

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA EN BROTES DE RÁBANO
(*RAPHANUS SATIVUS* L.) A LA APLICACIÓN EXÓGENA DE
MELATONINA**

POR

DAISY ANGÉLICA ROJAS QUIERO

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE
2026**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA EN BROTES DE RÁBANO
(*RAPHANUS SATIVUS* L.) A LA APLICACIÓN EXÓGENA DE
MELATONINA**

POR

DAISY ANGÉLICA ROJAS QUIERO

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE
2026**

Aprobada por:

Profesor Titular, María Dolores López B.
Licenciada en Química, Dr.

Guía

Investigadora Clemson U., Karin Albornoz M.
Ing. Agrónomo, PhD

Co-Guía

Profesor Asociado, Susana Fischer
Ing. Agrónomo, PhD

Asesor

Profesor Asistente, Paula Vásquez
Ing. Agrónomo, Mg

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen.....	1
Summary.....	1
Introducción.....	2
Materiales y métodos.....	5
Resultados y discusión.....	10
Conclusiones.....	20
Referencias.....	21

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		Página
Figura 1	Distribución de los tratamientos en el diseño experimental completamente al azar.....	7
Figura 2	Crecimiento de los brotes de rábano como respuesta de los tratamientos de elicitación. Peso fresco (a), peso seco (b) y longitud del hipocótilo (c).....	10
Figura 3	Contenido de polifenoles totales (mg 100 g ⁻¹ de peso seco) en brotes de rábano.....	15
Figura 4	Evaluación de la capacidad antioxidante, DPPH y ORAC (μmol Trolox 100 g ⁻¹), en brotes de rábano.....	19
Tabla 1	Contenido de glucosinolatos (mg 100 g ⁻¹ de peso seco) individuales y totales en brotes de rábano después de la aplicación de los elicitores en los tratamientos.	13
Tabla 2	Contenido de antocianinas (mg 100 g ⁻¹ de peso seco) en brotes de rábano después de la aplicación de diferentes tratamientos con elicitores.....	17

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA EN BROTES DE RÁBANO (*RAPHANUS SATIVUS* L.) A LA APLICACIÓN EXÓGENA DE MELATONINA

ASSESSMENT OF THE RESPONSE OF RADISH SPROUT (*RAPHANUS SATIVUS* L.) TO EXOGENOUS MELATONIN APPLICATION

Palabras índice adicionales: elicitación, compuestos bioactivos, glucosinolatos, fitoquímicos, antioxidantes.

RESUMEN

Las Brassicas destacan por su alto valor nutricional y su contenido de compuestos fitoquímicos, como glucosinolatos, polifenoles y antocianinas, asociados a efectos antioxidantes y antiinflamatorios con potencial rol protector frente a enfermedades crónicas. En la etapa de brotes, estos metabolitos se encuentran en mayores concentraciones que en plantas adultas. Para potenciar su biosíntesis se emplea la elicitación, una estrategia que activa rutas metabólicas de defensa, siendo la melatonina un elicitador emergente. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación exógena de melatonina sobre la biomasa, la capacidad antioxidante y el contenido de compuestos bioactivos en brotes de *Raphanus sativus* L. Se aplicaron 100, 200 y 300 ppm de melatonina, junto con controles con agua y Tween 20. La dosis más alta redujo significativamente la biomasa, con una disminución del 61,47 % en el peso fresco respecto al control (29,0 g). En contraste, 200 ppm promovió una mayor acumulación de glucosinolatos totales (595,0 mg 100 g⁻¹), destacando la glucorafenina, mientras que polifenoles, antocianinas y capacidad antioxidante respondieron de forma dosis dependiente. Estos resultados indican que la melatonina modula el metabolismo secundario y representa una estrategia prometedora para mejorar la calidad funcional de brotes con potencial aplicación en la industria alimentaria.

SUMMARY

Brassicas are recognized for their high nutritional value and their content of

phytochemicals such as glucosinolates, polyphenols, and anthocyanins, which are associated with antioxidant and anti-inflammatory effects and a potential protective role against chronic diseases. At the sprout stage, these metabolites are present at higher concentrations than in mature plants. To enhance their biosynthesis, elicitation is employed as a strategy that activates defense-related metabolic pathways, with melatonin emerging as a promising elicitor. The aim of this study was to evaluate the effect of exogenous melatonin application on biomass, antioxidant capacity, and the content of bioactive compounds in *Raphanus sativus* L. sprouts. Melatonin was applied at 100, 200, and 300 ppm, along with water and Tween 20 controls. The highest dose significantly reduced biomass, with a 61.47 % decrease in fresh weight compared to the control (29.0 g). In contrast, 200 ppm promoted a higher accumulation of total glucosinolates (595.0 mg 100 g⁻¹), with glucoraphenin as the predominant compound, while polyphenols, anthocyanins, and antioxidant capacity showed dose-dependent responses. These results indicate that melatonin modulates secondary metabolism and represents a promising strategy to enhance the functional quality of sprouts with potential applications in the food industry.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existe una creciente preocupación por acceder a alimentos saludables que contribuyan a reducir la inseguridad alimentaria y mejorar la salud (Afshin *et al.*, 2019; Martínez-Sanguinetti *et al.*, 2019). Entre estos, los alimentos ricos en fitoquímicos destacan por su aporte complementario a carbohidratos, proteínas, vitaminas y ácidos grasos. Los fitoquímicos poseen reconocidas propiedades antioxidantes y antiinflamatorias asociadas a la prevención de enfermedades crónicas como cardiovasculares, diabetes, obesidad y trastornos neurodegenerativos (Zhang *et al.*, 2015). Su incorporación en productos alimentarios puede aumentar el valor saludable y la aceptación por parte de los consumidores (Sagar *et al.*, 2018). Además, las hortalizas de hoja tradicionales aportan fitoquímicos junto con minerales esenciales, reforzando su relevancia nutricional (Sivakumar *et al.*, 2018). Por lo tanto, una dieta rica en frutas y hortalizas, fuente natural de estos compuestos, se asocia con una menor incidencia de

enfermedades crónicas (Boyer y Liu, 2004).

Los glucosinolatos son metabolitos secundarios que contienen azufre y nitrógeno, y se clasifican en alifáticos, aromáticos e indólicos según su precursor aminoacídico (Fahey *et al.*, 2001). Las Brassicas destacan por su alta acumulación, especialmente en brotes, donde pueden concentrarse hasta 20 veces más que en plantas adultas (Baenas *et al.*, 2016). Aunque los glucosinolatos poseen baja actividad biológica, sus productos de hidrólisis, generados por la enzima mirosinasa, son potentes bioactivos involucrados en defensa vegetal, atracción de insectos y en el sabor y aroma característicos. Entre ellos, los isotiocianatos son los más comunes y se asocian a propiedades anticancerígenas. Asimismo, los glucosinolatos indólicos y aquellos con grupos alquenilo aportan notas amargas (Halkier y Gershenzon, 2006).

La elicitación consiste en aplicar pequeñas cantidades de sustancias capaces de activar o potenciar la biosíntesis de compuestos específicos en los organismos (Radman *et al.*, 2003). Los elicitores suelen clasificarse según su origen y estructura molecular en bióticos, de origen biológico, provenientes del patógeno o de la planta, y abióticos, que incluyen factores físicos o químicos (Vasconsuelo y Boland, 2007). También pueden distinguirse por su interacción con la planta en elicitores generales, que inducen defensas en múltiples hospedadores, y específicos, que actúan sólo en plantas hospedantes (Vasconsuelo y Boland, 2007). La elicitación representa una herramienta valiosa para la industria hortofrutícola, ya que permite incrementar el contenido nutracéutico y mejorar el perfil fitoquímico de los productos. Estos metabolitos aportan propiedades organolépticas, capacidad antioxidante, actividad antimicrobiana y contribuyen al color de frutas y hortalizas (Baenas *et al.*, 2014; Cisneros-Zevallos, 2003).

Una de las moléculas que puede ser utilizadas en la elicitación es la melatonina, *N*-acetil-metoxitriptamina (Chen *et al.*, 2009). Es una indolamina que fue descubierta en animales en 1958 y tiempo después se detectó en una microalga unicelular llamada *Lingolium polyedrum*. Esto dio paso a estudiar la melatonina en plantas superiores (Arnao y Hernández-Ruiz, 2014).

