ISSN 2215-2202
AGRONOMÍA COSTARRICENSE
REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
https://revistas.ucr.ac.cr//index.php/agrocost

Artículo científico

Tratamientos alternativos para el control del deterioro fisiológico poscosecha (DFP) en yuca (*Manihot esculenta* Crantz) mediante la inducción de resistencia a oxidación

Karina Alvarado-López[1], Maricruz Ramírez-Sánchez[2/*], Marco Vinicio Sáenz-Murillo[3]
[*]Autora para correspondencia. Correo electrónico: maricruz.ramirezsanchez@ucr.ac.cr

[1]Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.

[2]Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.

[3]Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.
DOI: https://doi.org/10.15517/vfwn1a11
Recibido el 13 de octubre del 2025; Aceptado el 28 de octubre del 2026

Resumen

Introducción. El deterioro fisiológico poscosecha (DFP) limita significativamente la comercialización de las raíces de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) fresca, especialmente en mercados internacionales que demandan productos con bajo impacto ambiental y sin recubrimientos sintéticos como la parafina. **Objetivo.** Este estudio evaluó la eficacia de tratamientos alternativos (etanol, ácido cítrico y metabisulfito de sodio) para inducir resistencia a la oxidación en raíces de yuca variedad Valencia, como estrategia para controlar el DFP. **Materiales y métodos.** Se realizaron dos ensayos: A) el primero permitió desarrollar una escala visual de severidad del DFP bajo diferentes condiciones de temperatura y almacenamiento; B) en el segundo, se valuó el efecto de dichos tratamientos sobre variables físicas (incidencia, severidad, pérdida de peso, respiración, luminosidad) y químicas (capacidad antioxidante, concentración de fenoles totales). **Resultados.** Los resultados obtenidos indicaron que el etanol al 70% y el metabisulfito de sodio a 250 ppm redujeron significativamente la incidencia y severidad del DFP, con efectos similares a la parafina, sin los inconvenientes ambientales asociados. El almacenamiento a 15 °C mostró menor incidencia de daño que a 5 °C, lo que sugiere un impacto negativo del frío sobre la fisiología de la raíz. **Conclusiones.** Estos hallazgos respaldan el uso de alternativas sostenibles y viables al parafinado para la conservación poscosecha de yuca destinada a exportación.

Palabras clave: GRAS; etanol; metabisulfito de sodio; temperatura de almacenamiento; conservación postcosecha.

Research article

Abstract

Alternative treatments for the control of postharvest physiological deterioration (PPD) in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) through the induction of resistance to oxidation

Introduction. Postharvest physiological deterioration (PPD) poses a major constraint to the commercialization of fresh cassava roots (*Manihot esculenta* Crantz), particularly in international markets seeking environmentally friendly and synthetic-free products. **Objective.** To evaluate the effectiveness of alternative treatments (ethanol, citric acid, and sodium metabisulfite) for inducing oxidative resistance in cassava roots (Valencia variety) as a strategy to control PPD. **Materials and methods.** Two trials were conducted: A) The first one developed a visual scale for PPD severity under different storage temperatures and durations; B) The second one assessed the impact of postharvest treatments on physical (incidence, severity, weight loss, respiration, luminosity) and chemical parameters (antioxidant capacity, total phenolic content). **Results.** Our results showed that 70% ethanol and 250 ppm sodium metabisulfite significantly reduced PPD incidence and severity, with effects comparable to paraffin, yet without its environmental drawbacks. Storage at 15 °C resulted in lower deterioration compared to 5 °C, suggesting that low temperatures may adversely affect cassava root physiology. **Conclusions.** Our findings support the use of sustainable alternatives to paraffin for extending the postharvest shelf life of cassava intended for export.

Keywords: GRAS; ethanol; sodium metabisulfite; storage temperature; postharvest preservation.

Introducción

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es una planta tropical originaria de Sudamérica de mucha importancia a nivel mundial. Es considerado el quinto cultivo básico más relevante por su aporte calórico y alta producción, dado que es el alimento primario para aproximadamente 800 millones de personas y se producen más de 278 millones de toneladas a nivel mundial (FAO, 2017). Se siembra en 103 países, de los cuales, los principales productores son países africanos como Nigeria y Ghana, seguido por naciones como Brasil, Tailandia e Indonesia (Parmar et al., 2017).

En Costa Rica, se destinan cerca de 10 mil hectáreas al cultivo de esta raíz, con una producción anual cercana a las 160 mil toneladas métricas (SEPSA, 2019). La yuca es el cuarto producto agrícola de mayor volumen de exportación, sus principales importadores son Estados Unidos, Holanda y España. En el 2021, se reportaron ganancias de USD 97 millones por esta actividad (PROCOMER, 2022).

Una de las principales limitantes para la comercialización y expansión del cultivo es el rápido deterioro poscosecha que acorta su vida útil (Uarrota et al., 2015). Este es ocasionado, en la mayoría de los casos, por un fenómeno endógeno denominado deterioro fisiológico poscosecha (DFP), conocido también con el nombre de pardeamiento enzimático o ennegrecimiento fisiológico. El DFP es un proceso activo de oxidación enzimática que se desencadena como reacción al daño mecánico durante la cosecha. Este fenómeno se expresa entre las 24 y 72 horas luego de recolectarse la raíz, y generalmente se presenta como una coloración negra - azulada en zonas vasculares del xilema y en tejido parenquimático cercano (Zainuddin et al., 2017).

Se estima que alrededor del mundo las ventas por yuca fresca pierden entre un 5% y 25% de los ingresos esperados a causa de este proceso de oxidación; muchas veces el producto se descarta, al no cumplir los estándares de calidad para exportación (Rahmawati et al., 2021). En zonas donde no se puede realizar un procesamiento rápido y efectivo, la yuca se puede deteriorar completamente antes de ser consumida o tratada (Saravanan et al., 2016). A raíz de esta problemática, el método más utilizado para mantener la integridad de la yuca a nivel poscosecha es el parafinado. Este es un proceso en el cual se sumerge la raíz en parafina líquida a una temperatura mayor a los 100 °C. El fin es formar una barrera física que disminuya el intercambio gaseoso y ralentice tanto la actividad enzimática como los procesos de oxidación, dando como resultado la extensión de la vida útil de la yuca hasta por cuatro semanas (Barona, 2015). Si bien el parafinado parece ser una solución viable, existen problemas ambientales y comerciales, que rodean esta práctica.

En primera instancia, se utiliza como materia prima un hidrocarburo derivado del petróleo, un producto no renovable que fomenta la extracción petrolera, una de las actividades de mayor impacto negativo en el ambiente y la biodiversidad (Bravo, 2007). También, se debe tomar en cuenta que la cáscara de yuca parafinada es una fuente de desechos no aprovechables, no puede ser utilizada como biomasa para otros subproductos como compost o alimento animal (Medina et al., 2013).

Los principales mercados de exportación de yuca fresca de Costa Rica son Estados Unidos y los países de la Unión Europea, regiones en las cuales se viene dando un cambio en los hábitos alimenticios, y se está optando por consumir productos más naturales, orgánicos y con nula o baja carga química (Posada, 2018).

Bajo esta tendencia, se podría esperar que se llegue a prohibir la exportación de yuca parafinada a distintos países, ya que no se ajusta a las demandas del mercado. Prueba de esto es que en años recientes países europeos y norteamericanos prohibieron la parafina como parte de empaque de productos frescos (Estrada, 2013); además, en el 2021, se registró la primera devolución de producto a causa del recubrimiento y se prohibió el ingreso de yuca parafinada proveniente de Costa Rica en el puerto español de Algeciras, confirmando los problemas de aceptación de este material (Barquero, 2021).

La producción de yuca a nivel nacional tiene como objetivo principal satisfacer la demanda de mercados externos. Por lo tanto, la conservación de la calidad de dichas raíces en el transporte es imprescindible. La yuca es un producto susceptible al frío, al ser transportado a bajas temperaturas se aumenta la producción de etileno y se propicia la oxidación interna, por lo que estas respuestas al estrés pueden generar a su vez que se acelere la aparición de síntomas por DFP (Uchechukwu-Agua et al., 2015). La temperatura óptima de almacenamiento en contenedores para el transporte de este producto no se conoce. Se mencionan ámbitos muy amplios a los cuales el producto puede ser enviado, desde los 0 a los 15 °C, por lo cual es importante determinar cuál se adecua al material vegetal evitando que se propicie la aparición del DFP (Fonseca & Saborío, 2001).

Debido al panorama planteado, es pertinente buscar nuevas alternativas para el control del DFP en yuca que sean efectivas, económicas, menos contaminantes, aceptadas en los mercados internacionales y que se adapten a las necesidades de los productores, además de evaluar temperaturas de almacenamiento para envíos internacionales. El objetivo del estudio fue evaluar la eficacia de tratamientos alternativos (etanol, ácido cítrico y metabisulfito de sodio) para inducir resistencia a la oxidación en raíces de yuca variedad Valencia, como estrategia para controlar el DFP

Materiales y métodos

Desarrollo de una escala visual mediante documentación fotográfica del estado de oxidación en yuca expuesta a diferentes temperaturas y tiempos de almacenamiento

Se inició la investigación determinando el efecto de la temperatura y el tiempo de almacenamiento en la oxidación de la yuca. Mediante esta relación se pudo determinar a cuál temperatura y tiempo de exposición es menos propensa la yuca a presentar síntomas de pardeamiento enzimático. Dicho experimento incluyó tres tratamientos de temperaturas de almacenamiento (5, 10 y 15 °C), utilizando una misma humedad relativa de cámara entre 85 y 90%.

Las temperaturas 5, 10 y 15 °C se seleccionaron basándose en los ensayos realizados por Fonseca y Saborío (2001), considerando la máxima temperatura a la que se transporta yuca al exterior (15 °C), un valor cercano a la temperatura más usual de exportación usado en Costa Rica que es 8 °C y una de las temperaturas mínimas aceptadas para el transporte de yuca en contenedores (5 °C).

Para la ejecución de este ensayo, se tomaron raíces de yuca sanas (previamente lavadas con agua) sin residuos de suelo y sin tratar (cosechadas en el mes de marzo del 2022). Dichas raíces se almacenaron por 20 días en las cámaras frías a las temperaturas mencionadas. Posterior a este tiempo, se elevó a temperatura ambiente para simular la exhibición en el mercado. Cada cuatro días luego de almacenarse, se fotografiaron cortes transversales de las yucas, realizados cada 4 cm iniciando 2 cm debajo de la herida de cosecha. Dichas fotografías se tomaron con una cámara EOS Rebel T6, Canon (Ōita, Japón). Se realizaron ocho evaluaciones, en un total de 34 días de estudio.

El ensayo finalizó cuando las yucas se encontraron en un estado sanitario que dificultó su manejo y en el cual la pudrición abarcaba casi la totalidad de la raíz interfiriendo con la documentación del deterioro fisiológico.

Como último paso del primer ensayo, se creó la escala visual para medir la severidad de los síntomas del DFP. Se procesaron las imágenes más representativas, en las cuales se apreciaban mejor los síntomas, con el programa Image J (National Institutes of Health [NIH], Bethesda, Maryland, United States), mediante la herramienta de segmentación por color. Se determinó la severidad de la enfermedad midiendo el porcentaje de daño en relación con el área total de los cortes transversales de yuca. Mediante el análisis de las fotografías, se seleccionó a cuántos centímetros de distancia en la yuca se observó mejor el efecto y se asignaron los valores numéricos de la escala. Para finalizar, se seleccionaron las imágenes más representativas donde se apreciaba correctamente el daño para la creación de la escala y se analizó la incidencia y severidad del DFP en las distintas secciones de las raíces de yuca. Con estas variables, se determinaron las temperaturas óptimas para realizar los siguientes ensayos.

