ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.2110

Impact of Agrovoltaic Shading on the Chemical Composition and Antioxidant Capacity of Radishes (*Raphanus sativus L.*)

Rondán -Sanabria, Gerby Giovanna[1]; Flores Sacsi, Edgar Santiago[2]; Delgado Huamani, Edgar Ronny[3]; Treviño Zevallos, Ítalo Francisco[4]; Velarde Allazo, Edwar Andrés[4];
[1,2,3,4,]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, *grondans@utp.edu.pe, edsanflores@gmail.com, c21684@utp.edu.pe, itrevino@utp.edu.pe, evelarde@utp.edu.pe*

Abstract*– Agrovoltaic systems, which combine photovoltaic panels with agriculture, can increase production and modify plant metabolism due to shading stress. This study aimed to compare radish cultivation in an agrovoltaic system with 10° and 50° shading angles versus a conventional crop through physical and chemical analyses. The cultivation was automated using sensors to monitor pH, humidity, solar radiation, and NPK levels. Following AOAC standards, the proximal composition was determined. ICP-MS was used to determine total mineral content in both leaves and bulbs, and antioxidant capacity was assessed using the DPPH and FRAP methods. The results showed that shading significantly affected the treatments, with radishes showing larger bulb size and leaf area in the treatment with a 10° solar panel inclination. Significant differences were found in the carbohydrate and ash content of the bulbs among the treatments. On the other hand, the leaves showed a higher concentration of minerals compared to the bulbs, highlighting their nutritional contribution. Significant differences were also observed in total phenolic compounds and flavonoids, with higher levels in the leaves. Regarding antioxidant activity, the bulbs exhibited greater DPPH radical inhibition (82%-88%), while the antioxidant activity measured using the FRAP method was higher in the control group. These results suggest that shading influences the synthesis of secondary metabolites, regulating the concentration of phenolics and flavonoids, which affects antioxidant activity.

Keywords--. Agrovoltaic system, shading levels, phenolic compounds, antioxidant activity, Raphanus sativus L.

Impacto del sombreado agrovoltaico en la composición química y capacidad antioxidante de rábanos (*Raphanus sativus L.*)

Rondán -Sanabria, Gerby Giovanna[1]; Flores Sacsi, Edgar Santiago[2]; Delgado Huamani, Edgar Ronny[3]; Treviño Zevallos, Ítalo Francisco[4]; Velarde Allazo, Edwar Andrés[4];
[1,2,3,4,]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, *grondans@utp.edu.pe, edsanflores@gmail.com, c21684@utp.edu.pe, itrevino@utp.edu.pe, evelarde@utp.edu.pe*

Resumen*– Los sistemas agrovoltaicos, que combinan paneles fotovoltaicos con la agricultura, pueden aumentar la producción y modificar el metabolismo de las plantas debido al estrés por sombreado. Este estudio tuvo como objetivo comparar el cultivo de rabanitos en un sistema agrovoltaico con sombreado de 10° y 50° de inclinación frente a un cultivo convencional, mediante análisis físicos y químicos. Se automatizó el cultivo usando sensores para monitorear pH, humedad, radiación solar y niveles de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). Siguiendo las normas AOAC se determinó la composición proximal. ICP-MS se usó para determinar los minerales totales, tanto en hojas como en bulbos y la capacidad antioxidante se evaluó con los métodos DPPH y FRAP. Los resultados mostraron que el sombreado afectó significativamente los tratamientos, destacándose los rabanitos con mayor tamaño de bulbo y área foliar en el tratamiento con 10° de inclinación del panel solar. Se encontraron diferencias significativas en el contenido de carbohidratos y cenizas en los bulbos entre los tratamientos. Por otro lado, las hojas presentaron una mayor concentración de minerales en comparación con los bulbos, destacando su aporte nutricional. También, se observaron diferencias significativas en los compuestos fenólicos totales y flavonoides, siendo más altos en las hojas. En cuanto a la capacidad antioxidante, los bulbos mostraron mayor inhibición del radical DPPH (82%-88%), mientras que la actividad antioxidante medida con FRAP fue mayor en el control. Estos resultados sugieren que el sombreado influye en la síntesis de metabolitos secundarios, regulando la concentración de fenólicos y flavonoides, lo que afecta la actividad antioxidante.

***Palabras clave: Sistema agrovoltaico, niveles de sombrado, compuestos fenólicos, actividad antioxidante, Raphanus sativus* L.**

I. Introducción

En las últimas décadas, el estudio y empleo de los sistemas solares fotovoltaicos han aumentado debido a su rentabilidad y su amplio uso como fuente principal de energía renovable disponible en todo el planeta y se espera que hasta el año 2050 esta tecnología domine el mercado energético. Este crecimiento de manera exponencial podría reemplazar a la energía producida por combustibles fósiles, que tienen un impacto en el calentamiento global y el ecosistema. Además, la energía renovable tiene numerosos beneficios para el medio ambiente y el desarrollo sostenible. Actualmente, esta energía es aceptada como una solución crucial para los desafíos energéticos, ecosistémicos y sociales del mundo [1], [2]

Sin embargo, aunque proporciona una fuente de energía limpia, sus instalaciones requieren grandes áreas de suelo no permanente, lo que puede causar un impacto en el consumo de tierras fértiles [3], [4]. Además, se ha identificado que la presencia de paneles solares en estos espacios de suelo puede tener un impacto en el proceso de sellado, sombreado y degradación general del suelo, generando preocupaciones sobre su impacto en el ecosistema [5]. Por esta razón, muchos expertos reclaman una mayor investigación para evaluar cualquier impacto negativo en la posible prestación de servicios ecosistémicos de este creciente uso de tierra [6], [7].