En humanos, la melatonina tiene múltiples funciones fisiológicas, como influir en

los estados de ánimo, en los ritmos circadianos, los que regulan la actividad metabólica y hormonal durante el día. Además, influye en el sueño, en la temperatura corporal, ingesta de alimentos, entre otros (Arnao y Hernández-Ruiz, 2014).

En plantas, se ha estudiado que la melatonina cumple funciones de antioxidante y elimina radicales libres, de esta manera protege a macromoléculas del estrés oxidativo (Reiter *et al.*, 2001). También es capaz de regular el crecimiento, interfiriendo en funciones de las auxinas, junto con activar la germinación y retrasar senescencia foliar (Chen *et al.*, 2009; Arnao y Hernández-Ruiz, 2014).

En cuanto a la biosíntesis de la melatonina, su precursor es el aminoácido triptófano, el cual modula su producción. Múltiples factores estimulan la biosíntesis de melatonina, como la luz, la maduración de la fruta, el desarrollo de las hojas, la sequía, el frío, calor, entre otros (Fan *et al.*, 2018). Cuando es sintetizada endógenamente se encarga de cumplir funciones contra el estrés biótico y abiótico, junto con la tolerancia a metales pesados, a sequía, radiación UV, temperaturas, etc. Funciones similares cumple si la planta es tratada exógenamente (Park *et al.*, 2021).

Además, la melatonina es un compuesto que se encuentra en bajas concentraciones en los alimentos, como en frutas, verduras, cereales y algunas legumbres (Aguilera *et al.*, 2015). Burkhardt *et al.* (2001) investigaron la aplicación exógena en cerezas ácidas Montmorency y Balaton (*Prunus cerasus* L. Rosaceae), cuyo objetivo fue cuantificar la melatonina del fruto en diferentes condiciones. Estas fueron cosechadas en diferentes épocas (julio y agosto) y grados de madurez. Ambas especies presentaron concentraciones de melatonina equivalentes entre sí. Pero las cerezas Montmorency tenían diferencias al cosecharlas en árboles distintos.

Por otro lado, Chen *et al.* (2009) estudiaron la aplicación exógena de melatonina en plántulas de mostaza de hoja silvestre (*Brassica juncea*) para evaluar el efecto sobre el crecimiento radicular. Dentro de sus resultados encontraron que la melatonina aplicada aumentó el crecimiento de las raíces con bajas concentraciones, pero al ser aplicada en concentraciones altas, el crecimiento fue

inhibido.

Este trabajo se enfocó en el rábano o rabanito (*Raphanus sativus*), especie originaria de Europa y Asia, perteneciente a la familia Brassicaceae y al género *Raphanus* (Gamba *et al.*, 2021). Se trata de una hortaliza de ciclo corto, con crecimiento rápido, destacada por su raíz comestible, junto con sus hojas y brotes, que son utilizadas en diversas preparaciones alrededor del mundo. Además, presenta una amplia variabilidad de colores y una pulpa blanca característica (Banihani, 2017). En los últimos años ha aumentado el interés de brotes por sus propiedades anticancerígenas, especialmente debido a los isotiocianatos, compuestos que exhiben múltiples mecanismos con potencial antitumoral (Manivannan *et al.*, 2019). Asimismo, los rábanos, particularmente los de color rojo, son ricos en antocianos, pigmentos responsables del color de las raíces y cuyo principal aporte radica en sus propiedades antioxidantes y su capacidad para eliminar radicales oxidativos (Gamba *et al.*, 2021).

Por lo tanto, un mayor contenido de estos fitoquímicos incrementaría la actividad biológica de brotes de rábano y su impacto positivo en la salud, por lo que aplicaciones exógenas de elicitores, como la melatonina, podrían enriquecer su composición fitoquímica en un marco de sustentabilidad y seguridad alimentaria. En este contexto, el objetivo general fue evaluar el efecto de la melatonina exógena sobre la biomasa, la capacidad antioxidante y el contenido de compuestos bioactivos en brotes de *Raphanus sativus* L.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal y germinación de semillas

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Bioactivos en Plantas e Ingredientes Vegetales (BIOINVE) de la Universidad de Concepción, campus Concepción. Las semillas destinadas a la generación de brotes de rábano (*Raphanus sativus* L. cv. 'Sparkler') se obtuvieron en la Semillería San Alfonso SL (Santiago, Chile). Estas fueron remojadas en 5 g L⁻¹ de hipoclorito de sodio bajo aireación durante 4 horas, a continuación, fueron sumergidas en agua destilada bajo aireación durante 24 horas. Posteriormente, las semillas se distribuyeron en

bandejas de brotación (17 x 13 cm) con fibra de coco como sustrato (5 g de semillas por bandeja). Estas bandejas fueron trasladadas a la cámara de crecimiento vegetal con condiciones ambientales controladas. El fotoperiodo se estableció en 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad (16:8). La temperatura del aire fue de 20 °C. Se mantuvo una humedad relativa (HR) del 60 % y una radiación fotosintéticamente activa (PAR) de 350 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Las bandejas se ubicaron a 60 cm aproximadamente de la luz. Durante los tres primeros días todas las bandejas permanecieron en condiciones de oscuridad con papel de aluminio para estimular la elongación del tallo.

Tratamientos y diseño experimental

El elicitador y dosis de los tratamientos se seleccionaron de acuerdo con la literatura revisada en estudios de diferentes especies vegetales. El estudio se realizó con 5 tratamientos que contempló 3 concentraciones distintas de melatonina (MT1:100 ppm, MT2: 200 ppm y MT3: 300 ppm de melatonina respectivamente), un control con agua destilada y otro control con Tween 20. La melatonina se obtuvo de Sigma Aldrich (St. Louis, USA).

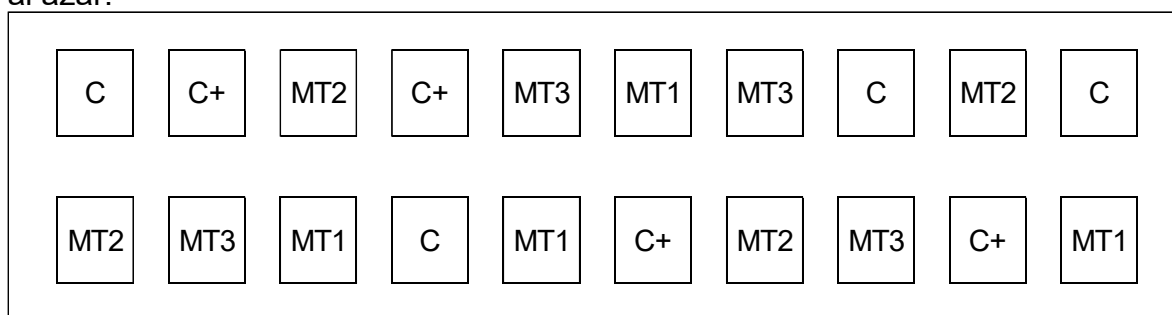
Tween 20 corresponde a un tensioactivo no iónico o surfactante, se utiliza como agente humectante para reducir la tensión superficial del agua y facilitar la solubilización de compuestos lipofílicos. En este ensayo se utilizó a una concentración de 1 % (v/v), para disolver la melatonina, la cual es poco soluble en agua.

En cuanto a la preparación de los tratamientos con melatonina, se comenzó con la dosis de 300 ppm. Para ello, se pesó 300 mg de melatonina (pureza ≥ 98 %), que se disolvió con 10 mL de Tween 20 y se completó con 990 mL de agua destilada. A partir de la disolución preparada de 300 ppm se procedió a realizar la dosis de 200 ppm, donde se tomó 67 mL y se disolvió hasta completar con agua destilada un volumen de 100 mL. Por último, para la dosis de 100 ppm, se tomó 34 mL del stock de 300 ppm y se disolvió hasta completar 100 mL con agua destilada.

El estudio se realizó con un diseño experimental completamente al azar, donde se llevó a cabo 4 repeticiones por tratamiento (Figura 1). Lo cuales fueron aplicados a través de pulverización exógena aérea con 3 mL de la solución de cada

concentración de MT y controles. Se realizaron un total de 5 aplicaciones, con una frecuencia de día por medio, además se aplicó un riego de mantención (100 mL de agua destilada por bandeja) en las mismas fechas de la aplicación de los tratamientos. Las aplicaciones se realizaron desde el día siguiente a la siembra hasta el día 10. Después de este período de crecimiento, se recolectaron los brotes, proceso realizado transcurridas 24 horas desde la última aplicación. Con el propósito de efectuar los análisis de las 20 bandejas, es decir 4 bandejas por tratamiento.

