolas de las crucíferas

El uso de insecticidas botánicos se ha consolidado como una estrategia eficaz en el manejo de plagas agrícolas. Según Mayanglambam, Singh y Rajashekar (2021), estos insecticidas son compuestos químicos derivados de plantas que poseen propiedades para matar, inhibir y repeler plagas específicas. Su extracción y formulación para uso comercial se han practicado durante dos mil años, y continúan siendo una opción relevante en la agricultura orgánica. Además, algunas plantas repelentes pueden generar sustancias tóxicas que desempeñan un papel crucial en la defensa contra insectos y patógenos.

Por otro lado, Ungureanu, Fierascu y Fierascu (2022) destacan el desarrollo de nuevos métodos para la preparación de nanopartículas, en los cuales se han sustituido reactivos clásicos por extractos de plantas obtenidos en diferentes condiciones. En este contexto, los extractos de vegetales crucíferos se utilizan para la obtención de bio-nano-recubrimientos, lo que subraya la versatilidad y potencial de estos vegetales en aplicaciones nanotecnológicas

2.2 Bioestimulantes en la agricultura

2.2.1 Definición y tipos de bioestimulantes

Bioestimulante

Los bioestimulantes, definidos por Benavides Mendoza (2021) como “cualquier sustancia o microorganismo aplicado a las plantas, independientemente de su contenido de nutrientes, con la meta de mejorar la eficiencia de la nutrición, la tolerancia al estrés abiótico o los caracteres de calidad”, representan una categoría importante de productos que puede incluir mezclas de estas sustancias o microorganismos (Du Jardin, 2015). Este enfoque resalta la importancia de los bioestimulantes en la optimización del crecimiento y desarrollo de las plantas, así como en la mejora de su resistencia a diversas condiciones adversas.

2.2.2 Tipos de bioestimulante

Ácidos húmicos y fúlvicos

Las SH son colecciones de compuestos heterogéneos, originalmente categorizados según su peso molecular y solubilidad en huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. La mayoría de los efectos bioestimulantes de las SH se refieren a la mejora de la nutrición radicular mediante diferentes mecanismos. Uno de ellos es el aumento de la absorción de macro y micronutrientes, debido al incremento de la capacidad de intercambio catiónico del suelo que contiene las SH polianiónicas, y a la mayor disponibilidad de fósforo al interferir las SH con la precipitación de fosfato de calcio" (Du Jardin, 2015,).

Hidrolizados de proteína y otros compuestos que contienen nitrógeno

Las mezclas de aminoácidos y péptidos, obtenidas mediante la hidrólisis química y enzimática de proteínas a partir de subproductos agroindustriales, tanto de fuentes vegetales como de desechos animales, presentan efectos directos sobre las plantas. Según Du Jardin (2015), estas mezclas modulan la absorción y asimilación de nitrógeno (N), regulando las enzimas involucradas en su asimilación y actuando sobre las vías de señalización de adquisición de N en las raíces. Además, contribuyen a la interacción entre los metabolismos de carbono y nitrógeno al regular enzimas del ciclo del ácido tricarbóxico (TCA). Se ha observado que los hidrolizados de proteínas aumentan la biomasa y la actividad microbiana, así como la fertilidad del suelo. Las actividades quelantes y de complejación de aminoácidos y péptidos específicos facilitan la disponibilidad y adquisición de nutrientes por parte de las raíces. Sin embargo, existe una creciente preocupación por la seguridad de utilizar hidrolizados de proteínas derivados de subproductos animales en la cadena alimentaria (Du Jardin, 2015; Calvo et al., 2014; Halpern et al., 2015).

Extracto de algas marinas y botánicos

El uso de algas frescas como fuente de materia orgánica y fertilizante ha sido una práctica antigua en la agricultura, aunque los efectos bioestimulantes han sido registrados recientemente. Este interés renovado ha impulsado el uso comercial de extractos de algas y compuestos purificados, incluyendo polisacáridos como laminarina, alginatos y carragenanos, así como sus productos de descomposición. En suelos, los polisacáridos presentes en las algas contribuyen a la formación de

geles, mejorando la retención de agua y la aireación del suelo. Además, estos compuestos polianiónicos favorecen la fijación e intercambio de cationes, lo cual es relevante para la remediación de metales pesados en el suelo. También se han documentado efectos positivos a través de la microflora del suelo, promoviendo bacterias que favorecen el crecimiento de las plantas y antagonizan a los patógenos en suelos supresivos. En términos nutricionales, los extractos de algas proporcionan tanto micro como macronutrientes, actuando efectivamente como fertilizantes, además de cumplir otras funciones. Los impactos en la germinación de semillas, el establecimiento de plantas y su crecimiento y desarrollo posteriores están relacionados con efectos hormonales, los cuales se consideran una de las principales causas de la actividad bioestimulante en cultivos. Asimismo, se han reportado efectos anti-estrés, donde tanto los compuestos protectores dentro de los extractos de algas como los antioxidantes y reguladores de genes sensibles al estrés desempeñan un papel importante (Du Jardin, 2015, p. 5; Calvo et al., 2014).

Quitosan y biopolímeros

Los oligómeros de quitosano presentan efectos fisiológicos significativos en las plantas, derivados de su capacidad policatiónica para unirse a diversos componentes celulares, tales como ADN, membrana plasmática y elementos de la pared celular. Esta unión también ocurre con receptores específicos que están involucrados en la activación de genes de defensa, actuando de manera similar a los elicitores de defensa de las plantas (El Hadrami et al., 2010; Hadwiger, 2013; Katiyar et al., 2015; Yin et al., 2010; Du Jardin, 2015). Las interacciones del quitosano con receptores celulares han mostrado como consecuencia la acumulación de peróxido de hidrógeno y la fuga de Ca^{2+} en el interior celular, lo que puede inducir cambios fisiológicos significativos, dado que estos factores son fundamentales en la señalización de respuestas al estrés y en la regulación del desarrollo. Por lo tanto, las aplicaciones agrícolas del quitosano han evolucionado con el tiempo, enfocándose inicialmente en la protección de las plantas contra patógenos fúngicos, pero ampliándose a usos relacionados con la tolerancia al estrés abiótico (como la sequía, salinidad y estrés por frío) y las características de calidad asociadas a los metabolismos primarios y secundarios (Du Jardin, 2015).

Compuestos inorgánicos

En el ámbito agrícola, se identifican cinco elementos beneficiosos clave: aluminio (Al), cobalto (Co), sodio (Na), selenio (Se) y silicio (Si). Estos elementos están presentes tanto en los suelos como en las plantas, y se encuentran en diversas formas, incluyendo sales inorgánicas y la sílice amorfa ($SiO_2 \cdot nH_2O$), que es común en especies gramíneas. Según diversos estudios, estos elementos desempeñan un papel fundamental al favorecer el crecimiento de las plantas, mejorar la calidad de los productos vegetales y aumentar la tolerancia de las plantas frente al estrés abiótico (Du Jardin, 2015,).

Hongos beneficiosos

Los hongos establecen diferentes tipos de interacciones con las raíces de las plantas, que pueden variar desde relaciones mutualistas, donde ambos organismos se benefician, hasta parasitismo (Behie y Bidochka, 2014). Entre estos, los hongos micorrizicos representan un grupo diverso que forma simbiosis con más del 90 % de las especies vegetales. Dentro de estas interacciones, las micorrizas arbusculares (AMF) son un tipo común de endomicorriza asociada con cultivos y plantas hortícolas. En este caso, las hifas de los hongos pertenecientes al grupo Glomeromycota penetran las células corticales de las raíces, formando estructuras ramificadas conocidas como arbusculos (Bonfante y Genre, 2010; Behie y Bidochka, 2014).

Los productos elaborados a partir de hongos, que se aplican a las plantas con el objetivo de mejorar la eficiencia nutricional, aumentar la tolerancia al estrés, y optimizar el rendimiento y la calidad de los cultivos, pueden ser clasificados como bioestimulantes (Du Jardin, 2015,). A diferencia de las especies micorrízicas, algunos de estos hongos tienen la capacidad de vivir al menos una parte de su ciclo vital separados de la planta, para luego colonizar las raíces y transferir nutrientes a sus hospedadores, utilizando mecanismos que aún no se comprenden completamente (Behie y Bidochka, 2014; Du Jardin, 2015,).

Particularmente, ciertos hongos, como las especies de *Trichoderma*, han sido objeto de extensos estudios debido a sus propiedades biopesticidas y de biocontrol, actuando como inductores de resistencia a enfermedades, así como su utilización como fuentes de enzimas en la industria biotecnológica (Mukherjee et al., 2012; Nicolás et al., 2014). Estos endófitos fúngicos pueden ser considerados bioestimulantes, aunque su aplicación en la agricultura se basa principalmente en sus capacidades como biopesticidas (Du Jardin, 2015,).

Bacterias beneficiosas

Las interacciones entre las bacterias y las plantas se manifiestan de diversas formas (Ahmad et al., 2008). Estas interacciones pueden variar desde el mutualismo hasta el parasitismo, similar a las relaciones que establecen los hongos. Además, las bacterias pueden habitar en diferentes nichos, que van desde el suelo hasta el interior de las células vegetales, incluyendo espacios intermedios como la rizosfera y el rizoplano. Las asociaciones bacterianas pueden ser tanto transitorias como permanentes, y algunas bacterias tienen la capacidad de ser transmitidas de manera vertical a través de las semillas. Las funciones que estas bacterias desempeñan son fundamentales para la vida de las plantas, ya que participan en ciclos biogeoquímicos, suministran nutrientes, aumentan la eficiencia en el uso de los mismos, inducen resistencia a enfermedades, mejoran la tolerancia al estrés abiótico y modulan la morfogénesis mediante reguladores del crecimiento vegetal.

En el ámbito agrícola, los bioestimulantes se clasifican en dos grupos principales según su diversidad taxonómica, funcional y ecológica: (i) los endosimbiontes mutualistas como *Rhizobium* y (ii) las PGPR (bacterias promotoras del crecimiento vegetal) que residen en la rizosfera. Los taxones de *Rhizobium* y otros relacionados

son comercializados como biofertilizantes, actuando como inoculantes microbianos que facilitan la adquisición de nutrientes por parte de las plantas (Du Jardin, 2015).

2.2.3 Beneficios del uso de los bioestimulantes en los cultivos agrícolas

La búsqueda de nuevas tecnologías y enfoques que aumenten la productividad de los cultivos, tanto en condiciones óptimas como subóptimas, es fundamental para asegurar la seguridad alimentaria. Al mismo tiempo, es vital mejorar la eficiencia en el uso de recursos como el agua y los fertilizantes, lo que contribuye a la preservación de la calidad del suelo y genera oportunidades de negocio para los agricultores (Rouphael & Colla, 2020).

En este contexto, los bioestimulantes vegetales se definen a partir de cuatro funciones agrícolas clave. Según Rouphael y Colla (2020), estos productos son clasificados como "fertilizantes de la UE cuya función es estimular los procesos de nutrición de las plantas, independientemente de su contenido de nutrientes. Su objetivo es mejorar uno o más de los siguientes aspectos: (1) la eficiencia en el uso de nutrientes, (2) la resistencia a estresores bióticos, (3) las características de calidad, o (4) la disponibilidad de nutrientes en el suelo o la rizosfera".

2.3 Efectos de los extractos de crucíferas en el desarrollo de las plantas

2.3.1 Estudios sobre el efecto de los extractos de crucíferas en el crecimiento vegetal

La salud y el desarrollo de las plantas representan aspectos fundamentales en la agricultura, siendo el diámetro del tallo uno de los parámetros más relevantes para evaluar su crecimiento y vigor. Según Pérez Piceno (2021), "el diámetro de los tallos es un indicador del crecimiento y vigor de las plantas. Generalmente, existe una relación directa entre el diámetro de tallo, la altura y el peso de la planta" (p. 21). En particular, se ha observado que los subproductos de coliflor favorecen un mayor diámetro de tallo, lo cual sugiere que estos extractos pueden activar mecanismos de defensa en las plantas, especialmente en condiciones donde se ve afectada la zona radicular, promoviendo la formación de raíces en el tallo por encima de los tejidos dañados.

Por otra parte, los extractos derivados de crucíferas ofrecen beneficios significativos en la protección contra patógenos. Pérez Piceno (2021) señala que "los extractos etanólico, acuoso y polvos deshidratados de brócoli, coliflor y repollo suprimieron el desarrollo de *Fusarium oxysporum* en el cultivo de tomate, debido a que redujeron la incidencia y severidad. Además, favorecieron el desarrollo del cultivo, el rendimiento y la calidad del fruto". Estos resultados subrayan el potencial de los bioestimulantes obtenidos de crucíferas para promover el crecimiento saludable de las plantas, al tiempo que contribuyen a mitigar el impacto de enfermedades agrícolas.

2.3.2 Mecanismos de defensa inducidos por extractos de crucíferas en los cultivos

Diversos estudios respaldan la efectividad de los subproductos derivados de crucíferas para suprimir patógenos como *Fusarium oxysporum*, uno de los principales responsables de enfermedades en cultivos de tomate. Según Sandoval Ortiz (2022), la aplicación de estos subproductos resultó en una reducción significativa tanto de la incidencia como de la severidad de la infección. Además, se observó que su uso estimuló la actividad de enzimas clave relacionadas con la defensa de las plantas, como la fenilalanina amonio liasa (PAL), la quitinasa y la β -1,3-glucanasa, lo que indica un mecanismo combinado de bioestimulación y biocontrol.

La investigación destacó que los extractos etanólicos mostraron ser los más efectivos como bioestimulantes, mientras que los polvos elaborados a partir de estos subproductos representaron una alternativa viable para su aplicación en campo. Entre las especies evaluadas, el brócoli sobresalió como la fuente más eficiente de subproductos con propiedades bioactivas (Sandoval Ortiz, 2022).

2.4 Fisiología de semillas de maíz y melón

2.4.1 Descripción de las etapas de germinación del maíz

La germinación es un proceso esencial para que las semillas de maíz se conviertan en plántulas viables capaces de establecerse y crecer de manera autónoma. Este proceso involucra una serie de etapas fisiológicas y morfogenéticas que activan el embrión y permiten su crecimiento. Suárez y Melgarejo (2010) señalan que estas etapas incluyen: i) la absorción de agua o imbibición; ii) la activación metabólica, con procesos como la respiración, síntesis de proteínas y movilización de reservas; y iii) la elongación del embrión, que culmina con la ruptura de la testa y la emergencia de la radícula (Martínez de la Cruz, 2018).

La imbibición es particularmente relevante en este proceso. Al entrar en contacto con un sustrato húmedo, la semilla de maíz absorbe agua y comienza a hincharse, proceso que se ve acelerado en ambientes cálidos y húmedos, como los tropicales. Esto permite que la germinación inicie en tan solo dos o tres días. En esta etapa, la coleorriza se alarga y atraviesa el pericarpio, permitiendo la salida de la radícula. A partir de ahí, se desarrollan de tres a cuatro raíces seminales, mientras que en el extremo opuesto de la semilla la plúmula, protegida por el coleoptilo, emerge gracias a la elongación del mesocotilo, el cual desempeña un papel crucial en el establecimiento de la plántula (Paliwal et al., 2001).

2.4.2 Importancia del mesocotilo en el desarrollo inicial

El mesocotilo es una estructura clave para el éxito de la plántula, ya que facilita la emergencia de la plúmula hacia la superficie del suelo. Su elongación permite que el coleoptilo salga al exterior, protegiendo la plúmula durante las etapas iniciales del

desarrollo. Además, su alta plasticidad en la tasa de crecimiento le permite adaptarse a condiciones ambientales variables, lo que resulta fundamental para el establecimiento exitoso del maíz en diversos entornos (Paliwal et al., 2001; Martínez de la Cruz, 2018).

2.4.3 Descripción de las etapas de germinación del melón

La germinación es un proceso fundamental que involucra la absorción de agua, la reactivación del metabolismo y el inicio del crecimiento del embrión de la semilla (Pérez, 2007). Este proceso se divide en tres fases, según lo descrito por Contreras (2012). En la primera fase, conocida como imbibición, la semilla absorbe agua; en la segunda fase, se activa el metabolismo, lo que favorece la síntesis de ácidos nucleicos y proteínas, así como un aumento en las actividades enzimáticas y la degradación de reservas energéticas; finalmente, en la tercera fase, ocurre la emergencia de la radícula, completando así el proceso de germinación. González Montenegro (2021) señala la importancia de entender estos procesos para evaluar el impacto de diferentes factores en la germinación de semillas, como en su estudio sobre el efecto de las concentraciones de agua de mar en el crecimiento de melón.

2.4.4 Tolerancia al estrés abiótico el maíz

El maíz es uno de los cultivos más importantes a nivel global, pero su desarrollo es especialmente sensible al estrés abiótico, como la sequía, la salinidad y las temperaturas extremas. En este contexto, se ha identificado que la trealosa desempeña un papel esencial como mediador frente a diferentes condiciones adversas, incluyendo el estrés osmótico y las variaciones extremas de temperatura. Su función en la adaptación de las plantas a estos estreses ha sido ampliamente documentada (Acosta Pérez, 2020).

2.4.5 Tolerancia al estrés abiótico el melón

Los estreses abióticos, como la humedad, la temperatura y la luz, afectan significativamente a las plantas superiores, lo que provoca diferencias en la producción de biomasa entre diversas especies. En este contexto, se ha observado que la sacarosa juega un papel esencial en la distribución de CO₂ en la planta, lo que resalta la importancia de realizar un monitoreo constante de los cambios ambientales (Tofiño et al., 2007). Por otro lado, se ha identificado que los reguladores de crecimiento pueden ayudar a las plantas a generar tolerancia frente al estrés abiótico, especialmente en condiciones de salinidad y sequía, aunque se reconoce que es necesario el uso de estrategias como el mejoramiento genético y herramientas biotecnológicas para mitigar los efectos negativos sobre su desarrollo (Chávez et al., 2012). Asimismo, los avances recientes sugieren que estos enfoques pueden ser clave para mejorar la respuesta de las plantas frente a condiciones adversas (Arroyo, 2023).

2.5 Potencial de los extractos de crucíferas en la agricultura sostenible

2.5.1 Ventajas del uso de bioestimulantes naturales en comparación con fertilizantes químicos

En la actualidad, la búsqueda de prácticas agrícolas sostenibles ha impulsado el desarrollo de regulaciones que restringen el uso de productos agroquímicos sintéticos. Como resultado, se ha incrementado significativamente el uso de productos biológicos, los cuales no solo contribuyen al control de plagas y enfermedades, sino también al mejoramiento de la nutrición de las plantas. Correa Bustos (2021) señala que estos productos biológicos, conocidos como inóculos, poseen propiedades específicas que favorecen el crecimiento vegetal y combaten las plagas sin generar impactos negativos en el medio ambiente ni representar riesgos para la salud humana. Según Ortiz et al. (2018, citado en Correa Bustos, 2021), los inóculos han demostrado ser eficaces y sostenibles en estas funciones clave.

Además de los inóculos, otras alternativas como los extractos de algas y las cianobacterias han ganado relevancia en la agricultura debido a sus propiedades beneficiosas. Correa Bustos (2021) destaca que estos organismos son apreciados por su contenido de nutrientes esenciales y metabolitos con diversas actividades bioactivas. Estas actividades incluyen la mejora de las propiedades del suelo, la protección de los cultivos frente a factores de estrés biótico y abiótico, y la estimulación del crecimiento vegetal a través de fitohormonas. Según Gonçalves (2021, citado en Correa Bustos, 2021), estas características hacen que los extractos de algas y las cianobacterias sean opciones prometedoras como biofertilizantes, bioestimulantes y biopesticidas en la agricultura moderna.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del experimento

El experimento se realizó durante el periodo comprendido entre marzo y agosto de 2024 en las instalaciones del Laboratorio de Fisiología y en un invernadero del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México (25°21' N, 101°02' O; altitud de 1,742 msnm).