Teniendo en cuenta que la eficiencia actual de los paneles solares fotovoltaicos policristalinos comerciales requiere 4 acres de tierra para generar 1 MW de energía, este tamaño de suelo podría generar una escasez mundial de tierras cultivables, trayendo como consecuencia una rivalidad por el uso de tierras en el futuro cercano [8]. Para minimizar el impacto del uso de suelos, se ha utilizado la combinación de paneles fotovoltaicos con la agricultura en el mismo terreno, conocido como sistemas agrovoltaicos o agrofotovoltaicos. Estos sistemas proporcionan sombra a las plantas, lo que resulta en varios beneficios aditivos y sinérgicos, como la disminución del estrés por sequía de las plantas, protección contra cambios de clima, menos cantidad de agua, etc. [9], [10], [11].

La investigación sobre los efectos del sombreado por paneles fotovoltaicos en distintos cultivos aún es limitada. Un estudio en invernadero mostró que el rendimiento y crecimiento del *Capsicum annuum* fue significativamente mayor bajo sombreado con paneles fotovoltaicos en comparación con el control [12]. Además, una reducción del 35% en la luz incidente incrementó el contenido de antioxidantes en los pimientos. Se observó también que las altas temperaturas pueden afectar la floración y provocar pudrición. El análisis de minerales reveló un aumento en los niveles de N, P y K en el tratamiento con sombreado, mientras que Na, Al, Mn, B, Mo y Ni disminuyeron bajo niveles elevados de sombra [3], [13].

No obstante, distintos niveles de sombreado en arándanos *(Vaccinium corymbosium septentrionalis)* han evidenciado que esta condición puede favorecer el incremento del tamaño del fruto, así como el contenido de fenoles y vitamina C. Asimismo, se identificaron 470 metabolitos secundarios, lo que llevó a concluir que las vías metabólicas de pirimidinas son sensibles al sombreado [14]. En cultivos de kiwi *(Actinida deliciosa)*, un sombreado del 19% resultó óptimo, ya que no afectó significativamente el crecimiento ni el rendimiento de la planta, pero mejoró la eficiencia en el uso del agua al reducir su consumo [15]

Sin embargo, la intensidad de la luz influye directamente en la morfología, fisiología y bioquímica de las plantas, afectando la materia seca, calidad y rendimiento de los cultivos [16], [17]. Además, muchas especies sintetizan metabolitos secundarios en respuesta a la radiación UV-B como mecanismo de defensa, compuestos que pueden aumentar en ciertas condiciones y tener aplicaciones en cosmética, fármacos y alimentos nutracéuticos [18]. Mostrando que la luz es clave en la fotosíntesis y en la producción de metabolitos secundarios, como fenoles y flavonoides, que influyen en la capacidad antioxidante de las plantas. Se ha demostrado que una menor intensidad lumínica puede alterar el perfil metabólico de los cultivos, afectando su calidad nutricional y funcional. Sin embargo, estos efectos varían según la especie y el nivel de sombreado aplicado.

Dado que cada planta requiere una cantidad específica de luz, es esencial analizar cómo distintos niveles de sombreado afectan su desarrollo y calidad. Este estudio busca comparar las características fisicoquímicas de rábanos cultivados en un sistema agrovoltaico con diferentes niveles de sombreado, frente a un sistema convencional y determinar su seguridad para el consumo humano.

II. Materiales y Métodos

A. Materiales

Todos los reactivos empleados para este estudio fueron de grado analítico, el metanol, etanol, cloruro férrico, sulfato ferroso heptahidratado, carbonato de sodio, acetato de sodio trihidratado, ácido acético glacial y ácido clorhídrico, fueron adquiridos de Merck (Darmstadt, Germani). El reactivo de Folin-Ciocateau, TPTZ (2,4,6-Tris(2-piridil)-s-triazina), DPPH ((2,2-Diphenyl-1-picryl-hidrazil), Ácido gálico, catequina fueron adquiridos por Sigma (St. Louis, Mo, EE. UU). Todas las soluciones fueron preparadas empleando agua ultrapura.

B. Cultivo de rábanos y cosecha

Para este estudio, se construyeron tres macetas de 1 m^2 y 50 cm de profundidad (Fig. 1) en la azotea de la Universidad Tecnológica del Perú, en Arequipa. Durante mayo y junio de 2023, se preparó el sustrato con grava para drenaje, arena para aeración y tierra agrícola como medio de cultivo. Una maceta se mantuvo como control, mientras que las otras dos fueron sombreadas con paneles solares inclinados a 10º y 50º, orientados al noroeste y ubicados a 1.5 m de altura.

En cada maceta se sembraron rábanos en 10 hoyos de 2 cm de profundidad, distribuidos en tres filas, y se implementó un sistema de riego por goteo. Durante su crecimiento, se monitorearon parámetros como altura, tamaño de hojas, signos de estrés o enfermedad, pH del suelo, humedad, NPK y radiación solar. Tras 40 días, los rábanos fueron cosechados, seleccionados y procesados.

Fig. 1. A) Macetas para el cultivo de rabanitos, B y C) Rabanitos en crecimiento.

El procesamiento incluyó limpieza para eliminar impurezas, separación de hojas y bulbos, y lavado con agua destilada. Los bulbos se cortaron en láminas de 1 mm y se secaron en una estufa ventilada a 40°C durante 48 horas, al igual que las hojas. Luego, las muestras secas fueron trituradas en un molino, almacenadas en frascos herméticos y etiquetadas para su posterior análisis.