Figura 1. Distribución de los tratamientos en el diseño experimental completamente al azar.



C: Control con agua destilada; C+: Control con Tween 20; MT1: Melatonina 100 ppm, MT2: Melatonina 200 ppm, MT3: Melatonina 300 ppm. Fuente: Elaboración propia.

Desarrollo de longitud del hipocótilo y biomasa

Se determinó la longitud de 10 brotes por bandeja midiendo con una regla la distancia desde la base del hipocótilo hasta la parte superior de los brotes del rábano, luego se calculó un promedio por cada tratamiento. Además, se determinó el peso fresco promedio (g) con una balanza digital. A continuación, se utilizó un equipo liofilizador (OPERON, Corea) para liofilizar las muestras y de esta manera realizar el pesaje del brote seco (g).

Extracción de GSL y análisis HPLC-DAD-ESI-MSn

Los glucosinolatos (GSL) se extrajeron de muestras liofilizadas y molidas (100 mg), utilizando 1 mL de metanol al 70% (v/v) en tubos Falcon de 15 mL. Los tubos fueron calentados durante un período de 20 min en un baño calefactor a 70 °C, realizando agitación en vortex cada 5 min para mejorar la extracción. Para detener la extracción, la mezcla de reacción se colocó en baño de agua helada durante 5 min. Por último, los extractos se centrifugaron a 13000 rpm durante 15 min. Se recogieron los sobrenadantes y se filtraron a través de una membrana de fluoruro de

polivinilideno (PVDF) de 0,45 μm . Todas las muestras se almacenaron a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ antes de su análisis.

Los glucosinolatos se identificaron mediante los espectros de UV-Visible, tiempos de retención y sus patrones de fragmentación (M- y MSn) a través de la técnica HPLC-DAD-ESI-MSn, según el método detallado por Baenas *et al.* (2016). HPLC hace referencia a la cromatografía líquida de alta eficiencia que está conectada a la detección de espectrometría de masas de ionización por electrospray (ESI-MS) y la detección de matriz de fotodiodos (DAD) (Kajdžanoska *et al.*, 2010). Los cromatogramas se registraron a 227 nm, y la cuantificación de los GSL intactos se llevó a cabo utilizando glucoerucina y glucobrassicina como estándares para glucosinolatos alifáticos e indólicos, respectivamente (Sigma Aldrich, St. Louis, MO, USA). Los resultados se expresaron como mg 100 g^{-1} de peso seco.

Extracción de antioxidantes y fenoles totales en brotes

La extracción se realizó basándose en el método utilizado por Ferreres *et al.* (2009). Para extraer los compuestos se pesó 0,5 g de cada muestra previamente liofilizada, y se agregó 5 mL de solución de $\text{H}_2\text{O}/\text{MeOH}/\text{ácido fórmico}$ (24:25:1) a cada tubo Falcon, los cuales fueron agitados en vortex durante 5 min. A continuación, los tubos fueron llevados al ultrasonido (en frío) por 1 hora y posteriormente se refrigeraron a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante la noche. Al día siguiente se colocaron nuevamente en ultrasonido durante 1 hora y se centrifugaron a 3500 rpm durante 15 min. Finalizada la centrifugación se filtró el sobrenadante por una membrana de PVDF de 0,22 μm , cuyo extracto se utilizó para analizar polifenoles totales, contenido total de antocianinas y capacidad antioxidante (DPPH y ORAC).

Análisis de polifenoles totales en brotes

Para determinar polifenoles totales, se utilizó el método de Folin Ciocalteu utilizando microplaca. A cada pocillo de la microplaca se agregó 25 μL de la muestra, 25 μL del reactivo Folin Ciocalteu y 200 μL de agua Tipo 1. A continuación, se agitó 30 segundos en el lector y se incubó por 5 min a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ en oscuridad. Transcurrido el tiempo se adicionó 25 μL de Carbonato de Sodio (Na_2CO_3). Luego se agitó por 30 segundos y se incubó durante 1 hora a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ en oscuridad. La lectura se realizó a 750 nm. Los resultados se expresaron en mg ácido gálico 100 g^{-1} de muestra seca.

Análisis de antocianinas en brotes

El contenido y análisis de antocianinas se realizó con la técnica HPLC-DAD-ESI-MSn utilizando las condiciones previamente establecidas para brotes de rábano. El sistema para cuantificar las muestras se llama HPLC-DAD de Hitachi (Hitachi technologies, MERCK, Darmstadt, Alemania), el cual utiliza las mismas condiciones. Se registraron cromatogramas a 520 nm y se utilizó cianidida-3-O-glucósido como estándar (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EE.UU). Los resultados se expresaron en mg 100 g⁻¹ de peso seco.

Capacidad antioxidante de brotes

Para medir la capacidad antioxidante de los brotes de rábano se emplearon dos métodos: el ensayo de capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC) (López *et al.*, 2018), y el método del 2,2- difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) que mide las actividades de eliminación de radicales libres (Mena *et al.*, 2011). Ambos ensayos se realizaron utilizando microplacas de 96 pocillos en un lector de microplacas multimodo híbrido Synergy H1 (Biotek, Winooski, VT, Estados Unidos).

La capacidad antioxidante mediante el ensayo ORAC para microplaca, se realizó agregando a toda la placa 150 µL de fluoresceína (0,111 µM), se agregó 25 µL de Trolox, blanco (buffer fosfato) y muestra, además se añadió en pocillos diferentes 300 µL de AAPH (150 mM). Luego se incubó por 30 min a 37 °C en el lector de microplaca. Terminado el tiempo, se agregó 25 µL de AAPH a toda la placa. Se ingresó al lector donde se evaluó midiendo la variación de fluorescencia tras 120 min de reacción con el radical. Los resultados se expresaron como µmol Trolox 100 g⁻¹ de peso seco.

La capacidad antioxidante DPPH para microplaca se realizó añadiendo 25 µL de la dilución del extracto y 200 µL de la solución DPPH, luego se agitó por 30 segundos y se incubó a 25 °C por 30 min en el lector. El objetivo fue medir la variación de absorbancia a 517 nm tras 30 min de reacción con el radical. Los resultados se expresaron como µmol Trolox 100 g⁻¹ de peso seco.

Análisis estadístico

Se recogieron y analizaron los datos para cada tratamiento. Los resultados se analizaron para encontrar diferencias significativas mediante el análisis de varianza

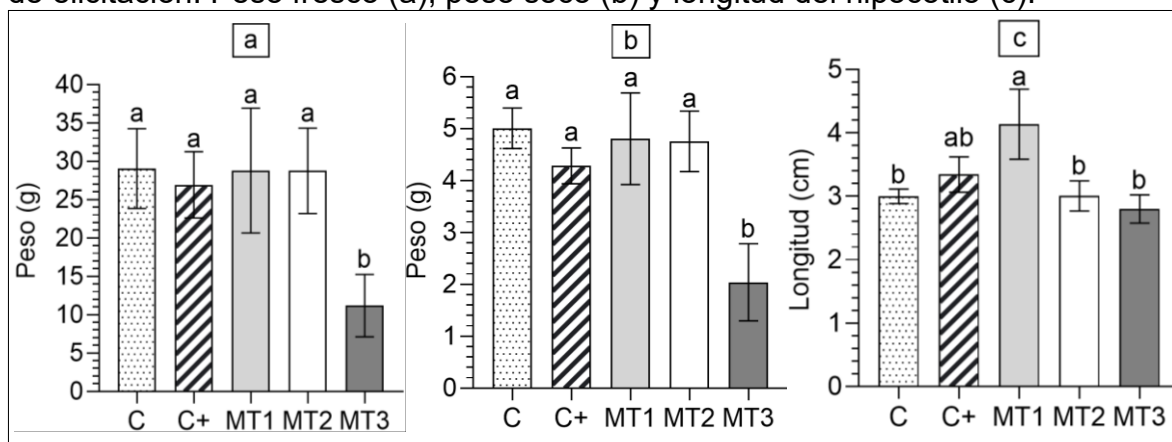
(ANOVA), seguido de la prueba de comparación de medias de Tukey. Los resultados se consideraron significativos cuando $p \leq 0,05$ utilizando el software Infostat. Previamente, se comprobaron los supuestos del análisis de varianza, con la prueba de Shapiro-Wilk para normalidad y la prueba de Levene para homogeneidad de varianzas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Longitud hipocótilo y peso de los brotes de rábano

La respuesta de los diferentes tratamientos de elicitación (C, C+, MT1, MT2 Y MT3) sobre el peso fresco (g), peso seco (g) y longitud del hipocótilo fue evaluada. Los resultados dan a conocer que el control con agua destilada (C) fue el que presentó mayor peso fresco y peso seco, con un promedio de 29,04 g y 5,01 gramos respectivamente. Sin embargo, en ambos casos, C fue estadísticamente igual a C+, MT1 y MT2. En cambio, para la longitud del hipocótilo, el mayor valor se obtuvo con la dosis de 100 ppm de melatonina, con una media de 4,14 cm (Figura 2).