Determinación de dosis y estimación del efecto de la aplicación de tratamientos poscosecha con antioxidantes y etanol, en la inducción de resistencia a la oxidación en yuca

El segundo ensayo tuvo como objetivo evaluar el potencial efecto de los agentes antioxidantes (ácido cítrico y metabisulfito de sodio) y el compuesto químico (etanol) sobre la estimulación de mecanismos internos contra el pardeamiento enzimático.

Para ello, se evaluaron las siguientes concentraciones: 25, 50, 75 y 90% v v^{-1} de etanol; 0,5, 1, 1,5 y 3% p v^{-1} de ácido cítrico; por último, 250, 500, 1000 y 1500 mg l^{-1} de metabisulfito de sodio. Posterior al estudio de la incidencia y porcentaje de severidad del DFP, se seleccionaron las dosis de 70% en etanol, 1% en ácido cítrico, 250 mg l^{-1} de metabisulfito de sodio y la temperatura de 5 °C para el almacenamiento.

Luego de definir las dosis para los tres tratamientos, se obtuvieron yucas frescas sin tratar, se lavaron y desinfectaron con agua clorada (50 mg l^{-1}). Posteriormente, se dejaron secando a temperatura ambiente (aproximadamente 20 °C) y se realizó la inmersión de las yucas en las disoluciones seleccionadas por un minuto. Posterior al secado, se empacaron e introdujeron en cámaras frías a dos temperaturas (5 y 15 °C) y humedad relativa entre 85 – 90%. Además de los tratamientos, se agregaron un control comercial (parafina) y un control absoluto de yuca sin tratar. Se almacenaron las muestras por 20 días en cámaras de enfriamiento (5 y 15 °C) para simular el envío de estas y, luego, se mantuvieron por 10 días más a temperatura ambiente para representar la vida en anaquel.

Las mediciones se realizaron los días 6, 22, 29 y 31 después del tratamiento. Para este ensayo, se midieron las variables físicas de severidad del DFP, utilizando la escala visual creada en el primer ensayo, incidencia, peso fresco, respiración, luminosidad, también, las variables químicas de concentración de fenoles totales y capacidad antioxidante. Las raíces de yuca utilizadas para este ensayo fueron cosechadas en noviembre del 2022, a excepción de las utilizadas para la determinación de dosis que se recolectaron en junio.

Variables evaluadas en las raíces de yuca

Con el fin de obtener datos que permitieran estudiar la inducción de resistencia a la oxidación, mediante la aplicación de distintos tratamientos y diferencias entre estos, se midieron características físicas y químicas de las yucas tratadas en el ensayo. Se seleccionaron las siguientes variables a evaluar:

a) **Pérdida de peso:** se midió el peso de las raíces de yucas marcadas a lo largo de las fechas de evaluación, utilizando una balanza granataria digital de la marca Ohaus-Adventurer modelo ARC120 (Parsippany, New Jersey, United States). Los resultados se presentaron en función del peso inicial como porcentaje de pérdida de peso.

$$Pérdida\ de\ peso\ (\%) = \frac{Peso\ inicial - Peso\ final}{Peso\ inicial} \times 100 \text{ (ecuación 1)}$$

b) **Severidad:** a partir de la escala creada en el primer ensayo, se categorizaron las yucas en los 7 niveles. Para realizar el análisis estadístico, se convirtió el grado de la escala a un índice de severidad, y a partir de este número, se realizó el análisis del área bajo la curva (ABC), en el cual está expresada esta variable.

c) **Incidencia:** se contabilizaron las raíces del total de individuos que presentaban síntomas de DFP en las distintas fechas de evaluación. Dicha variable se expresó en porcentaje, al dividir el número de yucas afectadas entre el número de total de yucas muestreadas y multiplicarse por 100.

d) **Tasa de respiración:** se colocaron dos raíces de yucas enteras por repetición en un recipiente hermético de volumen conocido. Se dejaron reposando dos horas y se midió el CO_2, utilizando el equipo denominado Gas Analyzer modelo F-960 de la marca Felix Instruments, Inc (Camas, Washington, United States).

e) **Concentración de fenoles totales:** se utilizó el método de Slinkard y Singleton (1977) con modificaciones para la determinación el método de Folin-Cicalteau. Se utilizó como solución extractora acetona al 50% v v^{-1} para extraer los fenoles de una muestra de 1 g de pulpa de yuca. Se midió en un lector de microplacas Biotek modelo Synergy™ HTX (Santa Clara, California, Estados Unidos) a una longitud de onda de 765 nm. La determinación de fenoles totales se realizó a partir de una curva de calibración de ácido gálico con concentraciones desde los 50 hasta los 400 µg ml^{-1} donde se midió la absorbancia

f) **Capacidad antioxidante:** se utilizó el método de Ou et al. (2001) con modificaciones. Como solución extractora se usó acetona al 50% v v^{-1}. Para la determinación, se utilizó fluoresceína y 2,2'-Azobis(2-metilpropionamidina) dihidrocloruro conocida como AAPH. La lectura se hizo en un lector de microplacas modelo Biotek Synergy™ HTX (Santa Clara, California, Estados Unidos), utilizando un filtro de excitación de 485 nm y un filtro de emisión de 530 nm. La capacidad antioxidante se expresó en equivalentes de Trolox (ET).

Diseño experimental

El diseño experimental fue irrestricto al azar en los dos ensayos. Como unidad experimental, se evaluó una caja de yuca de aproximadamente 25 kg, que contiene raíces seleccionadas lo más homogéneas en tamaño (máximo 40 cm de longitud) y buen estado sanitario. Se utilizaron cinco repeticiones por cada tratamiento para cada uno de los ensayos.

Las cajas se almacenaron en cámaras de enfriamiento en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa (variables dependiendo del ensayo) y se colocaron de manera que se minimizara cualquier efecto de posición. La asignación aleatoria de tratamientos se realizó al estibar las cajas en tarimas, asegurando que cada columna tuviera siempre una de las repeticiones de los diferentes tratamientos, pero colocadas en diferente posición.

Análisis estadístico

Previamente al análisis de varianza, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. La normalidad de los residuos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, mientras que la homogeneidad de varianzas se comprobó con la prueba de Levene.

Una vez cumplidos los supuestos del modelo, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para determinar el efecto de los tratamientos sobre cada una de las variables evaluadas. En los casos donde se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$), se aplicó una prueba de comparación de medias mediante el método de Tukey-HSD.

Los resultados se consideraron estadísticamente significativos cuando el valor de p fue menor a 0,05. Todos los análisis se efectuaron utilizando los paquetes base de R (R Core Team, 2022), bajo el entorno de desarrollo integrado Rstudio (Rstudio Team, 2020) empleando librerías específicas como car, agricolae y ggplot2 para visualización de datos.

Resultados

Desarrollo de la escala visual del estado de oxidación en tubérculos de yuca

En el primer ensayo, durante los primeros ocho días de almacenamiento en frío, no se observó ninguna sintomatología asociada al DFP. Sin embargo, al visualizarse bajo luz ultravioleta se pudo notar la acumulación de compuestos fluorescentes de forma diferente entre tratamientos (**Figura 1**). Se aprecia una distribución más localizada en los bordes al almacenarse a 10 °C y más generalizada con mayor concentración a 5 °C. No se observó fluorescencia a 15 °C. La mayor severidad de síntomas de pardeamiento se observó en los tratamientos de 5 y 10 °C, a los 22 días de estudio.

Visualmente, las yucas almacenadas a 10 °C se observaban más deterioradas que los demás tratamientos, además, se observó cómo el aumento en fluorescencia fue proporcional al de la sintomatología. Esta tendencia no se cumplió para el tratamiento de 15 °C, el cual no mostraba daños visibles y poca luminosidad bajo luz ultravioleta.

Mediante el análisis de la incidencia de DFP por fecha de evaluación (**Tabla 1**), se observó que esta afectación se presenta en una forma heterogénea. Los valores fluctúan en los días, por lo que no se ve un aumento constante del deterioro, ni se mantienen valores cercanos durante las distintas fechas de evaluación.

Posterior a la colocación de las muestras a temperatura ambiente (20 °C), se observó un notable incremento de DFP en días posteriores. A 15 °C no se presentaban síntomas antes de salir de la cámara y se llegó a tener hasta un 40% de incidencia **(Tabla 1)**. En las almacenadas a 5 °C, se aumentó dicho factor hasta un 80%, el más alto observado en la investigación. A 10 grados se hizo más uniforme y severa la aparición de síntomas, a diferencia de los primeros días de evaluación en cámara donde no se encontraban a diario muestras afectadas. Los mayores niveles de incidencia se encontraron en las yucas almacenadas a 5 °C, independientemente del estado de almacenamiento.

Propuesta de escala de evaluación para la severidad del deterioro fisiológico poscosecha

A partir de la documentación fotográfica realizada, se creó una escala para determinar la severidad del deterioro físico a nivel visual. Dicha escala constó de siete niveles: se asignó el valor 0 al menor deterioro atribuible a una yuca completamente sana; 1 que incluye yucas con daño menor o igual a un 10% de su totalidad; 2 que contiene yucas con hasta 20% de deterioro; 3 con máximo un 30%, y así sucesivamente. El nivel 6 es el de mayor afectación, indica un daño que se encuentra entre un 51 y 100% (**Figura 2**).

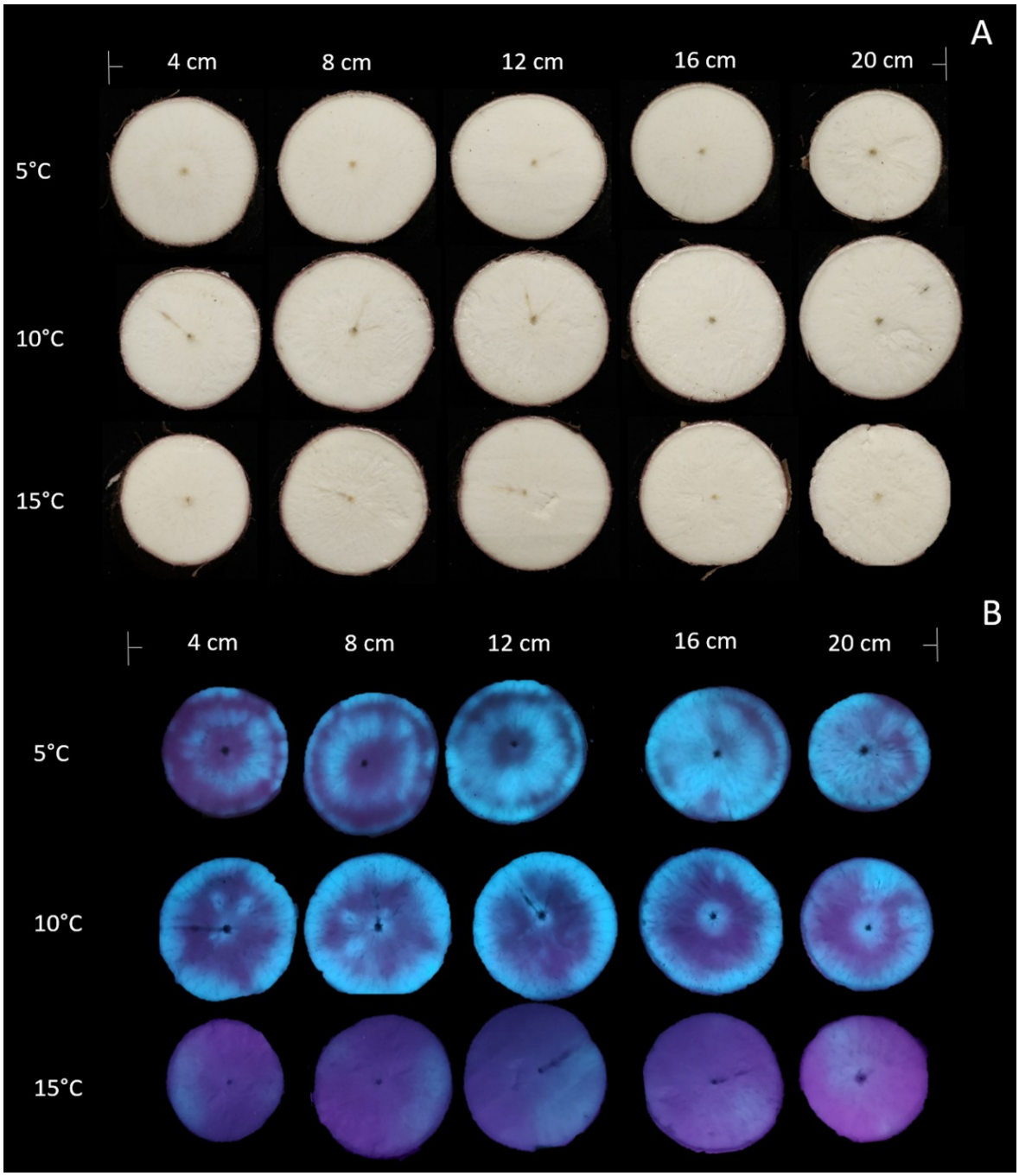


Figura 1. Fotografías de cortes transversales realizados cada 4 cm en yucas completas de la variedad Valencia (*Manihot esculenta* Crantz), almacenadas por ocho días a tres distintas temperaturas (5, 10 y 15 °C), expuestas a luz natural (A) y luz ultravioleta (B).