C. Determinación de propiedades químicas (composición proximal y minerales)

La composición proximal de las muestras de rábanos (hojas y raíces) se analizó, siguiendo la metodología de la Association of Official Analytical Chemistry (AOAC) [19]. La humedad se determinó mediante el método gravimétrico en estufa a 105 °C, las proteínas por el método micro-Kjeldahl con un factor de conversión de nitrógeno en proteína de 6.24, las cenizas mediante incineración y calcinación en mufla a 550 °C, y los lípidos por el método Soxhlet. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

Para la determinación de minerales, se empleó Espectrometría de Masas con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-MS, Analytik Jena, Germany). Se analizaron trazas de elementos como Al, Ba, Cu, Fe, K y Mg. Para ello, 5 g de muestra fueron digeridos con 5 mL de HNO_3 al 65% (m/m), diluidos hasta 50 mL y sometidos a análisis en ICP-MS, utilizando soluciones estándar como referencia [20].

D. Compuestos fenólicos y actividad antioxidante

Para la extracción de compuestos fenólicos y flavonoides en bulbos y hojas, se utilizó metanol al 100%. Se pesó 1 g de muestra seca, se añadió 25 mL de metanol y se agitó a 250 rpm durante 24 h a temperatura ambiente. Luego, se centrifugó a 5000 g por 15 min, recuperando el sobrenadante para los análisis posteriores. Con el mismo extracto se cuantificaron flavonoides, compuestos fenólicos totales y

actividad antioxidante (FRAP y DPPH), realizándose todos los análisis por triplicado.

La actividad antioxidante por DPPH, se cuantifico mezclando 100 µL del extracto con 3.9 mL de solución de DPPH (0.06 mM), midiendo la absorbancia a 517 nm. Se uso un control con metanol y DPPH, expresando los resultados como % de inhibición según la ecuación (1) [21].

$$\%\ de\ inhibición = \frac{(Abs.Control - Abs.extracto)}{Abs.control} X100 \quad (1)$$

La cuantificación de antioxidantes por FRAP se realizó mezclando 100 µL del extracto con 3 mL de reactivo FRAP, incubando a 37°C por 30 min y midiendo la absorbancia. La curva de calibración se obtuvo con sulfato ferroso y los resultados se expresaron en µM Fe^{2+}/mg de muestra [22].

Los flavonoides se cuantificaron añadiendo 3 mL de extracto a 3 mL de $AlCl_3$ al 2% en metanol, agitándose y reposando 30 min en oscuridad antes de medir la absorbancia a 415 nm. Se utilizó una curva patrón de quercetina y los resultados se expresaron en mg quercetina/100 g muestra [23-25].

Para la cuantificación de compuestos fenólicos totales, se empleó el reactivo Folin-Ciocateau con ácido gálico como estándar. Los resultados se expresaron en equivalentes de ácido gálico, realizándose todas las reacciones por triplicado [26].

E. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos de respuesta se realizó mediante un ANOVA multifactorial para determinar su significancia estadística ($p<0.05$). Posteriormente, se llevó a cabo una comparación de medias utilizando la prueba de Tukey HSD ($p<0.05$), empleando el software estadístico STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

III. Resultados y discusión

A. Influencia del sombreado en el tamaño de los rabanitos

En la Fig. 2 se observan los rabanitos cosechados después de 40 días de cultivo. Durante este período, se monitorearon diversos parámetros mediante tecnología IoT, como temperatura, pH, humedad, NPK y riego por goteo. Sin embargo, los datos específicos de estos parámetros no se presentan en este artículo, sino en [27]. Según los pesos registrados en cada tratamiento, se observó que a 10º de inclinación los bulbos alcanzaron un mayor tamaño, con una diferencia significativa ($P<0,05$) en comparación con los de 50º y el control. De manera similar, la longitud de la planta y el área foliar del rabanito mostraron diferencias significativas respecto a los otros tratamientos.

En la mayoría de los cultivos, el agua y la radiación solar son factores esenciales para el crecimiento de las plantas y la generación de biomasa, estos elementos desempeñan un papel clave en la asimilación del dióxido de carbono a través de los cloroplastos y en la transpiración que ocurre a mediante los estomas [28].

Fig. 2. Rabanitos a los 40 días de cultivo. A) Area foliar del rabanito, B) Bulbos antes de la cosecha. C) Rabanitos cosechados.

Para optimizar la producción de diversos cultivos, como fresa, rúcula, tomate y flores, se emplean sistemas fotovoltaicos, los cuales proporcionan un nivel de sombreado del 26%, 25%, 10-20% y 20%, respectivamente [29], [30], [31], [32]. Según [15], un sombreado del 19% en cultivos de kiwi resultó óptimo, ya que no impactó significativamente el crecimiento y rendimiento de la planta, pero mejoró la productividad del agua al reducir su consumo

B. Composición proximal

La composición proximal es un indicador clave del valor nutricional, ya que se basa en la presencia de macromoléculas en la parte comestible de la planta. Estos datos son fundamentales para el etiquetado de información nutricional y el uso de la planta como materia prima en la elaboración de otros alimentos.

En la Tabla I se presentan los valores de macronutrientes de hojas y bulbos obtenidos del cultivo de rabanito, considerando dos ángulos de inclinación del sombreado generado por paneles solares: 10° y 50°. En dicha tabla se detallan los niveles de proteínas, carbohidratos, fibra total, cenizas, humedad y contenido energético. La humedad en hojas y bulbos frescos fue del 90 % y 93 - 94 %, respectivamente, en cada tratamiento. Estos valores son comparables con los reportados en la literatura para hojas (89.5 g/100g y 89.11 g/100g) y bulbos (95.24 g/100g y 93.40 g/100g) [33], [34], [35], [36].