Figura 2. Crecimiento de los brotes de rábano como respuesta de los tratamientos de elicitación. Peso fresco (a), peso seco (b) y longitud del hipocótilo (c).



C: Control con agua destilada; C+: Control con Tween 20; MT1: Melatonina 100 ppm, MT2: Melatonina 200 ppm, MT3: Melatonina 300 ppm. Letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Fuente: Elaboración propia.

En peso fresco y seco, C mostró diferencias significativas únicamente frente a MT3. En ambos parámetros, el tratamiento MT3 evidenció los valores absolutos más bajos, siendo significativamente inferior al resto de los tratamientos. En comparación

con C, MT3 redujo el peso fresco y seco en un 61,47 % y 59,28 %, respectivamente, equivalente a casi 2,5 veces menos biomasa. Estos resultados concuerdan con la evidencia de que concentraciones elevadas de melatonina pueden inducir estrés oxidativo leve y restringir la expansión celular, afectando negativamente la acumulación de biomasa. En *Arabidopsis thaliana*, Zhang *et al.* (2014) demostraron que bajas dosis de melatonina (10–20 μ M) mejoran el peso fresco, mientras que concentraciones mayores tienen efectos inhibitorios.

En relación con la longitud del hipocótilo, el tratamiento MT1 mostró el mayor valor entre los tratamientos con melatonina y fue aproximadamente 1,4 veces superior a C, MT2 y MT3, aunque sin diferencias significativas respecto del control enriquecido C+. Estos resultados sugieren que dosis moderadas de melatonina pueden promover la elongación del hipocótilo, posiblemente mediante una interacción positiva con auxinas, hormona clave en el crecimiento. En contraste, las altas concentraciones aplicadas en MT2 y MT3, produjeron una marcada inhibición de la elongación, similar a C, lo que indica que niveles elevados podrían activar respuestas al leve estrés del elicitador y limitar la turgencia y expansión celular.

La literatura respalda este comportamiento dual de la melatonina, donde dosis bajas o moderadas ejercen efectos promotores del crecimiento y la biomasa, mientras que dosis altas generan respuestas inhibitorias. Por ejemplo, Tang *et al.* (2025) reportaron que la aplicación de melatonina junto con sacarosa en brotes de col rizada incrementó la altura y el peso fresco respecto a los tratamientos sin melatonina. Asimismo, Arena *et al.* (2014) observaron en el control, brotes de brócoli con valores de longitud del hipocótilo inferiores a lo obtenido en brotes de rábano de este estudio (~3,0 cm), lo que evidencia diferencias fisiológicas entre especies y el potencial del rábano para responder favorablemente a ciertas concentraciones de melatonina.

Glucosinolatos en brotes de rábano

El análisis de los glucosinolatos, junto con su identificación y cuantificación permitió detectar distintos perfiles de glucosinolatos de los brotes de rabanito. Se encontraron dos grandes grupos: alifáticos e indólicos. Entre los alifáticos se identificaron glucorafenina (GRE) y dehidroerucina (DER); entre los indólicos se

encontraron 4-hidroxi glucobrassicina (HGB), glucobrassicina (GB) y 4-metoxi glucobrassicina (MGB).

En la tabla 1 se presenta el contenido promedio de los glucosinolatos de manera individual y total según la aplicación de cada tratamiento. Los valores variaron de 359,05 a 595,00 mg 100 g⁻¹ de peso seco.

A pesar de que el mayor número de compuestos fueron de caracterización indólica, los glucosinolatos alifáticos presentaron mayor contenido en todos los tratamientos, con diferencia significativa. Se infiere que este aumento significativo es por una fuerte activación de las rutas de biosíntesis alifáticas (Seo *et al.*, 2017).

El mayor contenido total de glucosinolatos (TGSL) se vio reflejado en el tratamiento MT2, con una media de 595,00 mg 100 g⁻¹, presentando diferencias estadísticamente significativas con los otros tratamientos. Esto indica que una dosis intermedia promueve la acumulación y no hay un efecto lineal dependiente según la dosis. MT2 fue superior al control con agua destilada (C) en un 39,66 %, donde cuya síntesis de GSL totales fue la menor del ensayo (359,95 mg 100 g⁻¹). Además, la dosis aplicada en MT2 dio lugar a los contenidos más altos de glucosinolatos individuales, en comparación a los otros tratamientos, excepto la hidroxiglucobrassicina (HGB) y metoxiglucobrassicina (MGB) que fueron menores, pero sin diferencia significativa.

Con respecto a los glucosinolatos alifáticos, GRE fue el glucosinolato que mayor presencia tuvo en los tratamientos, aumentando en MT1 y llegando a su máximo en MT2, sin embargo, solo la aplicación de MT2 presentó diferencia significativa con el resto de elicitores y controles. La dosis más alta de melatonina dio lugar a una menor síntesis de GRE, disminuyendo significativamente en un 47,43 % con respecto al mayor valor observado en MT2 con una media de 367,62 mg 100 g⁻¹. Tendencia similar se observa en DER, con un aumento progresivo, y una disminución significativa en el tratamiento MT3. Según los reportes de Wang *et al.* (2024) donde se estudió el efecto de la melatonina en brotes de col rizada china con y sin radiación UV-B, se indica que sin radiación a concentraciones más altas de melatonina (100 µmol L⁻¹) hubo una inhibición en la acumulación de ciertos glucosinolatos alifáticos, en cambio con dosis más bajas (5 µmol L⁻¹) el total de glucosinolatos aumentó.

Tabla 1. Contenido de glucosinolatos ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ de peso seco) individuales y totales en brotes de rábano después de la aplicación de los elicitores en los tratamientos.

Glucosinolatos	Tratamientos				
	C	C+	MT1	MT2	MT3
GRE	203,82 \pm 21,305b	232,76 \pm 60,913b	280,60 \pm 35,291ab	367,62 \pm 15,863a	193,27 \pm 18,671b
HGB	66,98 \pm 2,450b	79,50 \pm 11,178ab	68,66 \pm 4,197b	87,37 \pm 3,022a	88,88 \pm 7,004a
DER	23,51 \pm 1,693c	27,63 \pm 1,405bc	63,24 \pm 3,534a	68,90 \pm 3,694a	34,51 \pm 2,286b
GB	38,68 \pm 4,347a	41,32 \pm 1,877a	39,90 \pm 3,592a	46,30 \pm 4,909a	42,51 \pm 2,408a
MGB	26,05 \pm 0,845ab	28,67 \pm 1,634a	19,33 \pm 1,373c	24,81 \pm 1,396ab	22,41 \pm 3,174bc
TGSL	359,05 \pm 21,557b	409,87 \pm 75,732b	471,73 \pm 46,276b	595,00 \pm 21,750a	381,58 \pm 22,132b

C: Control con agua destilada; C+: Control con Tween 20; MT1: Melatonina 100 ppm, MT2: Melatonina 200 ppm, MT3: Melatonina 300 ppm. GRE es glucorafenina; HGB es hidroxiglucobrassicina; DER es dehidroerucina; GB es glucobrassicina; MGB es metoxiglucobrassicina; TGSL es total de glucosinolatos. Medida de variabilidad: desviación estándar. Letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

En el caso de los glucosinolatos de tipo indólico la respuesta a la melatonina es distinta. HGB obtuvo un contenido mayor en los tratamientos con aplicaciones más altas de melatonina (MT2 y MT3), donde se acumuló 87,37 y 88,88 mg 100 g⁻¹ de peso seco respectivamente, siendo significativamente mayor que la acumulación en MT1 y en ambos controles. Esto indica que su respuesta fue dependiente de la dosis de melatonina. Para GB no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, además no siguió el mismo patrón que HGB pues el valor más alto se obtuvo con el elicitador MT2. Sin embargo, la acumulación con la dosis más alta fue solo un 8,19 % menor. Estos resultados indican un redireccionamiento del metabolismo indólico, influenciando principalmente por la interacción de la melatonina con la ruta del triptófano (Gigolashvili *et al.*, 2009).