Figure 1. Photographs of cross-sections made every 4 cm in whole cassava roots of the Valencia variety (*Manihot esculenta* Crantz), stored for eight days at three different temperatures (5, 10, and 15 °C), exposed to natural light (A) and ultraviolet light (B).

Tabla 1. Incidencia (%) del deterioro fisiológico poscosecha (DFP) en raíces de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) de la variedad Valencia almacenadas durante 35 días, de los cuales 20 días son en almacenamiento en frío a tres temperaturas (5, 10 y 15 °C) y 15 días a temperatura ambiente 20 °C. (n = 5).

Table 1. Incidence (%) of postharvest physiological deterioration (PPD) in cassava roots (*Manihot esculenta* Crantz), Valencia variety) stored for 35 days, including 20 days in cold storage at three different temperatures (5, 10, and 15 °C), followed by 15 days at ambient temperature (20 °C). (n = 5).

Tratamiento (°C)	**Incidencia de DFP (%)**									
	Días en almacenamiento									
	Días en enfriamiento				Días a 20°C					
	4	**8**	**12**	**16**	**21**	**23**	**25**	**28**	**31**	**35**
5	0	20	40	40	80	60	80	60	40	80
10	20	0	40	0	40	60	60	40	40	40
15	0	0	0	0	0	40	20	20	0	0

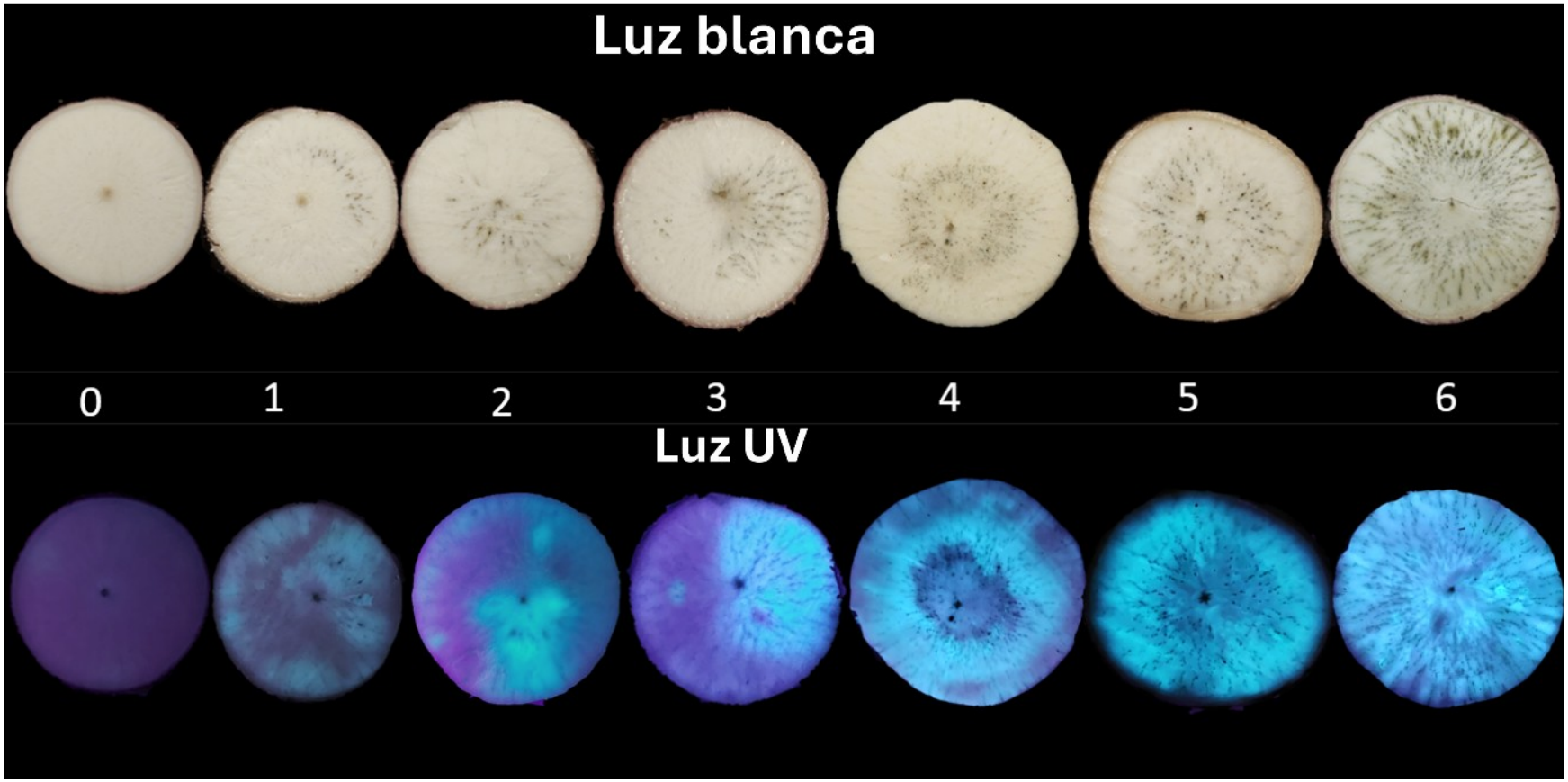


Figura 2. Propuesta de escala de evaluación para medir la severidad del deterioro fisiológico poscosecha en yuca (*Manihot esculenta* Crantz) de la variedad Valencia. Los números representan el grado de severidad siendo 0 una yuca sin síntomas y 6 el mayor grado de afectación con más de un 51% de daño.

Figure 2. Proposed evaluation scale for assessing the severity of postharvest physiological deterioration (PPD) in cassava (*Manihot esculenta* Crantz), Valencia. The numbers represent severity levels, where 0 indicates no visible symptoms and 6 corresponds to the highest level of deterioration, with more than 51% of the root surface affected.

Determinación de dosis para los tratamientos alternativos con antioxidantes y etanol

Se calculó el área bajo la curva (ABC) de la incidencia de DFP diferenciando los valores obtenidos en la simulación de envío (días de enfriamiento) y temperatura ambiente (**Tabla 2**). Los valores más bajos de ABC se presentaron en los días de almacenamiento en frío, excepto en las yucas del control absoluto y las tratadas con ácido cítrico al 1,5% y al 3% que de manera contraria presentaron las incidencias más elevadas del estudio. En días después de almacenamiento, se tuvo una tendencia muy estable en los 12 tratamientos y los dos controles (absoluto y parafina). Esta osciló entre las 460 y 550 unidades de área bajo la curva, la excepción fue el ácido cítrico al 1% con un ABC de 370 unidades.

En cuanto a la medición de área bajo la curva para la severidad (**Tabla 3**), se puede observar cómo, al igual que en la incidencia (**Tabla 2**), los valores más altos se expresaron al aumentar la temperatura. En las evaluaciones realizadas en enfriamiento, no se encontraron diferencias entre tratamientos y dosis, debido a que se obtuvieron severidades de DFP bajas.

En días a temperatura ambiente, se observa cómo la mayoría de los tratamientos tuvieron diferencias significativas con respecto al absoluto y fueron estadísticamente similares al control comercial, a excepción de metabisulfito 1000 y 1500 ppm, y ácido cítrico de 1,5% y 3%.

La incidencia de DFP obtenido en el segundo ensayo (**Tabla 4**) muestra que el almacenamiento a diferentes temperaturas generó comportamientos muy distintos, inclusive al compararse entre los mismos tratamientos. Los valores más altos se dieron en las yucas almacenadas a 5 °C, esto para todos los tratamientos. La mayor incidencia en todo el ensayo se presentó en yuca tratada con ácido cítrico almacenada a 5 °C; a 15 °C el valor más alto se obtuvo en el control absoluto. Por el contrario, la menor incidencia se presentó a 15 °C, pues se encontraron menos materiales afectados al aplicarse parafina y metabisulfito de sodio. La comparación entre incidencias es complicada, inclusive, si se realiza en las mismas temperaturas de almacenamiento, ya que no se observa un aumento gradual y hay fechas donde se comporta mejor un tratamiento que otro.

Tabla 2. Incidencia del deterioro fisiológico poscosecha medido en raíces de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) de la variedad Valencia tratadas con cuatro dosis de etanol, ácido cítrico y metabisulfito de sodio. Incidencia expresada en unidades de área bajo la curva (ABC). Las evaluaciones se dividen en días de enfriamiento (5 °C y cuatro fechas de evaluación) y días a temperatura ambiente (20 °C y dos fechas de evaluación) (n = 5).

Table 2. Incidence of postharvest physiological deterioration in cassava roots (*Manihot esculenta* Crantz, Valencia variety) treated with four concentrations of ethanol, citric acid, and sodium metabisulfite. Incidence is expressed as area under the curve (AUC) units. Evaluations are divided into cold storage days (5 °C across four assessment dates) and ambient temperature days (20 °C across two assessment dates) (n = 5).

Tratamiento	**Acumulado durante días de enfriamiento**	**Acumulado durante días a temperatura ambiente**
	Incidencia (Unidades de ABC)	
Control absoluto	800	550
Parafina	300	550
Ácido cítrico 0,5%	330	550
Ácido cítrico 1%	340	370
Ácido cítrico 1,5%	570	550
Ácido cítrico 3%	650	550
Etanol 25%	350	460
Etanol 50%	360	460
Etanol 70%	130	460
Etanol 90%	200	460
Metabisulfito de sodio 250 ppm	380	460
Metabisulfito de sodio 500 ppm	360	550
Metabisulfito de sodio 1000 ppm	320	550
Metabisulfito de sodio 1500 ppm	80	460

*ABC: Área bajo la curva.

Tabla 3. Severidad del deterioro fisiológico poscosecha medido en raíces de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) de la variedad Valencia, tratadas con cuatro dosis de etanol, ácido cítrico y metabisulfito de sodio. Severidad expresada en unidades de área bajo la curva (ABC). Las evaluaciones se dividen en días de enfriamiento (5 °C y cuatro fechas de evaluación) y días bajo condiciones de temperatura ambiente (20 °C y dos fechas de evaluación).

Table 3. Severity of postharvest physiological deterioration in cassava roots (*Manihot esculenta* Crantz, Valencia variety) treated with four concentrations of ethanol, citric acid, and sodium metabisulfite. Severity is expressed as area under the curve (AUC) units. Evaluations are divided into cold storage days (5 °C across four assessment dates) and ambient temperature days (20 °C across two assessment dates).