Como era de esperarse, se observó un mayor porcentaje de carbohidratos tanto en hojas, como en bulbos. Además, se registró un ligero aumento en los niveles de carbohidratos entre los tratamientos; sin embargo, estas diferencias no fueron significativas ($p<0.05$) en hojas. Pero, en los bulbos si presentaron diferencias significativas en los tratamientos. Estos valores son superiores a los reportados por [33], quienes determinaron 4.04 g/100g en hojas y 3.03 g/100g en bulbos.

En cuanto a los demás macronutrientes, las hojas de rabanito mostraron un mayor contenido de proteínas, fibra y cenizas en comparación con los bulbos. El contenido de proteínas en hojas secas fue similar a los valores reportados por [34], [35], con 21.6 g/100g y 26.71 g/100g, respectivamente. En contraste, los bulbos presentaron valores proteicos inferiores a los descritos en esos estudios.

Los datos obtenidos para cenizas y fibra en las hojas de rabanito fueron superiores a los reportados por [33]. Al

comparar estos resultados con la literatura, se confirma que las hojas contienen una mayor cantidad de macronutrientes que los bulbos. Asimismo, el contenido energético en hojas (28.72 Kcal/100g) fue superior al reportado por [35], mientras que en los bulbos fue menor que el valor registrado por [34] (293.21 Kcal/100g). Hasta el momento, no existen estudios en la literatura sobre el efecto del sombreado en *Raphanus sativus*. Sin embargo, en este trabajo, los valores de proteínas y carbohidratos fueron similares a los reportados en otros estudios, aunque el contenido de fibra y cenizas mostró diferencias. En cuanto a los lípidos, no fue posible detectarlos ni en hojas ni en bulbos.

Las variaciones en los valores reportados por diferentes autores para *Raphanus sativus* pueden atribuirse a diferencias geográficas en los cultivos, así como a factores bióticos y abióticos que influyen en su crecimiento y producción [37], [38].

TABLA I
COMPOSICIÓN PROXIMAL DE BULBOS Y HOJAS EN LOS TRES TRATAMIENTOS DEL CULTIVO DE RABANITOS EN BASE FRESCA

	Hojas			Bulbo			
Parámetro	**10º**	**50º**	**Control**	**10º**	**50º**	**Control**	**Unidades**
***Proteína**	2.60 ±0.30	2.78±0.20	2.99±0.08	0.63±0.05	0.63±0.01	0.65±0.05	g/100g
Carbohidrato[1]	**4.58±0.20**	**4.18±0.09**	**4.16±0.1**	**4.61^{a}±0.01**	**4.41^{b}±0.07**	**4.71^{c}±0.12**	g/100g
Fibra	1.54±0.07	1.54±0.20	1.48±0.04	0.60±0.01	0.61±0.01	0.61±0.03	g/100g
Cenizas	2.56±0.26	2.58±0.10	2.42±0.1	0.61^{a}±0.007	0.62±0.0	0.65^{b}±0.03	g/100g
Energía	28.72±0.30	27.84±0.68	28.60±0.7	20.96a±0.13	20.16b±0.12	21.44c±0.1	Kcal/100g
Grasa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	g/100g
Humedad	90.27±0.18	90.46±0.29	90.46±0.09	94.15±0.47	94.34±0.1	93.99±0.57	g/100g

*Proteína (F=6.25). [1]por diferencia. Según la comparación de medias no presenta diferencias estadísticas significativas entre niveles de sombreado en los tratamientos, ni el control con un nivel de confianza del 95.0%.

C. Concentración de minerales

La Tabla II, muestra una visión detallada de la composición mineral de las hojas y bulbos. Los datos están expresados en mg/100g de base fresca e incluyen los minerales más relevantes que cumplen funciones esenciales y fisiológicas en la alimentación humana, además de ser fundamentales para el crecimiento y desarrollo de la planta. En esta Tabla II, se observa claramente que las hojas presentan concentraciones minerales superiores en comparación con los bulbos. No obstante, las diferencias en la concentración entre tratamientos, tanto en hojas como en bulbos, son en su mayoría pequeñas, aunque en algunos casos se registran diferencias significativas ($p<0,05$).

TABLA II
CONCENTRACIÓN DE MINERALES EN HOJAS Y BULBOS EN LOS TRES TRATAMIENTOS DEL CULTIVO DE RABANITOS EN BASE FRESCA

	Hojas (mg/100 g)			Bulbo (mg/100g)		
Mineral	**10º**	**50º**	**Control**	**10º**	**50º**	**Control**
B	1.88±0.04	3.26±0.05	3.99±0.04	0.26±0.01^{a}	0.25±0.02^{a}	0.30±0.00^{b}
Ca	**354.25±1.04^{a}**	**372.48±1.15^{b}**	**359.21±1.05^{c}**	**25.52±0.21^{c}**	**21.87±0.14^{a}**	**22.40±0.20^{b}**
Cu	0.21±0.01^{a}	0.23±0.00^{a}	0.22±0.03^{a}	0.08±0.00^{a}	0.07±0.01^{a}	0.89±0.07^{b}
Fe	8.46±0.44^{ab}	9.54±0.54^{b}	7.47±0.24^{a}	0.46±0.00^{a}	0.61±0.01^{b}	0.79±0.02^{c}
K	**366.15±1.64^{a}**	**380.20±2.00^{b}**	**398.15±1.34^{c}**	**278.72±2.01^{a}**	**281.64±1.44^{a}**	**279.44±1.32^{a}**
Mg	**78.46±0.74^{a}**	**70.02±0.64^{b}**	**61.90±0.76^{c}**	**10.57±0.11^{b}**	**9.53±0.22^{a}**	**10.06±0.31^{ab}**
Mn	1.08±0.03^{a}	1.52±0.04^{b}	1.07±0.02^{a}	0.07±0.01^{a}	0.09±0.01^{a}	0.09±0.00^{a}
Na	**53.99±0.94^{a}**	**70.53±0.84^{b}**	**64.29±0.73^{c}**	**17.87±0.01^{a}**	**19.77±0.05^{b}**	**17.99±0.12^{a}**
P	**40.20±0.14^{a}**	**47.74±0.21^{b}**	**50.64±0.11^{c}**	**29.10±0.21^{a}**	**31.11±0.14^{b}**	**30.68±0.15^{b}**
Zn	0.80±0.00^{b}	0.73±0.01^{a}	0.72±0.00^{a}	0.32±0.04^{b}	0.21±0.02^{a}	0.22±0.03^{ab}