MGB fue el glucosinolato con menor acumulación en el ensayo, su valor absoluto más alto se obtuvo en los controles, en especial el control con Tween 20 (C+) con una media de 28,67 mg 100 g⁻¹ y fue significativamente mayor que MT1 en un 32,58 %. Estos resultados establecen que una aplicación exógena de melatonina afecta negativamente la acumulación de este glucosinolato. Baenas *et al.* (2016) evaluaron brotes de rábano luego de la elicitación, y reportaron que los valores de MGB fueron los más bajos del estudio. Por otro lado, Arena *et al.* (2024) compararon dos cultivares de brócoli y evaluaron el efecto de la aplicación de melatonina en las etapas iniciales de crecimiento, donde informaron que los niveles de MGB fueron mayores en el control.

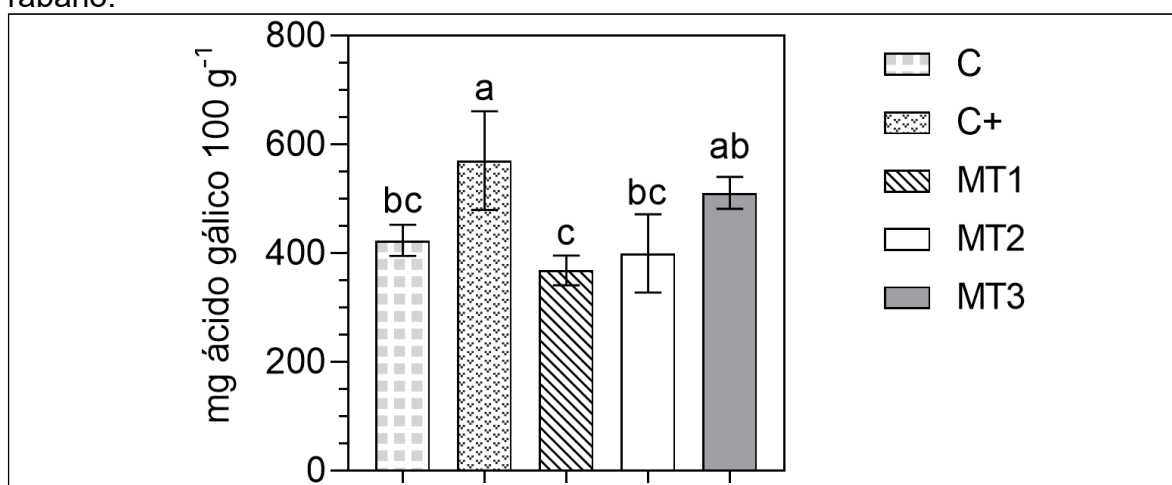
Polifenoles totales en brotes de rábano

La elicitación con las tres dosis de melatonina presentó contenido de polifenoles según el ensayo de Folin-Ciocalteu, con diferencia estadísticamente significativa con respecto a los controles (Figura 3). Además, entre los controles no solo hubo diferencias en el total de polifenoles, sino que también hubo cambios significativos uno del otro. Se vio reflejado en C+ que alcanzó una media de 570,49 mg de ácido gálico en 100 g de muestra seca, el cual es 25,75 % mayor con respecto a C (423,61 mg 100 g⁻¹).

El tratamiento C+ presentó el valor absoluto más alto de polifenoles totales de todo el ensayo, significativamente mayor que MT1 y MT2, en un 35,4 % y 29,9 %

respectivamente, pero estadísticamente igual a MT3. Lo que puede indicar que el Tween 20 tiene un efecto elicitante y genera una respuesta de defensa en la planta, produciendo una mayor acumulación de polifenoles. Según lo informado en estudios previos (Hosseinzadeh *et al.*, 2013), se reportó que los tensioactivos, especialmente los no iónicos tienen mayor capacidad de extraer compuestos fenólicos, debido a su estructura anfipática, que les permite interactuar con fases acuosas y lipídicas, facilitando solubilización y liberación de estos compuestos.

Figura 3. Contenido de polifenoles totales (mg 100 g⁻¹ de peso seco) en brotes de rábano.



C: Control con agua destilada; C+: Control con Tween 20; MT1: Melatonina 100 ppm, MT2: Melatonina 200 ppm, MT3: Melatonina 300 ppm. Letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los tratamientos con melatonina, se tiene que MT1, MT2 Y MT3 presentaron contenidos de polifenoles dependientes de la dosis. El tratamiento MT1 representó el contenido más bajo de polifenoles con una media de 368,48 mg de ácido gálico 100 g⁻¹. Esto podría relacionarse con que la concentración de melatonina exógena aplicada no fue suficiente para activar la vía encargada de síntesis de polifenoles, entonces la melatonina podría ejercer un efecto antioxidante directo, lo que reduce las especies reactivas de oxígeno (ROS), y por ende se disminuye la señalización que activa la vía fenilpropanoide (Galano *et al.*, 2011). Esta vía de biosíntesis de polifenoles se inicia a partir de desaminación del aminoácido fenilalanina, proceso que es catalizado por la enzima fenilalanina amoníaco-liasa (PAL) (Ruiz-García y Gómez-Plaza, 2013). Además, las rutas

metabólicas son influenciadas por la acción de la melatonina, pues se encarga de regular enzimas y transcripciones relacionadas con la síntesis de estos compuestos (Arnao *et al.*, 2022).

A diferencia de la dosis más alta, MT3 es significativamente mayor que MT1, elevando los niveles de polifenoles a 510,74 mg 100 g⁻¹ y superior a C en un 17 %. Se puede inferir que se produce una activación de la ruta biosintética del metabolismo fenólico, como respuesta a un estrés. Sin embargo, según lo reportado por Zhou *et al.* (2025) en donde se aplicó 100 µM (23,2 ppm) de melatonina a brotes de col, la acumulación de polifenoles fue considerablemente mayor (1100 mg 100 g⁻¹ de peso seco). Este valor permite deducir que con dosis intermedias de melatonina (tratamientos MT1 y MT2) la acumulación de fenoles podría estar inhibida.

Antocianinas en brotes de rábano

Las antocianinas son un grupo importante de pigmentos vegetales, responsables de los colores intensos que ayudan en la aceptabilidad de los alimentos. Se consideran componentes multifuncionales por su actividad antioxidante y propiedades beneficiosas (Moreno *et al.*, 2010; Giusti y Wrolstad, 2003). En este estudio se identificaron 17 antocianinas (Tabla 2), destacándose por ser derivados de cianidina acilados (Baenas *et al.*, 2015), estructura que le confiere mejora en la estabilidad y protección del color rojo a un pH más alto (de Pascual-Teresa y Sanchez-Bellesta, 2008). El contenido de antocianinas totales varió de 8,65 mg 100 g⁻¹ a 17,71 mg 100 g⁻¹ de peso seco.

Se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de antocianinas totales (AT) entre tratamientos (Tabla 2), con una tendencia similar al contenido de polifenoles totales (Figura 3). El mayor contenido se acumuló en el control con Tween 20 (C+) con una media de 17,71 mg 100 g⁻¹ y ligeramente superior a MT3 en un 7,0 %. Además, C+ presentó diferencias significativas con el control con agua destilada (C) siendo 1,6 veces mayor. En contraste, MT1 presentó el nivel más bajo (8,65 mg 100 g⁻¹) y fue estadísticamente similar a C. En el caso de tratamientos con melatonina hubo diferencias significativas, y los datos presentaron una posible respuesta dosis dependiente, donde a medida que aumentó la

concentración de melatonina, aumentaron los antocianos.

Tabla 2. Contenido de antocianinas (mg 100 g⁻¹) en brotes de rábano después de la aplicación de diferentes tratamientos con elicitores.

