

Compuestos bioactivos en tres tipos de *Capsicum annuum* L. durante el procesamiento y almacenamiento

Bioactive compounds in three types of *Capsicum annuum* L. during processing and storage

Mercedes Georgina Ramírez-Aragon¹ , Jessica Lizbeth Coria-Arellano¹ , Elizabeth Macías Cortés¹ , Edgar Miguel García-Carrillo² , José Luis García-Hernández^{3*} 

¹Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Av. Tecnológico N° 1555-Km. 14.5, Colonia Plácido Domingo, CP. 35150. Lerdo, Durango, México.

²Centro de Investigaciones en Química Aplicada CIQA, Enrique Reyna H. 140, San José de los Cerritos, CP. 25294. Saltillo, Coahuila, México.

³Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. Domicilio Conocido Ejido Venecia, municipio de Gómez Palacio, Durango, México.

*Autor de correspondencia: luis_garher@ujed.mx

Artículo científico

Recibido: 23 de febrero 2026

Aceptado: 15 de agosto 2026

RESUMEN. El género *Capsicum*, particularmente *Capsicum annuum* L., representa un cultivo de alto valor nutraceutico debido a su contenido de capsaicinoides, compuestos fenólicos, flavonoides, ácido ascórbico y actividad antioxidante. Sin embargo, el procesamiento y almacenamiento pueden modificar significativamente la estabilidad de estos compuestos bioactivos. El objetivo fue evaluar los cambios en capsaicina, ácido ascórbico, compuestos fenólicos totales, flavonoides totales y actividad antioxidante del radical ABTS (2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)), en tres variedades de Chile *C. annuum* (de árbol, serrano y jalapeño), evaluadas en fresco y procesadas durante cinco días consecutivos. Las determinaciones se realizaron en triplicado y el análisis estadístico se efectuó mediante un diseño factorial con medidas repetidas. En muestras frescas, el Chile de árbol presentó los valores más altos de capsaicina (3 584.2 mg 100 g⁻¹ peso fresco), ácido ascórbico (1 025.0 mg 100 g⁻¹), actividad antioxidante (35 028.6 µmol equivalentes de Trolox 100 g⁻¹), fenólicos totales (65.282 mg equivalentes de ácido gálico g⁻¹) y flavonoides totales (118.963 mg equivalentes de quercetina g⁻¹). En salsa, se observó una reducción significativa en todas las variables. La capsaicina disminuyó hasta 173.8 mg 100 g⁻¹ y el ácido ascórbico hasta 187.5 mg 100 g⁻¹ al día cinco. A pesar del descenso, la jerarquía varietal se mantuvo, con árbol > serrano > jalapeño en la mayoría de las variables. Se concluye que el procesamiento reduce la concentración absoluta de compuestos bioactivos, pero conserva el patrón varietal, destacando al Chile de árbol como la variedad con mayor potencial funcional.

Palabras clave: Actividad antioxidante, capsaicina, Chile, compuestos fenólicos, procesamiento poscosecha, almacenamiento.

ABSTRACT. The genus *Capsicum*, particularly *Capsicum annuum* L., is recognized for its high nutraceutical value due to its content of capsaicinoids, phenolic compounds, flavonoids, ascorbic acid, and antioxidant capacity. However, processing and storage may significantly affect the stability of these bioactive compounds. The aim of this study was to evaluate changes in capsaicin, vitamin C, total phenolic compounds, total flavonoids, and antioxidant activity radical ABTS (measured using the 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)) in three chili pepper *C. annuum* varieties (de árbol, serrano, and jalapeño) in fresh form and processed as sauce over five consecutive days. All determinations were performed in triplicate, and statistical analysis followed a factorial design with repeated measures. In fresh samples, árbol chili showed the highest values of capsaicin (3 584.2 mg 100 g⁻¹ fresh weight), vitamin C (1 025.0 mg 100 g⁻¹), antioxidant activity (35 028.6 µmol Trolox equivalents 100 g⁻¹), total phenolics (65.282 mg gallic acid equivalents g⁻¹), and total flavonoids (118.963 mg quercetin equivalents g⁻¹). In sauce samples, a significant reduction was observed in all variables. Capsaicin decreased to 173.8 mg 100 g⁻¹ and vitamin C to 187.5 mg 100 g⁻¹ by day five. Despite this decline, the varietal hierarchy remained consistent, with árbol > serrano > jalapeño for most measured variables. It is concluded that processing reduces the absolute concentration of bioactive compounds, but preserves the varietal pattern, highlighting árbol chili as the variety with the highest functional potential.

Keywords: Antioxidant activity, capsaicin, chili pepper, phenolic compounds, processing, storage.

Como citar: Ramírez-Aragon MG, Coria-Arellano JL, Macías Cortés E, García-Carrillo EM, García-Hernández JL (2026) Compuestos bioactivos en tres tipos de *Capsicum annuum* L. durante el procesamiento y almacenamiento. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. VI: e5120. DOI: 10.19136/era.a13nVI.5120.

INTRODUCCIÓN

El género *Capsicum* constituye uno de los cultivos hortícolas de mayor relevancia económica y nutracéutica a nivel mundial por su valor gastronómico y por su riqueza en metabolitos secundarios bioactivos con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas. Dentro de las especies cultivadas, *Capsicum annuum* L. es la más distribuida y existen variedades con perfiles fitoquímicos diversos, como el chile de árbol, serrano y jalapeño, los cuales se caracterizan por diferencias en pungencia, contenido fenólico y capacidad antioxidante (Tripodi y Kumar 2019, Liu *et al.* 2023). La diversidad genética de este fruto explica la amplia variabilidad en la acumulación de compuestos como capsaicinoides, flavonoides y ácido ascórbico. Estas variables se encuentran reguladas por factores genotípicos y ambientales (Yang *et al.* 2024).

Desde el punto de vista bioquímico, los frutos de chile son una fuente significativa de capsaicinoides, principalmente capsaicina y dihidrocapsaicina. Estos compuestos son responsables de la pungencia y han sido ampliamente estudiados por sus efectos biológicos en la modulación del estrés oxidativo y procesos inflamatorios (Barbero *et al.* 2014). El contenido de capsaicina presente en chile no permanece constante y puede presentar diferencias debido al cultivar y al tiempo de almacenamiento. Estas variaciones están relacionadas con las características propias de la matriz y con las condiciones de manejo después de ser cosechado (Iqbal *et al.* 2015, Cheng *et al.* 2023). Debido a ello, las variedades de chile con mayor pungencia presentan concentraciones iniciales superiores; sin embargo, dependiendo de los procesos y las condiciones a los que sean sometidos los frutos, pueden presentar pérdidas marcadas después del tiempo de almacenamiento.

Los capsaicinoides no son los únicos compuestos de interés presentes en el chile. Estos frutos también son una fuente importante de compuestos fenólicos y flavonoides, entre los que se pueden mencionar la quercetina, luteolina y algunos derivados del ácido ferúlico, estos compuestos contribuyen a la capacidad antioxidante de *Capsicum annuum* (Chávez-Mendoza *et al.* 2015, Lahbib *et al.* 2023). La concentración de compuestos puede variar de acuerdo con la madurez del fruto, las condiciones de desarrollo del cultivo, el almacenamiento y el procesamiento posterior (Jang *et al.* 2024, Papathanasiou *et al.* 2021). El efecto de la variedad es un factor que también influye, ya que se han encontrado diferencias considerables en el contenido fenólico total entre distintas variedades de chile, lo que representa la participación de factores genéticos y metabólicos propios de cada cultivar (Sun *et al.* 2007).

Otro componente relevante de *C. annuum* es el ácido ascórbico. Esta vitamina está presente en concentraciones elevadas en chile fresco, por ello es considerada una fuente importante de este micronutriente. Además de su importancia nutricional, participa en los mecanismos de protección frente a especies reactivas de oxígeno y contribuye a la regeneración de otros antioxidantes presentes en los tejidos vegetales (Hand *et al.* 2021, Bicikliski *et al.* 2018). Su estabilidad es baja frente a distintos factores. La oxidación, el incremento de la temperatura y la exposición a la luz provocan su degradación, situación que puede presentarse cuando el tejido vegetal es triturado y posteriormente almacenado (Barba *et al.* 2017, Gubsky *et al.* 2019).