Letras iguales en las filas de cada análisis muestras que no hubo diferencias significativas un nivel de confianza del 95.0%, tanto para hojas y bulbos de rabanitos

El calcio (Ca) y el potasio (K) fueron los minerales más abundantes en las hojas (354.25 a 372.48 mg/100g de muestra en base fresca), seguidos por el magnesio (Mg), sodio (Na), fósforo (P) y hierro (Fe), con diferencias estadísticamente significativas, excepto en el caso del hierro. Por otro lado, en los bulbos, el potasio presentó la mayor concentración (278.72 a 281.64 mg/100g de muestra fresca), seguido del fósforo, calcio, sodio y hierro. Asimismo, se identificaron boro (B), cobre (Cu), zinc (Zn) y manganeso (Mn) en bajas concentraciones tanto en hojas como en bulbos.

Los valores obtenidos son similares a los reportados en diferentes cultivos de rábanos a campo abierto [33], [39], [40]. Sin embargo, estudios previos indican que las concentraciones de nutrientes foliares como Ca, K, P, Mg, Na, Cu, Zn y Mn pueden aumentar en respuesta al sombreado prolongado en cultivos de níspero [41]. Del mismo modo, [12] y [42] evaluaron el impacto del sombreado en la concentración de minerales, observando un incremento en los niveles de N, P y K, mientras que las concentraciones de Al, B, Mo, Na, Mn y Ni disminuyeron. En contraste, no se registraron diferencias significativas en los niveles de Ca, Mg, S, Cu, Fe y Zn.

D. Compuestos fenólicos totales, flavonoides y actividad antioxidante.

La concentración de compuestos fenólicos y flavonoides es fundamental, ya que diversos estudios han demostrado que son los principales responsables de la actividad antioxidante en los vegetales [9], [43], [44]. Los resultados de los compuestos fenólicos totales (CFT) se expresaron en miligramos de equivalentes de ácido gálico por 100 g de muestra seca (mg EAG/100 g), mientras que los flavonoides totales se expresaron en miligramos de quercetina por 100 g de muestra seca (mg Q/100 g) (Tabla III).

En cuanto a los CFT, la mayor concentración se registró en las hojas del tratamiento control, seguido del tratamiento a 50° y del tratamiento a 10°. El análisis estadístico reveló diferencias significativas entre los tres tratamientos ($p < 0.05$). En los bulbos, la mayor concentración de CFT se observó en el tratamiento a 10° con 11724.06 mg EAG/100 g, seguido del tratamiento a 50°, mientras que el control presentó la menor concentración. Al comparar estos valores, también se identificaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$).

En relación con los flavonoides, las hojas presentaron concentraciones más altas que los bulbos. En las hojas, el grupo control mostró el mayor contenido con 2965.69 mg de quercetina/100 g, seguido de los tratamientos a 10° y 50°, con diferencias significativas entre ellos ($p < 0.05$). En los bulbos, la mayor concentración de flavonoides se encontró en el tratamiento a 50°, mientras que el control presentó la menor concentración. También, se observaron variaciones significativas en la capacidad antioxidante bajo los diferentes tratamientos de sombreado. Tanto en hojas como en bulbos, el control (sin sombra) presentó una mayor actividad antioxidante en comparación con los tratamientos de sombreado a 10° y 50°, medida mediante el reactivo FRAP, alcanzando valores de 3007.51 y 30895.23 µM de sulfato ferroso/g de muestra, respectivamente. Sin embargo, al emplear el método DPPH, se encontró que las hojas sometidas a un sombreado de 10° presentaron el mayor porcentaje de inhibición del radical DPPH, con un 80.37%. En los bulbos, tanto el tratamiento a 10° como el control mostraron porcentajes de inhibición estadísticamente similares, con valores de 87.85% y 88.78%, respectivamente.

Estos resultados son satisfactorios, ya que sugieren que el estrés por sombreado puede estar relacionado con la reducción en la síntesis de metabolitos secundarios, como los compuestos fenólicos y flavonoides, debido a una menor exposición a la radiación UV y una disminución en la actividad fotosintética, lo que impacta en la actividad antioxidante [9], [18]. No obstante, la exposición a la luz solar generalmente estimula la producción y síntesis de compuestos fenólicos y flavonoides como una respuesta defensiva de las plantas, siendo estos fundamentales para la actividad antioxidante.

Hasta el momento, no se han reportado estudios en la literatura sobre los efectos del sombreado en rabanitos, pero es posible hacer comparaciones con otras investigaciones que han evaluado la influencia de la intensidad lumínica en el metabolismo vegetal. Por ejemplo, en el arroz (*Oryza sativa* L,), diferentes intensidades de sombreado generaron variaciones en el tamaño del grano y en la concentración de antocianinas durante la etapa de madurez [9]. Asimismo, al incrementar la intensidad del sombreado, se observó una disminución en la concentración de flavonoides y compuestos fenólicos totales en la película de *Juglans sigillata* Dode (Nogal Chino) [45]. De manera similar, un sombreado moderado aplicado al té antes de la cosecha puede reducir la concentración de taninos y polifenoles, favorecer la acumulación de aminoácidos y potenciar la actividad de las enzimas polifenol oxidasa y peroxidasa [46].