3.2 Descripción del proceso experimental

Debido a que el experimento consistió en la aplicación tanto *in vitro* (Seed priming) como en condiciones de campo (Imbibición) y una prueba en campo mediante aspersión foliar (prueba en plántulas) de extractos de *Brassicaceas*, en una primera etapa, se obtuvieron los extractos de los diversos cultivos considerados en la prueba, bajo la metodología descrita más adelante.

La segunda etapa consistió en la aplicación de los extractos obtenidos, en tres pruebas por separado, la primera consistió en la aplicación de los extractos mediante el proceso de seed priming a semillas de maíz y melón en condiciones de laboratorio (*in vitro*), la segunda, empleando los mismos tratamientos pero mediante imbibición de semillas de las mismas especies, llevando las semillas a germinación en condiciones de invernadero y el tercer experimento consistió en la aplicación foliar de los extractos sobre plántulas de maíz y melón que no contaron con el procedimiento de seed priming, cada etapa y/o experimento se detalla en un apartado posterior, respectivamente.

3.3 Elaboración de subproductos

Los subproductos deshidratados de *Brassica oleracea* var. Capitata (repollo), *Brassica oleracea* var. Itálica (brócoli) y *Brassica oleracea* var. Botrytis (coliflor) se obtuvieron a partir de hojas y tallos, mediante un proceso controlado de secado y molienda. Los materiales vegetales fueron secados al aire libre bajo condiciones de exposición solar directa y, una vez secos, fueron triturados y tamizados hasta obtener una granulometría uniforme de 1.0 mm.

Para la obtención de los extractos, se empleó el método de extracción por maceración con agitación, utilizando etanol y metanol al 50% como solventes. Se pesaron 1.250 g de muestra seca de cada una de las especies de brassicas y se colocaron en matraces Erlenmeyer de 250 mL. A cada matraz se le adicionaron 62.5 mL de la solución etanólica o metanólica al 50%. Las muestras fueron sometidas a agitación manual durante el proceso de maceración, manteniéndolas en reposo durante 72 horas en recipientes de vidrio inerte, herméticamente sellados para evitar la volatilización de los solventes.

Posteriormente, los extractos fueron filtrados utilizando papel filtro Whatman No. 1 para eliminar impurezas y sólidos no disueltos. Los extractos filtrados se almacenaron en condiciones de refrigeración, en frascos de vidrio estériles, con el fin de preservar su integridad química y evitar su degradación.

3.3.1 Caracterización de subproductos

La caracterización de los subproductos consistió en la identificación y cuantificación de los metabolitos que se muestra en la siguiente tabla (Tabla 1).

Tabla 1. Método de cuantificación de metabolitos en extractos de cultivos evaluados

Metabolito	Método de identificación y/o cuantificación.
Proteínas totales	Bradford, 1976
Aminoácidos totales	Yemm y cocking, 1995
Carbohidratos totales	Dubois et al., 1965
Actividad antioxidante	Re et al., 1999
Fenoles totales	Yu & dahlgren, 2000
Flavonoides totales	Arvouet-grand et al., 1994

Cuantificación de Proteínas Totales

La cuantificación de proteínas totales se realizó utilizando el método de Bradford (1976). Se tomaron 50 μ L de extracto etanólico (EE) o estándar, y se añadieron 1.5 mL del reactivo de Bradford. Tras 5 minutos de incubación, la absorbancia se midió a 595 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Scientific Modelo G10S, Waltham, MA, EE. UU.). Se construyó una curva de calibración con albúmina de suero bovino estándar (0.005-0.5 mg/mL). Los resultados se expresaron como mg L⁻¹ de proteínas totales en peso fresco.

Capacidad Antioxidante Hidrofílica (ABTS)

La capacidad antioxidante se determinó mediante el método de Re et al. (1999). El catión radical ABTS se generó reaccionando ABTS a 7 mM con persulfato de potasio a 2.45 mM en una proporción 1:1 v/v, y se dejó en oscuridad durante 16 horas. La solución resultante se diluyó con etanol al 20% hasta alcanzar una absorbancia de 0.7 ± 0.01 a 754 nm. Para evaluar la capacidad antioxidante, se añadieron 20 μ L del extracto a 980 μ L de la solución de radical ABTS en un tubo de 2 mL, se agitó durante 5 segundos, y se dejó reposar durante 7 minutos en oscuridad. La absorbancia se midió a 754 nm. Los resultados se expresaron en miligramos equivalentes a ácido ascórbico por gramo de peso seco (mg EAA L⁻¹).

Determinación de Fenoles Totales

La cuantificación de fenoles totales se llevó a cabo según Yu y Dahlgren (2000). Se pesaron 200 mg de tejido liofilizado, al cual se le añadió 1 mL de una mezcla de agua y acetona (1:1). Después de mezclar con un vórtex por 30 segundos, se

sonificaron durante 5 minutos, se centrifugaron a 12,500 rpm durante 10 minutos a 4°C, y se extrajo el sobrenadante. Para la cuantificación, 50 µL del extracto se mezclaron con 200 µL de reactivo Folin-Ciocalteu, 500 µL de Na₂CO₃ al 20%, y 5 mL de agua destilada. La mezcla se incubó a 45°C durante 30 minutos en baño maría, y se leyó la absorbancia a 750 nm. Los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido gálico por litro (mg EQ/L).

Determinación de Flavonoides

Se utilizó el método de Zhishen et al. (1999) para la cuantificación de flavonoides. Se extrajeron 100 mg de tejido seco con 2 mL de metanol al 80%, se agitaron y se sonificaron, luego se centrifugaron a 4°C a 4000 rpm por 10 minutos. Para la cuantificación, se añadió 75 µL de NaNO₂ al 5%, seguido de 150 µL de AlCl₃ al 10%, y 500 µL de NaOH 1M. La mezcla se agitó y se añadió 2.025 mL de agua destilada, y la absorbancia se midió inmediatamente a 510 nm. Los flavonoides se cuantificaron utilizando una curva estándar de catequina, con los resultados expresados en mg de catequina por litro de peso seco.

Extracción y Cuantificación de Aminoácidos Totales

Para extraer los aminoácidos, 50 mg de muestra seca se añadieron a 1.5 mL de buffer citrato pH 5. Se mezclaron y se sometieron a sonificación por 10 minutos, luego se centrifugaron a 10,000 rpm durante 10 minutos a 4°C. El sobrenadante se filtró y se usó para la cuantificación. Se añadieron 2.25 mL de buffer citrato y 0.5 mL de ninhidrina al 0.35% a 250 µL del extracto. La mezcla se incubó en baño maría a 80-100°C durante 20 minutos, luego se enfrió en hielo y se midió la absorbancia a 570 nm. La concentración se calculó a partir de una curva de calibración con leucina estándar (10-100 mg/L).

Determinación de Carbohidratos Totales

Para la extracción de carbohidratos, 400 µL de muestra se combinaron con 400 µL de fenol al 5% y se agitó, luego se añadió ácido sulfúrico concentrado. La mezcla se incubó en baño maría a 30°C por 5 minutos, se dejó enfriar, y la absorbancia se midió a 480 nm. Los resultados se expresaron en mg de glucosa por litro, utilizando una curva de calibración con glucosa al 0.1%.

3.4 Experimento No. 1: Prueba de germinación de seed priming de semillas de maíz y melón

Para el experimento se utilizaron semillas de melón (Cantaloupe, Sakata) y semillas de maíz (AN447, UAAAN).

Se utilizaron 60 semillas por tratamiento, distribuidas en 6 cajas Petri por tratamiento, con 10 semillas en cada caja. Las semillas fueron desinfectadas mediante el siguiente protocolo:

Desinfección de semillas:

- Enjuague con alcohol etílico al 70% durante 2 minutos.
- Lavado con hipoclorito de sodio al 1% durante 2 minutos.
- Enjuague final con agua destilada durante 2 minutos.

Imbibición: Las semillas desinfectadas se imbibieron con el extracto correspondiente durante 24 horas. Cada caja Petri se equipó con un filtro humedecido con Captan al 1% para prevenir la contaminación.

3.4.1 Diseño Experimental

Los tratamientos se distribuyeron en un diseño completamente al azar, con 6 repeticiones por tratamiento. Cada repetición fue una caja Petri con 10 semillas. Las semillas se incubaron en una cámara de germinación por 20 días, con monitoreo y humectación del papel filtro con agua destilada. Cada 24 horas se registró el porcentaje de semillas germinadas por caja Petri.

3.4.2 Tratamientos

Tabla 2. Tratamientos aplicados mediante Seed priming en semillas de melón y maíz cultivadas prueba de germinación.

Tratamiento	Descripción
Testigo absoluto	Semillas desinfectadas
Bionare	Bioestimulante comercial
Extracto etanólico de brócoli	Extracto de brócoli en etanol
Extracto etanólico de repollo	Extracto de repollo en etanol
Extracto etanólico de coliflor	Extracto de coliflor en etanol
Extracto metanólico de brócoli	Extracto de brócoli en metanol
Extracto metanólico de repollo	Extracto de repollo en metanol
Extracto metanólico de coliflor	Extracto de coliflor en metanol

3.4.3 Variables a evaluar

Las siguientes variables se midieron durante el proceso de germinación y crecimiento de las plántulas:

- Largo de plúmula (mm)
- Largo de radícula (mm)
- Peso fresco (g)

- Peso seco (g)

3.4.4 Mediciones

- **Maíz:** Se midió el largo de la plúmula y radícula 7 días después de que el 50% de las semillas germinara, con una segunda medición 7 días después.
- **Melón:** Se tomaron las mismas mediciones a los 10 y 20 días respectivamente.

Las variables de peso fresco se determinaron al momento de la segunda medición. El peso seco se midió tras secar las muestras en una estufa a 60°C durante 48 horas.

3.4.5 Análisis estadístico

A los resultados obtenidos para las variables se realizó un análisis de varianza bajo un modelo de bloques completos al azar ($P < 0.05$) y una prueba de comparación de medias de tukey ($P < 0.05$).

3.5 Experimento No. 2: Imbibición de semillas de maíz y melón con germinación en condiciones de invernadero

Se utilizaron 40 semillas por tratamiento, distribuidas en 6 frascos, uno para cada tratamiento. Las semillas fueron desinfectadas mediante el siguiente protocolo:

Desinfección de semillas:

- Enjuague con alcohol etílico al 70% durante 2 minutos.
- Lavado con hipoclorito de sodio al 1% durante 2 minutos.
- Enjuague final con agua destilada durante 2 minutos.

Imbibición: Las semillas desinfectadas se imbibieron con el extracto correspondiente durante 24 horas, posterior a este periodo las semillas de cada tratamiento se pasaron a vasos de poliestireno de 473 mL con sustrato de turba de sphagnum (Peat moss) al 100% (v/v).

3.5.1 Diseño experimental

El diseño experimental para las plántulas fue similar al descrito para el experimento No. 1.

3.5.2 Tratamientos y variables a evaluar

Los mismos tratamientos mencionados en el experimento No. 1 (Tabla 1). Cada repetición constó de una planta, y se midieron las siguientes variables a los 30-40 días:

- Altura de la plántula (cm)
- Largo de radícula (cm)
- Número de hojas
- Diámetro de tallo (mm)
- Peso fresco (g)
- Peso seco (g)
- Tamaño de hoja mayor (cm²)

3.5.3 Análisis estadístico

A los resultados obtenidos para las variables se realizó un análisis de varianza bajo un modelo de bloques completos al azar ($P < 0.05$) y una prueba de comparación de medias de tukey ($P < 0.05$).

3.6 Aplicación foliar en plántulas de melón y maíz

Las plántulas se sembraron en vasos de poliestireno de 100 mL con sustrato de turba de sphagnum (Peat moss) 100% (v/v) y se evaluaron bajo las mismas condiciones de invernadero, del experimento 2. A partir de la aparición de las primeras hojas cotiledóneas, se aplicaron los extractos foliares cada 15 días.

3.6.1 Concentraciones de extracto

Se realizaron pruebas con diferentes concentraciones de extractos, eligiendo finalmente la proporción 1:300 por su eficacia, tras pruebas iniciales con las siguientes concentraciones (tabla 3):

Tabla 3. Determinación de la concentración ideal de extractos de Crucíferas para aplicación foliar

Concentración del Extracto	Eficacia Inicial
1:100	Fallida
1:300	Eficaz
1:500	Menor eficacia

3.6.2 Medición de variables

Las variables se evaluaron en maíz y melón, con un cronograma similar al del experimento de imbibición:

- **Maíz:** Mediciones intermedias a los 7 días, y finales a los 14 días.
- **Melón:** Mediciones intermedias a los 10 días, y finales a los 20 días.

Tabla 4. Variables evaluadas en plántulas de maíz y melón con tratamientos foliares

Variable	Método de Medición	Herramienta
Largo de plúmula	Vernier (mm)	Vernier
Largo de radícula	Vernier (mm)	Vernier
Peso seco	Secado en estufa (g)	Balanza gramera
Altura de la plántula	Cinta métrica (cm)	Vernier
Número de hojas	Conteo manual	-
Diámetro del tallo	Vernier (mm)	Vernier
Tamaño de hoja mayor	Área foliar (cm ²)	-

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de los extractos obtenidos

Capacidad antioxidante

Se observó que los extractos metanólicos de brócoli y coliflor presentaron la mayor capacidad antioxidante, con valores de 113.71 mg L⁻¹ y 83.95 mg L⁻¹, respectivamente. El extracto metanólico de repollo mostró un valor de 81.69 mg L⁻¹, significativamente menor en comparación con los otros dos. Estos resultados son consistentes con estudios previos que indican que algunas especies de Brassicaceae, como el brócoli, tienen un mayor potencial antioxidante en comparación con otros vegetales comunes (Ou et al., 2002; Zhou & Yu, 2006). El método de extracción y la especie reactiva presente en la mezcla de reacción pueden influir significativamente en los resultados de la capacidad antioxidante total (TAC), lo que resalta la importancia de optimizar estos factores en futuras investigaciones.

Tabla 5. Valores medios del contenido de compuestos químicos en los extractos de Crucíferas estudiadas

Tipo de extracto	Planta	Capacidad antioxidante	Proteínas totales	Flavonoides totales	Fenoles totales	Glutación (mM)
Metanólico mg L ⁻¹	Brócoli	113.71 ± 8.12 a	115.34 ± 5.13 b	63.51 ± 4.88 c	176.66 ± 8.60 b	0.063 ± 0.01 c
	Repollo	81.69 ± 10.23 b	104.57 ± 3.48 b	74.25 ± 3.07 c	169.16 ± 8.33 b	0.78 ± 0.02 b
	Coliflor	83.95 ± 5.47 b	106.125 ± 5.60 b	61.93 ± 6.28 c	200 ± 6.08 b	0.86 ± 0.01 b
Etanólico mg L ⁻¹	Brócoli	113.71 ± 8.12 a	105.5 ± 1.30 b	105.83 ± 7.75 a	202.5 ± 9.95 b	0.59 ± 0.01 c
	Repollo	83.95 ± 5.47 b	97.06 ± 4.36 b	108.48 ± 0.01 a	175.83 ± 13.70 b	0.75 ± 0.02 bc
	Coliflor	77.80 ± 10.29 b	103.93 ± 5.81 b	116.95 ± 3.32 a	205 ± 4.30 b	0.74 ± 0.01 bc
Polvo mg kg ⁻¹	Brócoli	53.30 ± 7.73 c	257.68 ± 11.2 a	88.44 ± 6.65 b	374.16 ± 14.49 a	1.11 ± 0.78 a
	Repollo	56.29 ± 13.78 c	253.78 ± 9.78 a	63.45 ± 3.78 c	363.33 ± 14.40 a	1.08 ± 0.1 a
	Coliflor	33.40 ± 7.68 d	305.03 ± 8.71 a	91.18 ± 5.00 b	401.66 ± 15.51 a	1.01 ± 0.04 a

Proteínas totales

En cuanto a las proteínas totales, el extracto metanólico de brócoli destacó con 115.34 mg L⁻¹, seguido por el extracto metanólico de coliflor con 106.25 mg L⁻¹. El extracto etanólico de brócoli mostró 113.71 mg L⁻¹, similar al metanólico. En contraste, los extractos de repollo mostraron valores más bajos (74.25 mg L⁻¹ para el metanólico y 79.92 mg L⁻¹ para el etanólico). Estos valores son comparables a los reportados por Sandoval Ortiz (2022), quienes también encontraron que los extractos etanólicos presentaron los niveles más altos de proteínas. El elevado contenido proteico en los extractos podría estar asociado con una mayor actividad de las proteínas de respuesta al estrés, como las mirosinasas, que juegan un papel clave en la conversión de glucosinolatos en compuestos activos (Morra & Kirkegaard, 2002).

Flavonoides totales

En relación con los flavonoides totales, el extracto metanólico de brócoli presentó el mayor contenido con 63.11 mg L^{-1} , seguido por el de repollo (62.23 mg L^{-1}) y coliflor (61.93 mg L^{-1}). Los extractos etanólicos y en polvo de brócoli también mostraron concentraciones altas de flavonoides (105.83 mg L^{-1}). Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Sandoval Ortiz (2022), que reportó un alto contenido de flavonoides en los extractos acuosos y en polvo deshidratado. Los flavonoides son compuestos fenólicos relevantes por su capacidad de defensa en las plantas, ya que se activan en respuesta a condiciones de estrés, como se ha descrito en estudios previos (Baker y Ollis, 1995; Cartaya y Reynaldo, 2001).

Fenoles totales

El contenido de fenoles totales fue más alto en el extracto metanólico de brócoli (176.66 mg L^{-1}), seguido por el de coliflor (200.06 mg L^{-1}) y el de repollo (169.16 mg L^{-1}). Los fenoles tienen propiedades antibacterianas bien documentadas, y sus concentraciones varían según el tipo de extracto y subproducto utilizado. De acuerdo con Iturbide y Zúñiga (2017), un alto contenido de fenoles en los subproductos de Brassicaceae puede contribuir a propiedades antibacterianas, lo que se confirma en los resultados obtenidos en este estudio.