La actividad antioxidante es una respuesta de los diferentes compuestos con capacidad reductora presentes en el fruto. Cuando esta actividad se determina mediante métodos como ABTS, generalmente se encuentra relacionada con las concentraciones de fenoles y flavonoides, tanto en chile fresco como después de su procesamiento (Medina-Juárez *et al.* 2012, Lahbib *et al.* 2023). El efecto del procesamiento no ocurre de la misma manera para todos los componentes. Mientras algunos compuestos termolábiles pueden disminuir, la ruptura de las estructuras celulares puede facilitar la liberación de ciertos compuestos fenólicos que se encontraban asociados con la matriz, lo cual provoca cambios en la actividad antioxidante cuantificada (Guo *et al.* 2024). Durante el almacenamiento, en cambio, puede observarse una pérdida gradual de esta capacidad, principalmente como consecuencia de procesos oxidativos y reacciones de degradación enzimática (Zamljen *et al.* 2025).

El procesamiento del chile en productos triturados o en forma de salsa es común tanto a nivel industrial como doméstico. Por ello, resulta de interés establecer en qué medida este procesamiento modifica los metabolitos secundarios presentes originalmente en el fruto. La molienda provoca la ruptura del tejido y aumenta el contacto de sus componentes. La exposición de la muestra al oxígeno acelerar las reacciones oxidativas y afectar a moléculas como el ácido ascórbico y la capsaicina (Barba *et al.* 2017, Guo *et al.* 2024). Cuando el producto se encuentra en un medio acuoso, pueden presentarse cambios en la distribución y solubilidad de los compuestos fenólicos. Después de la trituración podrían observarse perfiles más similares entre variedades que los parámetros encontrados inicialmente en los frutos frescos (Minatel *et al.* 2017).

La presencia de estos compuestos después del procesamiento también es relevante desde el punto de vista nutracéutico, debido a que parte del potencial funcional atribuido al chile depende de la presencia y concentración de sus metabolitos bioactivos. Aunque el procesamiento ocasione pérdidas de algunos compuestos, se ha observado que las diferencias entre variedades pueden mantenerse, de manera que aquellos cultivares con mayores concentraciones reportadas en fresco continúan destacando después de ser procesados (Medina-Juárez *et al.* 2012, Iqbal *et al.* 2015). Este comportamiento permite considerar al genotipo como uno de los factores determinantes en la síntesis y acumulación de metabolitos secundarios.

De manera general, los antecedentes muestran que la composición fitoquímica de *Capsicum annuum* depende de varios factores que actúan de manera conjunta, entre ellos el genotipo, el estado fisiológico del fruto y las condiciones posteriores a la cosecha. En consecuencia, comparar el fruto fresco, el fruto procesado y los cambios que ocurren durante el almacenamiento permite conocer con mayor precisión la estabilidad de los capsaicinoides, el ácido ascórbico y los compuestos fenólicos. Este tipo de evaluación permite identificar cuáles variedades de chile conservan mejor sus componentes bioactivos después del procesamiento. Por esta razón, el análisis simultáneo de diferentes grupos de fitoquímicos, variedades y tiempos de almacenamiento constituye una herramienta útil para establecer condiciones de procesamiento que permitan reducir sus pérdidas y conservar el valor funcional de los productos derivados del chile.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El trabajo experimental se llevó a cabo en los laboratorios del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL), ubicado en Lerdo, Durango, México. Para cada tratamiento y día de evaluación, las determinaciones correspondientes se realizaron por triplicado.

Material biológico, adquisición de muestras y diseño de muestreo

Para realizar el estudio se utilizaron frutos frescos de tres variedades comerciales de Chile (*Capsicum annuum*): de árbol, serrano y jalapeño, adquiridos en un supermercado de la localidad. Se seleccionaron frutos maduros, de apariencia uniforme y sin daños visibles. Antes de iniciar, los frutos de Chile se revisaron individualmente para eliminar aquellos frutos que presentaran algún daño mecánico y, posteriormente, las muestras se homogenizaron de acuerdo con la variedad correspondiente.

Cada variedad se estudió bajo dos formas de presentación: fruto fresco y producto procesado, este último preparado a partir de los mismos frutos. Ambas presentaciones se analizaron durante un periodo de cinco días consecutivos (Día 1-Día 5), con la finalidad de observar los cambios en los compuestos bioactivos y en la capacidad antioxidante a lo largo del tiempo de almacenamiento.

Elaboración de homogeneizados de Chile (sistema acuoso)

Las muestras se prepararon utilizando únicamente agua destilada como fase líquida, con el propósito de evaluar el comportamiento de los compuestos fitoquímicos en un sistema acuoso simplificado, sin la posible interferencia de ácidos, sales, aceites u otros ingredientes comúnmente empleados en la elaboración de salsas (Natividad-Torres *et al.* 2021, Zamljen *et al.* 2025). Los frutos de cada variedad se seleccionaron procurando uniformidad en su estado de madurez y ausencia de daños visibles; posteriormente, se lavaron con agua corriente y se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio de acuerdo con las disposiciones establecidas en la NOM-251-SSA1-2009. Después de la desinfección, se retiró el exceso de humedad superficial y se utilizaron 20 g de fruto, los cuales se mezclaron con 100 mL de agua destilada, manteniendo una relación Chile: agua equivalente a 20%, p/v. La mezcla se homogeneizó en una licuadora (Oster®) durante 2 min, a una velocidad de 1 2000 rpm, hasta obtener un homogeneizado acuoso de Chile. La temperatura de la mezcla inmediatamente después de la homogeneización se mantuvo entre 28 ± 1 °C y su pH inicial se encontró entre 5.5 y 6.0, determinado mediante un potenciómetro previamente calibrado. Posteriormente, el homogeneizado se distribuyó en frascos ámbar estériles de 50 mL y se almacenó en refrigeración a 5 °C durante cinco días. Las muestras se analizaron diariamente durante este periodo para determinar los cambios en las distintas variables medidas, manteniendo las mismas condiciones de almacenamiento entre cada periodo de análisis.

Preparación de extractos por maceración (muestras frescas y homogeneizados de Chile)

Para la obtención de extractos destinados a compuestos fenólicos totales, flavonoides totales y capacidad antioxidante (ABTS), se empleó extracción por maceración con etanol, por ser un disolvente ampliamente usado para recuperar compuestos fenólicos y fracciones antioxidantes en muestras de *Capsicum*. Para comenzar la extracción, se pesó una alícuota representativa de cada

muestra (fresco o salsa) y se adicionó etanol (grado analítico $\geq 99.5\%$; Merck®) a una relación sólido:solvente (1:10) apropiada para asegurar inmersión completa. La maceración se realizó en frascos ámbar, protegidos de la luz, con agitación intermitente; posteriormente, después de 72 h los extractos se clarificaron por centrifugación (Thermo Scientific®) y el sobrenadante se recuperó para las determinaciones espectrofotométricas (Rehman *et al.* 2024, Alghamdi *et al.* 2025).

Compuestos fenólicos totales

El contenido de compuestos fenólicos totales se determinó mediante el método colorimétrico de Folin–Ciocalteu. Se mezclaron 0.5 mL del extracto con 2.5 mL de reactivo Folin–Ciocalteu diluido 1:10 y, tras 5 min de reacción, se adicionaron 2.0 mL de carbonato de sodio al 7.5% (p/v). La mezcla se incubó durante 30 min en oscuridad a temperatura ambiente y la absorbancia se registró a 765 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys UV-1800®). Se construyó una curva de calibración con ácido gálico (Sigma-Aldrich®) en el rango de 0–200 $\mu\text{g mL}^{-1}$ ($R^2 \geq 0.99$) y los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (EAG) por gramo de muestra (Dominguez-López *et al.* 2024).