TABLA III
CONCENTRACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS TOTALES, FLAVONOIDES Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE EN HOJAS Y BULBOS DE RABANITOS

	Hojas de rabanitos			Bulbos de rabanitos		
Análisis	**10º de sombra**	**50º de sombra**	**Control sin sombra**	**10º de sombra**	**50º de sombra**	**Control sin sombra**
***CFT (mgGAE/100g)**	18662.14^{a}±15.6	2100.09^{b}±28.8	22486.88^{c}±30.6	11724.06^{a} ±12.5	11485.77^{b} ±55.9	10008.89^{c} ±10.4
Flavonoides (mg quercetina/100g)	2851.10^{b}±9.9	2600.92^{a}±13.6	2965.69^{c}±9.01	532.49^{b}±2.3	661.12^{c}±5.7	392.11^{a}±2.38
DPPH (%)	80.37^{b}±15.6	77.57^{a}±15.27	74.76^{a}±14.42	87.85^{a}±1.18	82.17^{b}±1.4	88.78^{a}±2.11
FRAP (uM sulfato ferroso/g)	2675.58^{b}±15.6	2339.18^{a}±15.3	3007.51^{c}±14.4	10256.41^{b}±50.3	3555.55^{a}±45.8	30895.23^{c}±31.56

*CFT: contenido de fenoles totales, Letras iguales en las filas de cada análisis muestras que no hubo diferencias significativas un nivel de confianza del 95.0%, tanto para hojas y bulbos de rabanitos

IV. Conclusiones

Este estudio demuestra que el sombreado agrovoltaico influye significativamente en el desarrollo y composición química de los rábanos (*Raphanus sativus* L.). Se observó que la inclinación de 10° en los paneles solares favoreció el tamaño del bulbo y el área foliar, lo que indica que un nivel moderado de sombra puede mejorar el crecimiento de la planta,

En la composición proximal, se encontraron diferencias significativas en carbohidratos y cenizas de los bulbos entre los tratamientos. No obstante, las hojas presentaron una mayor concentración de macronutrientes en comparación con los bulbos, resaltando su potencial como fuente de proteínas, fibra y minerales. El calcio y el potasio fueron los minerales predominantes en hojas, mientras que en los bulbos el potasio fue el más abundante, seguido de fósforo y calcio. El tratamiento con 50° mostró una ligera ventaja en la acumulación de ciertos minerales clave, indicando que la sombra afecta la absorción y distribución de nutrientes,

El sombreado también impactó la síntesis de metabolitos secundarios y la actividad antioxidante. Las hojas contenían más compuestos fenólicos totales y flavonoides que los bulbos. En cuanto a la actividad antioxidante, los bulbos a 10° y el control mostraron una inhibición DPPH similar (~88%), mientras que, en hojas, el tratamiento a 10° tuvo la mayor inhibición (80.37%). Con FRAP, el control presentó la mayor actividad en hojas (3007.51 µM) y bulbos (30895.23 µM).

En general, el sombreado a 10° favoreció la síntesis de compuestos bioactivos en bulbos, mientras que la mayor acumulación de metabolitos en hojas ocurrió en el control sin sombra, confirmando que la luz regula la composición química y actividad antioxidante en los rábanos.

Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica del Perú por el apoyo financiero para realizar este trabajo.

Referencias

[1] A. E. MacDonald. C. T. M. Clack. A. Alexander. A. Dunbar. J. Wilczak. and Y. Xie. “Future cost-competitive electricity systems and their impact on US CO2 emissions.” *Nat Clim Chang*. vol. 6. no. 5. pp. 526–531. 2016. doi: 10.1038/nclimate2921.

[2] Y. Liu *et al.*. “Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem.” *Land Degrad Dev*. vol. 30. no. 18. pp. 2177–2186. 2019. doi: 10.1002/ldr.3408.

[3] G. Barron-Gafford *et al.*. “Agrivoltaics in drylands: Co-location has food. water. and renewable energy benefits.” 2019.

[4] L. Delfanti *et al.*. “Solar plants. environmental degradation and local socioeconomic contexts: A case study in a Mediterranean country.” *Environ Impact Assess Rev*. vol. 61. pp. 88–93. 2016. doi: 10.1016/j.eiar.2016.07.003.

[5] D. Uldrijan. M. Kováčiková. A. Jakimiuk. M. D. Vaverková. and J. Winkler. “Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants.” *Ecol Eng*. vol. 168. no. April. 2021. doi: 10.1016/j. ecoleng.2021.106274.

[6] R. J. Randle-Boggis *et al.*. “Realising co-benefits for natural capital and ecosystem services from solar parks: A co-developed. evidence-based approach.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 125. no. March. p. 109775. 2020. doi: 10.1016/j.rser.2020.109775.

[7] M. C. Moscatelli. R. Marabottini. L. Massaccesi. and S. Marinari. “Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area.” *Geoderma Regional*. vol. 29. no. December 2021. p. e00500. 2022. doi: 10.1016/j.geodrs. 2022.e00500.

[8] R. M. Waghmare. R. Jilte. and S. Joshi. “Performance analysis of Agrophotovoltaic systems with Solanum lycopersicum crops.” *Mater Today Proc*. no. xxxx. 2022. doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.300.

[9] S. Song *et al.*. “Effects of shading at different growth stages with various shading intensities on the grain yield and anthocyanin content of colored rice (Oryza sativa L.).” *Field Crops Res*. vol. 283. no. February. p. 108555. 2022. doi: 10.1016/j.fcr.2022.108555.