Glutación

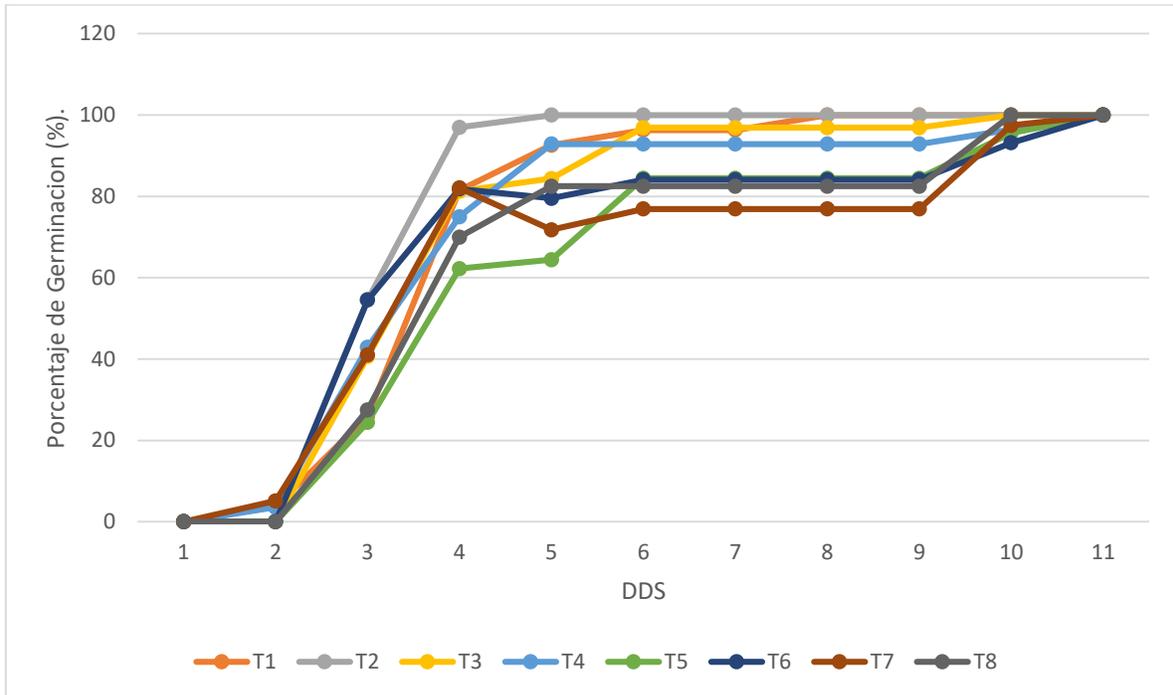
El contenido de glutación fue significativamente mayor en los extractos de brócoli y coliflor en polvo y etanólicos, con valores superiores a 0.70 mM . En cambio, el extracto metanólico de repollo mostró el valor más bajo, con 0.63 mM . El glutación S-transferasas (GSTs) han sido identificadas como proteínas clave en la respuesta al estrés, involucradas en el metabolismo secundario de las plantas, particularmente en la formación de compuestos naturales con enlaces carbono-azufre (Dixon et al., 2010; Sonderby et al., 2010). Estos hallazgos coinciden con la literatura, que sugiere que los fitoquímicos sulfurosos presentes en Brassicaceae podrían desempeñar un papel importante en la resistencia al estrés y en el metabolismo de estas especies (Czerniawski & Bednarek, 2018).

4.2 Experimento 1: Seed priming de semillas de maíz y melón in vitro

4.2.1 Evaluación del porcentaje de prueba de germinación de semillas de maíz y melón.

Para las semillas de melón en la prueba de germinación, los tratamientos EER, EEC, EMB y EMR mostraron una germinación más rápida, alcanzando el 100% entre 6 y 7 DDS (Figura 1). En cambio, los tratamientos TA, TC y EEB presentaron una germinación más lenta, alcanzando el 100% hacia el 10-11 DDS. Todos los tratamientos eventualmente alcanzaron tasas de germinación cercanas al 100%.

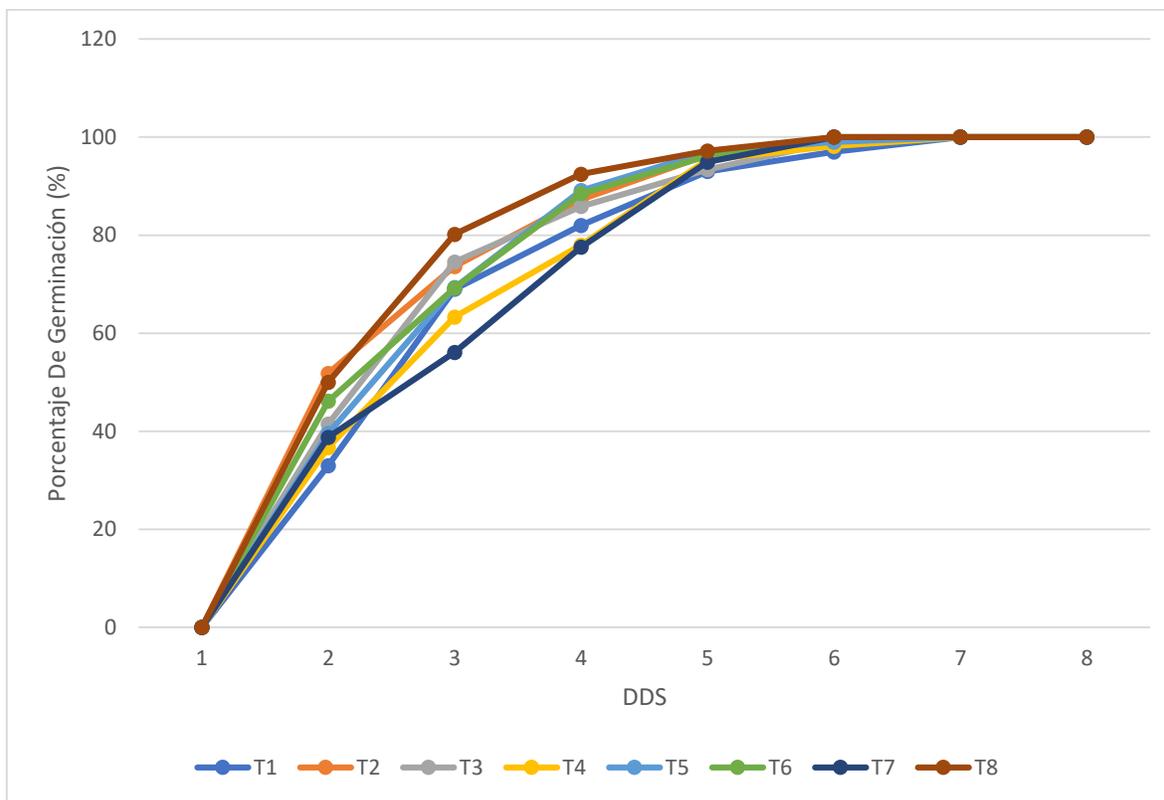
Figura 1. Porcentaje de germinación de semillas de melón con seed priming de extractos de Crucíferas



T1= Testigo Absoluto (TA). T2=Testigo Comercial (TC). T3= Extracto Etanólico de Brócoli (EEB). T4= Extracto Etanólico de Repollo (EER). T5= Extracto Etanólico de Coliflor (EEC). T6= Extracto Metanólico de Brócoli (EMB). T7= Extracto Metanólico de Repollo (EMR). T8= Extracto Metanólico de Coliflor (EEC). DDS=Días Después de la Siembra.

Para la prueba de germinación con semillas de maíz, todos los tratamientos aplicados alcanzaron un porcentaje cercano al 100% a los 7 DDS. El tratamiento EEC mostró el mayor porcentaje de germinación el 4 DDS, mientras que el tratamiento EER presentó un retardo, pero alcanzó un alto porcentaje hacia el 7 DDS. Los tratamientos EEC, EMB y EMR tuvieron una respuesta intermedia, logrando entre 90% y 100% de germinación a partir del 5 DDS (Figura 2).

Figura 2. Porcentaje de germinación de semillas de maíz, con seed priming con extractos de Crucíferas



T1= Testigo Absoluto (TA). T2=Testigo Comercial (TC). T3= Extracto Etanólico de Brócoli (EEB). T4= Extracto Etanólico de Repollo (EER). T5= Extracto Etanólico de Coliflor (EEC). T6= Extracto Metanólico de Brócoli (EMB). T7= Extracto Metanólico de Repollo (EMR). T8= Extracto Metanólico de Coliflor (EEC). DDS=Días Después de la Siembra.

4.2.2 Desarrollo de estructuras en plántulas prueba de germinación.

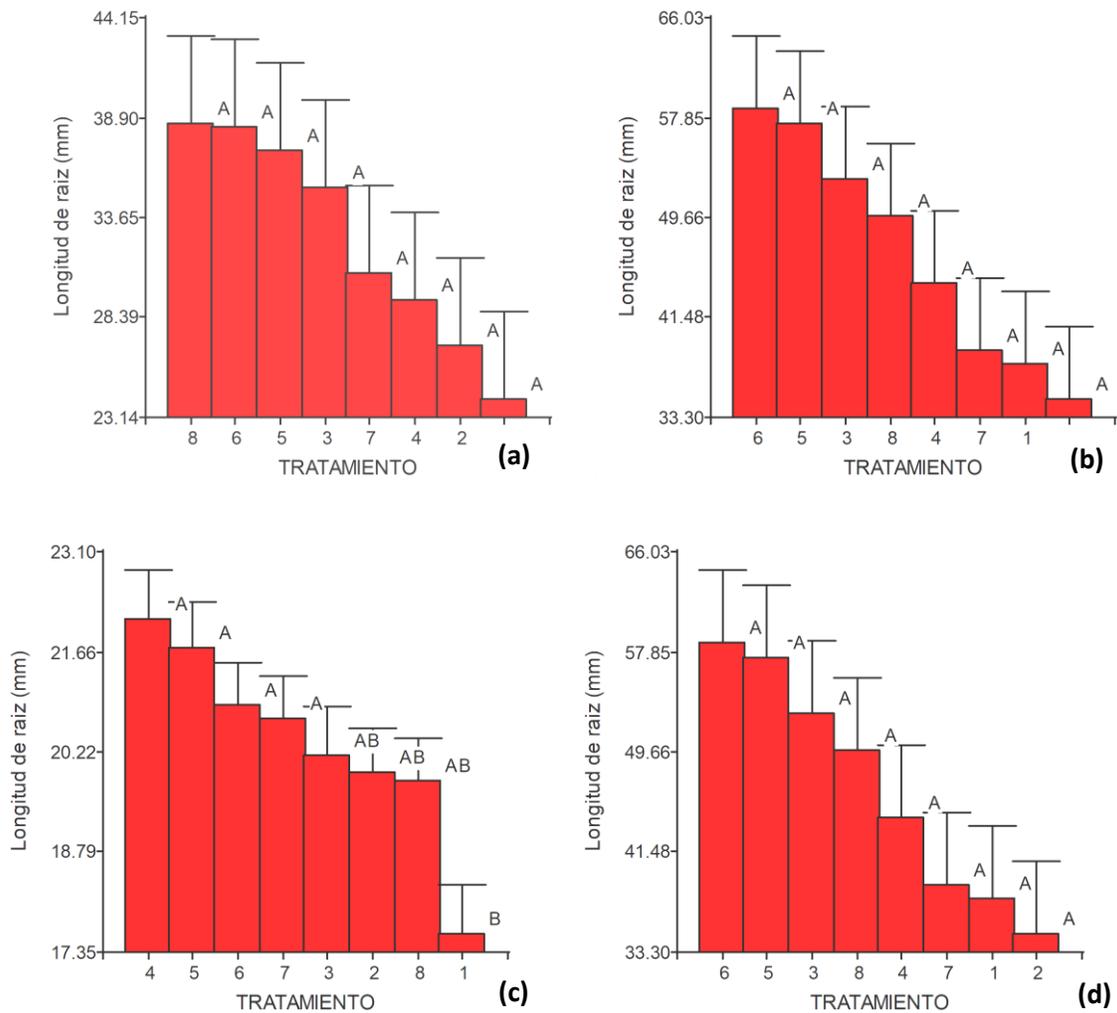
Desarrollo radicular de plántulas de maíz y melón en prueba de germinación.

En la medición intermedia para la radícula de semillas emergidas de melón (Figura 3a), los tratamientos evaluados no presentaron diferencias estadísticamente significativas en la variable de longitud de raíz, indicando un comportamiento similar entre ellos, mientras que para la medición final (Figura 3b), aunque el análisis de varianza reveló diferencias significativas entre los tratamientos, estas no se tradujeron en efectos visibles en la longitud de raíz, ya que todos los tratamientos mostraron un comportamiento uniforme.

Por otro lado, respecto al crecimiento radicular en semillas de maíz germinadas in vitro, específicamente para la medición intermedia (Figura 3c) los tratamientos con EER y EEC, así como los EMB y EMR, mostraron diferencias significativas en comparación con el testigo absoluto. Estos tratamientos lograron incrementos en la longitud de raíz del 25.66%, 23.39%, 18.73% y 17.49%, respectivamente, en relación al testigo. En tanto que en la medición final para el maíz (Figura 3d), no se

observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados, lo que sugiere una uniformidad en los resultados obtenidos.

Figura 3. Valores medios de la Longitud de Radícula de plántulas de melón (A y B) y maíz (C y D) por efecto de la aplicación de diferentes extractos de Crucíferas



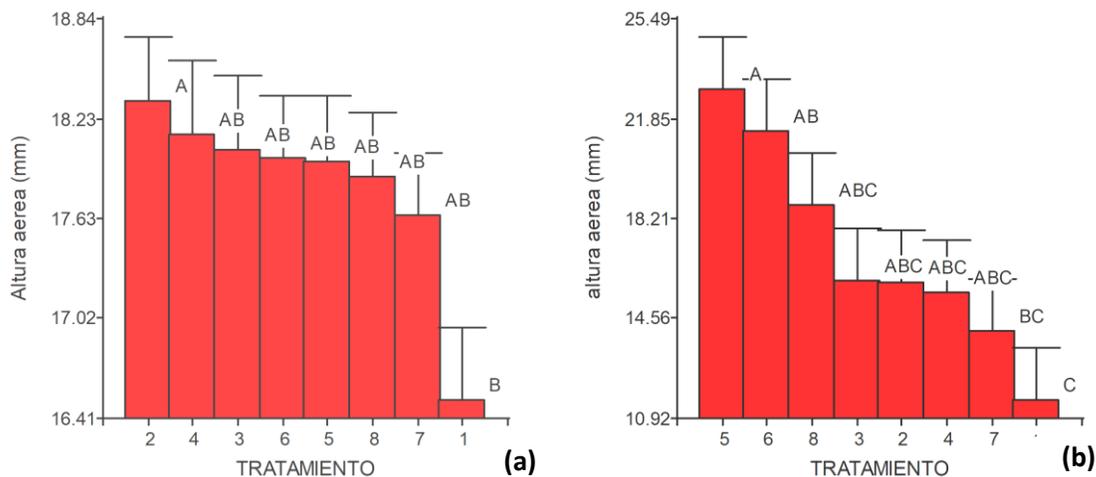
T1= Testigo Absoluto (TA). T2=Testigo Comercial (TC). T3= Extracto Etanólico de Brócoli (EEB). T4= Extracto Etanólico de Repollo (EER). T5= Extracto Etanólico de Coliflor (EEC). T6= Extracto Metanólico de Brócoli (EMB). T7= Extracto Metanólico de Repollo (EMR). T8= Extracto Metanólico de Coliflor (EEC).

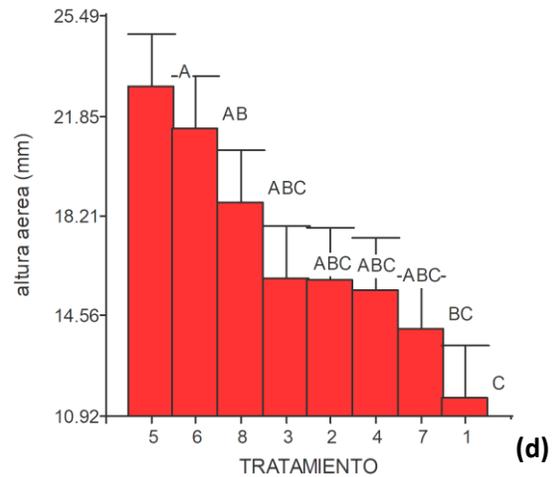
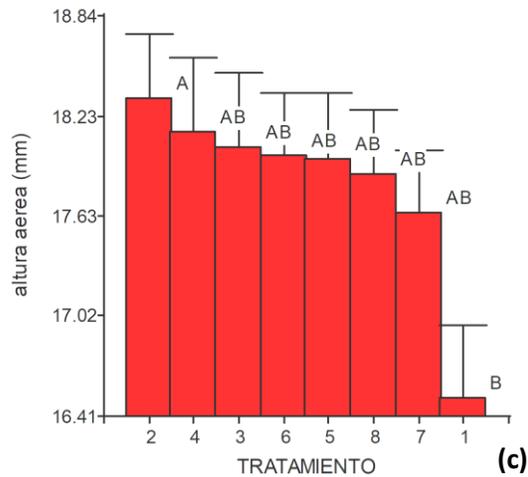
Desarrollo de plúmula de plántulas de melón y maíz prueba de germinación.

Respecto a la evaluación del crecimiento de la plúmula en semillas de melón en la medición intermedia (Figura 4a), el tratamiento EMB mostró diferencias estadísticamente significativas, con un incremento del 101% en comparación con el testigo absoluto, mientras que para la medición final en el mismo cultivo (Figura 1b), los tratamientos EEC y EMB presentaron incrementos significativos del 98.01% y 84.88%, respectivamente, respecto al testigo absoluto.

Para las semillas de maíz en prueba de germinación, la evaluación intermedia (Figura 4c) permitió observar que el testigo comercial destacó sobre los demás tratamientos con un aumento significativo del 11.01% en altura aérea en comparación con el testigo absoluto. Del mismo modo, en la medición final (Figura 4d), los tratamientos EEC y EMB nuevamente mostraron diferencias significativas, con incrementos del 98.01% y 84.88%, respectivamente, en comparación con el testigo absoluto.

Figura 4. Valores medios de la Longitud de Plúmula (Altura Aérea) de plántulas de melón y maíz por efecto de la aplicación de diferentes extractos de crucíferas





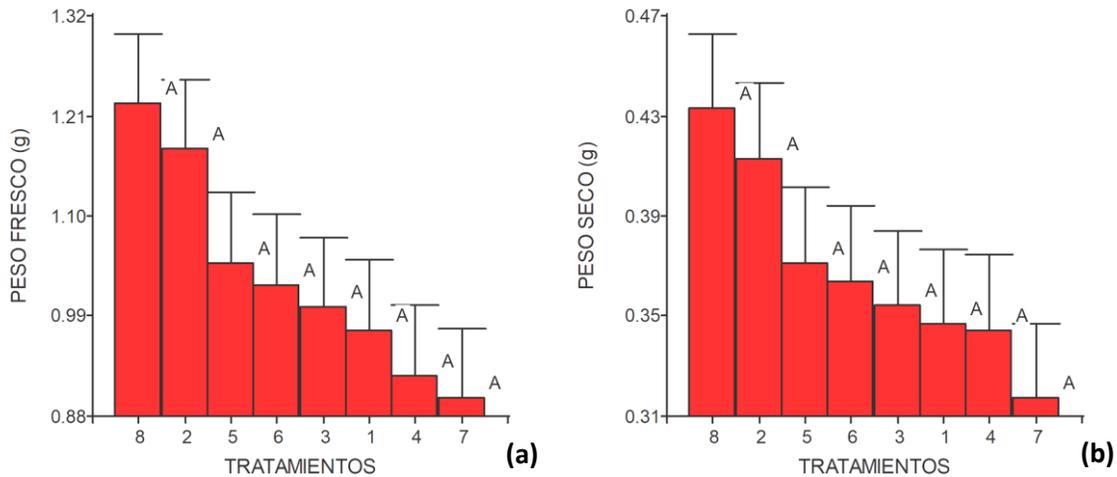
T1= Testigo Absoluto, (TA). T2=Testigo Comercial, (TC). T3= Extracto Etanólico de Brócoli (EEB). T4= Extracto Etanólico de Repollo (EER). T5= Extracto Etanólico de Coliflor (EEC). T6= Extracto Metanólico de Brócoli (EMB). T7= Extracto Metanólico de Repollo (EMR). T8= Extracto Metanólico de Coliflor (EEC).

4.2.3 Acumulación de biomasa fresca y seca

Acumulación de biomasa fresca y seca en plántulas de melón prueba de germinación.

Para el peso fresco de plántulas de melón (Figura 5a), los tratamientos evaluados no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí, indicando un comportamiento uniforme. De manera similar, en la variable de peso seco (Figura 5b) no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, lo que refleja una tendencia homogénea en los resultados obtenidos. (Figura 5).

Figura 5. Medias estadísticas del Peso Fresco y Peso Seco de plántulas de melón por efecto de la aplicación de extractos de Crucíferas.