Tratamiento	**Acumulado durante días de enfriamiento**	**Acumulado durante días a temperatura ambiente**
	Severidad (Unidades de ABC)	
Control absoluto	148 ± 20 a†	375 ± 25 a†
Parafina	13 ± 13 a	92 ± 9 c
Ácido cítrico 0,5%	162 ± 83 a	193 ± 42 bc
Ácido cítrico 1%	80 ± 22 a	115 ± 46 bc
Ácido cítrico 1,5%	73 ± 46 a	225 ± 34 abc
Ácido cítrico 3%	72 ± 38 a	230 ± 31 abc
Etanol 25%	75 ± 32 a	165 ± 28 bc
Etanol 50%	60 ± 37 a	135 ± 29 bc
Etanol 70%	48 ± 31 a	183± 55 bc
Etanol 90%	87 ± 31 a	170 ± 49 bc
Metabisulfito de sodio 250 ppm	60 ± 16 a	138 ± 24 bc
Metabisulfito de sodio 500 ppm	118 ± 52 a	170 ± 28 bc
Metabisulfito de sodio 1000 ppm	50 ± 25 a	283 ± 40 ab
Metabisulfito de sodio 1500 ppm	147 ± 66 a	245 ± 43 abc

*ABC: Área bajo la curva.

†Promedio ± Error estándar. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas $p \leq 0,05$.

Tabla 4 . Porcentaje de incidencia del deterioro fisiológico poscosecha en raíces de yucas (*Manihot esculenta* Crantz), de la variedad Valencia, tratadas con distintas alternativas a la parafina, almacenadas por 31 días, donde por 20 días se encontraron a dos temperaturas (5 y 15 °C) y días posteriores a 20 °C.

Table 4. Incidence (%) of postharvest physiological deterioration in cassava roots (Valencia variety, *Manihot esculenta* Crantz) treated with alternative compounds to paraffin. Roots were stored for 31 days, including 20 days at two temperatures (5 and 15 °C), followed by storage at 20 °C.

Tratamiento	Incidencia (%)							
	Almacenamiento a 5 °C				Almacenamiento a 15 °C			
	6 DT*	22 DT	29 DT	31 DT	6 DT*	22 DT	29 DT	31 DT
Control absoluto	80	80	100	100	40	60	60	100
Parafina	40	60	100	60	20	80	20	20
Ácido cítrico 1%	100	60	100	100	40	40	60	80
Etanol 70%	40	20	100	80	20	40	40	40
Metabisulfito de sodio 250 ppm	40	60	80	100	40	0	80	20

*Evaluación en días en enfriamiento. DT= días después del tratamiento. $n = 5$.

El área bajo la curva del índice de severidad (**Tabla 5**) permitió comparar diferencias entre tratamientos y temperaturas de almacenamiento. En ambas temperaturas, se dieron diferencias significativas entre yucas tratadas: Parafina, Metabisulfito y Etanol tuvieron las menores severidades de DFP comparado con el absoluto, que fue el tratamiento que dio las unidades de ABC más altas en ambas temperaturas. Mismos tratamientos a diferente temperatura difirieron en cuanto a severidad y los valores más bajos se presentaron en materiales almacenados a 15 °C. El tratamiento con ácido cítrico fue el único que no fue diferente del control absoluto en ninguno de los casos.

Tabla 5. Severidad del deterioro fisiológico poscosecha medido en raíces de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) de la variedad Valencia por un mes, tratadas con distintas alternativas a la parafina, y almacenadas a dos temperaturas distintas (5 y 15 °C) por 20 días y a 20 °C en días posteriores.

Table 5. Severity of postharvest physiological deterioration in cassava roots (*Manihot esculenta* Crantz, Valencia variety) measured over one month. Roots were treated with various alternatives to paraffin and stored at two different temperatures (5 and 15 °C) for 20 days, followed by storage at 20 °C.

Tratamiento	**Severidad (unidades ABC)**	
	5 °C	**15 °C**
Control absoluto	803 ± 103 a	801 ± 299 a
Ácido cítrico 1%	605 ± 119 ab	552 ± 205 ab
Parafina	393 ± 55 bc	133 ± 53 c
Metabisulfito de sodio 250 ppm	346 ± 39 bc	123 ± 48 c
Etanol 70%	220 ± 90 c	230 ± 145 bc

*Promedio ± Error estándar (n = 5). Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas $p \leq 0,05$.

La pérdida de peso de las yucas (**Figura 3**) tuvo un crecimiento gradual para las muestras almacenadas en ambas temperaturas (5 y 15 °C) y se perdió un máximo de 4,5% del peso total en el mes de estudio. En las yucas almacenadas a 5 °C, todos los tratamientos presentaron una pérdida de peso similar sin diferencias significativas en las distintas fechas de evaluación, situación distinta a la presentada a 15 °C, donde si se presentaron diferencias siendo las parafinadas las que perdieron menor peso, seguido de las tratadas con etanol.

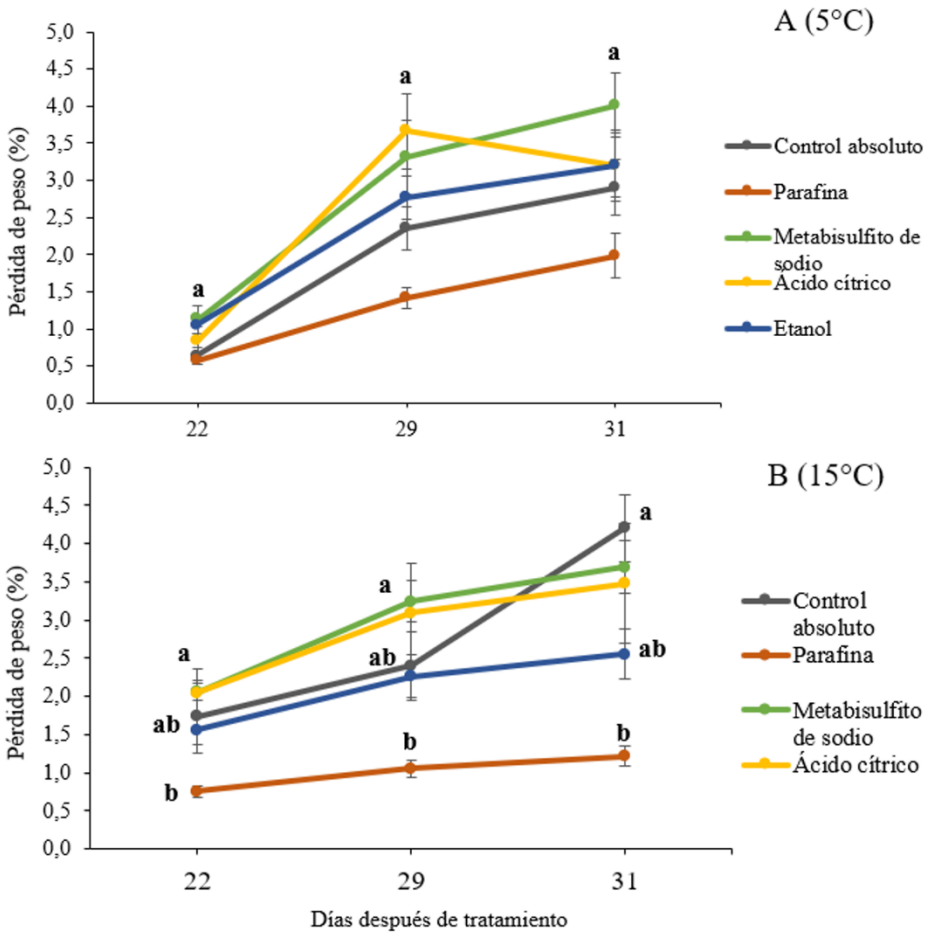


Figura 3. Pérdida de peso (%) de yucas (*Manihot esculenta* Crantz) de la variedad Valencia tratadas con etanol 70%, ácido cítrico 1%, metabisulfito de sodio 250 ppm, evaluadas por 31 días donde por 20 días se encontraron en temperaturas de enfriamiento (A = 5 °C y B = 15 °C) y los restantes a temperatura ambiente. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas $p \leq 0{,}05$ ($n = 5$).

Figure 3. Weight loss (%) of cassava roots (*Manihot esculenta* Crantz, Valencia variety) treated with 70% ethanol, 1% citric acid, and 250 ppm sodium metabisulfite. Evaluations were conducted over 31 days, with 20 days under cold storage conditions (A = 5 °C and B = 15 °C), followed by ambient temperature storage. Different letters within the same column indicate statistically significant differences at $p \leq 0.05$ ($n = 5$).

La tendencia de la tasa respiratoria de las raíces de yuca estudiadas (**Figura 4**) difirió mucho entre temperaturas de almacenamiento. A la temperatura de 5 °C en las primeras dos fechas de evaluación, la tasa se mantuvo en niveles bajos entre los 5 y 20 ml CO_2 kg^{-1} h^{-1}. Luego, creció abruptamente en la siguiente fecha de evaluación con valores máximos entre 60 y 90 ml CO_2 kg^{-1} h^{-1} y para la última evaluación los valores disminuyeron. Las yucas almacenadas a 15 °C tendieron a producir una tasa respiratoria más constante a lo largo de los días, entre los 5 y 40 ml CO_2 kg^{-1} h^{-1}. En ambos casos, las yucas tratadas con parafina fueron las de menor respiración.

Al estudiar la capacidad antioxidante de las yucas determinado mediante los equivalentes de Trolox, se observaron diferencias entre las yucas tratadas con diferentes temperaturas de almacenamiento y distintos tratamientos. A la temperatura de 5 °C (**Figura 5 A**) la capacidad antioxidante fue fluctuante; para la segunda fecha de evaluación, se observó un aumento comparado a la primera fecha (exceptuando el control absoluto). Posteriormente, disminuyó para la tercera evaluación y volvió a aumentar en la última, el etanol fue el único tratamiento que presentó un aumento progresivo con los días de evaluación. Los valores más altos se observaron en el tratamiento de metabisulfito de sodio, similar a lo ocurrido a 15 °C, donde la mayor capacidad antioxidante se dio en metabisulfito de sodio y etanol. En las almacenadas a 15 °C (**Figura 5 B**), se observó que dos tratamientos, metabisulfito y parafina, presentaron una disminución gradual en el tiempo. Los demás tratamientos se comportaron fluctuantes como lo observado en el caso de la temperatura de almacenamiento a de 5 °C; sin embargo, no con valores de disminución y aumento tan extremos.

La concentración de fenoles totales tuvo un comportamiento similar entre tratamientos en ambas temperaturas de almacenamiento (**Figura 6**). Esta variable se caracterizó por tener una disminución gradual en el tiempo, más representativa en la **Figura 6 B**. Los valores más bajos correspondieron al control absoluto mientras que los más altos, en la fecha inicial y final, se dieron con el tratamiento de metabisulfito de sodio. La principal diferencia entre tratamientos se dio al compararse con el control absoluto, que tuvo la concentración de fenoles más baja en todas las fechas de evaluación.

La **Figura 7** permite observar cómo se encontraban algunas yucas a los 29 y 31 días después de aplicarse los tratamientos. En estas, se pueden observar daños relacionados a patógenos (no identificados), con sintomatologías como coloraciones pardas - cafés, con pudrición visible y daños irregulares no asociados al DFP. En cuanto a las diferencias entre temperaturas de almacenamiento en frío, a 5 °C se pudo observar mayor afectación que a 15 °C en todos los tratamientos.