[10] C. Méndez espinoza and M. Á. Vallejo Reyna. “perspectiva de las especies forestales Response mechanisms to abiotic stress: towards a forest species perspective Introducción El estrés abiótico se refiere a los factores ambientales que alteran los procesos fisiológicos.” *Rev Mex Cienc For*. vol. 10. no. 56. 2019.

[11] S. Yue. M. Guo. P. Zou. W. Wu. and X. Zhou. “Effects of photovoltaic panels on soil temperature and moisture in desert areas.” *Environmental Science and Pollution Research*. vol. 28. no. 14. pp. 17506–17518. 2021. doi: 10.1007/s11356-020-11742-8.

[12] R. H. E. Hassanien. M. M. Ibrahim. A. E. Ghaly. and E. N. Abdelrahman. “Effect of photovoltaics shading on the growth of chili pepper in controlled greenhouses.” *Heliyon*. vol. 8. no. 2. p. e08877. 2022. doi: 10.1016/j.heliyon. 2022.e08877.

[13] V. A. Lima. F. V. Pacheco. R. P. Avelar. I. C. A. Alvarenga. J. E. B. P. Pinto. and A. A. de Alvarenga. “Growth. photosynthetic pigments and production of essential oil of long-pepper under different light conditions.” *An Acad Bras Cienc*. vol. 89. no. 2. pp. 1167–1174. 2017. doi: 10.1590/0001-3765201720150770.

[14] Y. Wu *et al.*. “A physiological and metabolomic analysis reveals the effect of shading intensity on blueberry fruit quality.” *Food Chem X*. vol. 15. no. February. p. 100367. 2022. doi: 10.1016/j.fochx.2022.100367.

[15] S. Jiang *et al.*. “Effects of different photovoltaic shading levels on kiwifruit growth. yield and water productivity under ‘agrivoltaic’ system in Southwest China.” *Agric Water Manag*. vol. 269. no. April. 2022. doi: 10.1016/j.agwat.2022.107675.

[16] F. Deng *et al.*. “Decreased anther dehiscence contributes to a lower fertilization rate of rice subjected to shading stress.” *Field Crops Res*. vol. 273. no. May. 2021. doi: 10.1016/j.fcr.2021.108291.

[17] Y. Cheng *et al.*. “Effects of shading on triterpene saponin accumulation and related gene expression of Aralia elata (Miq.) Seem.” *Plant Physiology and Biochemistry*. vol. 160. no. May 2020. pp. 166–174. 2021. doi: 10.1016/j.plaphy.2021.01.009.

[18] S. Takshak and S. B. Agrawal. “Defense potential of secondary metabolites in medicinal plants under UV-B stress.” *J Photochem Photobiol B*. vol. 193. no. February. pp. 51–88. 2019. doi: 10.1016/j. jphotobiol.2019.02.002.

[19] AOAC. “Association of Official Analytical Chemists.” *Official methods of analysis (15th ed.). Washington*. 1990.

[20] P. Pohl. M. Welna. A. Szymczycha-Madeja. P. Cyganowski. P. Jamroz. and A. Dzimitrowicz. “Rapid and easy ICP OES determination of selected major. minor and trace elements in Pu-erh tea infusions using the response surface methodology along with the joint desirability function approach.” *Talanta*. vol. 249. no. June. p. 123650. 2022. doi: 10.1016/j.talanta.2022.123650.

[21] M. Burits and F. Bucar. “Antioxidant activity of Nigella sativa essential oil.” *Phytotherapy Research*. vol. 14. no. 5. pp. 323–328. 2000. doi: 10.1002/1099-1573(200008)14:5<323: AID-PTR621>3.0.CO;2-Q.

[22] M. do S. M. Rufino *et al.* “FRAP embrapa.” *Comunicado Técnico. 125 Embrapa*. pp. 3–6. 2006.

[23] L. C. Kim DO. Chun OK. Kim YJ. Moon HY. “Quantification of polyphenolics and their antioxidant capacity in fresh plums.” *J Agric Food Chem*. vol. 51. 2003.

[24] R. Chirinos. R. Pedreschi. H. Rogez. Y. Larondelle. and D. Campos. “Phenolic compound contents and antioxidant activity in plants with nutritional and/or medicinal properties from the Peruvian Andean

region." *Ind Crops Prod*. vol. 47. pp. 145–152. 2013. doi: 10.1016/j. indcrop.2013.02.025.

[25] R. Chirinos. I. Betalleluz-Pallardel. A. Huamán. C. Arbizu. R. Pedreschi. and D. Campos. "HPLC-DAD characterisation of phenolic compounds from Andean oca (Oxalis tuberosa Mol.) tubers and their contribution to the antioxidant capacity." *Food Chem*. vol. 113. no. 4. pp. 1243–1251. 2009. doi: 10.1016/j.foodchem.2008.08.015.

[26] A. Vega-Gálvez *et al.*. "High hydrostatic pressure effect on chemical composition. color. phenolic acids and antioxidant capacity of Cape gooseberry pulp (Physalis peruviana L.)." *LWT - Food Science and Technology*. vol. 58. no. 2. pp. 519–526. 2014. doi: 10.1016/j. lwt.2014.04.010.

[27] G. G. Rondán-Sanabria. E. S. F. Sacsi. E. R. D. Huamani. and E. A. V. Allazo. "Evaluation of radish (Raphanus sativus L.) crop productivity under shading in an agrovoltaic system in two seasons of the year in Arequipa. Perú - 2023." in *4th International Conference on Electrical. Communication and Computer Engineering. ICECCE 2023*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.. 2023. doi: 10.1109/ICECCE61019.2023.10442298.