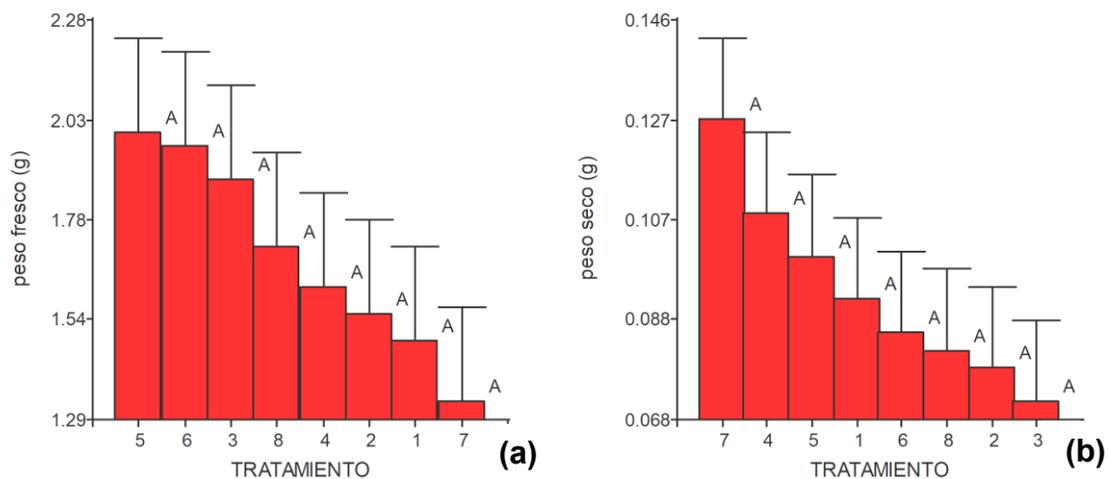


T1= Testigo Absoluto (TA). T2=Testigo Comercial (TC). T3= Extracto Etanólico de Brócoli (EEB). T4= Extracto Etanólico de Repollo (EER). T5= Extracto Etanólico de Coliflor (EEC). T6= Extracto Metanólico de Brócoli (EMB). T7= Extracto Metanólico de Repollo (EMR). T8= Extracto Metanólico de Coliflor (EEC).

Acumulación de biomasa fresca y seca en plántulas de maíz en prueba de germinación.

Respecto a la variable de peso fresco de plántulas de maíz (Figura 6a), los tratamientos evaluados no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí, indicando un comportamiento homogéneo. Mientras que para la variable de peso seco (Figura 6b), no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados, lo que evidencia uniformidad en los resultados obtenidos.

Figura 6. Medias estadísticas del Peso Fresco y Peso Seco en plántulas de maíz por efecto de la aplicación de extractos de Crucíferas



T1= Testigo Absoluto (TA). T2=Testigo Comercial (TC). T3= Extracto Etanólico de Brócoli (EEB). T4= Extracto Etanólico de Repollo (EER). T5= Extracto Etanólico de Coliflor (EEC). T6= Extracto Metanólico de Brócoli (EMB). T7= Extracto Metanólico de Repollo (EMR). T8= Extracto Metanólico de Coliflor (EEC).

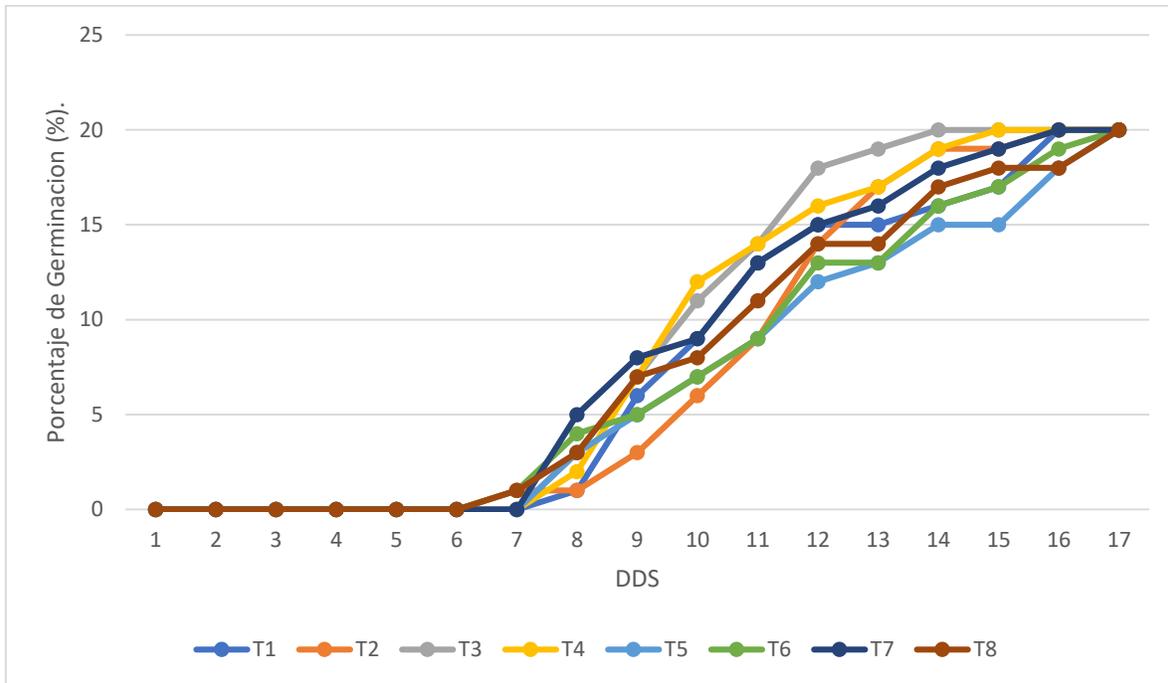
4.3 Experimento No. 2: Imbibición de semillas de maíz y melón en invernadero

4.3.1 Evaluación del porcentaje de germinación de semillas de maíz y melón en invernadero

Germinación de semillas de melón con imbibición en condiciones de invernadero

La germinación inició entre el 7° y 8° DDS en todos los tratamientos, excepto el testigo absoluto, que presentó un retraso significativo. Los tratamientos con extractos etanólicos (EEB, EER, EEM) destacaron por alcanzar las mayores tasas de germinación, logrando el 90% entre el 10° y 14° DDS, siendo el EEB el más efectivo. Los extractos metanólicos (EMB, EMR, EMC) mostraron una germinación más lenta y menor eficacia en comparación con los etanólicos. El testigo comercial confirmó su eficacia como estándar, mientras que el testigo absoluto obtuvo las menores tasas de germinación (Figura 7).

Figura 7. Porcentaje de germinación de semillas de melón inbibidas en extractos de crucíferas bajo condiciones de invernadero

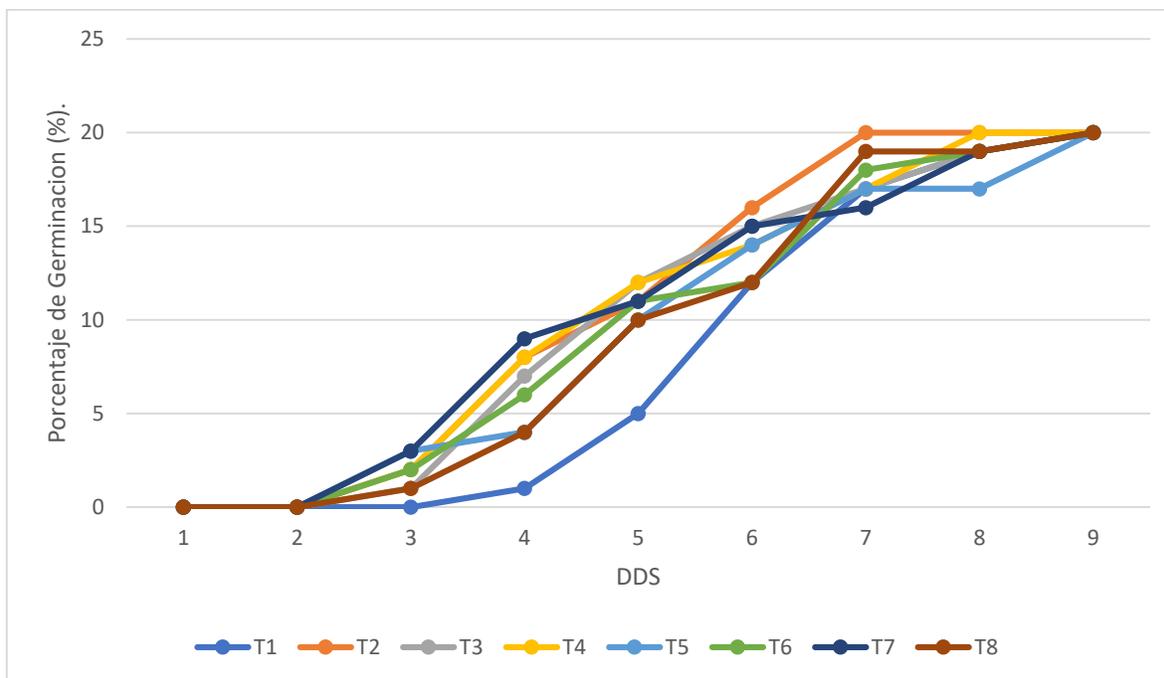


T1= Testigo Absoluto (TA). T2=Testigo Comercial (TC). T3= Extracto Etanólico de Brócoli (EEB). T4= Extracto Etanólico de Repollo (EER). T5= Extracto Etanólico de Coliflor (EEC). T6= Extracto Metanólico de Brócoli (EMB). T7= Extracto Metanólico de Repollo (EMR). T8= Extracto Metanólico de Coliflor (EEC). DDS=Días Después de la Siembra.

Germinación de semillas de maíz con imbibición en condiciones de invernadero

La germinación inició entre el 2° y 3° DDS en todos los tratamientos. Los extractos etanólicos, metanólicos y el testigo comercial alcanzaron la máxima germinación (20 semillas) entre el 6° y 8° DDS, destacando los extractos de repollo (EER Y EMR) por su rapidez. El testigo absoluto presentó una germinación más lenta, pero alcanzó valores similares al final del periodo (Figura 8).

Figura 8. Porcentaje de germinación de semillas de maíz inibidas en extractos de crucíferas bajo condiciones de invernadero



T1= Testigo Absoluto (TA). T2=Testigo Comercial (TC). T3= Extracto Etanólico de Brócoli (EEB). T4= Extracto Etanólico de Repollo (EER). T5= Extracto Etanólico de Coliflor (EEC). T6= Extracto Metanólico de Brócoli (EMB). T7= Extracto Metanólico de Repollo (EMR). T8= Extracto Metanólico de Coliflor (EEC). DDS=Días Después de la Siembra.

4.3.2 Desarrollo de estructuras en plántulas germinadas en invernadero

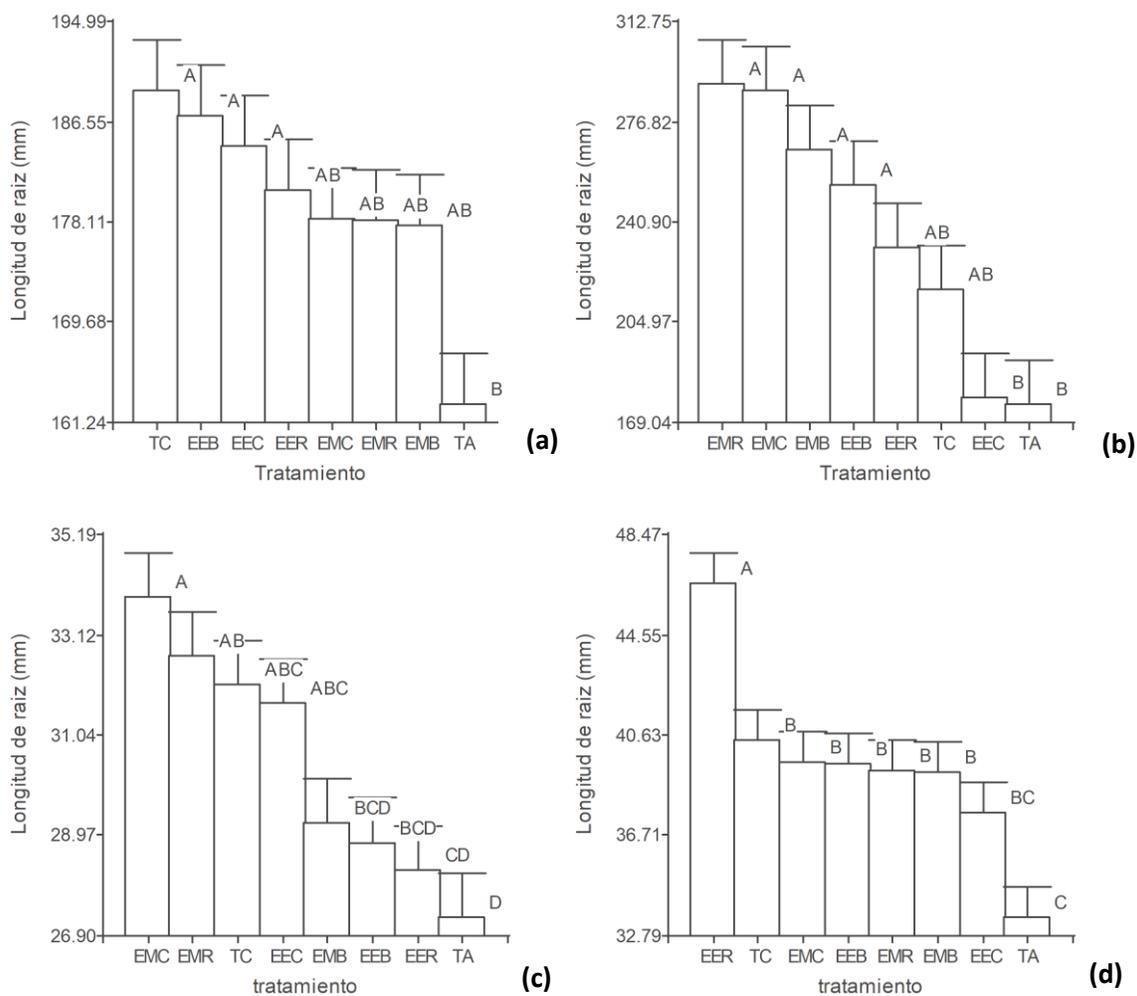
Desarrollo radicular de plántulas de melón y maíz germinadas en condiciones de invernadero

El desarrollo radicular de plántulas de melón germinadas en invernadero en la medición intermedia (Figura 9a), los tratamientos con EER y EMC, EMR y EMB no presentaron diferencias estadísticamente significativas con el testigo absoluto, aunque compartieron grupo estadístico con los demás tratamientos evaluados. Mientras que en la medición final para el mismo cultivo (Figura 9b), los tratamientos EMR, EMC y EMB, así como el EEB, mostraron diferencias estadísticamente significativas, con incrementos del 65.45%, 64.18%, 51.98% y 44.86%, respectivamente, en comparación con el testigo absoluto para esta variable.

Bajo el mismo análisis, la longitud de radícula de plántulas de maíz, en la medición intermedia (Figura 9c) permitió observar que los tratamientos EMC, EMR, TC y EER mostraron diferencias estadísticamente significativas, con incrementos de 24.26%, 19.79%, 17.59% y 16.20% respectivamente, en comparación con el testigo absoluto. En tanto que para la medición final para este cultivo (Figura 9d) la longitud de raíz del maíz, permitió observar que los siguientes tratamientos evaluados muestran diferencias significativas, con resultados superiores al testigo absoluto:

EER (39.04%), TA (20.74%), EMC (18.05%), EEB (17.91%), EMR (17.16%) y EMB (16.95%).

Figura 9. Comportamiento de las medias estadísticas de la longitud de radícula en plántulas de melón y maíz inhibidas en extractos de crucíferas bajo condiciones de invernadero



TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

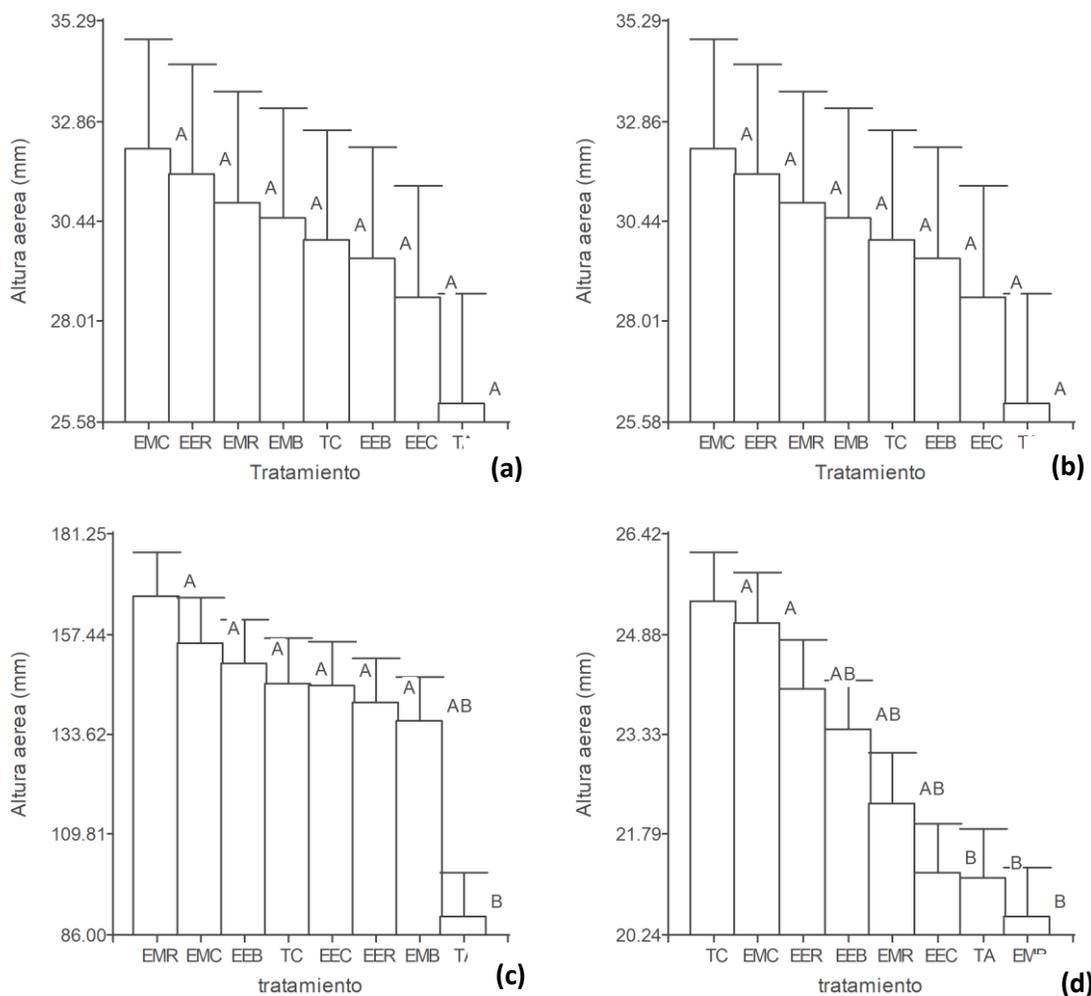
Desarrollo de la plúmula de plántulas de melón y maíz germinadas en condiciones de invernadero

Para las plántulas de melón germinadas bajo condiciones de invernadero en la medición intermedia (Figura 10a), los tratamientos evaluados no evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre sí para melón. Mientras que en la

medición final (Figura 10b) los tratamientos evaluados tampoco mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí para melón.