Flavonoides totales

Los flavonoides totales se cuantificaron mediante el método del cloruro de aluminio. Se mezclaron 0.5 mL de extracto con 0.1 mL de AlCl_3 al 10%, 0.1 mL de acetato de potasio 1 M y 2.8 mL de agua destilada. Tras incubación durante 30 min a 25 °C, la absorbancia se midió a 415 nm. La cuantificación se realizó mediante curva patrón de quercetina (Sigma-Aldrich®) en el rango 0–100 $\mu\text{g mL}^{-1}$ ($R^2 \geq 0.99$), expresándose los resultados como mg equivalentes de quercetina (EQ) por gramo de muestra (Shraim *et al.* 2021, Alghamdi *et al.* 2025).

Capacidad antioxidante (ABTS)

La actividad antioxidante se evaluó mediante el ensayo del radical ABTS^{•+}. El radical se generó mediante reacción de 7 mM ABTS (ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)) con 2.45 mM de persulfato de potasio durante 16 h en oscuridad a temperatura ambiente (Cano *et al.* 2023). La solución se diluyó con etanol hasta alcanzar una absorbancia de 0.70 ± 0.02 a 734 nm. Posteriormente, se mezclaron 100 μL de extracto con 3.0 mL de la solución radical y se midió la disminución de absorbancia a 734 nm después de 6 min de reacción. Se empleó Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-carboxílico) como estándar en un rango de 0–500 μM ($R^2 \geq 0.995$), expresándose los resultados como μmol equivalentes de Trolox por 100 g de muestra.

Capsaicina

La cuantificación de capsaicina se realizó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC-UV). Se pesó 1.0 g de muestra homogenizada y se extrajo con 10 mL de metanol grado HPLC mediante agitación durante 30 min y posterior sonicación por 15 min. El extracto se centrifugó a 6000 rpm durante 10 min y se filtró por membrana de 0.45 μm antes de su inyección. El análisis se efectuó en un sistema HPLC Agilent 1260 Infinity® equipado con detector UV, utilizando una columna C18 (250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μm), fase móvil acetonitrilo:agua acidificada con 0.1% ácido acético (60:40, v/v), flujo de 1.0 mL min^{-1} , temperatura de columna de 30 °C y volumen de inyección de 20 μL (Naseem *et al.* 2024). La detección se realizó a 280 nm y la cuantificación

mediante curva de calibración externa con estándar de capsaicina (99% pureza) en el rango de 1-200 $\mu\text{g mL}^{-1}$ ($R^2 \geq 0.998$), expresándose los resultados como mg capsaicina 100 g^{-1} de muestra.

Ácido ascórbico

El ácido ascórbico se determinó igualmente por HPLC-UV. Se pesaron 2.0 g de muestra y se homogenizaron con 10 mL de ácido metafosfórico al 3% (p/v) para estabilizar el ácido ascórbico. La mezcla se agitó durante 15 min, se centrifugó a 5 000 rpm por 10 min y se filtró por membrana de 0.20 μm . El análisis cromatográfico se realizó en un sistema HPLC Agilent 1260 Infinity® con columna C18 (250 mm $\times$ 4.6 mm), fase móvil ácido fosfórico 0.1% en modo isocrático, flujo de 1.0 mL min^{-1} , temperatura de 25 °C y detección UV a 254 nm (Villa-Rivera y Ochoa-Alejo 2023). La cuantificación se efectuó mediante curva patrón de ácido ascórbico (HPLC) en el rango de 5 a 500 $\mu\text{g mL}^{-1}$ ($R^2 \geq 0.997$), expresándose los resultados como mg ácido ascórbico 100 g^{-1} de muestra.

Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se estructuró como un arreglo factorial con tres factores: variedad (árbol, serrano, jalapeño), presentación (fresco, salsa) y día (D1-D5), con tres repeticiones por combinación. Dado que los días representan mediciones secuenciales en el tiempo sobre el mismo tipo de muestra por combinación, el análisis se realizó con un enfoque de medidas repetidas mediante PROC MIXED en SAS 9.4 (SAS 2009), considerando como efectos fijos: variedad, presentación, día y sus interacciones. Las comparaciones múltiples de medias se realizaron con Tukey ($\alpha = 0.05$) para identificar diferencias significativas entre niveles de los factores dentro de cada variable de respuesta.

RESULTADOS

Capsaicina

En la presentación de muestras en fresco, el chile de árbol mostró consistentemente los valores más altos de capsaicina durante los cinco días de evaluación, con un máximo de 3 584.2 mg capsaicina 100 g^{-1} PF en el día 1, disminuyendo progresivamente hasta 1 986.7 mg capsaicina 100 g^{-1} PF en el día 5 (Figura 1). En todos los días evaluados, el contenido de capsaicina en chile de árbol fue significativamente mayor que en los chiles serrano y jalapeño. El chile serrano presentó valores intermedios de 458.0 a 524.7 mg capsaicina 100 g^{-1} PF mientras que jalapeño registró las concentraciones más bajas, entre 351.4 y 309.4 mg capsaicina 100 g^{-1} PF, manteniéndose estadísticamente inferior en todos los días ($p < 0.05$).

En la presentación de los chiles hechos salsa, el mismo patrón mostrado en muestras frescas se mantuvo. El chile de árbol presentó el valor máximo en el día 1 (979.5 mg capsaicina 100 g^{-1} salsa) y una marcada reducción hasta 173.8 mg capsaicina 100 g^{-1} salsa en el día 5, manteniendo diferencias significativas ($p < 0.05$) respecto a las variedades de chile serrano y jalapeño. El chile serrano mostró valores entre 96.0 y 58.1 mg capsaicina 100 g^{-1} salsa, mientras que jalapeño registró concentraciones entre 60.3 y 57.4 mg capsaicina 100 g^{-1} salsa, siendo estadísticamente inferiores a las concentraciones registradas en el chile de árbol. Estos resultados evidencian que el

procesamiento disminuye la concentración absoluta, pero conserva la jerarquía entre las tres variedades evaluadas (Figura 2).

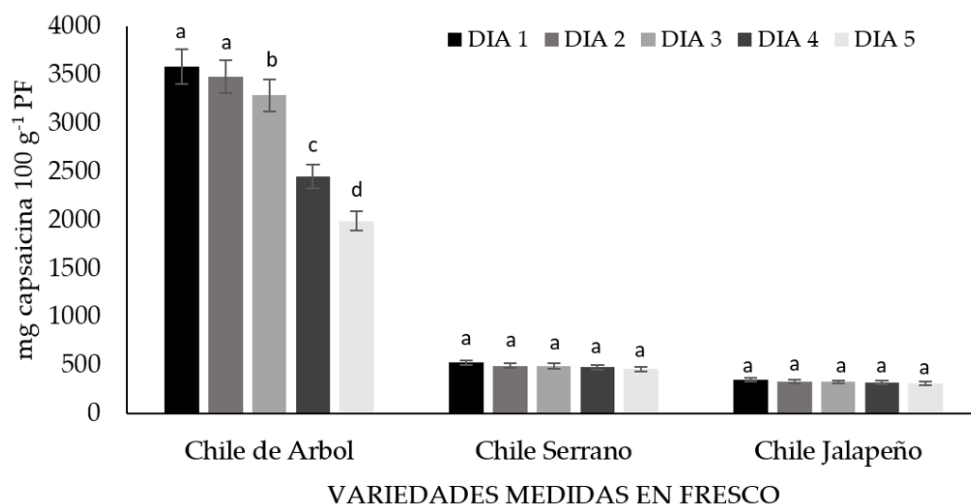


Figura 1. Capsaicina presente en tres variedades de Chile fresco. Letras distintas entre días de cada variedad muestran diferencia significativa ($p < 0.05$).