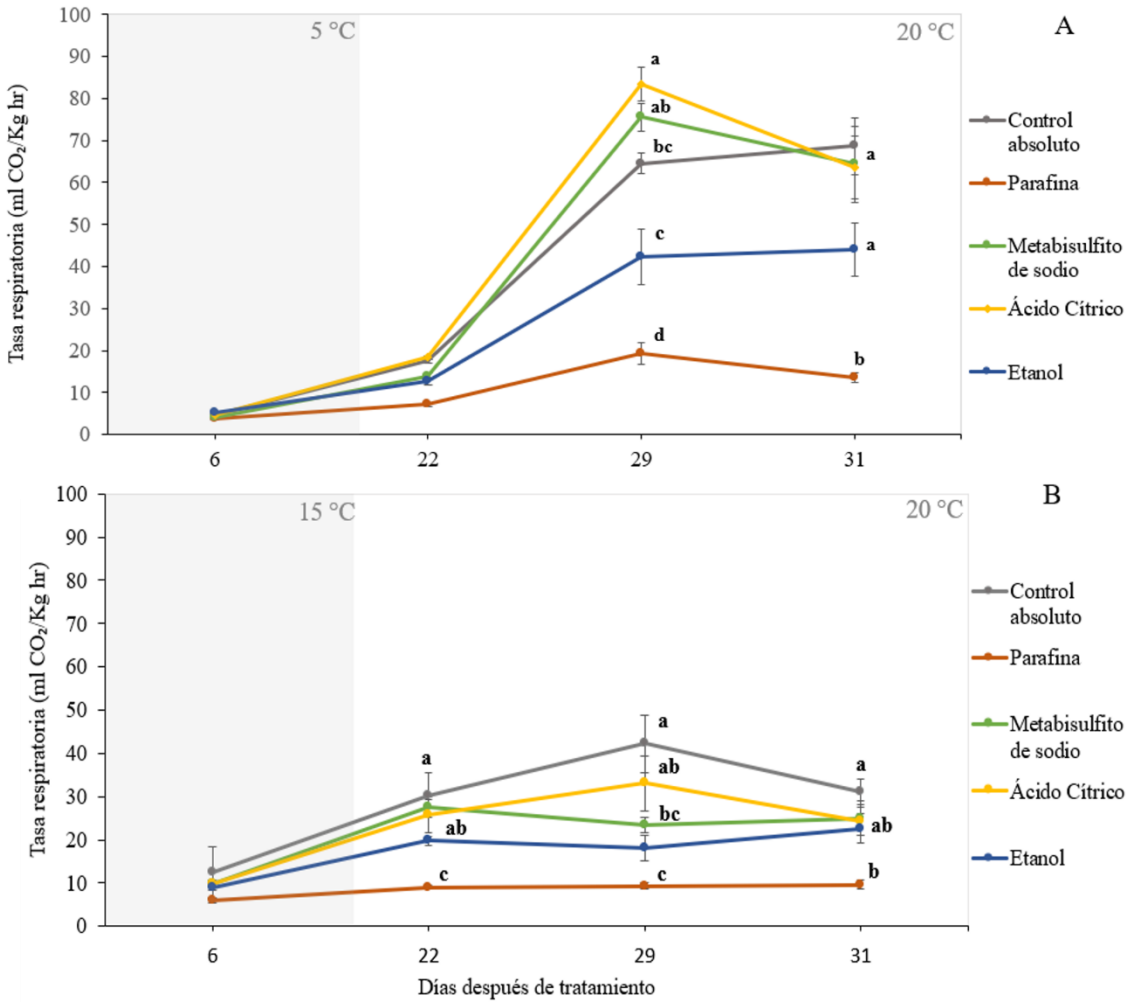


Figura 4. Tasa respiratoria (ml CO_2 kg^{-1} h^{-1}) de yucas (*Manihot esculenta* Crantz) de la variedad Valencia tratadas con etanol 70%, ácido cítrico 1% y metabisulfito de sodio 250 ppm, evaluadas por 31 días, donde por 20 días se encontraron en temperaturas de enfriamiento (A = 5 °C y B = 15 °C) y los restantes a temperatura ambiente (20 °C). Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas $p \leq 0{,}05$ ($n = 5$).

Figure 4. Respiration rate (ml CO_2 kg^{-1} h^{-1}) of cassava roots (*Manihot esculenta* Crantz, Valencia variety) treated with 70% ethanol, 1% citric acid, and 250 ppm sodium metabisulfite. Samples were evaluated over 31 days, including 20 days under cold storage (A = 5 °C and B = 15 °C), followed by storage at ambient temperature (20 °C). Different letters within the same column indicate statistically significant differences at $p \leq 0.05$ ($n = 5$).

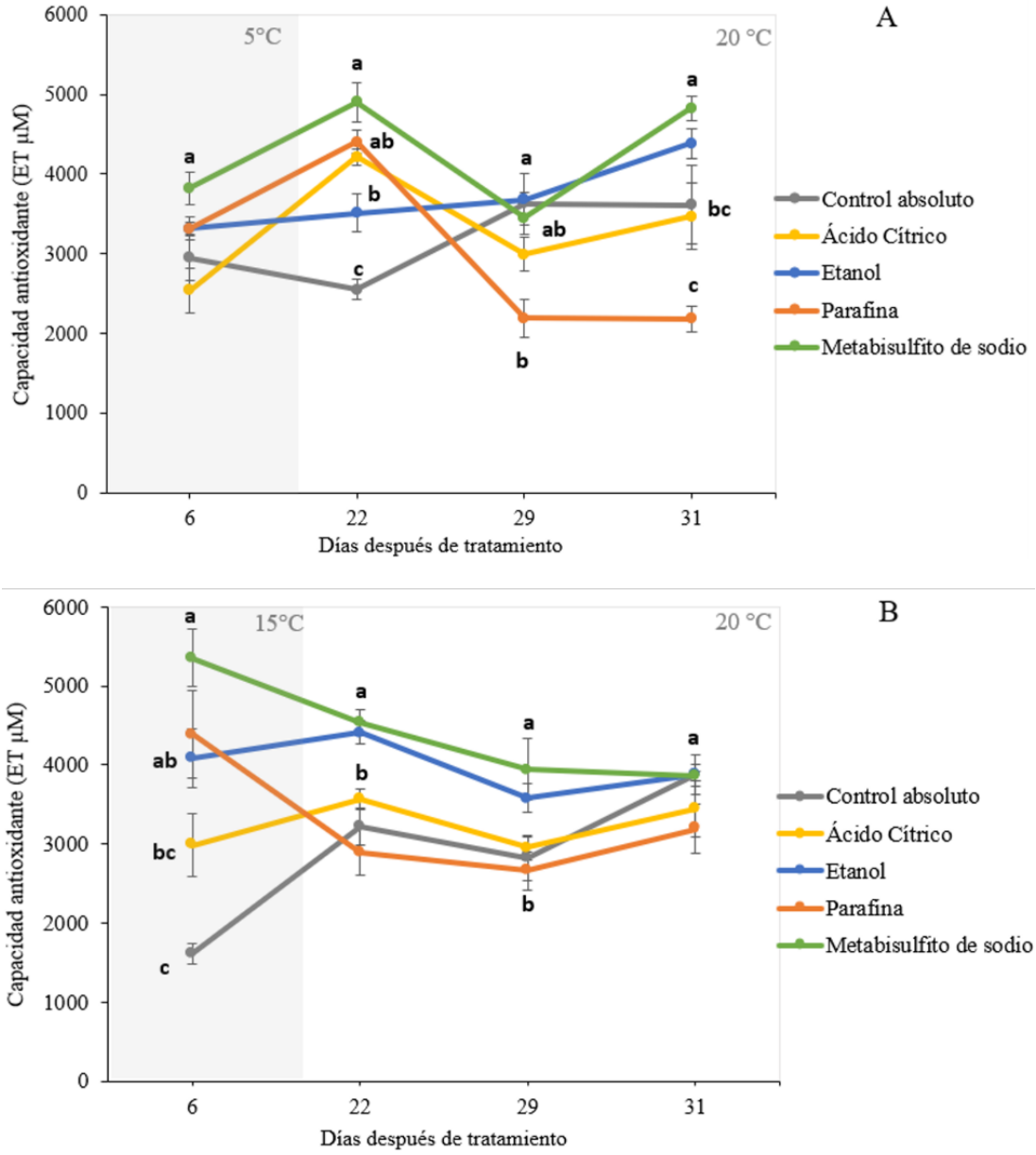


Figura 5. Capacidad antioxidante presentada como Equivalentes de Trolox (ET) en unidades de µm, de muestras de pulpa de yucas (*Manihot esculenta* Crantz) de la variedad Valencia tratadas con etanol 70%, ácido cítrico 1%, metabisulfito de sodio 250 ppm, evaluadas por 31 días; 20 días a temperaturas de enfriamiento (A = 5 °C y B = 15 °C) y las fechas restantes a temperatura ambiente de 20 °C. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas $p \leq 0{,}05$ ($n = 5$).

Figure 5. Antioxidant capacity, expressed as Trolox equivalents (TE) in µM units, in cassava pulp samples (*Manihot esculenta* Crantz, Valencia variety) treated with 70% ethanol, 1% citric acid, and 250 ppm sodium metabisulfite. Roots were evaluated over 31 days: 20 days under cold storage (A = 5 °C and B = 15 °C), followed by ambient temperature (20 °C). Different letters within the same column indicate statistically significant differences at $p \leq 0.05$ ($n = 5$).

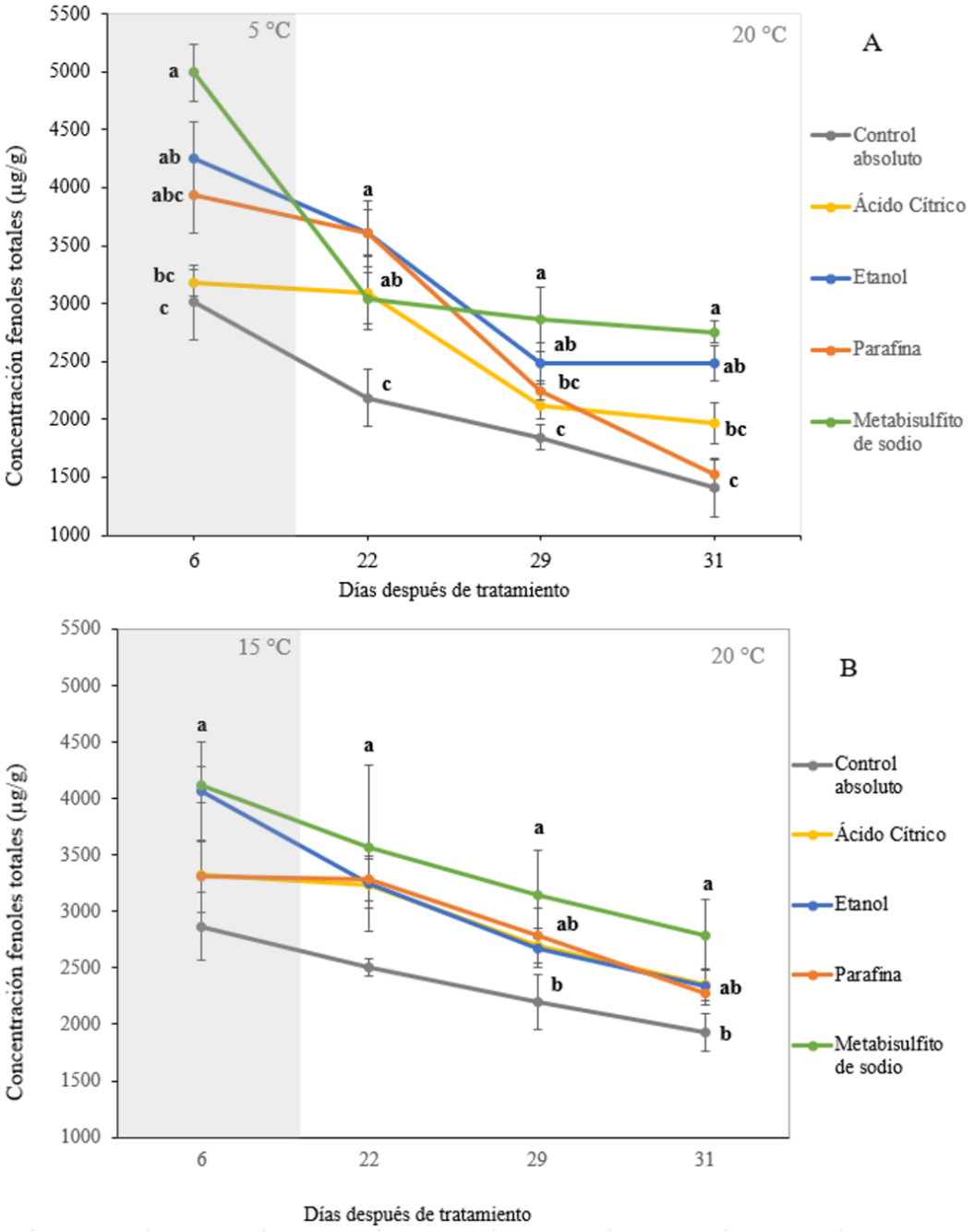


Figura 6. Concentración de fenoles totales de muestras de yucas (*Manihot esculenta* Crantz) de la variedad Valencia tratadas con etanol 70%, ácido cítrico 1%, metabisulfito de sodio 250 ppm y evaluadas por 31 días donde por 20 días se encontraron en temperaturas de enfriamiento (A = 5 °C y B = 15 °C) y las fechas restantes a temperatura ambiente. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas $p \leq 0{,}05$ ($n = 5$).