A	Tratamientos				
	C	C+	MT1	MT2	MT3
A1	0,05 ± 0,026b	0,13 ± 0,011b	Nd	0,15 ± 0,038ab	0,27 ± 0,080a
A2	0,22 ± 0,042ab	0,13 ± 0,040b	0,32 ± 0,112a	0,27 ± 0,076ab	0,18 ± 0,055ab
A3	0,14 ± 0,057cd	0,30 ± 0,013c	0,08 ± 0,024d	1,11 ± 0,009a	0,59 ± 0,164b
A4	0,41 ± 0,080c	1,58 ± 0,083b	0,56 ± 0,130c	1,29 ± 0,178b	3,11 ± 0,066a
A5	0,58 ± 0,150bc	1,69 ± 0,112a	0,77 ± 0,220b	0,20 ± 0,020c	1,41 ± 0,283a
A6	0,27 ± 0,039c	0,18 ± 0,041c	1,10 ± 0,056a	Nd	0,76 ± 0,161b
A7	0,79 ± 0,065b	1,81 ± 0,268a	0,16 ± 0,035c	1,76 ± 0,079a	2,05 ± 0,409a
A8	1,45 ± 0,360b	2,05 ± 0,112a	0,72 ± 0,073c	0,23 ± 0,070d	0,30 ± 0,054cd
A9	0,35 ± 0,070b	0,37 ± 0,103b	1,82 ± 0,347a	0,32 ± 0,075b	0,41 ± 0,109b
A10	0,43 ± 0,078b	0,57 ± 0,166b	Nd	2,03 ± 0,168a	1,73 ± 0,050a
A11	0,38 ± 0,049b	0,55 ± 0,115b	0,51 ± 0,076b	1,62 ± 0,081a	Nd
A12	1,80 ± 0,313b	3,03 ± 0,348a	0,49 ± 0,116c	0,45 ± 0,090c	2,34 ± 0,565ab
A13	2,20 ± 0,273a	2,30 ± 0,370a	1,07 ± 0,079b	0,63 ± 0,037bc	0,22 ± 0,034c
A14	0,35 ± 0,065b	0,44 ± 0,067b	Nd	Nd	1,69 ± 0,356a
A15	0,65 ± 0,158b	1,03 ± 0,123a	0,66 ± 0,062b	0,55 ± 0,024bc	0,29 ± 0,086c
A16	0,54 ± 0,120b	0,56 ± 0,121b	0,40 ± 0,093b	0,94 ± 0,096a	0,95 ± 0,114a
A17	0,52 ± 0,124b	0,99 ± 0,060a	Nd	Nd	0,19 ± 0,068c
AT	11,12 ± 1,055bc	17,71 ± 1,172a	8,65 ± 0,803c	11,55 ± 0,664b	16,47 ± 1,340a

C: Control con agua destilada; C+: Control con Tween 20; MT1: Melatonina 100 ppm, MT2: Melatonina 200 ppm, MT3: Melatonina 300 ppm. A es antocianinas; A1 es Cianidina-3-O-sofósido-5-O-(malonil)glucósido; A2 es Cianidina-3-O-(sinapoil)sofósido-5-O-glucósido; A3 es Cianidina-3-O-(sinapoil)sofósido-5-O-(malonil)sofósido; A4 es Cianidina-3-O-(disinapoil)sofósido-5-O-(malonil)glucósido; A5 es Cianidina-3-O-(feruloil-sinapoil)diglucósido/ Cianidina-3-O-(feruloil)sofósido-5-O-(malonil)sofósido; A6 es Cianidina-3-O-(feruloil-sinapoil)sofósido-5-O-sofósido; A7 es Cianidina-3-O-(p-cumaroil)sofósido-5-O-(malonil)glucósido; A8 es Cianidina-3-O-(p-cumaroil)sofósido-5-O-(malonil)glucósido/Cianidina-3-O-(feruloil-sinapoil)diglucósido-5-O-glucósido; A9 es Cianidina-3-O-(feruloil-sinapoil)diglucósido-5-O-glucósido/Cianidina-3-O-(feruloil)sofósido-5-O-(malonil)sofósido; A10 es Cianidina-3-O-(sinapoil)sofósido-5-O-(malonil)glucósido; A11 es Cianidina-3-O-(feruloil)sofósido-5-O-(malonil)glucósido; A12 es Cianidina-3-O-(diferuloil)sofósido-5-O-(malonil)sofósido; A13 es Cianidina-3-O-(feruloil-sinapoil)sofósido-5-O-(malonil)glucósido; A14 es Cianidina-3-O-(p-cumaroil-sinapoil)sofósido-5-O-(malonil)glucósido; A15 es Cianidina-3-O-(p-cumaroil-sinapoil)sofósido-5-O-(malonil)sofósido; A16 es Cianidina-3-O-(feruloil-sinapoil)sofósido-5-O-(malonil)glucósido; A17 es Cianidina-3-O-(diferuloil)sofósido-5-O-(malonil)glucósido; AT es antocianinas totales; Nd: no detectado. Medida de variabilidad: desviación estándar. Letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos según prueba de Tukey (P ≤ 0,05).

Al analizar las antocianinas de manera individual, se observa un comportamiento variable frente a la estimulación de la melatonina. Se tiene que antocianos como A4, A5, A7, A12 mostraron incrementos significativos en C+ con respecto a C. En

MT3 también se destacan las mismas antocianinas con valores altos lo que podría indicar que dosis altas estimulan el metabolismo flavonoide, y que estructuras con acilación múltiple son más susceptibles a estímulos fuertes.

En algunos compuestos como A3 y A11, la respuesta fue más pronunciada en MT2 que en MT3. Hay casos como A2, A13 y A15 donde la acumulación de antocianinas disminuye a medida que aumenta la concentración de melatonina. Además, con la concentración más baja de melatonina, A7, A8 y A12 tienen una acumulación significativamente menor que lo acumulado en el control C.

El resultado de antocianina total del control de este estudio (Tabla 2) es menor a lo reportado por (Hanlon y Barnes, 2011), quienes obtuvieron 29,0 mg 100 g⁻¹ de peso seco. Diferencia que se puede atribuir a la antocianina principal presente en aquella variedad (*R. sativus* var Red Meat), la cual correspondía a pelargonidina. Por otro lado, Matera *et al.* (2012) aislaron antocianinas en brotes de Sango, donde casi el 100 % fueron identificadas como cianidinas y solo 1 % pertenecían a la familia de las peonidinas. Investigaciones han mencionado que la caracterización de antocianinas depende de la variedad estudiada (Hanlon y Barnes, 2011).

En brotes de *B. juncea* y otras brassicas se ha demostrado que aplicación exógena de melatonina (ej: 100 µM) estimula la activación de biosíntesis de hormonas vegetales y activación de genes claves para la biosíntesis de antocianinas, además de un crecimiento vegetativo y aumento de fenoles y glucosinolatos totales (Hernandez-Ruiz *et al.*, 2022).

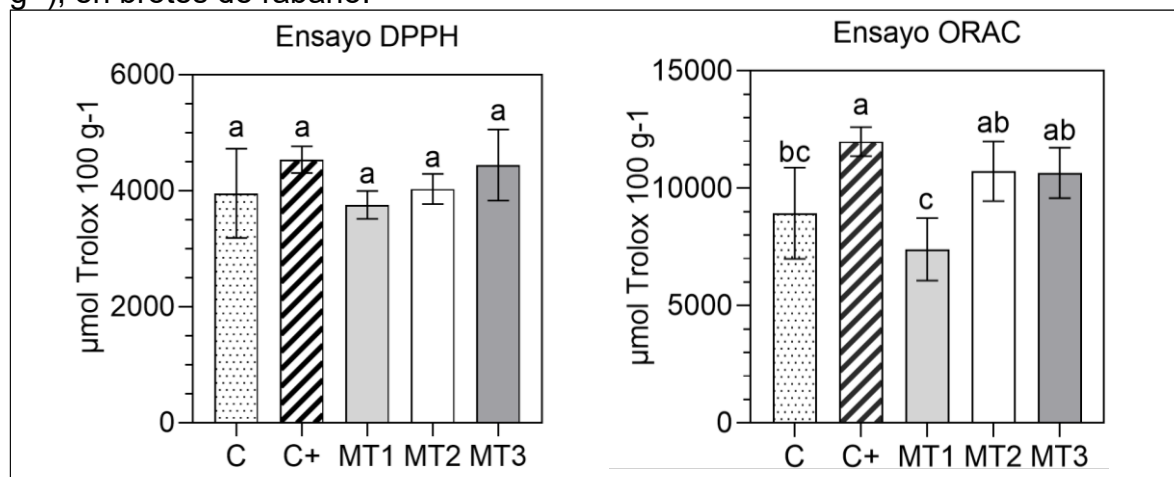
Lo anterior sugiere que cada derivado de cianidina posee una sensibilidad diferente, y por ende una respuesta no lineal a la dosis de melatonina. Donde algunos compuestos responden mejor al surfactante, otros a la melatonina, e incluso otros son inhibidos.