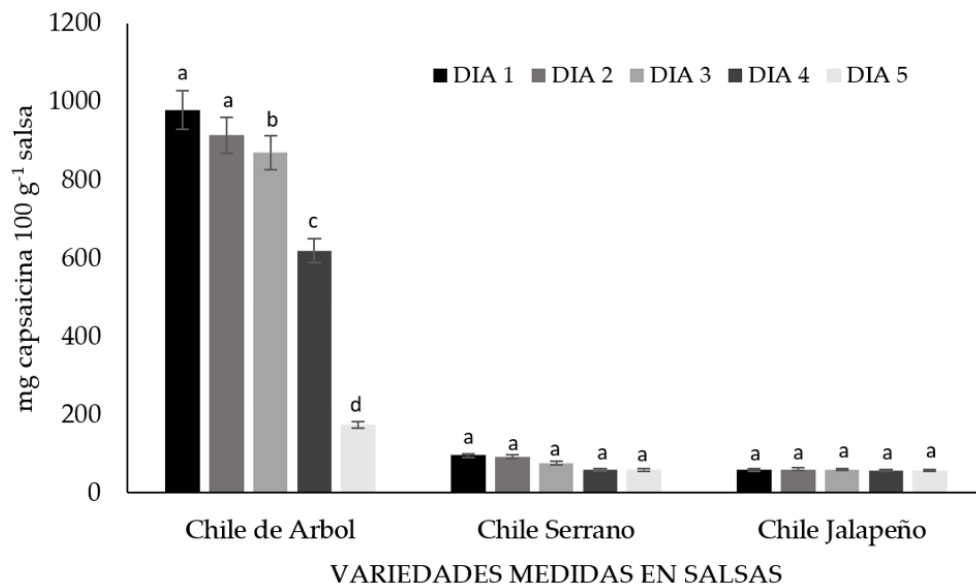


Figura 2. Capsaicina presente en homogeneizados de Chile elaborados con tres variedades de Chile. Letras distintas entre días de cada variedad muestran diferencia significativa ($p < 0.05$).

Ácido ascórbico

En muestras frescas, el Chile de árbol presentó los mayores contenidos de ácido ascórbico (Figura 3), en todos los días, alcanzando un máximo de 1 025.0 mg ácido ascórbico 100 g⁻¹ PF en el día 1 y disminuyendo hasta 615.4 mg ácido ascórbico 100 g⁻¹ PF en el día 5. Las diferencias fueron significativas frente a las variedades de Chile serrano y jalapeño en cada día evaluado ($p < 0.05$). La variedad de Chile serrano mostró valores intermedios (391.2-313.6 mg ácido ascórbico 100 g⁻¹ PF),

mientras que el chile jalapeño presentó las concentraciones más bajas (305.5-279.6 mg ácido ascórbico 100 g⁻¹ PF).

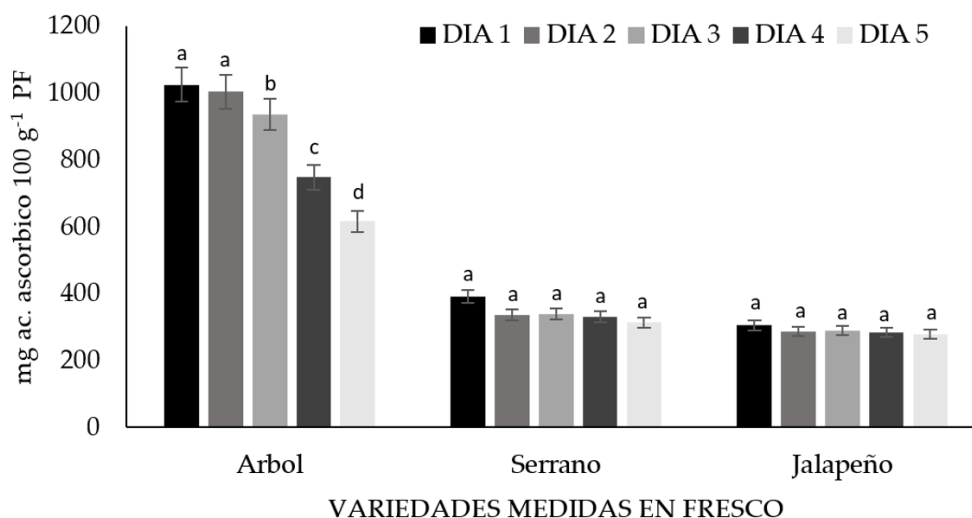


Figura 3. Ácido ascórbico presente en tres variedades de chile fresco. Letras distintas entre días de cada variedad muestran diferencia significativa ($p < 0.05$).

En la presentación en salsa, el ácido ascórbico presentó valores menores que en las muestras frescas (Figura 4), el valor máximo correspondió nuevamente a la variedad de chile de árbol en el día 1 (548.9 mg ácido ascórbico 100 g⁻¹ salsa), con una disminución progresiva hasta 187.5 mg ácido ascórbico 100 g⁻¹ salsa en el día 5. Los homogeneizados de chile elaborados con chile serrano y jalapeño presentaron valores inferiores, aunque hacia el día 5 ambos fueron estadísticamente similares (159.0 y 159.6 mg ácido ascórbico 100 g⁻¹ salsa, respectivamente). El procesamiento redujo aproximadamente un 50% el contenido inicial de ácido ascórbico en la variedad de chile de árbol, manteniendo diferencias significativas principalmente frente a la variedad de chile jalapeño.

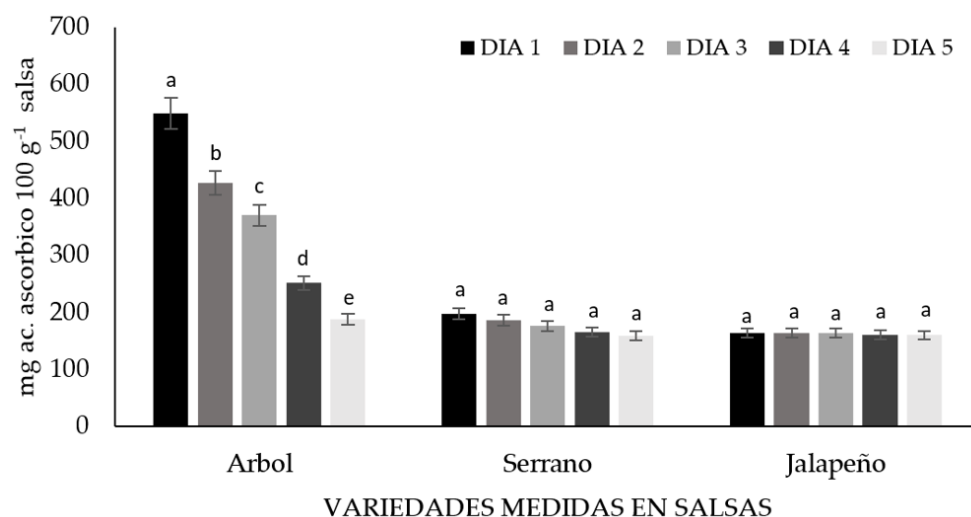


Figura 4. Ácido ascórbico presente en homogeneizados de chile elaborados con tres variedades de chile. Letras distintas entre días de cada variedad muestran diferencia significativa ($p < 0.05$).

Actividad antioxidante (ABTS)

En las muestras evaluadas en peso fresco, para la variable de actividad antioxidante. El chile de árbol mostró los valores más altos durante todo el periodo, con un máximo de 35 028.6 $\mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PF}$ en el día 1 y un mínimo de 26 057.1 $\mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PF}$ en el día 5. Los frutos evaluados de chile serrano presentaron valores intermedios (15 285.7–14 285.7 $\mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PF}$), mientras que la variedad de chile jalapeño mostró las concentraciones más bajas (12 600.0–12 885.7 $\mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PF}$). En todos los días se observaron diferencias significativas entre las tres variedades (de árbol, serrano y jalapeño) (Figura 5).