El mismo análisis aplicado a la medición intermedia del desarrollo de plúmula de plántulas de maíz (Figura 10c), los tratamientos destacaron al superar al testigo absoluto con los siguientes resultados: EMR (84.19%), EMC (72.03%), EEB (66.42%), TC (61.35%), EEC (60.72%) y EER (56.26%). Del mismo modo en la medición final (Figura 10d) para la misma variable y cultivo, los tratamientos TC y EMC mostraron diferencias estadísticamente significativas, con incrementos del 20.11% y 18.55%, respectivamente, en comparación con el testigo absoluto.

Figura 10. Comportamiento de las medias estadísticas de la longitud de plúmula en plántulas de melón y maíz inbibidas en extractos de crucíferas bajo condiciones de invernadero

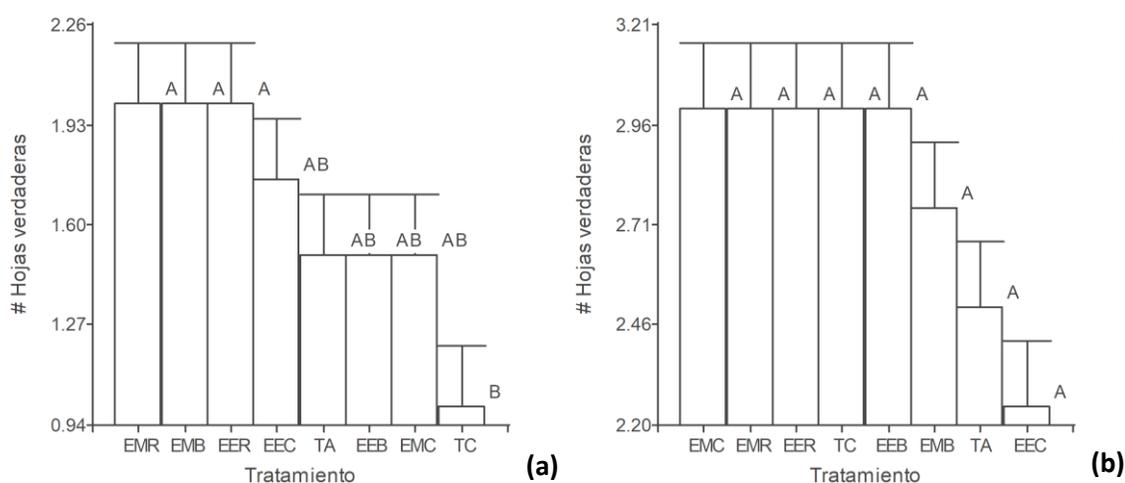


TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

Cantidad de hojas verdaderas desarrolladas en plántulas de melón

El conteo del total de hojas verdaderas en plántulas de melón (Figura 11a) realizado a medio periodo del experimento, permitió observar que el tratamiento EER presentó una diferencia estadísticamente significativa, alcanzando un incremento porcentual del 20% en comparación con el testigo comercial. Sin embargo, en la medición realizada al final del experimento (Figura 11b), los tratamientos evaluados no mostraron diferencias estadísticamente significativas en cuanto al número de hojas verdaderas.

Figura 11. Número de hojas verdaderas desarrolladas en plántulas de melón, como efecto de la imbibición de semillas en extracto de crucíferas



TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

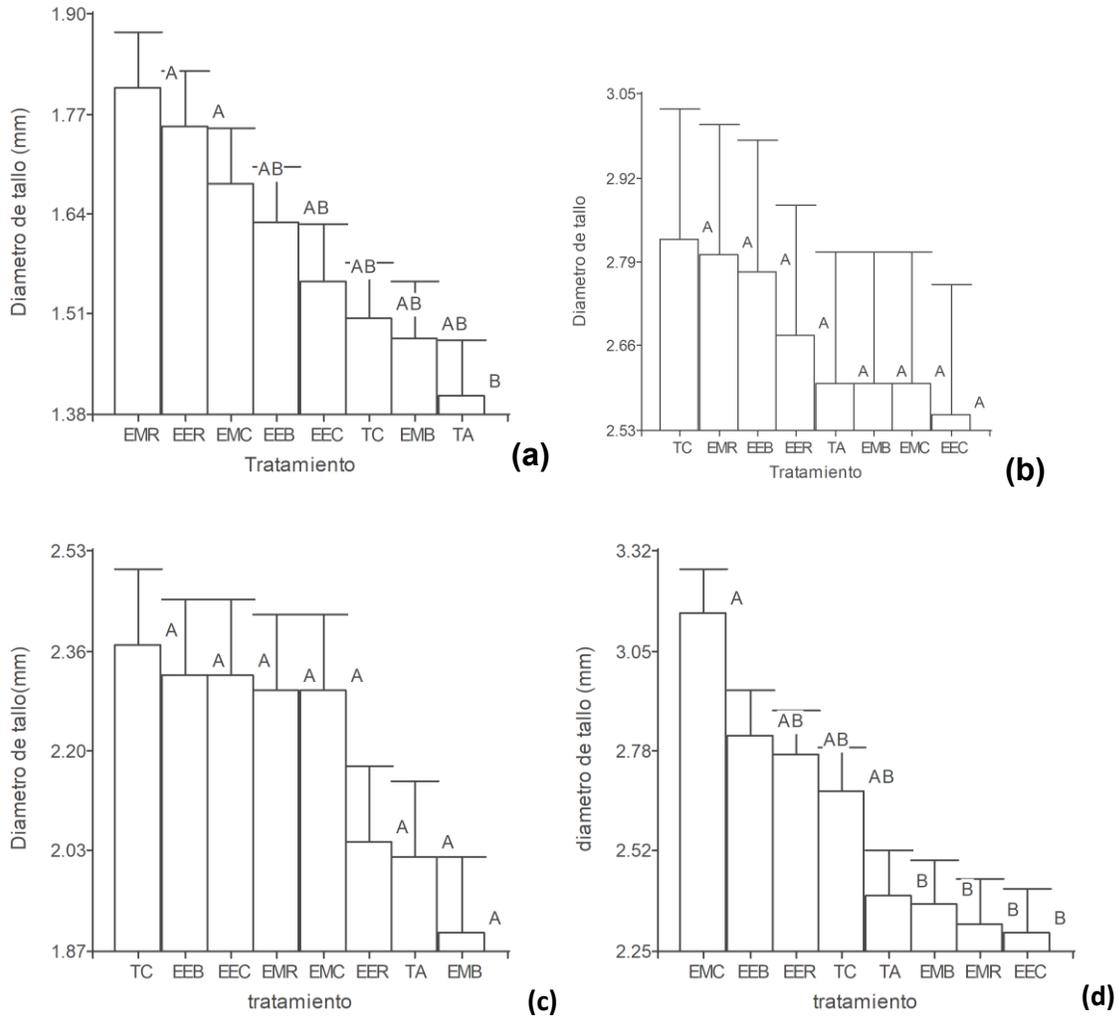
Comportamiento del diámetro de tallo en plántulas de melón y maíz, germinadas en invernadero por efecto de extractos de crucíferas

La medición intermedia del diámetro de tallo en plántulas de melón (Figura 12a), demostró que los tratamientos con EMR y EER fueron superiores al resto, al mostrar incrementos significativos con valores 28.57% y 25% superiores, respectivamente, en comparación con el testigo absoluto, del mismo modo en la medición final (Figura 12b), los tratamientos evaluados no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sí.

Para el caso de las plántulas de maíz en la medición intermedia (Figura 12c), los resultados de diámetro de tallo del maíz indicaron que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados. Sin embargo, en la

medición final (Figura 12b), el tratamiento número EMC destacó al mostrar diferencias altamente significativas, superando al testigo absoluto en un 31.25% en diámetro de tallo del maíz.

Figura 12. Comportamiento de diámetro de tallo en plántula de melón y maíz tratadas con extracto de crucíferas por imbibición, en condiciones de invernadero



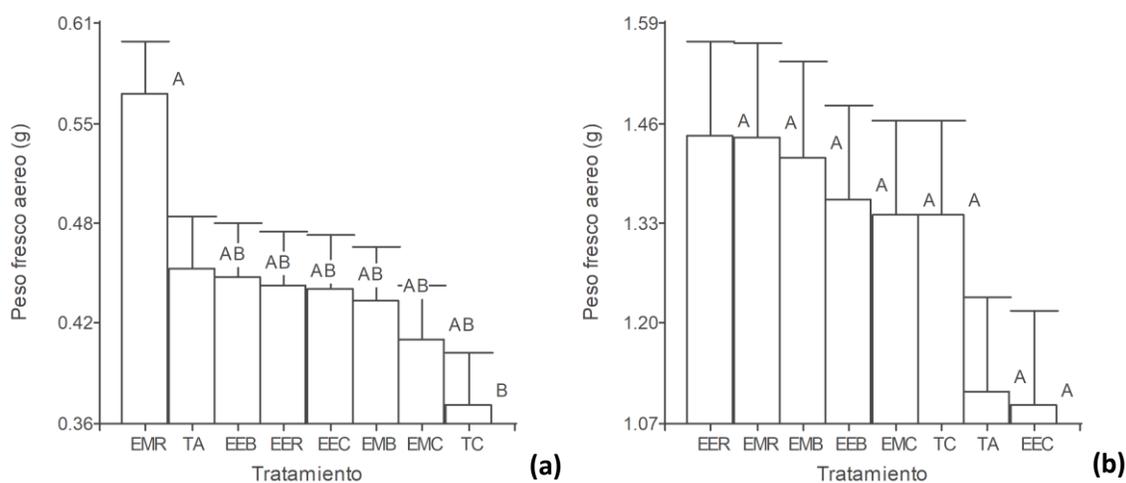
TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

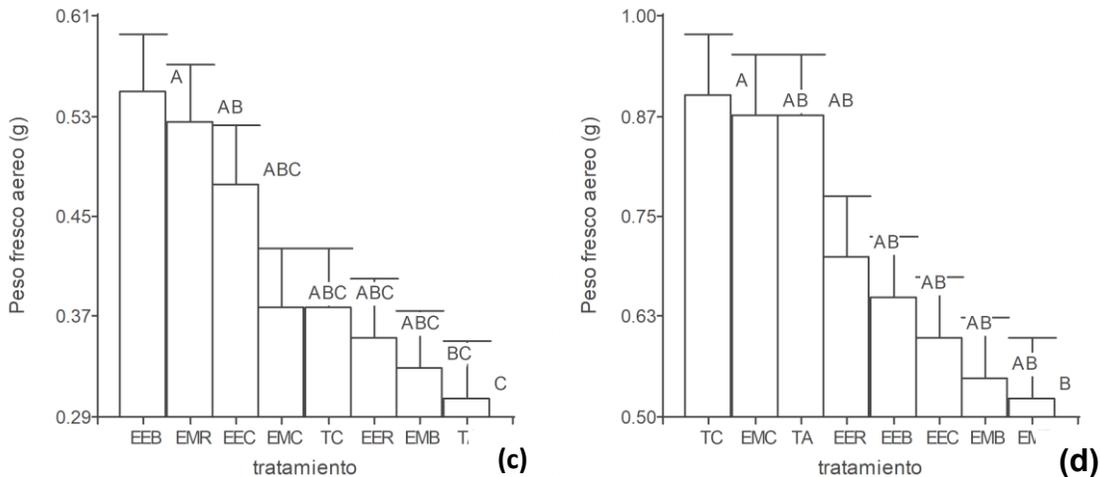
4.3.3 Acumulación de biomasa fresca y seca
Acumulación de biomasa fresca en plúmula de plántulas de maíz y melón germinadas en condiciones de invernadero

Para la medición de biomasa fresca en plúmula de plántula de melón, en la medición intermedia (Figura 13a), los tratamientos con EEB, EER y EEC, así como los EMB y EMC, no mostraron diferencias estadísticamente significativas respecto al testigo absoluto. No obstante, estos compartieron grupo estadístico con todos los tratamientos evaluados. Cabe destacar que el Tratamiento EMR presentó un incremento 54.05% superior al testigo comercial, mostrando una diferencia estadísticamente significativa. Para la medición final de esta misma variable y cultivo (Figura 13b), los tratamientos evaluados no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí en la variable de peso fresco aéreo.

Así también, para la medición de la acumulación de biomasa fresca en plúmula de plántulas de maíz al final del experimento (Figura 13c), los tratamientos con EEB y EMR evidenciaron diferencias estadísticamente significativas, con incrementos de 83.33% y 76.66% en comparación con el testigo absoluto, mientras que para la medición al final del experimento solamente TA mostró diferencias estadísticamente significativas en la variable de peso fresco aéreo, siendo 2.27% superior al testigo absoluto.

Figura 13. Medias estadísticas de la acumulación de biomasa fresca en plúmula de plántulas de melón y maíz bajo condiciones de invernadero





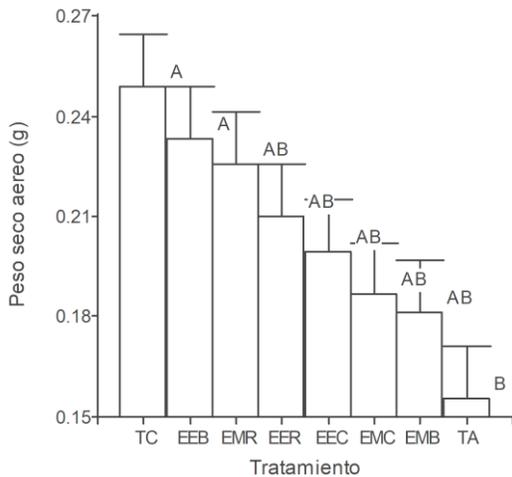
TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

Acumulación de biomasa seca en plúmula de plántulas de maíz y melón germinadas en condiciones de invernadero

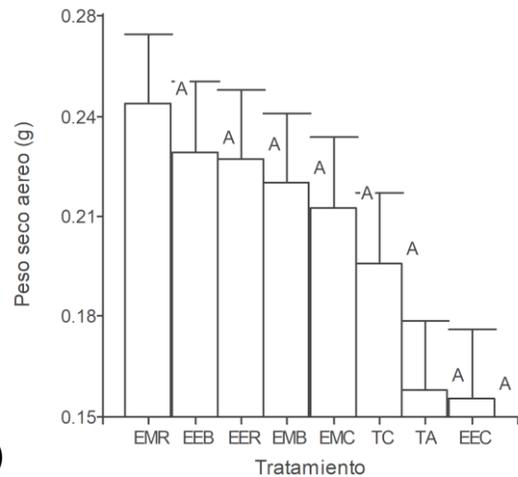
La medición intermedia en plúmulas de plántula de melón (figura 14a), los resultados indican que el TC y el tratamiento EEB presentaron incrementos significativos en el peso seco aéreo del melón, con valores 56.25% y 43.75% superiores, respectivamente, en comparación con el testigo absoluto. En tanto que para la medición final (Figura 14b), los tratamientos evaluados no evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre sí en la variable peso seco aéreo del melón.

La medición intermedia del peso seco de plúmula en plántula de maíz (Figura 14c), permite deducir que los tratamientos con EEB, EMC y TC demostraron incrementos estadísticamente significativos, con aumentos del 55.55%, 33.33% y 57.14%, respectivamente, en comparación con el testigo absoluto, mientras que en la medición final (Figura 14c), el tratamiento con EMC no mostró diferencias estadísticamente significativas respecto al testigo absoluto; sin embargo, destacó con un 57.14% de incremento frente a otros tratamientos del peso seco aéreo del maíz.

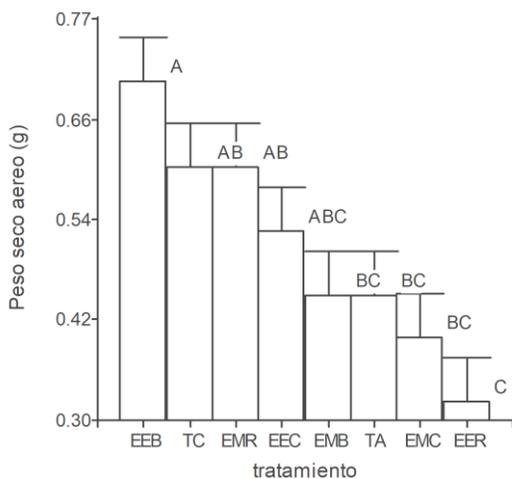
Figura 14. Medias estadísticas de la acumulación de biomasa seca en plúmula de plántulas de melón y maíz bajo condiciones de invernadero



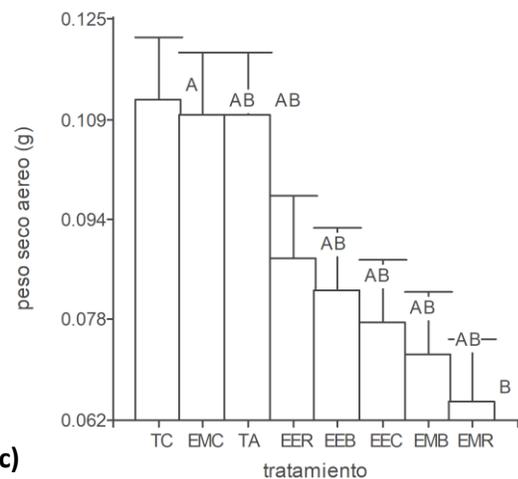
(a)



(b)



(c)



(d)

TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

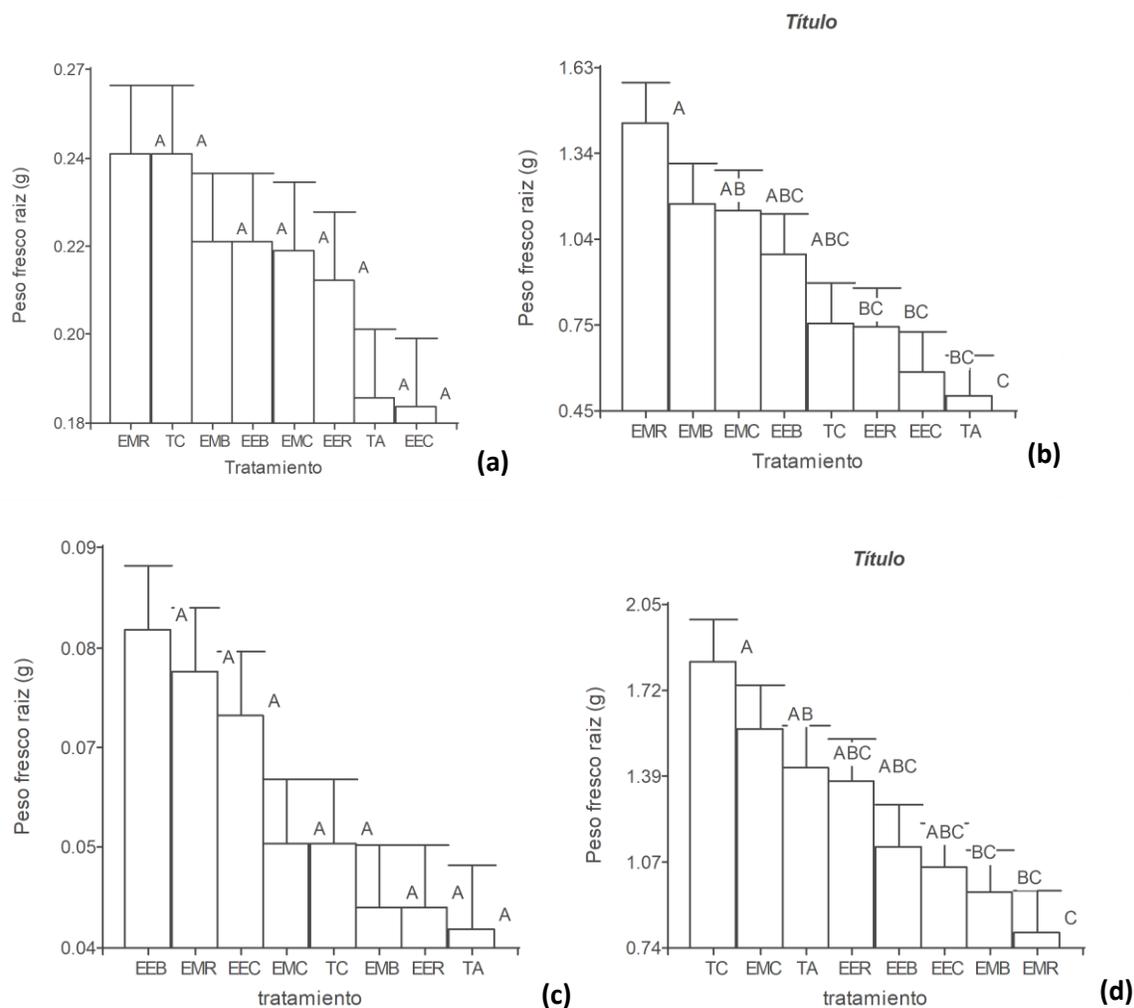
Acumulación de biomasa fresca en radícula de plántulas de maíz y melón germinadas en condiciones de invernadero

La medición intermedia de peso fresco en radícula de plántulas de melón, así como la prueba de medias realizada, no evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados (Figura 15a). Sin embargo, la misma prueba de medias en la medición final, permite observar que los tratamientos con EMR y EMB sobresalieron al presentar incrementos significativos en el peso fresco de raíz, con valores 82.35% y 29.41% superiores al testigo absoluto (Figura 15b).