Capacidad antioxidante en brotes de rábano

La tendencia observada en la acumulación de antocianinas coincidió con los ensayos de capacidad antioxidante, aunque con distinta sensibilidad analítica para ambos métodos. En el ensayo ORAC se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, a diferencia del ensayo DPPH que la respuesta fue contraria (Figura 4). Lo que sugiere que los brotes tratados presentaron mayor capacidad de

antioxidantes hidrofílicos y lipofílicos para romper cadenas y neutralizar radicales peróxilos que son altamente reactivos. No así radicales sintéticos como el DPPH que reaccionan lento (Huang *et al.*, 2005).

Figura 4. Evaluación de la capacidad antioxidante, DPPH y ORAC ($\mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1}$), en brotes de rábano.



C: Control con agua destilada; C+: Control con Tween 20; MT1: Melatonina 100 ppm, MT2: Melatonina 200 ppm, MT3: Melatonina 300 ppm. Letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos según prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). Fuente: Elaboración propia.

En el caso de ORAC, el control con Tween 20 (C+) fue el que obtuvo mayor capacidad de eliminación de radicales libres con una media de $11988,68 \mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1}$ mostrando diferencia estadísticamente significativa con C y con MT1. Sin embargo, ambos controles no presentaron diferencias con los tratamientos MT2 y MT3, los cuales fueron inferiores a C+ en un 10,55 % y 11,10 % respectivamente. Por otro lado, los valores más bajos se obtuvieron con la aplicación de MT1 con una media de $7297,52 \mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1}$, siendo inferior en un 39,13 % con respecto a C+.

En el ensayo de capacidad antioxidante DPPH (Figura 5) los valores obtenidos mostraron un comportamiento sin diferencias significativas entre tratamientos, oscilando entre $3756,50 \mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1}$ de peso seco (dosis baja, MT1) hasta $4536,57 \mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1}$ de peso seco (control Tween 20, C+).

Con respecto al control C+, este presentó los valores absolutos más altos en ambos métodos, coincidiendo con polifenoles totales y antocianinas. El aumento se explicaría posiblemente por el efecto físico-químico del surfactante, lo que generaría

un estrés leve, además de su función de antioxidante, lo que estaría modificando la respuesta fisiológica.

La aplicación de melatonina exógena afectó la capacidad antioxidante de forma dependiente de la concentración. El incremento con dosis medias- altas se explicaría por una activación de rutas antioxidantes endógenas, luego de una señal hormonal frente al estrés químico del elicitador. Además, la melatonina a ciertas dosis posee la capacidad de estimular la expresión de enzimas antioxidantes como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), peroxidasas (POD), etc., que a su vez aumentan la expresión de genes como *APX1*, *CAT1*, entre otros (Khan *et al.*, 2020).

Estudios previos determinaron que brotes de la variedad Pink Beauty de rábano contenían un valor de ORAC de 22200,0 $\mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1}$ de peso seco, valor que supera el doble de lo reportado en este ensayo (Hanlon y Barnes, 2011).

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se puede afirmar que:

- El efecto de la melatonina en brotes de rábano es dependiente de la dosis aplicada, observándose respuestas contrastantes en crecimiento y metabolismo.
- Dosis elevadas no resultan adecuadas para el desarrollo vegetal, sugiriendo un posible efecto fitotóxico, mientras que concentraciones bajas a intermedias favorecen el crecimiento y la elongación del hipocótilo.
- La aplicación de melatonina modula el metabolismo de los glucosinolatos, con una mayor estimulación de la vía alifática y una respuesta negativa de los glucosinolatos indólicos.
- El aumento en el contenido de compuestos fenólicos y en la actividad antioxidante observado en algunos tratamientos se asocia a respuestas de estrés más que a una mejora directa de la calidad metabólica.
- La melatonina se perfila como un potencial elicitador metabólico, cuyo uso requiere una optimización cuidadosa de la dosis para equilibrar crecimiento y respuesta al estrés.

REFERENCIAS

1. Afshin, A., Sur, P. J., Fay, K. A., Cornaby, L., Ferrara, G., Salama, J. S., Mullany, E. C., Abate, K. H., Abbafati, C., Abebe, Z., Afarideh, M., Aggarwal, A., Agrawal, S., Akinyemiju, T., Alahdab, F., Bacha, U., Bachman, V. F., Badali, H., Badawi, A., . . . Roth, G. A. (2019). Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*, 393(10184), 1958-1972. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(19\)30041-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(19)30041-8)
2. Aguilera, Y., Herrera, T., Benítez, V., Arribas, S. M., De Pablo, A. L. L., Esteban, R. M., & Martín-Cabrejas, M. A. (2014). Estimation of scavenging capacity of melatonin and other antioxidants: Contribution and evaluation in germinated seeds. *Food Chemistry*, 170, 203-211. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.071>
3. Arnao, M. B., & Hernández-Ruiz, J. (2014). Melatonin: plant growth regulator and/or biostimulator during stress? *Trends in Plant Science*, 19(12), 789–797.
4. Arnao, M. B., Cano, A., & Hernández-Ruiz, J. (2022). Phytomelatonin: an unexpected molecule with amazing performances in plants. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 73, Issue 17). <https://doi.org/10.1093/jxb/erac009>
5. Arena, D., Ben Ammar, H., Rodriguez, V. M., Velasco, P., Garcia, G., Calli, R., & Branca, F. (2024). Exogenous Melatonin Affects the Morphometric Characteristics and Glucosinolates during the Initial Growth Stages of Broccoli. *Agronomy*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy14020286>
6. Baenas, N., Ferreres, F., García-Viguera, C., & Moreno, D. A. (2015). Radish sprouts—Characterization and elicitation of novel varieties rich in anthocyanins. *Food Research International*, 69, 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.009>
7. Baenas, N., García-Viguera, C., & Moreno, D. (2014). Elicitation: A tool for enriching the bioactive composition of foods. *Molecules* (Basel, Switzerland), 19(9), 13541–13563. <https://doi.org/10.3390/molecules190913541>
8. Baenas, N., Villaño, D., García-Viguera, C., & Moreno, D. A. (2016). Optimizing elicitation and seed priming to enrich broccoli and radish sprouts in glucosinolates. *Food Chemistry*, 204, 314–319. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.144>
9. Banihani, S. (2017). Radish (*Raphanus sativus*) and diabetes. *Nutrients*, 9(9), 1014. <https://doi.org/10.3390/nu9091014>

10. Boyer, J., & Liu, R. H. (2004). Apple phytochemicals and their health benefits. *Nutrition Journal*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/1475-2891-3-5>
11. Burkhardt, S., Tan, D. X., Manchester, L. C., Hardeland, R., & Reiter, R. J. (2001). Detection and Quantification of the Antioxidant Melatonin in Montmorency and Balaton Tart Cherries (*Prunus cerasus*). *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 49(10), 4898-4902. <https://doi.org/10.1021/jf010321>
12. Chen, Q., Qi, W., Reiter, R. J., Wei, W., & Wang, B. (2008). Exogenously applied melatonin stimulates root growth and raises endogenous indoleacetic acid in roots of etiolated seedlings of *Brassica juncea*. *Journal Of Plant Physiology*, 166(3), 324-328. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.06.002>
13. Cisneros-Zevallos, L. (2003). The use of controlled postharvest abiotic stresses as a tool for enhancing the nutraceutical content and adding-value of fresh fruits and vegetables. *Journal of Food Science*, 68(5), 1560–1565. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb12291.x>
14. De Pascual-Teresa, S., & Sanchez-Ballesta, M. T. (2007). Anthocyanins: from plant to health. *Phytochemistry Reviews*, 7(2), 281-299. <https://doi.org/10.1007/s11101-007-9074-0>
15. Fahey, J. W., Zalcmann, A. T., & Talalay, P. (2001). The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry*, 56(1), 5–51. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)00316-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)00316-2)
16. Fan, J., Xie, Y., Zhang, Z., & Chen, L. (2018). Melatonin: A multifunctional factor in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(5), 1528. <https://doi.org/10.3390/ijms19051528>
17. Gamba, M., Asllanaj, E., Raguindin, P. F., Glisic, M., Franco, O. H., Minder, B., Bussler, W., Metzger, B., Kern, H., & Muka, T. (2021). Nutritional and phytochemical characterization of radish (*Raphanus sativus*): A systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 205–218. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.045>
18. Galano, A., Tan, D. X., & Reiter, R. J. (2011). Melatonin as a natural ally against oxidative stress: a physicochemical examination. *Journal Of Pineal Research*, 51(1), 1-16. <https://doi.org/10.1111/j.1600-079x.2011.00916.x>
19. Gigolashvili, T., Berger, B., & Flügge, U. (2008). Specific and coordinated control