Figure 6. Total phenolic content in cassava root samples (*Manihot esculenta* Crantz, Valencia variety) treated with 70% ethanol, 1% citric acid, and 250 ppm sodium metabisulfite. Roots were evaluated over 31 days, including 20 days under cold storage (A = 5 °C and B = 15 °C) and the remaining days at ambient temperature. Different letters within the same column indicate statistically significant differences at $p \leq 0.05$ ($n = 5$).

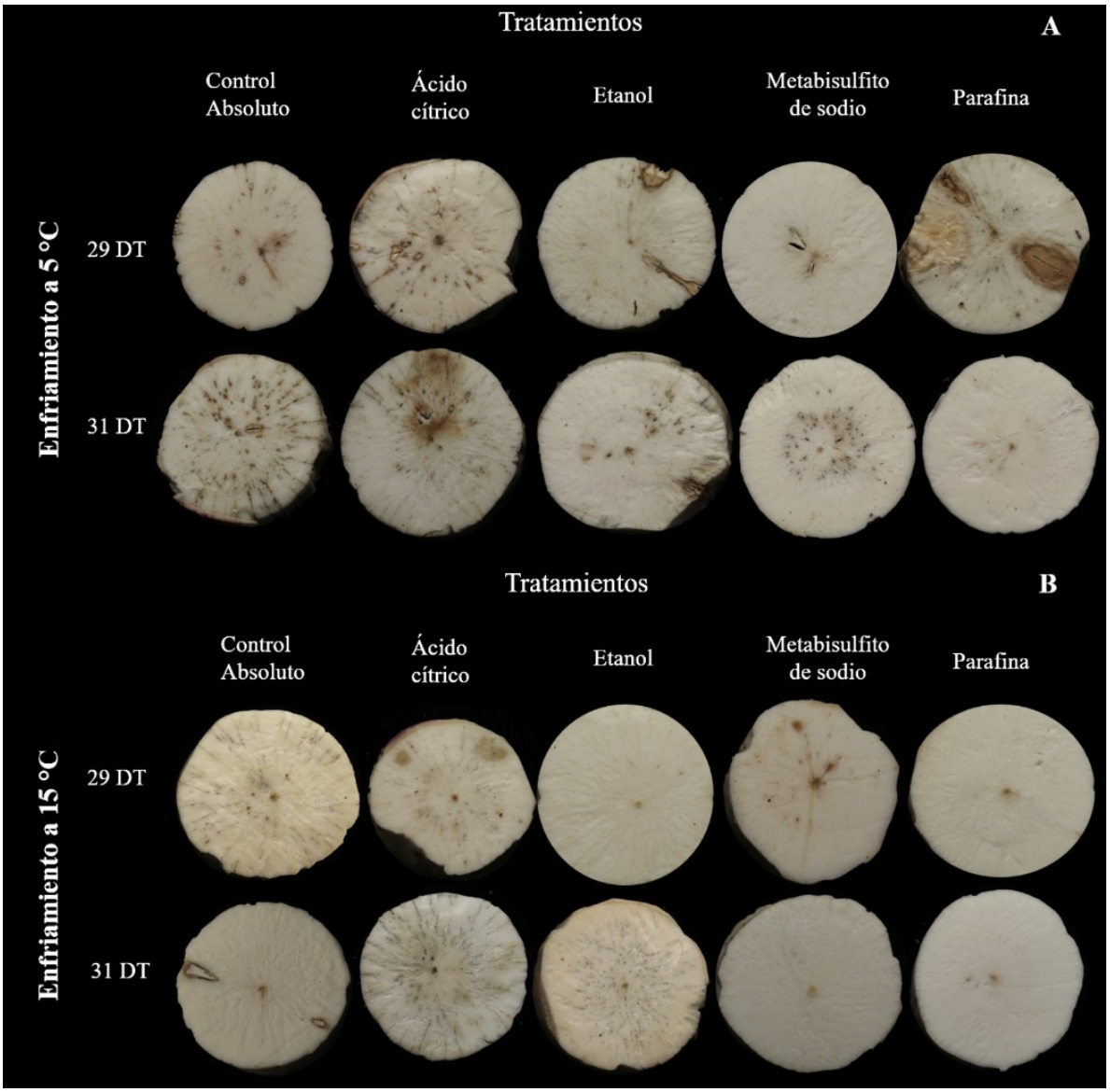


Figura 7. Fotografías del estado sanitario de cortes transversales de los primero 4 cm de raíces de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) tratadas con etanol 70%, ácido cítrico 1%, metabisulfito de sodio 250 ppm, evaluadas a los días 29 y 31 después de tratamiento (DT) y posterior a almacenarse los primeros 20 días a 5 (A) y 15 °C (B). Tomadas en el laboratorio de Tecnología Poscosecha (CIA, UCR) en setiembre del 2023.

Figure 7. Photographic record of the sanitary condition of transverse sections from the first 4 cm of cassava roots (*Manihot esculenta* Crantz) treated with 70% ethanol, 1% citric acid, and 250 ppm sodium metabisulfite, taken on days 29 and 31 after treatment. Roots were stored for 20 days under cold conditions at 5 °C (A) and 15 °C (B), followed by ambient temperature. Images were taken at the Postharvest Technology Laboratory (CIA, University of Costa Rica) in September 2023.

Discusión

Estados de oxidación en tubérculos de yuca: factores asociados y detección

La documentación fotográfica realizada en el primer ensayo se elaboró bajo dos iluminaciones distintas, luz natural y ultravioleta. Las imágenes tomadas bajo ultravioleta tenían como finalidad demostrar la acumulación de compuestos fluorescentes. En ese sentido, la fluorescencia en yuca es ocasionada por la acumulación de metabolitos secundarios que poseen esta característica. La escopoletina es el compuesto al que se le atribuye esta propiedad, ya que se produce en mayor cantidad y ha sido el más estudiado. Este se encuentra a bajas concentraciones en raíces recién cosechadas y aumenta en grandes cantidades 24 horas después de recolectarse (Liu et al., 2017).

Si bien no se conoce con exactitud su función en la raíz, este compuesto tiene una alta capacidad antibacterial por lo que una de las hipótesis es que se sintetiza con el fin de evitar la colonización de patógenos, como respuesta a las heridas causadas por la cosecha (Gnonlonfin et al., 2012). Como se observó en las **Figuras 1 y 2**, el aumento de fluorescencia está estrechamente ligado al progreso del daño por DFP en las distintas fechas de evaluación, ya que indica mayor acumulación de escopoletina que es indispensable para que se dé la oxidación y su sintomatología. Prueba de esto es que raíces resistentes al DFP no acumulan grandes concentraciones de escopoletina como si lo hacen las susceptibles (Rosero, 2008).

Al analizar los resultados del primer ensayo se pudo observar cómo el desarrollo de los síntomas de oxidación relacionados al DFP se manifestaron de diferentes formas en las yucas de la variedad Valencia al ser almacenadas en temperaturas de 5, 10 y 15 °C. Esta situación evidencia la importancia de utilizar una adecuada temperatura a la hora de almacenar este producto, con el fin de controlar el desarrollo de DFP.

Suelen recomendarse temperaturas frías entre los 0 y 5 °C para el transporte y reserva de la yuca. Sin embargo, la mayoría de los estudios que sustentan esta práctica toman en cuenta la aplicación previa de parafina (INTA, 2017). El parafinado proporciona una capa protectora que puede minimizar el impacto de bajas temperaturas. Sin embargo, en el caso de esta investigación no se utilizó ninguna cobertura y se presentaron los mayores daños por oxidación a nivel poscosecha en la temperatura más baja (5 °C). Esta situación podría evidenciar que dichas temperaturas son funcionales para productos tratados con parafina o algún tipo de producto que aísle a las yucas del frío directo (Barona, 2015).

Según los resultados observados, la utilización de temperaturas cercanas a 15 °C puede ser una opción viable para reducir el desarrollo del DFP. Al ser un daño fisiológico, la heterogeneidad en la incidencia encontrada en los diferentes días de evaluación es un comportamiento esperable (**Tabla 1)**. Si bien los materiales vegetales utilizados provienen de la misma finca, factores como la forma de la yuca, el estado nutricional y sanitario de la planta en campo, las características del suelo, el manejo a la hora de cosechar y la forma de transporte de la raíz, son factores que juegan un papel importante a la hora de la expresión de síntomas (Pedreschi & Lurie, 2015). Por esto, es común que este tipo de enfermedades abióticas no se desarrollen en una forma semejante en las repeticiones.

Si bien es esperable mucha heterogeneidad en el estudio de la incidencia de DFP a lo largo de la investigación, las yucas del primer ensayo presentaron valores contrastantes al compararse con otros ensayos. La incidencia de DFP más baja reportada en la presente investigación fue observada en las yucas del primer ensayo almacenadas a 15 °C (**Tabla 1**), aun cuando estas se compararon con yucas parafinadas y aplicadas con los demás tratamientos estudiados. Se llegó a un máximo de 40% de incidencia de DFP y se presentó únicamente en tres de las 10 fechas de evaluación. Si bien la calidad de estas yucas era superior, las condiciones edafoclimáticas jugaron un papel importante en el desarrollo de síntomas. En Costa Rica, la mayor afectación de DFP se da durante las épocas lluviosas, en zonas donde los suelos son mayormente arcillosos y no se han preparado de manera correcta (Fonseca & Saborío, 2001). Por lo tanto, es esperable que las yucas del control absoluto del ensayo 1 presenten menores incidencias, ya que, si bien venían de zonas similares a los otros ensayos, fueron cosechadas en época seca a inicios de marzo, influenciado por un déficit de lluvia generalizado presentado a inicios del 2022 (Chinchilla et al., 2022).

La propuesta de escala para medir la severidad del DFP (**Figura 2**), es una gran herramienta para el estudio de esta afectación, ya que presenta de forma resumida y gráfica, cómo se da la sintomatología en una de las variedades de mayor producción en Costa Rica como es el caso de Valencia (INTA, 2017). Esta escala llega hasta un nivel 6, ya que la mayoría de las yucas no presentaron una severidad mayor al 60% del área total. A su vez, por la forma en que se presentan las lesiones punteadas, es difícil distinguir entre afectaciones que se encuentren entre un 60 y 80 % y no se encontró en este ensayo ninguna yuca que llegara a presentar valores cercanos a 90 o 100% de afectación.