La prueba de medias para los valores obtenidos en la medición intermedia del peso fresco de la radícula de plántula de maíz, muestra que los tratamientos evaluados no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí (Figura 15c), mientras que la prueba de medias para la medición final de la variable peso fresco

de radícula de plántula de maíz, el TC mostró diferencias de 27.97%, superando al testigo absoluto (Figura 15d).

Figura 15. Medias estadísticas de la acumulación de biomasa fresca en radícula de plántulas de melón y maíz bajo condiciones de invernadero



TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

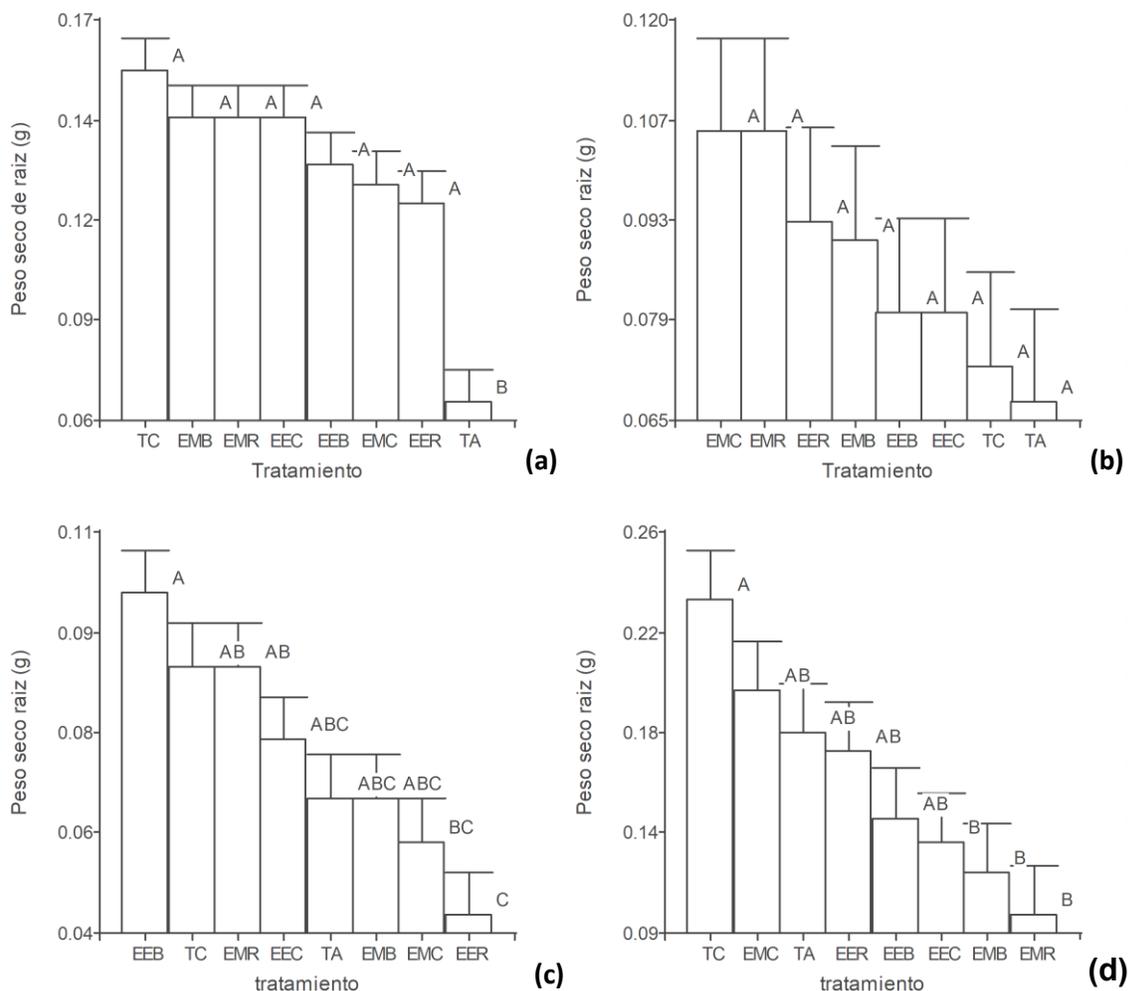
Acumulación de biomasa seca en radícula de plántulas de maíz y melón germinadas en condiciones de invernadero

Los resultados de la prueba de medias para la variable peso seco de radícula para plántulas de melón medida en su etapa intermedia, no evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados (Figura 16a). Mientras que esta misma prueba en su etapa final determino que los tratamientos

con EMR y EMB sobresalieron al presentar incrementos significativos en el peso fresco de raíz, con valores 82.35% y 29.41% superiores al testigo absoluto, respectivamente (Figura 16b).

Para la misma variable, pero en plántulas del cultivo de maíz, los tratamientos EEB, EMR y TC mostraron diferencias estadísticamente significativas, con incrementos de 42.85% y 28.57% respecto al testigo absoluto (Figura 16c). A su vez, la medición final de esta variable permitió observar que TC mostró una diferencia estadísticamente significativa de 27.77%, superando al testigo absoluto (Figura 16d).

Figura 16. Medias estadísticas de la acumulación de biomasa seca en radícula de plántulas de melón y maíz bajo condiciones de invernadero



TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

4.4 Prueba de aspersión de extractos de crucíferas en plántulas de maíz y melón

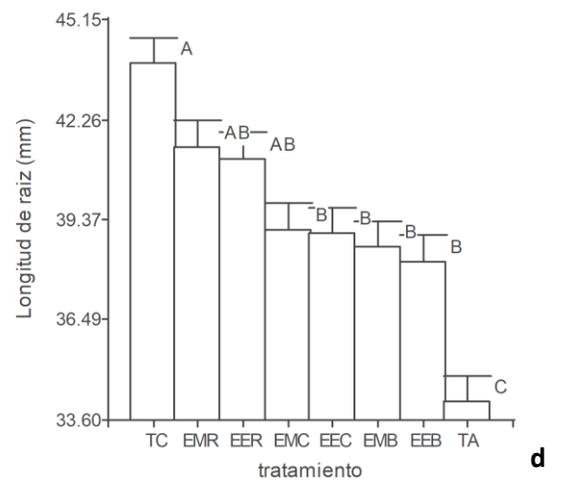
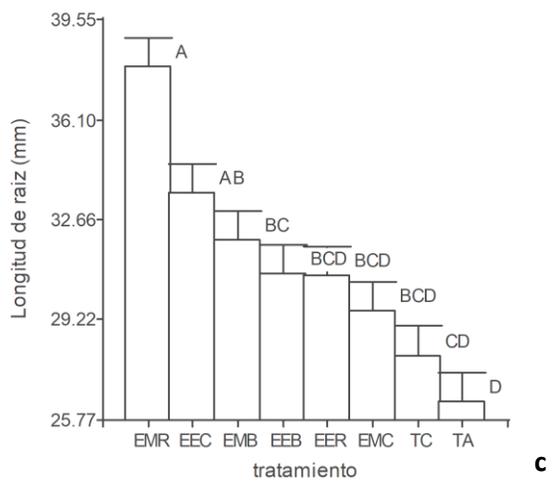
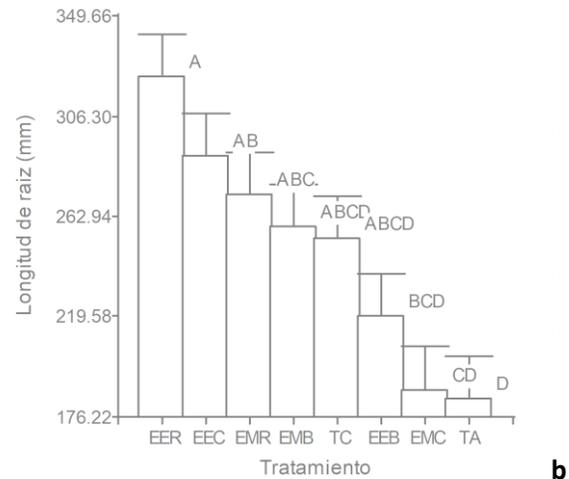
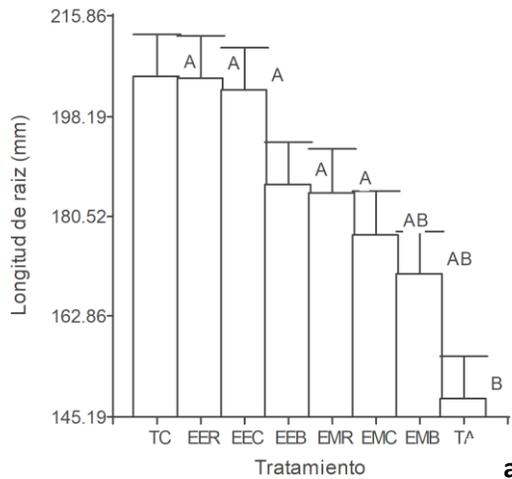
4.4.1 Desarrollo de estructuras en plántulas tratadas con aspersiones de extractos de crucíferas

Desarrollo radicular de plántulas de melón y Maiz asperjadas con extractos de crucíferas

Para el caso de las plántulas de melón, en la medición intermedia de la radícula, los tratamientos EMC y EMB no presentaron diferencias estadísticamente significativas en comparación con el testigo absoluto; sin embargo, compartieron grupo estadístico con todos los tratamientos evaluados. Por otro lado, el TC, junto con los tratamientos EER, EEC y EEB, así como el EMR, mostraron diferencias altamente significativas, superando al testigo absoluto en hasta un 38.21% en la variable de longitud de raíz en melón (Figura 17a). Mientras que, en la medición final para la misma variable y cultivo, los resultados indican que los tratamientos EMB y EMC, TC y EEB no presentaron diferencias significativas respecto al testigo absoluto. Sin embargo, los tratamientos EMR y EEC registraron incrementos del 47% y 57%, respectivamente, en comparación con el testigo absoluto (Figura 17b). Cabe destacar que el tratamiento EER mostró una diferencia estadísticamente significativa, siendo 75% superior al testigo absoluto.

Para la variable de longitud de radícula para maíz en la medición intermedia, el tratamiento EMB presentó una diferencia estadísticamente significativa de 14.21% superior al TC. Además, los tratamientos EMR y EEC destacaron, mostrando diferencias significativas del 43.67% y 27.27%, respectivamente, superando al testigo absoluto (Figura 17c). En la medición final de la longitud de raíz en maíz, todos los tratamientos evaluados mostraron diferencias altamente significativas en comparación con el testigo absoluto. El testigo comercial destacó, siendo 28.56% superior al testigo absoluto. Por otro lado, los tratamientos con EMR y EER no presentaron diferencias estadísticas respecto al testigo comercial. (Figura 17d).

Figura 17. Comportamiento de los valores medios de la longitud de raíz en plántulas de melón y Maiz tratadas con aspersiones de extractos de crucíferas



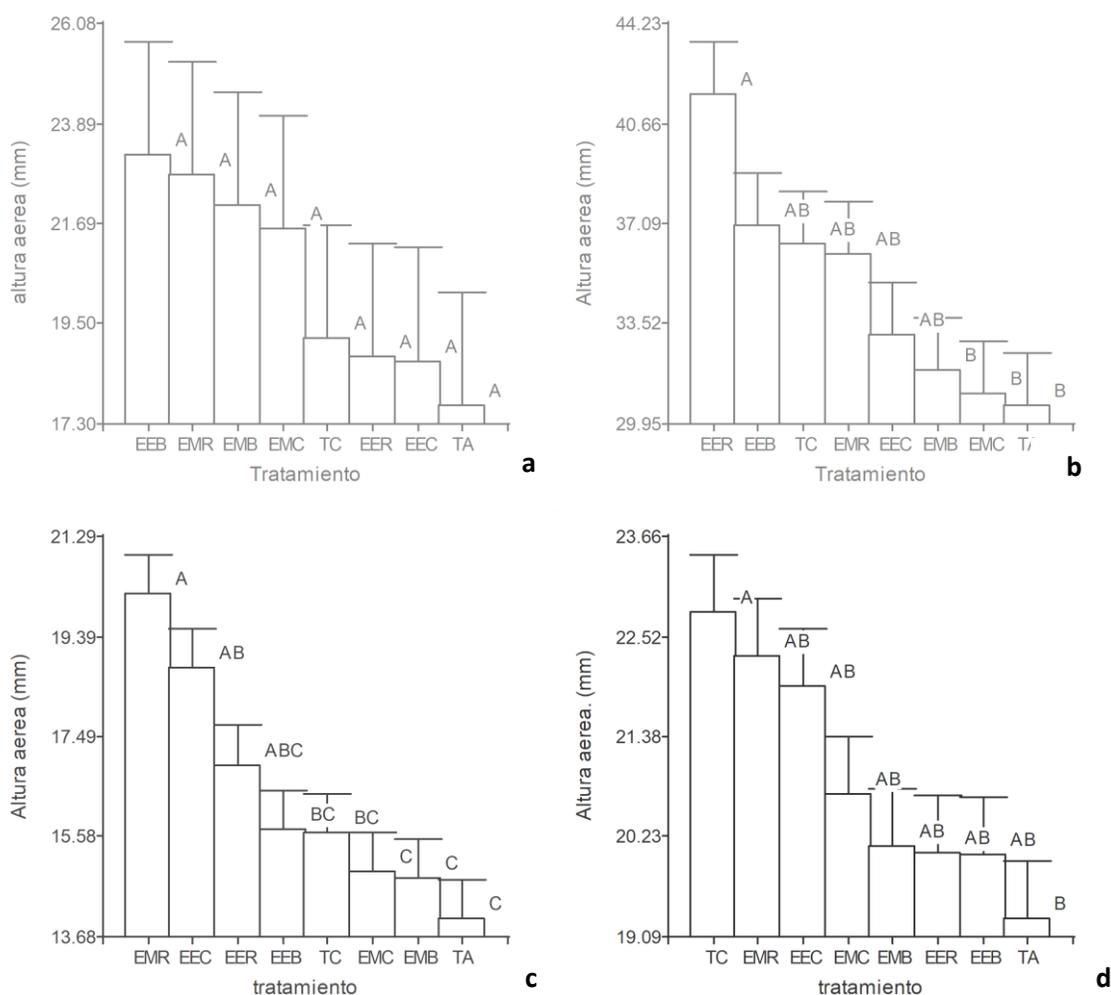
TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor

Desarrollo de las plántulas de melón y maíz tratadas con aspersiones foliares de extractos de crucíferas

Los valores medios obtenidos para los tratamientos evaluados en la medición intermedia no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sí para la longitud de plántula del melón (Figura 18a) para la medición final los resultados muestran que los tratamientos EEB, EEC y EER; EMR, EMB, EMC y TC obtuvieron valores estadísticamente similares al testigo absoluto (Figura 18b). Sin embargo, el tratamiento EER destacó significativamente, registrando una altura de planta 36.37% superior al testigo absoluto para la altura de planta en melón.

En la medición intermedia para la variable de altura de planta en maíz, los tratamientos EMR y EEC presentaron diferencias estadísticamente significativas, con incrementos del 43.97% y 33.99% en comparación con el testigo absoluto (Figura 18c) de igual manera en la medición final no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos y el testigo absoluto, excepto en el caso del TC y el tratamiento EMR, que superaron al testigo absoluto en un 18.13% y 15.54%, respectivamente. (Figura 18d).

Figura 18. Medias estadísticas de la altura de planta de melón y Maiz tratada con aspersiones de extracto de crucíferas

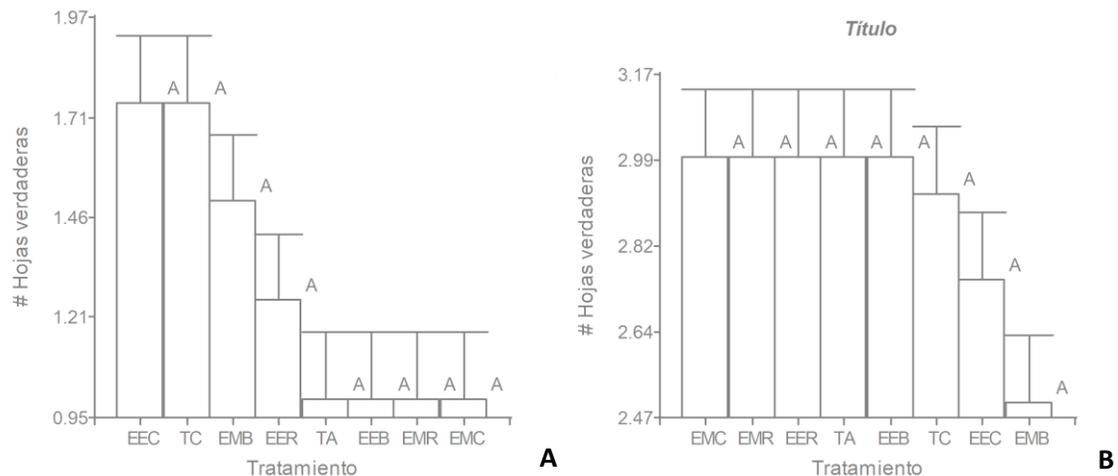


TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

Número de hojas verdaderas de plántulas de melón tratadas con aspersiones de extractos de crucíferas

Aunque el análisis de varianza en la medición intermedia indicó diferencias altamente significativas entre los tratamientos, estas no tuvieron un efecto observable en la variable, ya que todos los tratamientos se comportaron de manera uniforme (Figura 19a) y en la medición final los tratamientos evaluados tampoco demostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí (Figura 19b).