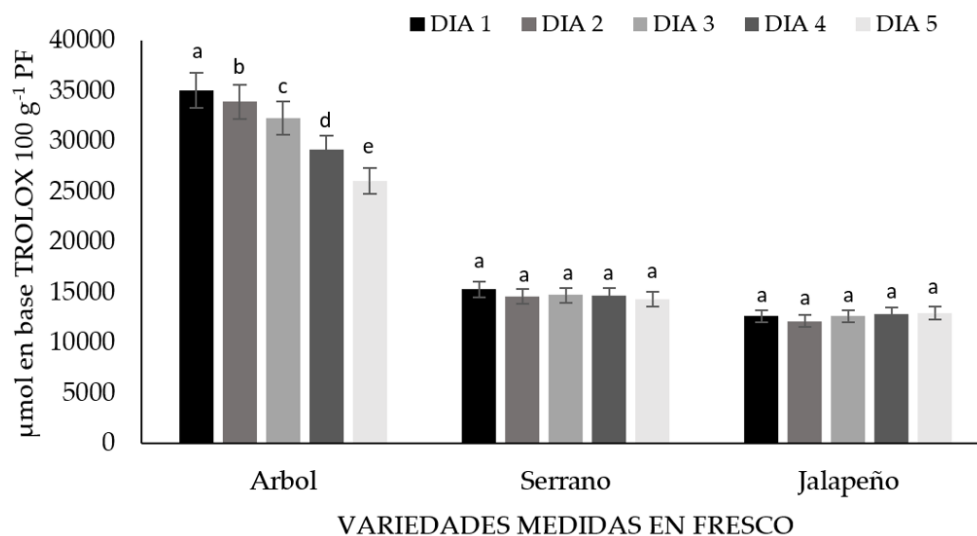


Figura 5. Actividad antioxidante en tres variedades de chile fresco. Letras distintas entre días de cada variedad muestran diferencia significativa ($p < 0.05$)

En la Figura 6 se presentan los resultados en los homogeneizados de chile para la actividad antioxidante. El chile de árbol mantuvo la mayor actividad antioxidante, con un valor máximo de 22 814.3 $\mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1} \text{ salsa}$ en el día 1 y una disminución hasta 13 857.1 $\mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1} \text{ salsa}$ en el día 5. Por otra parte, la variedad de chile serrano (13 142.9–12 028.6 $\mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1} \text{ salsa}$) y jalapeño (11 371.4–11 200.0 $\mu\text{mol Trolox } 100 \text{ g}^{-1} \text{ salsa}$) presentaron valores significativamente menores que la salsa elaborada con chile de árbol en todos los días evaluados ($p < 0.05$). A pesar del procesamiento, la actividad antioxidante relativa se conservó con diferencias claras entre las variedades de chile evaluadas.

Compuestos fenólicos totales

En la presentación de chiles evaluados en peso fresco, el chile de árbol alcanzó el valor máximo para compuestos fenólicos totales en el día 3 (65.282 mg EAG $\text{g}^{-1} \text{ PF}$), siendo significativamente superior a las variedades de chile serrano y jalapeño todos los días. La variedad de chile serrano presentó los valores más bajos (7.949–7.538 mg EAG $\text{g}^{-1} \text{ PF}$), mientras que la variedad de jalapeño mostró concentraciones intermedias (10.410–32.949 mg EAG $\text{g}^{-1} \text{ PF}$). Se destaca que en el día 3, el jalapeño incrementó hasta 32.949 mg EAG $\text{g}^{-1} \text{ PF}$, aunque permaneció estadísticamente inferior al chile de árbol (Figura 7).

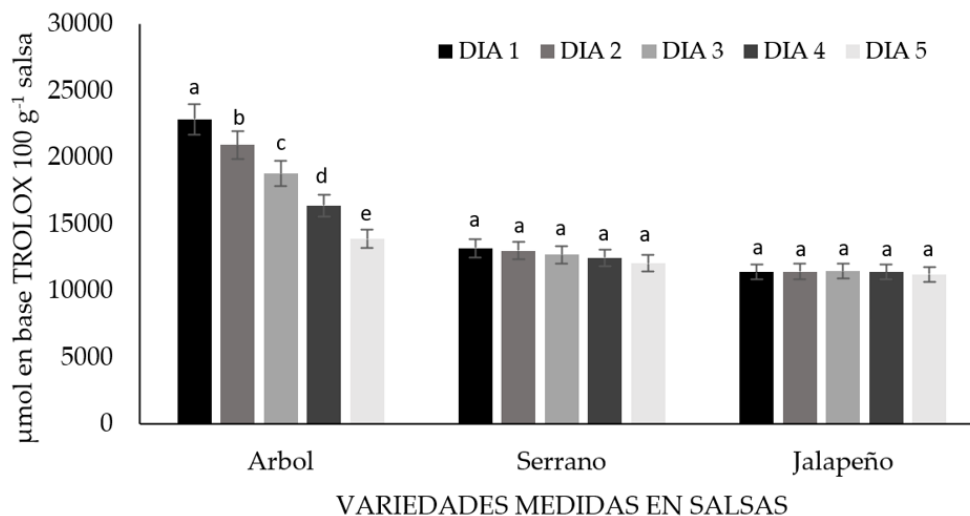


Figura 6. Actividad antioxidante presente en homogeneizados de Chile elaborados con tres variedades de Chile. Letras distintas entre días de cada variedad muestran diferencia significativa ($p < 0.05$).

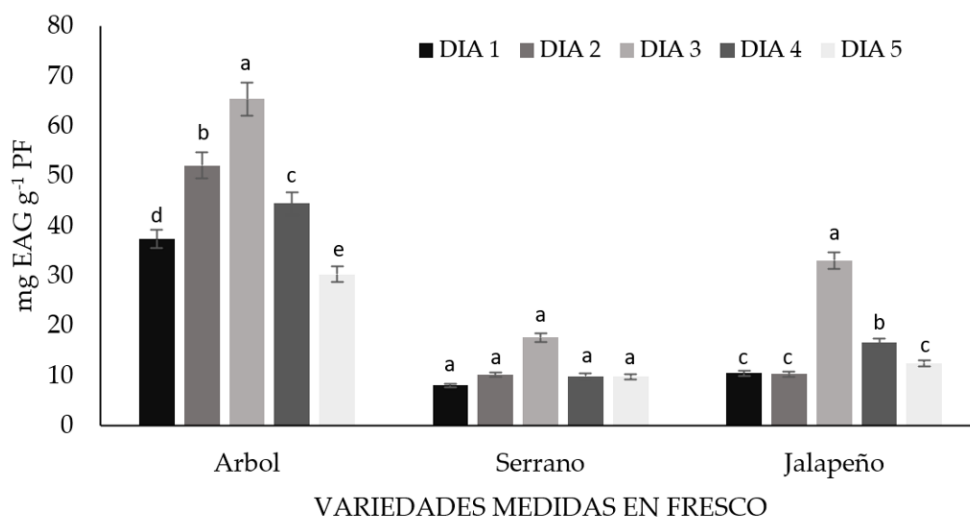


Figura 7. Compuestos fenólicos totales en tres variedades de Chile fresco. Letras distintas entre días de cada variedad muestran diferencia significativa ($p < 0.05$).

En los homogeneizados de Chile elaborados, las diferencias entre las tres variedades evaluadas, para compuestos fenólicos totales, fueron menos marcadas. El valor más alto se observó en Chile serrano en el día 1 (14.103 mg EAG g^{-1} salsa), aunque estadísticamente fue similar a la variedad de árbol (13.949 mg EAG g^{-1} salsa). A partir del día 2, no se detectaron diferencias significativas entre variedades, con valores que oscilaron entre 10.872 y 13.282 mg EAG g^{-1} salsa, indicando que el procesamiento homogeneizó el contenido fenólico (Figura 8).

Flavonoides totales

En muestras evaluadas frescas, el Chile de árbol presentó el mayor contenido de flavonoides totales durante todo el estudio, con un máximo de 118.963 mg EQ g^{-1} PF en el día 3, seguido por Chile

jalapeño (63.575 mg EQ g⁻¹ PF) y serrano (25.663 mg EQ g⁻¹ PF). Las diferencias fueron significativas en cada día evaluado ($p < 0.05$), manteniendo el patrón varietal, chile de árbol-jalapeño-serrano (Figura 9).