[28] T. Sekiyama and A. Nagashima. "Solar sharing for both food and clean energy production: Performance of agrivoltaic systems for corn. a typical shade-intolerant crop." *Environments - MDPI*. vol. 6. no. 6. jun. 2019. doi: 10.3390/environments6060065.

[29] A. Moreno. D. Chemisana. and E. F. Fernández. "Energy performance and crop yield production of a semitransparent photovoltaic greenhouse." *Appl Energy*. vol. 382. Mar. 2025. doi: 10.1016/j. apenergy.2025.125285.

[30] A. Colantoni *et al.*. "Solar radiation distribution inside a greenhouse prototypal with photovoltaic mobile plant and effects on flower growth." *Sustainability (Switzerland)*. vol. 10. no. 3. Mar. 2018. doi: 10.3390/su10030855.

[31] R. H. E. Hassanien. M. Li. and F. Yin. "The integration of semi-transparent photovoltaics on greenhouse roof for energy and plant production." *Renew Energy*. vol. 121. pp. 377–388. jun. 2018. doi: 10.1016/j. renene.2018.01.044.

[32] Y. Tang. X. Ma. M. Li. and Y. Wang. "The effect of temperature and light on strawberry production in a solar greenhouse." *Solar Energy*. vol. 195. pp. 318–328. Jan. 2020. doi: 10.1016/j. solener.2019.11.070.

[33] R. Goyeneche *et al.*. "Chemical characterization and antioxidant capacity of red radish (Raphanus sativus L.) leaves and roots." *J Funct Foods*. vol. 16. pp. 256–264. jun. 2015. doi: 10.1016/j. jff.2015.04.049.

[34] W. Chihoub *et al.*. "Valorisation of the green waste parts from turnip. radish and wild cardoon: Nutritional value. phenolic profile and bioactivity evaluation." *Food Research International*. vol. 126. Dec. 2019. doi: 10.1016/j. foodres.2019.108651.

[35] E. Olika Keyata. Y. B. Tola. G. Bultosa. and S. Fikreyesus Forsido. "Proximate. mineral. and anti-nutrient compositions of underutilized plants of Ethiopia: Figl (Raphanus sativus L.). Girgir (Eruca sativa L) and Karkade (Hibiscus sabdariffa): Implications for in-vitro mineral bioavailability." *Food Research International*. vol. 137. nov. 2020. doi: 10.1016/j.foodres.2020.109724.

[36] E. O. Keyata. Y. B. Tola. G. Bultosa. and S. F. Forsido. "Phytochemical contents. antioxidant activity and functional properties of Raphanus sativus L. Eruca sativa L. and Hibiscus sabdariffa L. growing in Ethiopia." *Heliyon*. vol. 7. no. 1. Jan. 2021. doi: 10.1016/j.heliyon. 2021. e05939.

[37] M. M. Zaier *et al.*. "Effects of the seasonal variation in the phytochemical composition and bioactivities of the wild halophyte Suaeda fruticosa." *Food Biosci*. vol. 50. Dec. 2022. doi: 10.1016/j.fbio.2022.102131.

[38] A. Aires. C. Fernandes. R. Carvalho. R. N. Bennett. M. J. Saavedra. and E. A. S. Rosa. "Seasonal effects on bioactive compounds and antioxidant capacity of six economically important brassica vegetables." *Molecules*. vol. 16. no. 8. pp. 6816–6832. Aug. 2011. doi: 10.3390/molecules16086816.

[39] R. Ashraf *et al.*. "Fortification of phenolics. antioxidant activities and biochemical attributes of radish root by plant leaf extract seed priming." *Biocatal Agric Biotechnol*. vol. 16. pp. 115–120. oct. 2018. doi: 10.1016/j. bcab.2018.07.012.

[40] R. Ashraf. B. Sultana. M. Iqbal. and M. Mushtaq. "Variation in biochemical and antioxidant attributes of Raphanus sativus in response to foliar application of plant leaf extracts as plant growth regulator." *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*. vol. 14. no. 1. pp. 1–8. jun. 2016. doi: 10.1016/j. jgeb.2016.08.003.

[41] Y. Shan *et al.*. "Long-term. high-intensity shading enhances triterpene production of loquat leaf through increasing foliar mineral nutrients." *Sci Hortic*. vol. 260. Jan. 2020. doi: 10.1016/j. scienta. 2019.108873.

[42] J. C. Díaz-Pérez. "Light level under shading nets affects bell pepper (Capsicum *annuum* L.) fruit mineral nutrients." *Acta Hortic*. no. 1252. pp. 159–162. Sep. 2019. doi: 10.17660/ActaHortic.2019.1252.21.

[43] A. Rani *et al.*. "Enzymatically assisted extraction of antioxidant and anti-mutagenic compounds from radish (Raphanus sativus)." *Environ Technol Innov*. vol. 23. p. 101620. 2021. doi: 10.1016/j. eti.2021.101620.

[44] A. Ramakrishna and G. A. Ravishankar. "Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants." *Plant Signal Behav*. vol. 6. no. 11. pp. 1720–1731. 2011. doi: 10.4161/psb.6.11.17613.

[45] Y. Jiang. J. Chen. W. Zhang. and X. Pan. "Shading in fruit changes the polyphenol accumulation of pellicle by regulating activity of key enzymes and expression of their gene related polyphenol anabolism of Juglans sigillata Dode." *Sci Hortic*. vol. 329. Apr. 2024. doi: 10.1016/j. scienta.2024.113017.

[46] C. Shao *et al.*. "Effects of Preharvest Shading on Dynamic Changes in Metabolites. Gene Expression. and Enzyme Activity of Three Tea Types during Processing." *J Agric Food Chem*. vol. 70. no. 45. pp. 14544–14558. nov. 2022. doi: 10.1021/acs. jafc.2c05456.