Figura 19. Media estadística del número de hojas verdaderas desarrolladas en plántula de melón con prueba de aspersión foliar de extractos de crucíferas



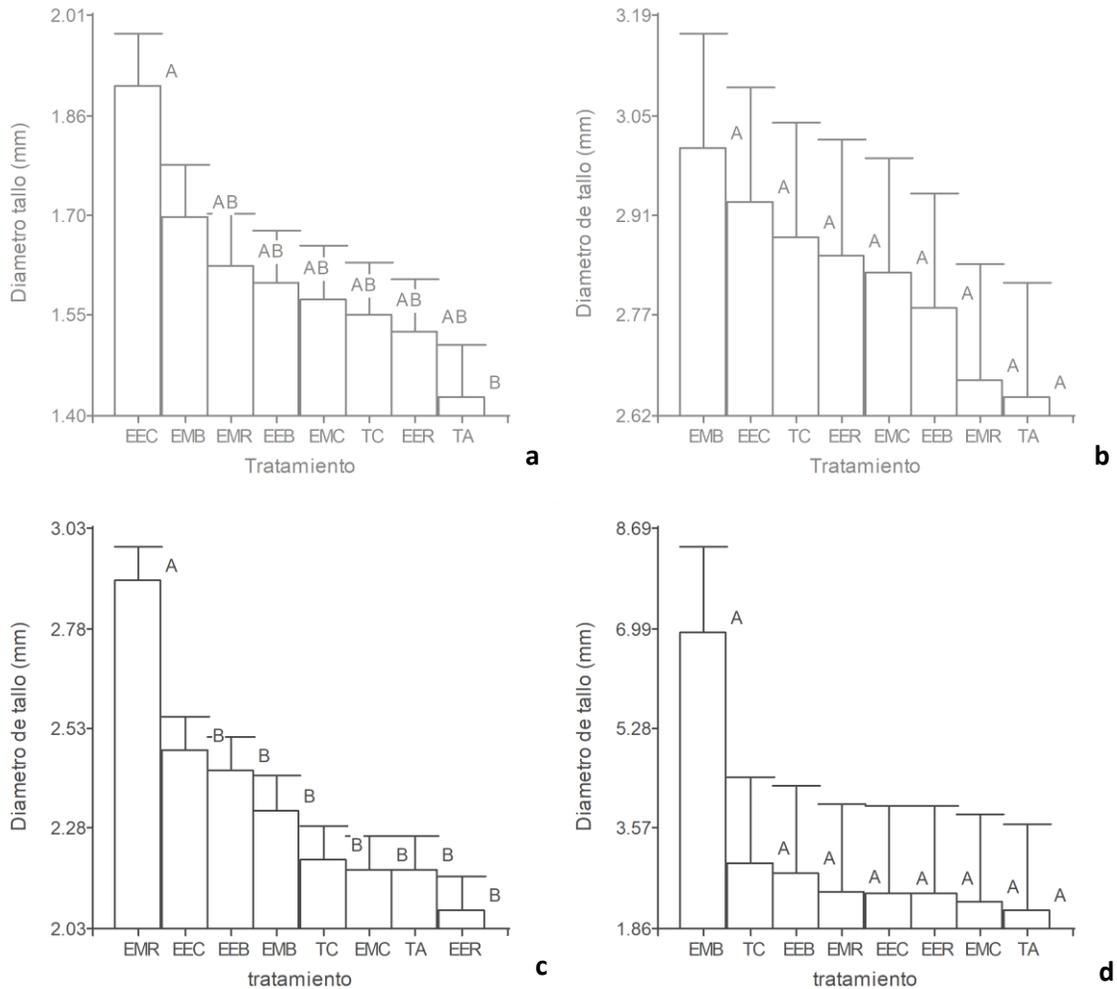
TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

Resultados para la variable de diámetro de tallo en plántulas de maíz y melón tratadas con aspersiones foliares de extractos de crucíferas

Para el caso de las plántulas de melón, en la medición intermedia todos los tratamientos evaluados fueron estadísticamente similares al testigo absoluto, excepto las plántulas tratadas EEC, las cuales presentaron un tallo 32.87% más grueso en comparación con el testigo (Figura 20a). En la medición final los tratamientos evaluados no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí en la variable de diámetro de tallo del melón (Figura 20b).

En la variable de diámetro de tallo del maíz en la medición intermedia, se observó que el tratamiento EMR presentó diferencias altamente significativas (Figura 20c), con un aumento del 33.02% en comparación con el testigo absoluto. En la misma variable de la medición final, los tratamientos evaluados no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí, en el diámetro de tallo del maíz (Figura 20d).

Figura 20. Comportamiento de los valores medios del diámetro de tallo en plántula de melón y maíz en prueba de aspersión de extractos de crucíferas



TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

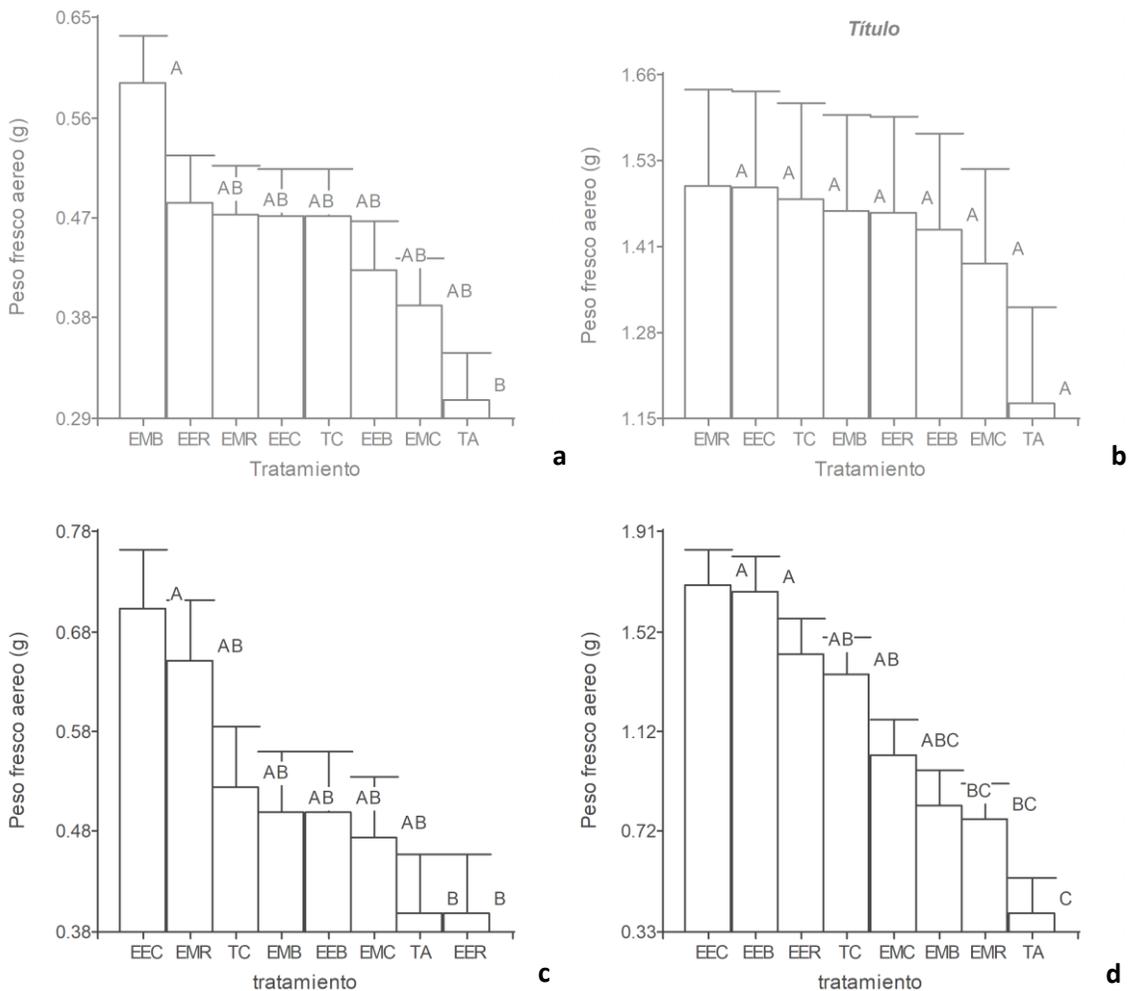
4.4.2 Acumulación de biomasa fresca y seca

Resultados para la variable peso fresco de la parte aérea de plántulas de melón y maíz tratadas con aspersiones foliares de extractos de crucíferas

Para el caso del cultivo de melón, las plántulas evaluadas permitieron observar que los tratamientos (Figura 21a) en la medición intermedia fueron estadísticamente similares al testigo absoluto, con la excepción de las plantas tratadas con el EMB, las cuales mostraron un peso fresco aéreo 90.32% superior en comparación con el testigo absoluto, en la medición final no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sí para esta variable (Figura 21b).

Para la medición intermedia de la variable de peso fresco de la parte aérea de la plántula de maíz, el tratamiento EEC presentó diferencias estadísticamente significativas (Figura 21c), siendo 75% superior al testigo absoluto. En la medición final los tratamientos EEC, EEB, EER y TC mostraron diferencias estadísticamente significativas, superando al testigo absoluto en 325%, 320%, 257.5% y 237.5%, respectivamente. (Figura 21d).

Figura 21. Comportamiento de la media estadística del peso fresco de la parte aérea de plántula de melón y maíz en prueba aspersión foliar con extractos de crucíferas



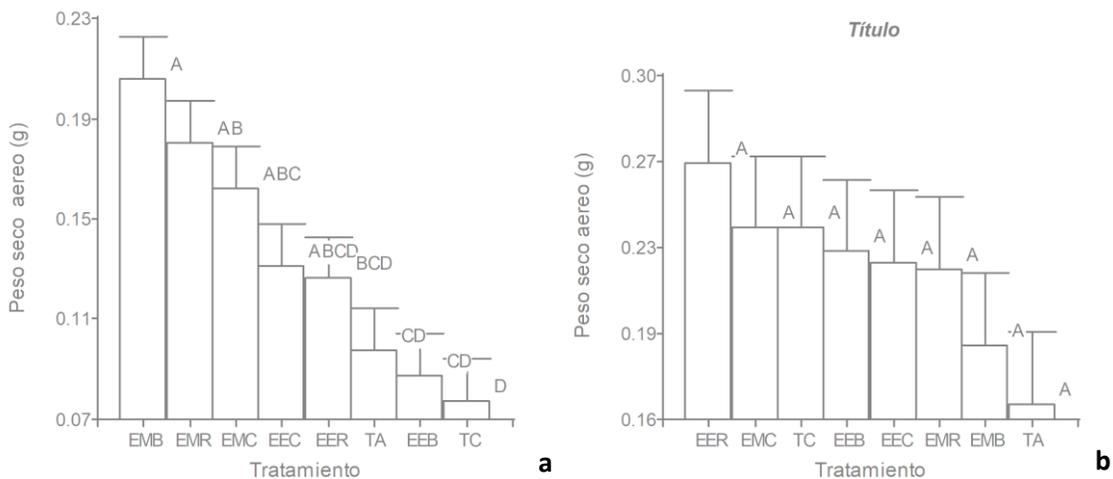
TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

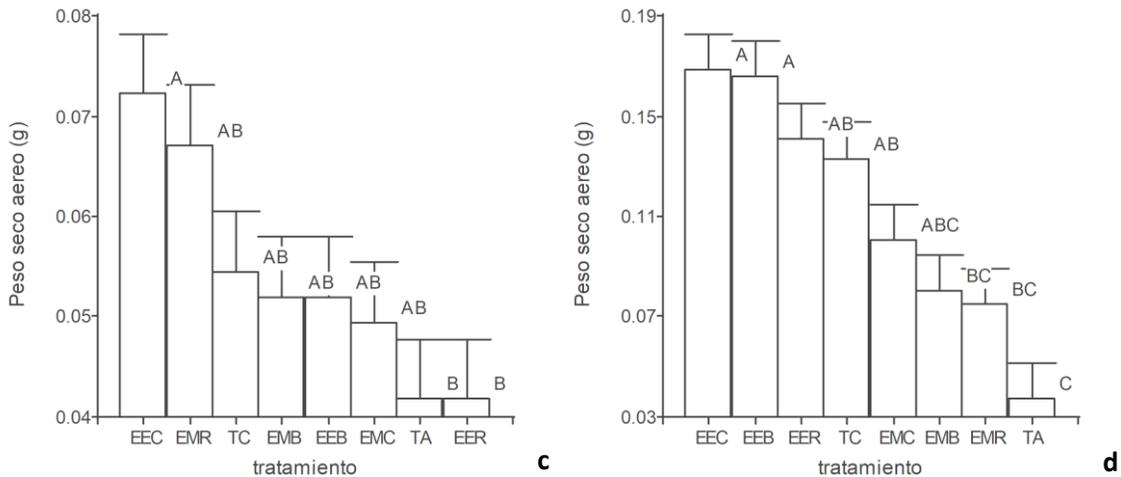
Resultados para la acumulación de biomasa seca en plántulas de melón y Maíz asperjadas con extractos de crucíferas

Se observa en la medición intermedia que los tratamientos con EMC Y EEC, EER, EEB, y TC no presentaron diferencias estadísticas respecto al testigo absoluto (Figura 22a). Sin embargo, los tratamientos EMB y EMR destacaron con incrementos en el peso seco aéreo del 100% y 90%, respectivamente, en comparación con el testigo absoluto. Cabe resaltar que las plántulas tratadas con EMB mostraron un peso seco en melón 150% superior al del testigo comercial. Los tratamientos evaluados en la medición final no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí para la variable peso seco aéreo en melón (Figura 22b).

En la variable de peso seco aéreo en la medición intermedia del maíz, el tratamiento con EEC mostró una diferencia estadísticamente significativa, con un incremento del 75% en comparación con el testigo absoluto (Figura 22c). En la medición final los tratamientos con EER y EEB presentaron incrementos altamente significativos (Figura 22d), siendo un 325% superiores al testigo absoluto. Adicionalmente, el tratamiento con EER y TC también mostraron diferencias estadísticamente significativas, alcanzando un 350% más que el testigo absoluto.

Figura 22. Comportamiento de las medias estadísticas de peso seco aéreo en plántula de melón y maíz asperjadas con extractos de crucíferas





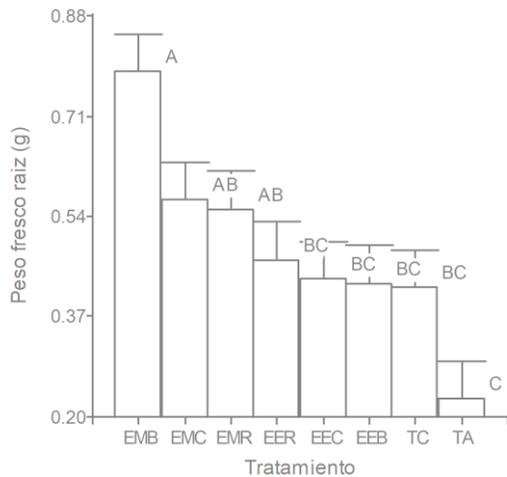
TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

Resultados para la variable de peso fresco de raíz de plántulas de melón y maíz asperjadas con extractos de crucíferas

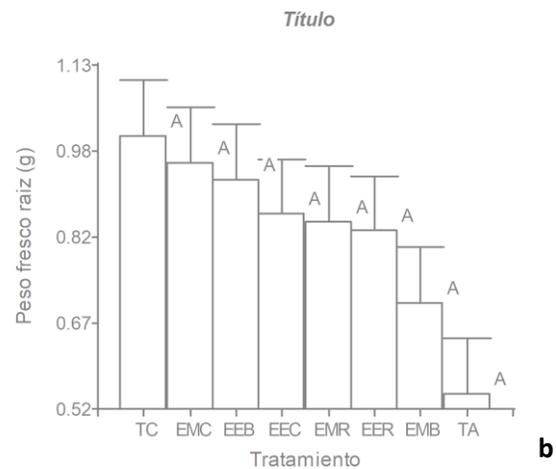
Se observaron diferencias altamente significativas en la medición intermedia entre los tratamientos evaluados. El tratamiento EMB destacó al presentar un incremento del 243.48% en comparación con el testigo absoluto y del 88.09% respecto al testigo comercial (Figura 23a). Asimismo, los tratamientos EMC y EMR mostraron incrementos significativos, siendo superiores al testigo absoluto en un 147.82% y un 139.13%, respectivamente en la variable de peso fresco de raíz en melón. En la medición final no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí para la variable de peso fresco de raíz en melón (Figura 23b).

En la medición intermedia de peso fresco raíz en maíz, los tratamientos EEB y EMR destacaron por obtener resultados estadísticamente significativos de 54.54%, mismos que superaron al testigo absoluto (Figura 23c). Para la medición final los tratamientos TC, EMC y EEB mostraron diferencias estadísticamente significativas con porcentajes 147.4%, 115.38% y 108.9% superiores al testigo absoluto. (Figura 23d).

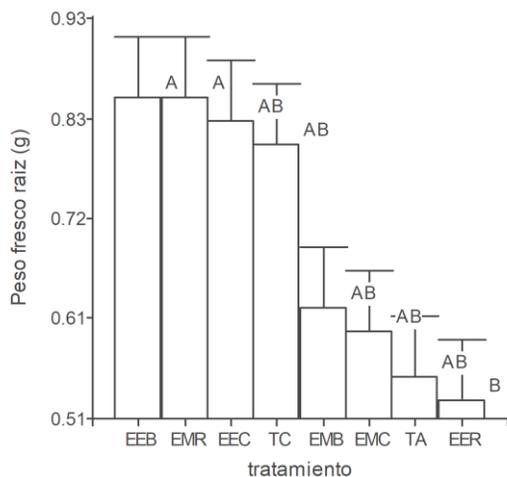
Figura 23. Comportamiento de las medias estadísticas de peso fresco en raíz de plántula de melón y Maiz asperjadas con extractos de crucíferas



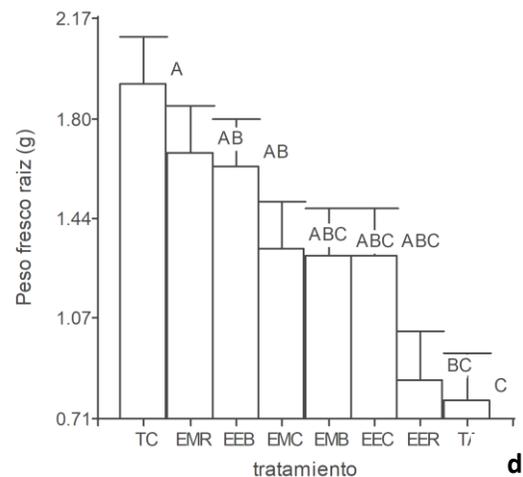
a



b



c



d

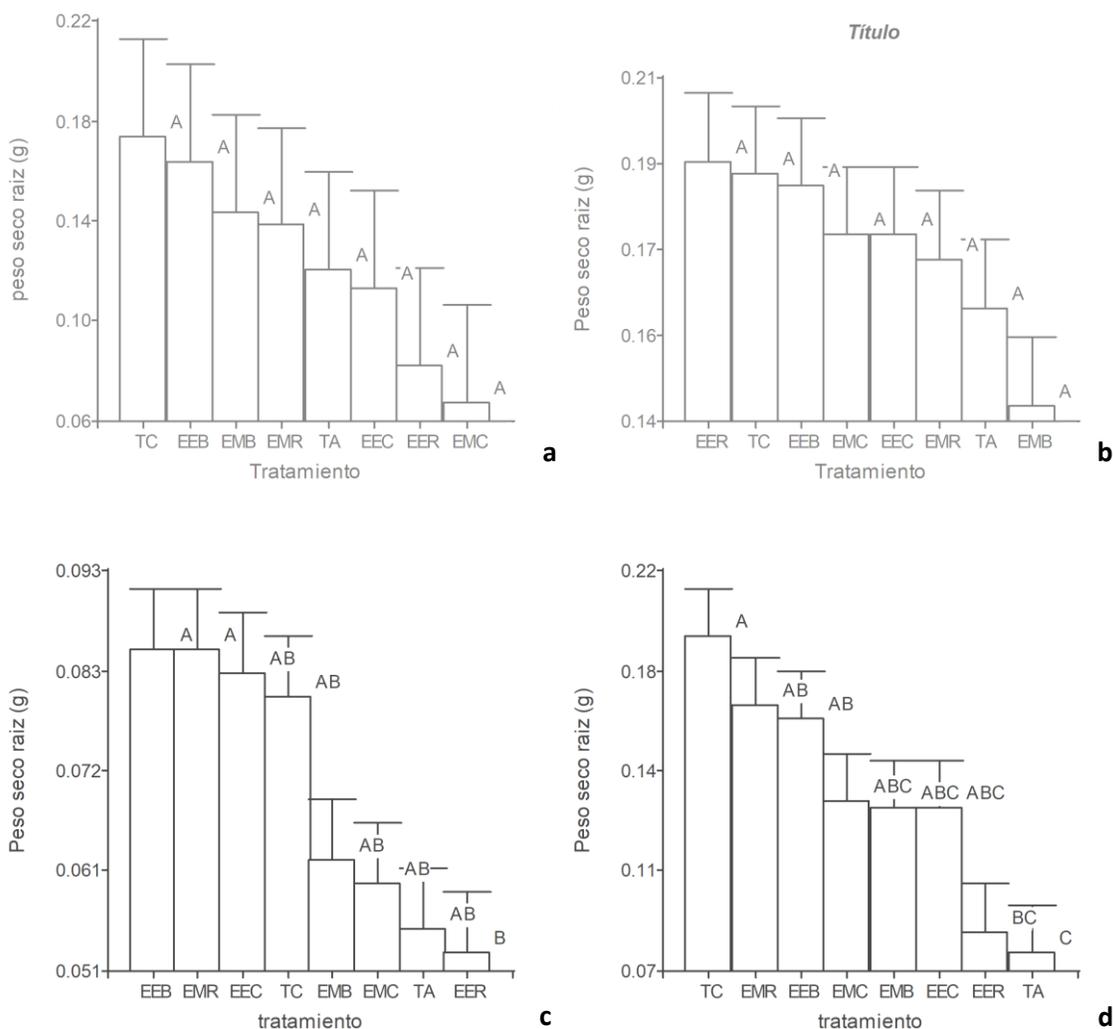
TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

Resultados para la variable de peso seco de raíz de plántulas de melón y maíz tratadas con aspersiones de extractos de crucíferas

En la medición intermedia se observaron diferencias altamente significativas (Figura 24a) entre los tratamientos evaluados. El tratamiento EMB destacó al presentar un incremento del 243.48% en comparación con el testigo absoluto y del 88.09% respecto al TC. Asimismo, los tratamientos EMC y EMR mostraron incrementos significativos, siendo superiores al testigo absoluto en un 147.82% y un 139.13%, respectivamente en peso seco de raíz en melón. En la medición final no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí para la variable de peso fresco de raíz en melón (Figura 24b).