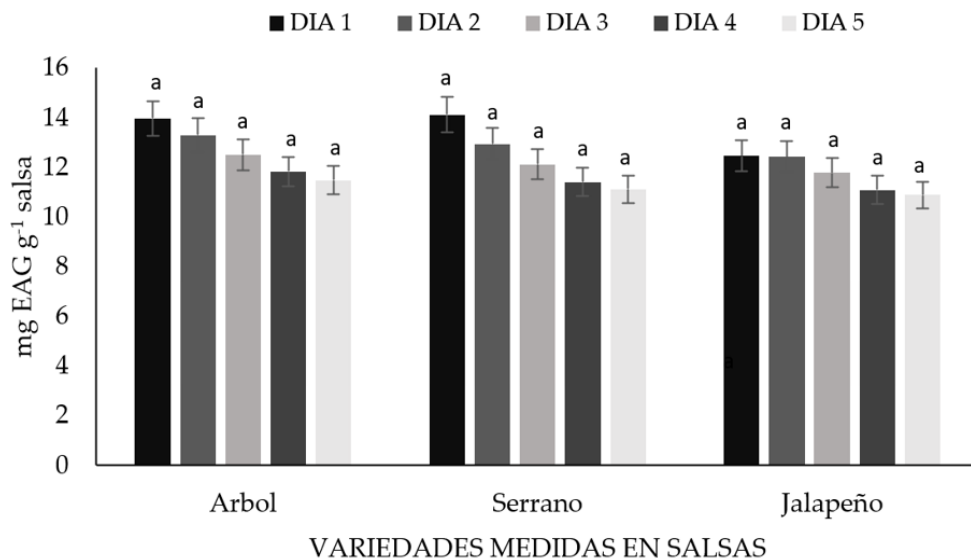


Figura 8. Compuestos fenólicos totales en homogeneizados de Chile elaborados con tres variedades de Chile. Letras distintas entre días de cada variedad muestran diferencia significativa ($p < 0.05$)

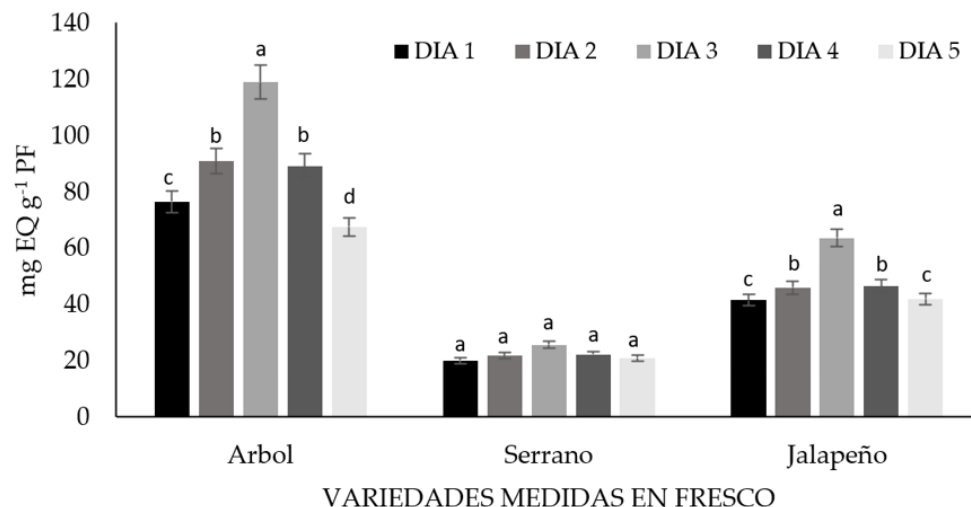


Figura 9. Flavonoides totales en tres variedades de Chile fresco. Letras distintas entre días de cada variedad muestran diferencia significativa ($p < 0.05$)

En los homogeneizados de Chile evaluados, el Chile de árbol registró el valor más alto en el día 1 (30.054 mg EQ g⁻¹ salsa) y disminuyó hasta 20.5 mg EQ g⁻¹ salsa en el día 5. El Chile serrano (19.263-16.788 mg EQ g⁻¹ salsa) y jalapeño (17.525-16.65 mg EQ g⁻¹ salsa) mostraron valores inferiores. En los primeros días se observaron diferencias significativas entre las tres variedades. Sin embargo,

hacia los días finales las variedades de chile serrano y jalapeño tendieron a agruparse estadísticamente (Figura 10).

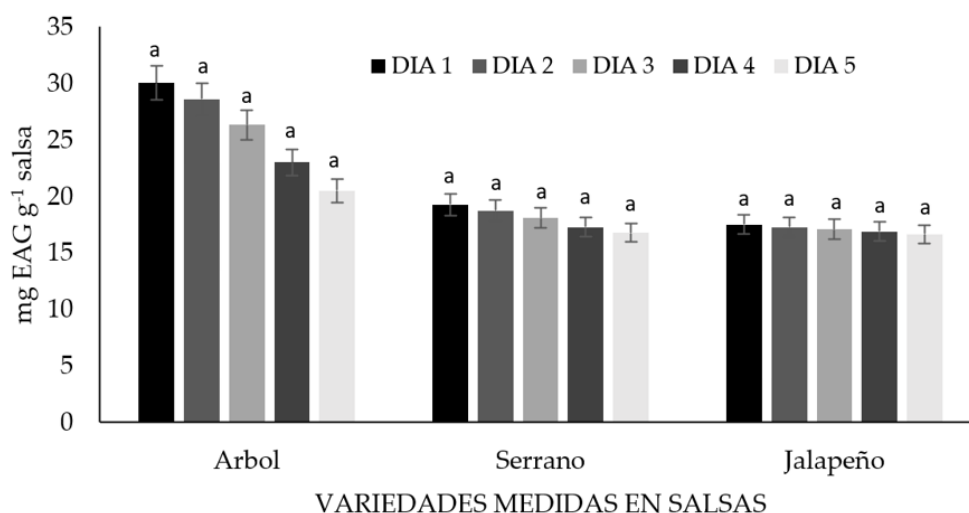


Figura 10. Flavonoides totales en homogeneizados de Chile elaborados con tres variedades de Chile. Letras distintas entre días de cada variedad muestran diferencia significativa ($p < 0.05$)

DISCUSIÓN

La composición fitoquímica de *Capsicum* depende fuertemente del genotipo, del tejido (pericarpio, placenta, semillas) y del procesamiento, lo que explica las diferencias reportadas entre Chile de árbol, serrano y jalapeño del presente estudio, así como los cambios de las muestras analizadas a lo largo del almacenamiento (5 días) en muestras frescas y procesadas (salsa) (Alghamdi *et al.* 2025). De manera global, la evidencia reciente confirma que los tratamientos térmicos y el procesamiento (molienda, cocción, pasteurización, acidificación, exposición a oxígeno y luz) suelen reducir compuestos termolábiles (ácido ascórbico) y pueden ocasionar pérdidas o redistribución de fenoles, flavonoides y capsaicinoides dependiendo de la severidad del tratamiento y del material que se analiza (Mengistu y Beri 2024, Zamljen *et al.* 2025).

Capsaicina

En este estudio, el Chile de árbol presentó los valores más altos de capsaicina tanto en fresco como en salsa, con una disminución marcada a lo largo del almacenamiento, particularmente en salsa donde se reportó un decremento de capsaicina del 82% entre el día 1 y el día 5. En las variedades de Chile serrano y jalapeño, los valores fueron menores y con menor variación entre los días analizados, lo que sugiere que el descenso del alcaloide se vuelve más evidente cuando el contenido inicial es alto y cuando las muestras son procesadas, ya que el procesamiento favorece la degradación de los metabolitos secundarios (Alghamdi *et al.* 2025).

La literatura coincide en que el procesamiento puede modificar el contenido de capsaicinoides. Por ejemplo, en productos fermentados de Chile se han observado reducciones moderadas (alrededor de 24%), mientras que en muestras sometidas a condiciones más agresivas (oxidación, temperatura,

tiempo), las pérdidas pueden ser mayores (Zamljen *et al.* 2025). Además, los trabajos comparativos en productos procesados muestran que la capsaicina puede diferir entre fresco y salsas comerciales. En un estudio en jalapeño para chipotle (incluyendo salsas comerciales), se reportaron diferencias significativas entre estados de procesamiento y un valor promedio para salsas comerciales de 281.22 mg g⁻¹ PS, inferior a muestras de chile sometido a ahumado-deshidratado, lo que refuerza el efecto del proceso sobre la concentración final medida (Natividad-Torres *et al.* 2021). En paralelo, algunos estudios sobre el perfil de capsaicinoides en múltiples cultivares confirman que la variabilidad genética explica buena parte de los contrastes entre variedades, lo cual explica las diferencias tan marcadas entre variedades analizadas en este estudio (Alghamdi *et al.* 2025).