Alternativas para el control del deterioro fisiológico postcosecha (DFP) en yuca

Al analizar la incidencia y la severidad de DFP mediante el área bajo la curva (**Tablas 2 y 3**), se escogieron las dosis a utilizar de ácido cítrico, metabisulfito de sodio y etanol, que corresponden a 1%, 250 ppm y 70%, respectivamente. Estas se seleccionaron debido a que tuvieron valores más bajos que el control absoluto, por lo que se cree que hubo un efecto de dichas aplicaciones en yuca sobre el desarrollo de DFP, y a su vez, se tomó en cuenta que dichas dosis representaran la menor cantidad de producto que causara un efecto sobre el DFP.

La temperatura en la cual se almacenaron las yucas (posterior a la cosecha) influyó en el desempeño de los tratamientos aplicados, siendo situaciones menos favorables para las raíces que se encontraban a 5 °C considerando la aparición de DFP. La disminución de temperatura es una de las técnicas poscosecha más utilizadas para la conservación de la calidad de productos frescos y la prolongación del tiempo de comercialización. La refrigeración de dichos materiales permite que se ralentice la senescencia al disminuir el metabolismo en general, la producción o sensibilidad al etileno, la pérdida de peso y la tasa respiratoria (Inestroza-Lizardo et al., 2016).

De forma general, a una mayor tasa respiratoria de los productos frescos, menor es la potencial vida útil. En el segundo ensayo, se puede observar cómo a 5 °C la respiración se encontró cercana a los 5 ml CO_2 kg^{-1} h^{-1} (**Figura 4**), considerada en productos tropicales como la yuca un ritmo de respiración bajo (Arias & Toledo, 2000). Si bien la baja temperatura en el periodo de almacenamiento brinda una ventaja al ralentizar el proceso de descomposición de los materiales vegetales y en el caso de la yuca la aparición de daños por DFP, la mayoría de los productos tropicales son susceptibles a sufrir alteraciones fisiológicas a causa de la exposición a bajas temperaturas (Li et al., 2022). En estudios sobre almacenamiento en frío de yuca, se reportaron daños por frío en temperaturas entre los 8 y 5 °C. A estas temperaturas se observó la deformación de células y distorsión de la pared celular, afectando a su vez la fluidez de la membrana celular donde se cree que reside la principal adaptación al frío (Odoch et al., 2021). Como consecuencia a la adversidad del ambiente, el estrés por temperaturas bajas produce en las yucas la acumulación de radicales libres y disminución de la actividad enzimática, siendo las más afectadas la superóxido-dismutasa (SOD) y las peroxidasas clase III que se correlacionan con la producción de prolina y malondialdehído (Luo & Huang, 2012).

La actividad enzimática se ve afectada por factores externos como el pH, la calidad del sustrato en el que se encuentran y la temperatura, siendo sensible al frío; al exponer enzimas a bajas temperaturas, no se inhibe completamente su acción, pero sí disminuye su capacidad catalizadora (Eissa & Ibrahim, 2018). En el caso de la yuca, enzimas importantes por ser partícipes en el desarrollo del DFP son la Fenilalanina amonio liasa (PAL), la Polifenol oxidasa (PFO) y otras peroxidasas. En estudios realizados en hojas de albahaca, al ser almacenadas a 5 °C, la actividad de PFO y peroxidasas disminuyó en casi un 40% al compararse con hojas almacenadas a 20 °C (López et al., 2014).

En el caso de la PAL en investigaciones realizadas en plantas de clavel, la temperatura óptima a la cual se da mejor la actividad fue entre los 35 y 40 °C. Al exponer dicha enzima a 20 °C, se disminuyó un 10% de su actividad y en temperaturas cercanas a 0 °C se disminuyó un 80% de su capacidad (Ardila et al., 2017). Dicha disminución puede ser la causante de que se observen valores más bajos de incidencia de DFP en yucas almacenadas en frío (**Tabla 4**), sin embargo, esta situación es solo momentánea.

Las alteraciones por bajas temperaturas a nivel interno se expresan rápidamente, sin embargo, la aparición de síntomas se puede dar hasta días después (dependiendo del material) o al regresar a una temperatura más cálida, cuando se reactiva el metabolismo y la actividad enzimática (López, 2003). En el caso de la severidad del DFP se expresó únicamente un acumulado del área bajo la curva, sin embargo, también se pudo observar mayores niveles a 5 °C al compararse con el almacenamiento a 15 °C. El posible daño por frío generado al realizar la simulación de envío a 5 °C pudo haber afectado la interacción con los tratamientos aplicados, pero de igual manera, en el Ensayo 2, se observó cómo las yucas tratadas con etanol controlaron de mejor manera la aparición de daños causados por DFP.

Las yucas tratadas con Etanol presentaron una tasa respiratoria mejor a la mayoría de los tratamientos (**Figura 4**), menor incidencia y severidad de DFP (**Tablas 4 y 5**), además de una alta concentración fenólica (**Figura 6**). Este comportamiento se puede relacionar con los resultados obtenidos en otras investigaciones, donde se utilizó etanol en productos frescos. Estudios realizados en melón, al realizarse la inmersión en etanol al 6% junto con melatonina, mostraron la reducción de daños por frío, disminuyó la acumulación de malondialdehído y se promovió la síntesis de fenoles y flavonoides (Lin et al., 2020).

En aplicaciones poscosecha con etanol 50% en rodajas de yuca de la variedad SC5, proveniente de China, se determinó que el etanol exógeno podía mitigar los síntomas del DFP, ya que se encontró que las yucas tratadas presentaron menores niveles de ROS (en especial de peróxido de hidrógeno). Además, se menciona que el etanol ayudó a que se diera una mejor actividad enzimática en catalasas, peroxidasas y superóxido dismutasa (Liu et al., 2019). Estas interacciones del etanol con enzimas, concentración fenólica y acumulación de compuestos pueden ayudar a comprender mejor porqué se da un alto desempeño en las yucas tratadas con etanol, aun en condiciones con predisposición a presentar daños por frío.

En contraste, las yucas en la simulación de envío a 15 °C no presentaron un aparente daño por frío y con respecto a las variables de respuesta se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos. En el caso del segundo ensayo, fue el metabisulfito de sodio el que mejor se desempeñó. El metabisulfito de sodio es conocido en la industria alimentaria por su función conservante en productos procesados y su acción antioxidante (Le Ha et al., 2011). En productos frescos, se ha utilizado por su eficacia al prevenir el pardeamiento. Si bien este mecanismo en sulfitos no se ha descrito, dentro de las posibles razones por las cuales este compuesto es efectivo están: su capacidad de inhibir la acción de la polifenol oxidasa, interactuar con intermediarios claves en la formación de pigmentos y tener una amplia capacidad reductora que permite donar electrones a radicales libres de oxígeno generando que se estabilicen o neutralicen (Morante et al., 2014). El efecto inhibitorio de la polifenol-oxidasa depende del sustrato y del ambiente en que se aplique este producto, sin embargo, se ha observado su eficiencia en productos frescos como fresa, manzana, piña, mamey y tubérculos como el yacón (Palma, 2010).

La eficacia en el control del pardeamiento del metabisulfito de sodio fue comprobada en el segundo ensayo, donde la incidencia y severidad del DFP fueron las menores, de igual manera que la parafina que es el control comercial (**Tablas 4 y 5**). Estos resultados se pueden relacionar con la acción estabilizadora de radicales libres. En adición, las yucas tratadas con metabisulfito se caracterizaron por tener los valores de capacidad antioxidante y la concentración de fenoles totales más altos del estudio (**Figuras 5 y 6**).

Cabe resaltar que la concentración de fenoles totales en yuca suele clasificarse como muy baja (menor a las 1000 µg de ácido gálico g^{-1} de muestra), considerando estudios realizados a distintas verduras y hortalizas, mientras que los valores reportados en este ensayo en el control absoluto presentaron concentraciones desde los 3000 µg g^{-1} en la evaluación inicial. En el caso de las tratadas con metabisulfito de sodio, las concentraciones rondaron entre los 5000 y 3000 µg g^{-1}, siendo clasificadas como un contenido fenólico intermedio comparable con productos como la papa o el pepino que se encuentran cercanos a los 4000 µg g^{-1}; esto para muestras tomadas en Colombia utilizando muestras liofilizadas para su análisis (Zapata et al., 2014).

Una de las situaciones a destacar al estudiar el efecto de la aplicación de antioxidantes poscosecha es la poca o nula acción antioxidante que tuvo el ácido cítrico. Esto por cuanto se obtuvieron valores muy altos de incidencia y severidad, similares a los obtenidos en el control absoluto, además del valor más alto de respiración. El ácido cítrico ha sido descrito como un efectivo tratamiento para inhibir el oscurecimiento enzimático; sin embargo, en aplicaciones con yucas el manejo fue distinto, ya que se conservaron en refrigeración y se eliminó la cáscara antes de ser tratadas, condiciones muy distintas a las presentadas en este estudio (Campos, 2014).

El deterioro poscosecha de la yuca suele dividirse en dos fases: deterioro primario, que corresponde al fisiológico, y secundario, que se asocia al daño causado por la presencia de microorganismos como hongos y bacterias. Este se caracteriza por generar en las yucas una textura más suave, color crema o pardo localizado y en ocasiones un olor ácido (Fonseca & Saborío, 2001). En la **Figura 7**, se observa la forma en que se presentó este deterioro secundario en el segundo ensayo y cómo los tratamientos aplicados no fueron eficientes para su control. Si bien, el estudio de daños por patógenos no fue parte de los objetivos del trabajo, es una forma en la cual se puede observar otra de las maneras en que el daño por frío afectó a las yucas almacenadas a 5 °C, ya que las más dañadas fueron las que estuvieron a bajas temperaturas; además, cómo no se puede basar únicamente la elección de un tratamiento tomando en cuenta una sola problemática. La recomendación debe ser integral, ya que, si se decide el uso, por ejemplo, de metabisulfito para el control del DFP, se debe de tomar en cuenta que las yucas siguen siendo susceptibles a otros daños.

Implicaciones del presente estudio en el manejo poscosecha de la yuca

Los resultados obtenidos en este estudio aportan información valiosa para la comprensión del deterioro fisiológico poscosecha (DFP) en yuca, y permiten identificar factores críticos que afectan su vida útil, tales como la temperatura de almacenamiento y la aplicación de tratamientos exógenos con potencial antioxidante.

La temperatura de almacenamiento poscosecha en yuca es uno de los factores que influyó directamente en la aparición del DFP y en la vida útil de las yucas estudiadas. Caracterizar mejor el daño por frío en yuca, tomando en cuenta, por ejemplo, cómo varía la actividad enzimática (enzimas como PAL, PFO y/o peroxidasas) y cuáles vías metabólicas están involucradas en este proceso en diferentes temperaturas ayudaría a comprender mejor los mecanismos implicados en este tipo de deterioro, que han sido poco documentado en estudios poscosecha de yuca.

La aparición de deterioro secundario (de origen patogénico) observado en las fases finales del almacenamiento refuerza la necesidad plantearse un manejo poscosecha más integral al tratar el DFP. Estudiar estrategias de control dual que combinen los tratamientos más eficaces contra el DFP (etanol o metabisulfito de sodio) con fungicidas compatibles y aceptados en mercados externos podría contribuir a reducir simultáneamente el deterioro fisiológico y microbiano.

Finalmente, si bien este estudio se enfocó en la medición de variables fisicoquímicas y fisiológicas, el sabor de las yucas es un aspecto esencial para su comercialización. Si se desean adoptar alguno de los tratamientos propuestos, es esencial evaluarse si tratamientos como el metabisulfito de sodio, conocido por modificar el sabor en alimentos procesados, tienen algún efecto negativo sobre las características organolépticas de la yuca fresca.