- of indolic and aliphatic glucosinolate biosynthesis by R2R3-MYB transcription factors in *Arabidopsis thaliana*. *Phytochemistry Reviews*, 8(1), 3-13. <https://doi.org/10.1007/s11101-008-9112-6>
20. Giusti, M., & Wrolstad, R. E. (2003). Acylated anthocyanins from edible sources and their applications in food systems. *Biochemical Engineering Journal*, 14(3), 217-225. [https://doi.org/10.1016/s1369-703x\(02\)00221-8](https://doi.org/10.1016/s1369-703x(02)00221-8)
21. Hanlon, P. R., & Barnes, D. M. (2011). Phytochemical Composition and Biological Activity of 8 Varieties of Radish (*Raphanus sativus* L.) Sprouts and Mature Taproots. *Journal Of Food Science*, 76(1). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01972.x>
22. Halkier, B. A., & Gershenzon, J. (2006). Biology and biochemistry of glucosinolates. *Annual Review of Plant Biology*, 57(1), 303–333.
23. Hernández-Ruiz, J., Ruiz-Cano, D., Giraldo-Acosta, M., Cano, A., & Arnao, M. B. (2022). Melatonin in Brassicaceae: Role in Postharvest and Interesting Phytochemicals. *Molecules*, 27(5), 1523. <https://doi.org/10.3390/molecules27051523>
24. Hosseinzadeh, R., Khorsandi, K., & Hemmaty, S. (2013). Study of the Effect of Surfactants on Extraction and Determination of Polyphenolic Compounds and Antioxidant Capacity of Fruits Extracts. *PLoS ONE*, 8(3), e57353. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057353>
25. Huang, D., Ou, B., & Prior, R. L. (2005). The Chemistry behind Antioxidant Capacity Assays. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 53(6), 1841-1856. <https://doi.org/10.1021/jf030723c>
26. Khan, A., Numan, M., Khan, A. L., Lee, I., Imran, M., Asaf, S., & Al-Harrasi, A. (2020). Melatonin: Awakening the Defense Mechanisms during Plant Oxidative Stress. *Plants*, 9(4), 407. <https://doi.org/10.3390/plants9040407>
27. Kajdžanoska, M., Gjamovski, V., & Stefova, M. (2010). HPLC-DAD-ESI-MSn identification of phenolic compounds in cultivated strawberries from Macedonia. <https://doi.org/10.20450/mjcce.2010.165>
28. López, M. D., Baenas, N., Retamal-Salgado, J., Zapata, N., & Moreno, D. A. (2018). Underutilized native Biobío berries: Opportunities for foods and trade. *Natural Product Communications*, 13(12), 1934578X1801301. <https://doi.org/10.1177/1934578X1801301226>

29. Manivannan, A., Kim, J.-H., Kim, D.-S., Lee, E.-S., & Lee, H.-E. (2019). Deciphering the nutraceutical potential of *Raphanus sativus*—A comprehensive overview. *Nutrients*, 11(2), 402. <https://doi.org/10.3390/nu11020402>
30. Martínez-Sanguinetti, M. A., Leiva, A. M., Petermann-Rocha, F., Villagrán, M., Troncoso-Pantoja, C., & Celis-Morales, C. (2019). Una de cada cinco muertes en el mundo se asocia a una alimentación no saludable: ¿Cuál es la realidad chilena? *Revista Chilena de Nutrición: Órgano Oficial de La Sociedad Chilena de Nutrición, Bromatología y Toxicología*, 46(5), 653–655. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182019000500653>
31. Matera, R., Gabbanini, S., De Nicola, G. R., Iori, R., Petrillo, G., & Valgimigli, L. (2012). Identification and analysis of isothiocyanates and new acylated anthocyanins in the juice of *Raphanus sativus* cv. Sango sprouts. *Food Chemistry*, 133(2), 563-572. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.050>
32. Mena, P., García-Viguera, C., Navarro-Rico, J., Moreno, D. A., Bartual, J., Saura, D., & Martí, N. (2011). Phytochemical characterisation for industrial use of pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars grown in Spain: Selection of pomegranates for juices. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(10), 1893–1906. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4411>
33. Moreno, D. A., Pérez-Balibrea, S., Ferreres, F., Gil-Izquierdo, Á., & García-Viguera, C. (2010). Acylated anthocyanins in broccoli sprouts. *Food Chemistry*, 123(2), 358-363. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.04.044>
34. Park, H.-S., Kazerooni, E. A., Kang, S.-M., Al-Sadi, A. M., & Lee, I.-J. (2021). Melatonin enhances the tolerance and recovery mechanisms in *Brassica juncea* (L.) Czern. Under saline conditions. *Frontiers in plant science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.593717>
35. Radman, R., Saez, T., Bucke, C., & Keshavarz, T. (2003). Elicitation of plants and microbial cell systems. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 37(1), 91–102. <https://doi.org/10.1042/BA20020118>
36. Reiter, R. J., Tan, D. X., Burkhardt, S., & Manchester, L. C. (2009). Melatonin in plants. *Nutrition Reviews*, 59(9), 286–290. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2001.tb07018.x>
37. Ruiz-García, Y., & Gómez-Plaza, E. (2013). Elicitors: A Tool for Improving Fruit Phenolic Content. *Agriculture*, 3(1), 33-52. <https://doi.org/10.3390/agriculture3010033>

38. Sagar, N. A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E. M., & Lobo, M. G. (2018). Fruit and vegetable waste: Bioactive compounds, their extraction, and possible utilization. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(3), 512–531. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>
39. Seo, M. S., & Kim, J. S. (2017). Understanding of MYB transcription factors involved in glucosinolate biosynthesis in Brassicaceae. In *Molecules* (Vol. 22, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/molecules22091549>
40. Sivakumar, D., Chen, L., & Sultanbawa, Y. (2018). A comprehensive review on beneficial dietary phytochemicals in common traditional Southern African leafy vegetables. *Food Science & Nutrition*, 6(4), 714–727. <https://doi.org/10.1002/fsn3.643>
41. Tang, J., Han, S., Sun, D., Zhou, A., Di, H., Ma, J., Escalona, V. H., Wang, Y., Liu, Q., Han, Y., Yu, X., Liang, K., Huang, Z., Tang, Y., Li, H., Zhang, F., Chen, Z., & Sun, B. (2025). Sucrose and melatonin coordinately regulate the quality of Chinese kale sprouts. *LWT*, 231, 118359. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118359>
42. Vasconsuelo, A., & Boland, R. (2007). Molecular aspects of the early stages of elicitation of secondary metabolites in plants. *Plant Science: An International Journal of Experimental Plant Biology*, 172(5), 861–875. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2007.01.006>
43. Wang, L., Sun, X., Cao, Y., Wang, L., Li, F., & Wang, Y. (2010). Antioxidant and pro-oxidant properties of acylated pelargonidin derivatives extracted from red radish (*Raphanus sativus* var. *niger*, Brassicaceae). *Food And Chemical Toxicology*, 48(10), 2712-2718. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.06.045>
44. Wang, M., Wang, J., Yang, Y., Li, Z., Mustafa, G., Li, Y., Liu, L., Zhang, Z., & Wang, Q. (2024). UV-B irradiation enhances the accumulation of beneficial glucosinolates induced by melatonin in Chinese kale sprout. *Horticultural Plant Journal*, 10(4), 995–1006. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2024.05.003>
45. Zhang, Y. J., Gan, R. Y., Li, S., Zhou, Y., Li, A. N., Xu, D. P., Li, H. Bin, & Kitts, D. D. (2015). Antioxidant phytochemicals for the prevention and treatment of chronic diseases. In *Molecules* (Vol. 20, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/molecules201219753>
46. Zhang, N., Sun, Q., Zhang, H., Cao, Y., Weeda, S., Ren, S., & Guo, Y. (2014). Roles of melatonin in abiotic stress resistance in plants. *Journal Of Experimental Botany*, 66(3), 647-656. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru336>

47. Zhou, A., Tang, J., Wu, S., Di, H., Ma, J., Escalona, V. H., Yu, X., Liang, K., Huang, Z., Tang, Y., Li, H., Zhang, F., Chen, Y., Chen, Z., & Sun, B. (2025). Low concentration of sodium chloride combined with melatonin improved the nutritional quality of Chinese kale sprouts. *LWT*, 117903. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117903>