En cuanto a las variedades procesadas para elaboración de homogeneizados de chile, la disminución de capsaicina puede relacionarse con diversos factores, como mayor área superficial y contacto con oxígeno por la molienda, la posible degradación catalizada por enzimas residuales o por condiciones de pH y temperatura. En este sentido, la literatura metodológica reciente enfatiza que la cuantificación de capsaicinoides es altamente sensible al tipo de extracción y al genotipo a evaluar, por lo que diferencias absolutas entre estudios deben discutirse con cautela, siendo de mayor interés la comparación de tendencias y porcentajes de cambio (Cheng *et al.* 2024).

Ácido ascórbico

El ácido ascórbico mostró el patrón más constante de pérdida con el tiempo, especialmente en salsa en los resultados reportados del presente estudio. En chile de árbol, el contenido en fresco disminuyó aproximadamente el 40%, mientras que en salsa la reducción de ácido ascórbico fue de 66% en el mismo periodo de 5 días. Las variedades de chile serrano y jalapeño presentaron valores menores y una tendencia menos pronunciada en cuanto a la degradación del ácido ascórbico. Este comportamiento coincide con la evidencia reciente donde distintos autores reportan que el ácido ascórbico es altamente susceptible a oxidación (O₂), temperatura, metales traza y luz, y su retención disminuye con calentamiento y almacenamiento (Villa-Rivera y Ochoa-Alejo 2023, Mengistu y Beri 2024). En productos fermentados como las pastas de chile, se han reportado disminuciones desde el 30–50% de ácido ascórbico durante el proceso, donde estos hallazgos coinciden con los resultados obtenidos en el presente estudio (Zamljen *et al.* 2025), aunque en este estudio la pérdida en salsa de árbol fue más severa, lo que sugiere condiciones más desfavorables (oxigenación por trituration, temperatura de preparación, o mayor exposición durante los días de seguimiento).

Actividad antioxidante (ABTS)

En este estudio, la actividad antioxidante (ABTS) fue mayor en chile de árbol, y decreció con el tiempo tanto en peso fresco como en salsa. Las variedades de chile serrano y jalapeño se mantuvieron sustancialmente por debajo, con cambios temporales más moderados. Estudios recientes en *Capsicum* confirman que la capacidad antioxidante se asocia estrechamente con el contenido y perfil de compuestos fenólicos y, en ciertos casos, con contribuciones de otros antioxidantes (ácido ascórbico y pigmentos) (Alghamdi *et al.* 2025). En trabajos donde se evaluó degradación por almacenamiento en productos de chile, se observó que el radical ABTS disminuye conforme decrece el contenido fenólico y ocurre oxidación de metabolitos, lo cual coincide con la reducción temporal detectada en este estudio en las muestras de homogeneizados de chile (Rehman *et al.* 2024). Asimismo, en jalapeño para chipotle se reportaron diferencias significativas

en capacidad antioxidante entre estados de procesamiento, con valores promedio mayores en el producto ahumado-deshidratado con valores de $112.33 \mu\text{mol TE g}^{-1}$ PS frente al fresco $60.11 \mu\text{mol TE g}^{-1}$ PF, evidenciando que el procesamiento puede aumentar o disminuir la respuesta a la actividad antioxidante evaluada, dependiendo del tipo de proceso (concentración por deshidratación vs degradación por cocción) (Natividad-Torres *et al.* 2021). El descenso de la actividad antioxidante en salsa durante cinco días se relaciona con una pérdida neta de antioxidantes reactivos al radical ABTS^{•+} (Rehman *et al.* 2024).

Compuestos fenólicos totales

Los compuestos fenólicos totales mostraron una respuesta dependiente de variedad y día. En peso fresco, el chile de árbol presentó valores superiores y un máximo evidente en el día tres con un valor de $65.282 \text{ mg EAG g}^{-1}$ PF. Por otro lado, la variedad de chile jalapeño mostró un incremento puntual mientras que el chile serrano se mantuvo bajo. En cuanto a las muestras procesadas (homogeneizados de chile), los valores fueron más homogéneos entre variedades, con una tendencia general a disminuir levemente con los días. En la literatura, el total de fenoles en chiles se reporta en rangos amplios dependiendo de variedad y procesamiento de las muestras (fresco-salsa). Un análisis amplio de cultivares indica que el contenido fenólico típico puede situarse, por ejemplo, en el orden de mg GAE g^{-1} de peso seco en diversos materiales, reforzando el papel del genotipo como factor clave (Alghamdi *et al.* 2025). Para productos procesados, se ha descrito que la degradación de polifenoles durante almacenamiento reduce la concentración de estos compuestos; en un estudio de almacenamiento se observó una reducción aproximada del 43% en 15 días bajo ciertas condiciones, coherente con la dirección del cambio en salsa observado en el presente estudio (Rehman *et al.* 2024). Un hallazgo importante es que en salsa las diferencias entre variedades no son significativas para el contenido de compuestos fenólicos, lo que es compatible con dos mecanismos discutidos en la literatura: homogeneización de las muestras y reacciones oxidativas que convergen a niveles similares de compuestos fenólicos medibles por Folin-Ciocalteu (Mengistu y Beri 2024). Además, estudios en salsas comerciales a base de chile muestran que los fenoles totales pueden ser inferiores según el proceso. Por ejemplo, en chipotle se reportó que el contenido fenólico promedio en salsas comerciales puede ubicarse alrededor de $278.5\text{--}304.3 \text{ mg EAG } 100 \text{ g}^{-1}$ PF, con diferencias claras frente al producto ahumado-deshidratado (Natividad-Torres *et al.* 2021).

Flavonoides totales

En la medición de flavonoides, el chile de árbol nuevamente dominó en fresco, con un valor máximo en el día tres y valores superiores al resto de variedades en todos los días; la variedad de jalapeño presentó valores intermedios y serrano fue la variedad con menor cantidad de flavonoides presentes. En los homogeneizados de chile, el chile de árbol mantuvo valores más altos al inicio con descenso hacia el día 5, mientras que las variedades de serrano y jalapeño reportaron rangos cercanos. La bibliografía reciente atribuye una fracción importante de la capacidad antioxidante en *Capsicum* a flavonoides específicos (quercetina, luteolina, apigenina) y a fenilpropanoides, lo que apoya la correspondencia entre los patrones de flavonoides y actividad antioxidante observados en este estudio (Alghamdi *et al.* 2025). Durante almacenamiento, también se ha documentado disminución de flavonoides cuantificados (en equivalentes de estándar) conforme aumenta el

tiempo, con disminuciones cuantificables entre días (1-15) en muestras de Chile procesado y almacenado (Rehman *et al.* 2024).