Conclusiones

El presente estudio demostró que el uso de etanol al 70% y el metabisulfito de sodio a 250 ppm representan una alternativa eficaz y sostenible al parafinado convencional para la mitigación del deterioro fisiológico poscosecha (DFP) en raíces de yuca de la variedad Valencia. Estos tratamientos redujeron significativamente la incidencia y severidad del DFP, sin comprometer la calidad visual ni las propiedades fisicoquímicas de las raíces.

En adición, se evidenció que la temperatura de almacenamiento influye en el desarrollo del deterioro, siendo 15 °C más favorable que 5 °C para conservar la integridad del producto. La escala visual propuesta permite una evaluación práctica y objetiva del DFP, lo que facilita su uso en contextos comerciales y de investigación.

Los resultados obtenidos respaldan la viabilidad del uso de compuestos generalmente reconocidos como seguros (GRAS) como herramientas sostenibles para extender la vida útil de la yuca fresca destinada a mercados de exportación.

Agradecimientos

Un especial agradecimiento a la empresa B&C Exportadores por la donación de la yuca para el desarrollo de la presente investigación.

Literatura citada

Arias, C. J., & Toledo, J. (2000). *Manual de manejo postcosecha de frutas tropicales (papaya, piña, plátano, cítricos)*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). http://www.fao.org/3/a-ac304s.pdf

Ardila, H., Baquero, B., & Martínez, S. (2017). Inducción de la actividad de la enzima fenilalanina amonio liasa en clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) por elicitores del hongo *Fusarium oxysporum f.* sp. Dianthi raza 2. *Revista Colombiana de Química, 36*(2), 151-167. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042007000200002

Barona, S. (2015). *Tecnologías para la parafinación y el encerado de raíces frescas de yuca*. Corporación CLAYUCA. https://fundacion.compas.com.co/Portals/0/Documentos/Parafinaci%C3%B3n%20y%20encerado%20de%20ra%C3%ADces%20de%20yuca.pdf

Barquero, M. (2021, 9 de junio). Puerto español rechaza productos de Costa Rica por cera usada en cáscara. *La Nación*. https://www.nacion.com/economia/agro/puerto-espanol-rechaza-productos-de-costa-rica-por/QMN47PN5ZBHJTNH2XGBHKSLXOE/story/

Bravo, E. (2007). *Impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad*. Acción Ecológica. https://www.inredh.org/archivos/documentos_ambiental/impactos_explotacion_petrolera_esp.pdf

Campos, T. B. (2014). *Efecto del ácido cítrico en la inhibición del oscurecimiento enzimático de la yuca blanca (Manihot esculenta* Crantz*) mínimamente procesada, envasada y almacenada en refrigeración* [Tesis licenciatura, Universidad Nacional Intercultural de la Amazonia]. Repositorio UNIA. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNIA_4c8fb2c46a935849f0ab9388e1396f03/Details

Chinchilla, G., Suárez, M., & Hernández, K. (2022). *Boletín meteorológico mensual (febrero)*. Instituto Meteorológico Nacional.

Eissa, H. A., & Ibrahim, W. A. (2018). Kinetics of phenylalanine and tyrosine ammonia-lyase enzymes activity of banana fruit (*Musa cavendishii* L., cv. Enana). *Middle East Journal of Applied Sciences, 8*(2), 680-689. https://www.curresweb.com/mejas/mejas/2018/680-689.pdf

Estrada, F. (2013). *Yuca - Región Huetar Norte & Atlántica*. PRESICA. http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/01/00521-inventariotecnilogiasyucafeb2014.pdf

Fonseca, J. M., & Saborío, D. (2001). *Tecnologías postcosecha de yuca fresca parafinada (Manihot esculenta* Crantz*) para exportación en Costa Rica*. Imprenta Nacional. https://www.researchgate.net/publication/304082459_TECNOLOGIA_POST_COSECHA_DE_YUCA_FRESCA_PARAFINADA_Manihot_esculenta_Crantz_PARA_EXPORTA

Food and Agriculture Organization (FAO). (2017). *Perspectivas alimentarias: resúmenes de mercado*. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/66add3c9-087e-4f7a-81c0-f922e480bfbf/content

Gnonlonfin, G. J. B., Sanni, A., & Brimer, L. (2012). Scopoletin – a coumarin phytoalexin with medicinal properties. *Critical Reviews in Plant Sciences, 31*(1), 47-56. https://doi.org/10.1080/07352689.2011.616039

Inestroza-Lizardo, C., Voigt, V., Muniz, A. C., & Gomez-Gomez, H. (2016). Métodos de enfriamiento aplicables a frutas y hortalizas enteras y mínimamente procesadas. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 17*(2), 149-161. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81349041003

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2017). *Cultivo de yuca (Manihot esculenta* Crantz*)*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. https://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/2018/Manual_cultivo_yuca_INTA_min_edited.pdf

Le Ha, H. A. I., Uthaibutra, J., & Joomwong, A. (2011). The prevention of pericarp browning and the maintenance of post-harvest quality in Vietnamese longan cv. Long, using sodium metabisulfite treatment. *International Journal of Agriculture & Biology, 13*(4), 565-570. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20113241034

Li, S., Zhao, P., Yu, X., Liao, W., & Peng, M. (2022). Cell signaling during drought and/or cold stress in cassava. *Tropical Plants, 1*, 6. https://doi.org/10.48130/TP-2022-0006

Lin, X., Wang, L., Hou, Y., Zheng, Y., & Jin, P. A. (2020). Combination of melatonin and ethanol treatment improves postharvest quality in bitter melon fruit. *Foods, 9*, 1376. https://doi.org/10.3390/foods9101376

Liu, G., Li, B., Wang, Y., Wei, B., He, C., Liu, D., & Shi, H. (2019). Novel role of ethanol in delaying postharvest physiological deterioration and keeping quality in cassava. *Food and Bioprocess Technology, 12*, 1756-1765. https://doi.org/10.1007/s11947-019-02330-x

Liu, S., Zainuddin, I. M., Vanderschuren, H., Doughty, J., & Beeching, J. R. (2017). RNAi inhibition of feruloyl CoA 6′-hydroxylase reduces scopoletin biosynthesis and post-harvest physiological deterioration in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) storage roots. *Plant Molecular Biology, 94*, 185-195. https://doi.org/10.1007/s11103-017-0602-z

López, E., Martínez, M. T., Colinas, M. T., Bautista, C., Martínez, J., & Rodríguez, J. E. (2014). Actividad antioxidante y enzimática de albahaca Nufar (*Ocimum basilicum* L.) almacenada en refrigeración. *Agronomía Mesoamericana, 25*(2), 256-265. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212014000200004

López, N. (2003). *Influencia de la concentración enzimática inicial en la cinética de desactivación térmica de peroxidasa comercial* [Tesis licenciatura, Universidad Austral de Chile]. http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2003/fal864i/doc/fal864i.pdf

Luo, X., & Huang, Q. (2012). Studies on the cold resistance of cassava. *Journal of Agricultural Science, 4*(6). https://doi.org/10.5539/jas.v4n6p104

Medina, S., García, L. M., Vélez, C., Alcalá, L. A., & Fernández Quintero, A. (2013). Estudio comparativo de conservación de raíces de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) recubiertas con cera natural y parafina. *Informador Técnico, 77*(1), 17-12. https://doi.org/10.23850/22565035.40

Morante Carriel, J., Obrebska, A., Nieto Rodríguez, J. E., Carranza Patiño, M. S., Pico-Saltos, R., & Bru-Martínez, R. (2014). Distribución, localización e inhibidores de las polifenol oxidasas en frutos y vegetales usados como alimento. *Ciencia y Tecnología, 7*(1), 23-31. https://doi.org/10.18779/cyt.v7i1.135

Odoch, M., Buys, E. M., & Taylor, J. R. (2021). Effects of vacuum packaging storage of minimally processed cassava roots at various temperatures on microflora, tissue structure, starch extraction by wet milling and granule quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 101*(15), 6347-6354. https://doi.org/10.1002/jsfa.11305

Ou, B., Hampsch-Woodill, M., & Prior, R. L. (2001). Development and validation of an improved oxygen radical absorbance capacity assay using fluorescein as the fluorescent probe. *Journal of Agriculture and Food Chemistry, 49*(10), 4619-4626. https://doi.org/10.1021/jf010586o

Palma, G. (2010). *Caracterización de la polifenol oxidasa del mamey (Pouteria sapota) y control del oscurecimiento enzimático* [Tesis doctorado, Instituto Politécnico Nacional]. http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/10625

Parmar, A., Sturm, B., & Hensel, O. (2017). Crops that feed the world: Production and improvement of cassava for food, feed, and industrial uses. *Food Security, 9*(5), 907-927. https://doi.org/10.1007/s12571-017-0717-8

Pedreschi, R., & Lurie, S. (2015). Advances and current challenges in understanding postharvest abiotic stresses in perishables. *Postharvest Biology and Technology, 107*, 77-89. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.05.004

Posada, C. (2018, 26 de marzo). Productos orgánicos cobran mayor interés en mercados internacionales. *La Cámara*. https://apps.camaralima.org.pe/repositorioaps/0/0/par/posada_820/posada_820_final_productos%20org%C3%A1nicos%20cobran%20mayor%20inter%C3%A9s%20en%20mercados%20internacionales.pdf

Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica (PROCOMER). (2022). Costa Rica: exportaciones de producto. https://www.procomer.com/exportador/documentos/anuario-estadistico-2020

R Core Team. (2022). R: A language and environment for statistical computing. https://www.R-project.org/

Rahmawati, R. S., Sukma, D., Ardie, S. W., & Sudarsono, S. (2021). Postharvest physiological deterioration in cassava: Potential problems, inhibition, and resistant level identification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 694*(1), 2-9. https://doi.org/10.1088/1755-1315/694/1/012035

Rosero, E. A. (2008). *Avances en la introgresión asistida por marcadores moleculares de la resistencia al deterioro fisiológico postcosecha (DFP) desde Manihot walkerae Croizat E. en poblaciones de yuca M. esculenta* Crantz [Tesis maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2445

Saravanan, R., Ravi, V., Thajudhin, S., & George, J. (2016). Post-harvest physiological deterioration of cassava (*Manihot esculenta*) – A review. *Indian Journal of Agricultural Sciences, 86*(11), 11-18. https://doi.org/10.56093/ijas.v86i11.62869

Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA). (2019). *Boletín estadístico agropecuario (29)*.

Slinkard, K., & Singleton, V. L. (1977). Total phenol analysis: Automation and comparison with manual methods. *American Journal of Enology and Viticulture, 28*, 49-55.

Uarrota, V. G., Nunes, E. C., Peruch, L. A. M., Neubert, E. O., Coelho, B., Moresco, R., García, M., Sánchez, T., Luna, J. L., Dufour, D., Ceballos, H., López, L. A., Hershey, C., Rocha, M., & Maraschin, M. (2015). Toward better understanding of postharvest deterioration: biochemical changes in stored cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Food Science & Nutrition, 4*(3), 409-422. https://doi.org/10.1002/fsn3.303

Uchechukwu-Agua, A., Caleb, O., & Opara, U. (2015). Postharvest handling and storage of fresh cassava root and products: A review. *Food and Bioprocess Technology, 8*(4). https://doi.org/10.1007/s11947-015-1478-z

Zainuddin, I. M., Fathoni, A., Sudarmonowati, E., Beeching, JR., Gruissem, W., & Vanderschuren, H. (2017). Cassava post-harvest physiological deterioration: From triggers to symptoms. *Postharvest Biology and Technology, 142*, 115-123. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.09.004

Zapata, S., Piedrahita, A. M., & Rojano, B. (2014). Capacidad atrapadora de radicales oxígeno (ORAC) y fenoles totales de frutas y hortalizas de Colombia. *Perspectivas en Nutrición Humana, 16*(1), 25-36.

Agronomía Costarricense, Universidad de Costa Rica.
Se encuentra licenciada con Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.
Para mayor información escribir a rac.cia@ucr.ac.cr