La variable de peso seco de raíz de maíz en medición intermedia mostró que los tratamientos EEB y EMR obtuvieron resultados estadísticamente significativos (Figura 24c), con un 50% más de peso seco en comparación con el testigo absoluto. En la medición final los tratamientos TC, EMR y EEB presentaron diferencias estadísticamente significativas (Figura 24d) con incrementos de 237.5%, 212.5% y 200%, respectivamente, superando al testigo absoluto.

Figura 24. Comportamiento medio de la variable peso seco de raíz, en plántula de melón y maíz asperjadas con extractos de crucíferas



TA=Testigo Absoluto, TC=Testigo Comercial, EEB= Extracto Etanólico de Brócoli, EER= Extracto Etanólico de Repollo, EEC= Extracto Etanólico de Coliflor, EMB= Extracto Metanólico de brócoli, EMR= Extracto Metanólico de Repollo, EMC= Extracto Metanólico de Coliflor.

4.5 Discusión general sobre los efectos de extractos botánicos sobre germinación y crecimiento de plántulas

Aunque el uso de extractos de crucíferas empleados como bioestimulantes del proceso de germinación de maíz y melón, así como el crecimiento en etapas tempranas de este cultivo no está ampliamente documentada, algunos otros estudios reportan ciertos efectos positivos de algunos extractos botánicos empleados en procesos similares.

Así, Srimathi, Gokulakrishnan y Prakash (2021), han encontrado efectos positivos de los extractos de hojas de *Prosopis juliflora* y *Moringa oleífera* concentradas al 10%, empleadas en un proceso de seed priming en semillas de maíz, afectando positivamente el porcentaje de germinación, velocidad de germinación, longitud de plántula, producción de materia seca, índice de vigor I y II. Del mismo modo, Ahmed (2023) reportó un incremento significativo del porcentaje de germinación, tasa de germinación y crecimiento de plántula de maíz por efecto de la aplicación de seed priming con extractos de ajo (*Allium sativum*) y *Moringa oleífera* a 0.5 y 1.0 g mm⁻¹ y 0.25 y 0.5 g mm⁻¹ respectivamente.

Otros extractos como el de Cúrcuma (*Curcuma longa*) aplicados mediante seed priming, permiten incrementar la actividad enzimática y reducir el contenido de malondialdehído (MDA) en semillas de garbanzo, además, se ha encontrado la expresión de polipéptidos menores de albumina y globulina en dichas semillas (Kaushal et al., 2024).

En cucurbitáceas, se ha encontrado que los extractos proteicos hidrolizados obtenidos de biomasa de leguminosas mejoran el porcentaje de germinación, el tiempo promedio de germinación y el desarrollo temprano de plántulas de pepino (*Cucumis sativus*), este efecto se debe o se atribuye al contenido de un espectro amplio de aminoácidos y nitrógeno orgánico (Saadatian, Saleem & Abdullah, 2024).

V. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran el alto potencial de los extractos de crucíferas, particularmente los extractos etanólicos de brócoli y coliflor, para actuar favorablemente en la germinación y desarrollo de plántulas de maíz (*Zea mays*) y melón (*Cucumis melo*).

En la prueba *in vitro* el tratamiento de extracto etanólico de coliflor demostró ser más eficiente en cuanto a mayor porcentaje de germinación e incrementos en la longitud de raíz y plúmula.

En los experimentos *de seed priming* en invernadero, los extractos de brócoli aumentaron la tasa de germinación en un 20%, superando al testigo absoluto, lo

que demostró su eficacia para acelerar este proceso. Además, se observó un aumento significativo en la longitud de radícula y en la longitud de la plúmula, lo que sugiere un fortalecimiento en el desarrollo inicial de las plántulas.

Para las aplicaciones foliares, los resultados mostraron un incremento en el peso fresco de las plántulas de maíz y melón tratadas con los extractos etanólicos de brócoli, el peso seco también aumentó lo que indica una mayor acumulación de biomasa y un desarrollo más vigoroso en las plántulas que se les aplicó dicho tratamiento.

Por lo tanto, los extractos de crucíferas, en especial el de brócoli, demostraron ser eficaces en mejorar parámetros importantes en las plántulas como la germinación, el crecimiento radicular y el vigor general de las plántulas. Estos resultados exponen el potencial de los extractos como una alternativa natural y sostenible al uso de agroquímicos en la agricultura. Se concluye que los bioestimulantes pueden contribuir significativamente a prácticas agrícolas más ecológicas, favoreciendo la resiliencia de los cultivos frente al estrés abiótico y mejorando la eficiencia de los recursos. Se podrían realizar más investigaciones para saber las condiciones de campo de estos extractos evaluando el impacto a gran escala y en diferentes tipos de cultivos y suelo.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta Pérez, P. (2020). *Aislamiento y caracterización molecular de los genes trealosa-6-fosfato sintetasa (TPS) y trealosa-6-fosfato fosfatasa (TPP) y su relación en la tolerancia a estrés abiótico en plántulas de maíz (Zea mays)* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Ahmad, I., Pichtel, J., & Hayat, S. (Eds.). (2008). *Interacciones planta-bacteria: estrategias y técnicas para promover el crecimiento de las plantas*. John Wiley & Sons.
- Ahmed, A. A. (2023). Efficiency of using Garlic and Moringa extracts as a priming for improving germination traits and seedling growth of Maize (*Zea mays*, L.). *Egyptian Journal of Plant Breeding*, 27(2), 225-246.
- Azuma, K., Ippoushi, K., Ito, H., Higashio, H., & Terao, J. (1999). Evaluation of antioxidative activity of vegetable extracts in linoleic acid emulsion and phospholipid bilayers. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(14), 2010-2016.
- Baez-Flores M.E., Troncoso-Rojas, M. & Tiznado-Hernandez M.E. (2008). Biochemical and Genetic Responses of Fungi to the Toxic Effect of Synthetic and Natural Fungicides. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 29, 61-68.
- Baker W., Ollis W.D. 1995. Recent development in the chemistry of natural phenolic compound. *Natureforssch*. Vol 50. Pp 331-332
- Bednarek, P. (2012). Sulfur-containing secondary metabolites from *Arabidopsis thaliana* and other Brassicaceae with function in plant immunity. *Chembiochem* 13, 1846–1859. doi: 10.1002/cbic.201200086
- Behie, S. W., & Bidochka, M. J. (2014). Nutrient transfer in plant–fungal symbioses. *Trends in plant science*, 19(11), 734-740.
- Benavides Mendoza, A., & Fuentes Lara, L. O. (2022). *Libro de texto bioestimulantes*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Bonfante, P., & Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature communications*, 1(1), 48.
- Botella-Pavía, P., & Rodríguez-Concepción, M. (2006). Biotecnología de carotenoides en plantas para alimentos mejorados nutricionalmente. *Physiologia Plantarum*, 126(3), 369-381.
- Brazaitytė, A., Sakalauskiėnė, S., Samuolienė, G., Jankauskiėnė, J., Viršilė, A., Novičkova, A., ... y Duchovskis, P. (2015). Los efectos de los espectros e intensidad de la iluminación LED en el contenido de carotenoides en los microgreens de Brassicaceae. *Química de los alimentos*, 173, 600-606.

- Brown, P., & Saa, S. (2015). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 6, 671. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00671>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and soil*, 383, 3-41.
- Cartaya, O., & Reynaldo, I. (2001). Flavonoids: Chemical characteristics and applications. *Cultivos Tropicales*, 22(2),5-14. [date of Consultation November 20, 2022]. Retrieved from: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215009001>
- Carvajal Alcaraz, M., Moreno Fernández, D. Á., & García Ibáñez, P. (2023). *Desarrollo de bio-nanoencapsulaciones para la mejora de la estabilidad y biodisponibilidad de ingredientes bioactivos de crucíferas* [Tesis doctoral, Universidad de Murcia]. Repositorio Institucional de la Universidad de Murcia. <http://hdl.handle.net/10201/128525>
- Chávez Suárez, L., Álvarez Fonseca, A., & Ramírez Fernández, R. (2012). Apuntes sobre algunos reguladores del crecimiento vegetal que participan en la respuesta de las plantas frente al estrés abiótico. *Cultivos Tropicales*, 33(3), 47-56.
- Contreras Quiroz, M. D. R. (2012). *Germinación de semillas de especies nativas de los pastizales del altiplano del norte de México* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Correa Bustos, A. (2021). Respuesta bioestimulante a la aplicación de extractos de origen natural en el trasplante de arándanos en cultivo sin suelo.
- Czerniawski, P., & Bednarek, P. (2018). Glutathión S-transferasas en la biosíntesis de metabolitos secundarios que contienen azufre en plantas de Brassicaceae. *Fronteras de la Ciencia de las Plantas*, 9, 1639.
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia horticulturae*, 196, 3-14.
- Dunbar, K. L., Scharf, D. H., Litomska, A., and Hertweck, C. (2017). Enzymatic carbon-sulfur bond formation in natural product biosynthesis. *Chem. Rev.* 117, 5521–5577. doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00697
- El Hadrami, A., Adam, L. R., El Hadrami, I., & Daayf, F. (2010). Quitosano en la protección de plantas. *Drogas marinas*, 8(4), 968-987.
- Gonçalves, A. L. (2021). The use of microalgae and cyanobacteria in the improvement of agricultural practices: a review on their biofertilising, biostimulating and biopesticide roles. *Applied Sciences*, 11(2), 871.
- González Montenegro, C. E. (2021). *Efecto de diferentes concentraciones de agua de mar en el crecimiento y germinación de semillas híbridas de melón Cucumis melo*

L (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2021.).

- Hadwiger, L. A. (2013). Multiple effects of chitosan on plant systems: Solid science or hype. *Plant science*, 208, 42-49.
- Halpern, M., Bar-Tal, A., Ofek, M., Minz, D., Muller, T., & Yermiyahu, U. (2015). The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake. *Advances in agronomy*, 130, 141-174.
- Iturbide-Zuñiga, A. S., Colinas-León, M. T. B., Lozoya-Saldaña, H., Medina-Moreno, S. A., & Ayala-Arreola, J. (2017). In vitro evaluation of extracts from the *Lilium* genus to control *Fusarium oxysporum*. *Revista mexicana de fitopatología*, 35(3), 611-622.
- Jadhav, U., Ezhilarasan, R., Vaughn, S. F., Berhow, M. A., & Mohanam, S. (2007). Iberin induces cell cycle arrest and apoptosis in human neuroblastoma cells. *International journal of molecular medicine*, 19(3), 353-361.
- Katiyar, D., Hemantaranjan, A., & Singh, B. (2015). El quitosano como un compuesto natural prometedor para mejorar las posibles respuestas fisiológicas en las plantas: una revisión. *Revista India de Fisiología Vegetal*, 20, 1-9.
- Kaushal, K., Rajani, K., Kumar, R.R. et al. Physio-biochemical responses and crop performance analysis in chickpea upon botanical priming. *Sci Rep* 14, 9342 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59878-8>
- Kopsell, D. A., & Kopsell, D. E. (2006). Accumulation and bioavailability of dietary carotenoids in vegetable crops. *Trends in plant science*, 11(10), 499-507.
- Martínez de la Cruz, S. (2018). *Detección de micotoxinas en poblaciones de maíces criollos mexicanos*. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/45445>
- Mayanglambam, S., Singh, K. D., & Rajashekar, Y. (2021). Enfoques biológicos actuales para el manejo de plagas de crucíferas. *Informes científicos*, 11(1), 11831.
- Mendoza, A. B. (2021). Bioestimulantes agrícolas: Importancia y definición.
- Mithen, R. (2001). Glucosinolates—biochemistry, genetics and biological activity. *Plant Growth Regulation*, 34, 91-103.
- Morra, M. J., & Kirkegaard, J. A. (2002). Liberación de isotiocianato de los tejidos de *Brassica* incorporados en el suelo. *Biología y Bioquímica del Suelo*, 34(11), 1683-1690.
- Mukherjee, P. K., Horwitz, B. A., Herrera-Estrella, A., Schmoll, M., & Kenerley, C. M. (2013). Trichoderma research in the genome era. *Annual review of phytopathology*, 51(1), 105-129.
- Nicolás, C., Hermosa, R., Rubio, B., Mukherjee, P.K., Monte, E., 2014. Trichoderma genes in plants for stress tolerance-status and prospects. *Plant Sci*. 228, 71–78.

- Ortiz-Galeana, M. A., Hernández-Salmerón, J. E., Valenzuela-Aragón, B., Rocha-Granados, M., & Santoyo, G. (2018). Diversidad de bacterias endófitas cultivables asociadas a plantas de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) cv. Biloxi con actividades promotoras del crecimiento vegetal. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 34(2), 140-151.
- Ou, B., Huang, D., Hampsch-Woodill, M., Flanagan, J. A., & Deemer, E. K. (2002). Analysis of antioxidant activities of common vegetables employing oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and ferric reducing antioxidant power (FRAP) assays: a comparative study. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50(11), 3122-3128.
- Paliwal, R. L. (2001). *El Maiz en Los Tropicos: Mejoramiento Y Produccion (Coleccion FAO: Produccion Y Proteccion Vegetal)* (No. 28). Food & Agriculture Org.
- Pedras, M. S. C., Yaya, E. E., and Glawischnig, E. (2011). The phytoalexins from cultivated and wild crucifers: chemistry and biology. *Nat. Prod. Rep.* 28, 1381–1405. doi: 10.1039/C1NP00020A
- Pérez Pérez, C. J. (2007). Germinación de semillas de mimosa aculeaticarpa var. biuncifera (benth) barneby (fabaceas).
- Pérez Piceno, L. A. (2022). *Evaluación de subproductos de crucíferas para el biocontrol de Fusarium Oxysporum en el cultivo de tomate* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Recuperado de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/48507>
- Ramirez, D., Abellán-Victorio, A., Beretta, V., Camargo, A., & Moreno, D. A. (2020). *Functional Ingredients From Brassicaceae Species: Overview and Perspectives*. Laboratorio de Cromatografía para Agroalimentos, Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo.
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in plant science*, 11, 40.
- Saadatian, M., Saleem, K., & Abdullah, H. (2024). Seed Priming with Vegetal Protein Hydrolysate Enhances Germination and Early Seedling Growth in *Cucumis sativus* L. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 12(2), 181-188. doi: 10.22059/ijhst.2024.358649.637
- Sandoval Ortiz, W. X. (2022). *Valoración de residuos de crucíferas para el biocontrol y bioestimulación de plantas de tomate infectadas con Fusarium*.
- Shankar, S., Segaran, G., Sundar, R. D. V., Settu, S., & Sathivelu, M. (2019). Brassicaceae-A classical review on its pharmacological activities. *Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res*, 55(1), 107-113.

- Sonderby, I. E., Geu-Flores, F., and Halkier, B. A. (2010). Biosynthesis of glucosinolates - gene discovery and beyond. *Trends Plant Sci.* 15, 283–290. doi: 10.1016/j.tplants.2010.02.005
- Srimathi, S., Gokulakrishnan, J., y Prakash, M. (2021). Effect of seed priming with botanical leaf extracts on seed quality and yield of maize hybrid, coh (m) 4. *The Journal of Research Angraui*, 49(1), 37-44.
- Suárez, D., & Melgarejo, L. M. (2010). Biología y germinación de semillas. *Experimentos en fisiología vegetal*, 13-25.
- Sun, J., Zhang, M., & Chen, P. (2016). GLS-finder: Una plataforma para el perfilado rápido de glucosinolatos en hortalizas de Brassica. *Revista de química agrícola y alimentaria*, 64(21), 4407-4415
- Tofiño A., Romero H. y Ceballos H. (2007). Efecto del estrés abiótico sobre la síntesis y degradación de almidón. Artículo científico. Available at: <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v25n2/v25n2a06.pdf>
- Ungureanu, C., Fierascu, I., & Fierascu, R. C. (2022). Aprovechamiento sostenible de residuos crucíferos en aplicaciones nanotecnológicas. *Revestimientos*, 12(6), 769.
- Villatoro Pulido, M. M. (2011). *Caracterización nutricional y agronómica, análisis de la actividad biológica y selección de crucíferas para uso alimentario*.
- Wu, X.; Beecher, G.R.; Holden, J.M.; Haytowitz, D.B.; Gebhardt, S.E.; Prior, R.L. Lipophilic and hydrophilic antioxidant capacities of common foods in the United States. *J. Agric. Food Chem.* 2004, 52, 4026–4037. [CrossRef] [PubMed]
- Yin, H., Zhao, X., & Du, Y. (2010). Oligochitosan: una vacuna contra las enfermedades de las plantas: una revisión. *Polímeros de carbohidratos*, 82(1), 1-8.
- Zhou, K., & Yu, L. (2006). Total phenolic contents and antioxidant properties of commonly consumed vegetables grown in Colorado. *LWT-Food Science and Technology*, 39(10), 1155-1162.