CONCLUSIONES

La composición fitoquímica y la capacidad antioxidante de *Capsicum annuum* L. están determinadas por la variedad y el tipo de procesamiento. Entre las variedades evaluadas, el Chile de árbol presentó las mayores concentraciones de capsaicina, ácido ascórbico, compuestos fenólicos totales, flavonoides totales y actividad antioxidante, tanto en estado fresco como en salsa, evidenciando mayor potencial funcional y nutracéutico. El procesamiento para la elaboración de homogeneizados de Chile y el almacenamiento durante cinco días ocasionaron reducciones significativas en la concentración absoluta de todos los compuestos evaluados, particularmente en capsaicina y ácido ascórbico. Asimismo, la actividad antioxidante mostró una tendencia que coincide con el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides, lo que respalda la contribución predominante de estos metabolitos en la capacidad antioxidante global de las muestras. En conjunto, los hallazgos evidencian que el procesamiento reduce la concentración de metabolitos secundarios, pero no altera sustancialmente el patrón comparativo entre variedades.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Alghamdi M, Rathinasabapathy T, Komarnytsky S (2025) Capsaicinoid profiles, phenolic content, and antioxidant properties of chili peppers grown in urban settings. *International Journal of Molecular Sciences* 26(10): 4916. <https://doi.org/10.3390/ijms26104916>
- Barba FJ, Mariutti LR, Bragagnolo N, Mercadante AZ, Barbosa-Canovas GV, Orlén V (2017) Bioaccessibility of bioactive compounds from fruits and vegetables after thermal and nonthermal processing. *Trends in Food Science & Technology* 67: 195-206. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.07.006>
- Barbero GF, Ruiz AG, Liazi A, Palma M, Vera JC, Barroso CG (2014) Evolution of total and individual capsaicinoids in peppers during ripening of the Cayenne pepper plant (*Capsicum annuum* L.). *Food Chemistry* 153: 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.068>
- Bicikliski O, Trajkova F, Mihajlov L, Jordanovska S, Tashev K (2018) Vitamin C and total antioxidant content in pepper fruits (*Capsicum annuum* L.): Comparative analysis of peppers grown in conventional and organic agricultural systems. *Annual Research & Review in Biology* 27(5): 1-11. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2018/42851>
- Cano A, Maestre AB, Hernández-Ruiz J, Arnao MB (2023) ABTS/TAC methodology: Main milestones and recent applications. *Processes* 11(1): 185. <https://doi.org/10.3390/pr11010185>
- Chávez-Mendoza C, Sánchez E, Muñoz-Marquez E, Sida-Arreola JP, Flores-Córdova MA (2015) Bioactive compounds and antioxidant activity in different grafted varieties of bell pepper. *Antioxidants* 4(2): 427-446. <https://doi.org/10.3390/antiox4020427>

- Cheng Y, Gao C, Luo S, Yao Z, Ye Q, Wan H, Liu C (2023) Effects of storage temperature at the early postharvest stage on the firmness, bioactive substances, and amino acid compositions of chili pepper (*Capsicum annuum* L.). *Metabolites* 13(7): 820. <https://doi.org/10.3390/metabo13070820>
- Cheng Z, Wen ZF, Liu ZF, Zhang Y, Zhou Y, Feng XS (2024) Capsaicinoids in food: An update on pretreatment and analysis methods since 2010. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 54(1): 73-92. <https://doi.org/10.1080/10408347.2022.2054269>
- Dominguez-López I, Pérez M, Lamuela-Raventós RM (2024) Total (poly)phenol analysis by the Folin-Ciocalteu assay as an anti-inflammatory biomarker in biological samples. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 64(27): 10048-10054. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2220031>
- Gubsky S, Dobrovolska O, Aksonova O, Zhelezniak Z, Evlash V (2019) Degradation kinetics of L-ascorbic acid in food matrix of jelly during storage. *Progressive Technique and Technologies of Food Production Enterprises, Catering Business and Trade* (1): 248-264. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3263759>
- Guo J, Jike X, Wu C, Liu L, Wang C, Xu K, Lei H (2024) Phytochemicals, antioxidant capacities and volatile compounds changes in fermented spicy Chinese cabbage sauces treated by thermal and non-thermal technologies. *Food Research International* 176: 113803. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113803>
- Hand MJ, Nono GV, Tonfack LB, Taffouo VD, Youmbi E (2021) Nutrient composition, antioxidant components and ascorbic acid content response of pepper fruit (*Capsicum annuum* L.) cultivars grown under salt stress. *International Journal of Biology* 2(1): 43-70
- Iqbal Q, Amjad M, Asi MR, Ariño A, Ziaf K, Nawaz A, Ahmad T (2015) Stability of capsaicinoids and antioxidants in dry hot peppers under different packaging and storage temperatures. *Foods* 4(2): 51-64. <https://doi.org/10.3390/foods4020051>
- Jang H, Choi M, Jang KS (2024) Comprehensive phytochemical profiles and antioxidant activity of Korean local cultivars of red chili pepper (*Capsicum annuum* L.). *Frontiers in Plant Science* 15: 1333035. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1333035>
- Lahbib K, Bnejdi F, Pandino G, Lombardo S, El-Gazzah M, El-Bok S, Dabbou S (2023) Changes in yield-related traits, phytochemical composition, and antioxidant activity of pepper (*Capsicum annuum*) depending on its variety, fruit position, and ripening stage. *Foods* 12(21): 3948. <https://doi.org/10.3390/foods12213948>
- Liu F, Zhao J, Sun H, Xiong C, Sun X, Wang X, Zou X (2023) Genomes of cultivated and wild *Capsicum* species provide insights into pepper domestication and population differentiation. *Nature Communications* 14(1): 5487. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41251-4>
- Medina-Juárez LA, Molina-Quijada DM, Sánchez CLDT, González-Aguilar GA, Gámez-Meza N (2012) Antioxidant activity of peppers (*Capsicum annuum* L.) extracts and characterization of their phenolic constituents. *Interciencia* 37(8): 588-593
- Mengistu HK, Beri GB (2024) Cooking effect on bioactive compounds and antioxidant capacity of red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Heliyon* 10(17). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35418>
- Minatel IO, Borges CV, Ferreira MI, Gomez HAG, Chen CYO, Lima GPP (2017) Phenolic compounds: Functional properties, impact of processing and bioavailability. *Phenolic Compounds Biological Activity* 8: 1-24. <http://dx.doi.org/10.5772/66368>
- Naseem M, Rana RM, ul Hassan M, Khan MA, Binobead MA, Elsadek MF, Iqbal R (2024) High performance liquid chromatography (HPLC) based genetic diversity profiling of chilli germplasm for fruit pungency and phytochemical contents. *BMC Plant Biology* 24(1): 368. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05055-y>
- Natividad-Torres EA, Aguilar AG, Chávez ES, Sida-Arreola JP, Marquez EM, Mendoza CC (2021) Processing effect on the bioactive compounds content of Mexican jalapeño peppers for chipotle (*Capsicum annum* L.). *Acta Agrícola y Pecuaria* 7(1): 1-13. <https://doi.org/10.30973/aap/2021.7.0071007>

- Papathanasiou T, Gougoulis N, Karayannis VG, Kamvoukou CA (2021) Investigation of the total phenolic content and antioxidant capacity of three sweet pepper cultivars (*Capsicum annuum* L.) at different development and maturation stages. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* 65(2): 219-228. <https://doi.org/10.3311/PPch.15553>
- Rehman A, Majeed U, Shafi A, Shahbaz M, Baboo I, Sultan R, Lackner M (2024) Evaluation of antioxidant capacity and bioactive compounds in *Capsicum annum* L. red peppers following drying in a polycarbonate greenhouse. *Eurobiotech Journal* 8(1): 12-22. <https://doi.org/10.2478/ebtj-2024-0002>
- SAS (2009) SAS® 9.2 Language Reference: Concepts. SAS Institute Inc. Cary, NC.
- Shraim AM, Ahmed TA, Rahman MM, Hijji YM (2021) Determination of total flavonoid content by aluminum chloride assay: A critical evaluation. *LWT* 150: 111932. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111932>
- Sun T, Xu Z, Wu CT, Janes M, Prinyawiwatkul W, No HK (2007) Antioxidant activities of different colored sweet bell peppers (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Food Science* 72(2): S98-S102. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00245.x>
- Tripodi P, Kumar S (2019) The *Capsicum* crop: An introduction. In: *The Capsicum genome*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97217-6_1
- Villa-Rivera MG, Ochoa-Alejo N (2023) Ascorbic acid in chili pepper fruits: Biosynthesis, accumulation, and factors affecting its content. *Journal of the Mexican Chemical Society* 67(3): 187-199. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v67i3.2003>
- Yang Y, Gao C, Ye Q, Liu C, Wan H, Ruan M, Cheng Y (2024) The influence of different factors on the metabolism of capsaicinoids in pepper (*Capsicum annuum* L.). *Plants* 13(20): 2887. <https://doi.org/10.3390/plants13202887>
- Zamljen T, Jamnik P, Vidrih R, Grohar MC, Slatnar A (2025) Biochemical transformations in fermented chili pastes: Impact of cultivar and fermentation type on flavor and bioactive compounds. *Food Research International* 117739. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.117739>