



Efectos del estrés abiótico aplicado en postcosecha sobre la acumulación de compuestos bioactivos*

Effects of postharvest abiotic stress on the accumulation of bioactive compounds

Ruth De la Asunción-Romero¹, Nadiarid Jiménez-Elizondo², Ileana Morales-Herrera¹

* Recepción: 17 de junio, 2024. Aceptación: 12 de noviembre, 2024. Esta revisión se realizó en el marco del proyecto de investigación “Efecto del estrés abiótico en postcosecha en la concentración de compuestos bioactivos en guayaba y cas” 735-C3-114, Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

¹ Universidad de Costa Rica, Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos. San José 11501-2060, Costa Rica. ruth.delaasuncion@ucr.ac.cr (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0003-4507-6407>), ileana.morales@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0009-0008-0758-0593>).

² Universidad de Costa Rica, Escuela de Tecnología de Alimentos. San José 11501-2060, Costa Rica. nadiarid.jimenez@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-6611-8488>).

Resumen

Introducción. El estrés abiótico en plantas ha sido estudiado por muchos años desde una perspectiva agrícola y fisiológica, genera interés su aplicación en postcosecha con la finalidad de inducir cambios deseables como base para el desarrollo de alimentos funcionales. **Objetivo.** Investigar y sintetizar la información relacionada con la aplicación de tratamientos de estrés abiótico en postcosecha en frutas y vegetales a fin de evaluar su impacto en el contenido de compuestos bioactivos. **Desarrollo.** La revisión se desarrolló en Costa Rica de marzo de 2023 a enero de 2024, y describe los principales efectos de la aplicación en postcosecha de estrés abiótico controlado inducido por daño físico, temperaturas altas o bajas, aplicación de sustancias químicas e irradiación en frutas y vegetales, con especial atención a la acumulación de compuestos bioactivos generados como sustancias de defensa por el metabolismo secundario. **Conclusiones.** La información disponible da evidencia de un efecto en la acumulación de compuestos bioactivos, y los efectos generados dependen del producto, tipo de tratamiento e intensidad, y las condiciones del almacenamiento posterior. La aplicación de tratamientos con la finalidad de inducir estrés abiótico conlleva, además, efectos en otras características que, según la intensidad, pueden dificultar el uso posterior del material como materia prima para el desarrollo de alimentos funcionales. Por ello, el estudio de los tratamientos que permitan una acumulación importante de sustancias de interés en un determinado producto, que luego pueda ser utilizado como una materia prima mejorada para el desarrollo de alimentos funcionales, deberá incluir también los efectos sobre aspectos de calidad relevantes. Deberá considerarse el efecto del tiempo y condiciones de almacenamiento sobre la concentración de las sustancias de interés y el posible efecto de condiciones de procesamiento sobre su estabilidad.

Palabras clave: tecnología postcosecha, alimentos funcionales, productos frescos de origen vegetal, antioxidantes.



Abstract

Introduction. Abiotic stress in plants has been studied for many years from agricultural and physiological perspective, generating interest in its application during postharvest stages to induce desirable changes as a basis for the development of functional foods. **Objective.** To investigate and synthesize information related to the application of postharvest abiotic stress treatments in fruits and vegetables in order to evaluate their impact on the bioactive compounds content. **Development.** This review was developed in Costa Rica from March 2023 to January 2024 and describes the main effects of applying controlled abiotic stress during postharvest. The includes physical damage, exposure to high or low temperature, application of chemical substances, and irradiation in fruits and vegetables, with special attention to the accumulation of bioactive compounds generated as defense substances or through secondary metabolism. **Conclusions.** The available information suggests an effect on the accumulation of bioactive compounds, the sensory and general quality of the product, the type of treatment used, and storage conditions. The application of treatments to induce controlled abiotic stress should consider the intensity of stress, as excessive levels hinder subsequent use of the material as raw input for developing functional foods. Therefore, studies on treatments that allows important accumulation of compounds of interest in a specific product, suitable for the use as an raw material in functional food development, should also address their effects on relevant quality aspects. Additionally, the effects of time and storage conditions on the concentration and stability of these compounds should be considered.

Keywords: postharvest technology, functional foods, fresh produce, antioxidants.

Introducción

Las plantas son organismos susceptibles de sufrir estrés por causa de factores bióticos, tales como insectos y microorganismos patógenos, o abióticos, tales como sequía, salinidad, temperatura desfavorable, radiación, entre otros (Ochoa-Velasco et al., 2017). El estrés abiótico en plantas ha sido estudiado a lo largo de décadas, y existen numerosos estudios orientados al logro de cierto grado de tolerancia a factores abióticos en cultivos. Entre las estrategias estudiadas para favorecer la resistencia de las plantas al estrés abiótico están el mejoramiento genético convencional y la mutagénesis inducida (Carvajal-Campos & Jiménez, 2021). El estrés abiótico a nivel de plantación ha sido también estudiado como un factor importante relacionado con la calidad de los productos cosechados (Méndez Adorno et al., 2012).

La aplicación de tratamientos que conllevan estrés abiótico también ha sido utilizada con la finalidad de prolongar la vida útil y mejorar las cualidades de diferentes productos. Ejemplos de ello son el curado de cítricos, así como de algunas raíces y tubérculos, los tratamientos con alta o baja temperatura, y el uso de atmósferas modificadas o controladas, entre otros (Ben-Yehoshua et al., 1987; Delate & Brecht, 1989; Nunes et al., 2007; Sugri et al., 2019). Estos tratamientos pueden favorecer una mejor conservación mediante la lignificación de la superficie en camote (*Ipomoea batatas* L.) (Sugri et al., 2019), o lograr una disminución en la incidencia de pudrición en frutos cítricos (Ben-Yehoshua et al., 1987; Nunes et al., 2007).

El potencial de aplicación del estrés abiótico en postcosecha para obtener materiales con cualidades mejoradas ha sido objeto de investigación en las últimas dos décadas. En una de las primeras publicaciones en el tema, Cisneros-Zevallos (2003) concluyó que los efectos del estrés abiótico en el metabolismo de los productos vegetales frescos o mínimamente procesados pueden ser utilizados para aumentar los niveles de sustancias bioactivas. Esto haría posible la obtención de alimentos frescos o procesados de mayor beneficio para la salud, para lo que es necesario estudiar la respuesta metabólica de diferentes productos y tejidos a diferentes tipos de estrés abiótico.

Los efectos de tratamientos de estrés abiótico controlado, aplicados en postcosecha, tales como daño físico, alta o baja temperatura, alteraciones en la composición de gases atmosféricos, luz ultravioleta u otras radiaciones, falta de agua, aplicación de fitohormonas, entre otros, han sido estudiados en diferentes tejidos vegetales (Cisneros-Zevallos, 2003; Jacobo-Velázquez et al., 2011; Pedreschi & Lurie, 2015; Torres-Contreras et al., 2014). Estos estudios coinciden en el potencial de dichos tratamientos para estimular la síntesis de compuestos bioactivos. Los compuestos acumulados suelen ser sustancias de defensa generadas por el metabolismo secundario de los tejidos vegetales.

La intensidad del estrés abiótico aplicado está relacionada con la respuesta fisiológica del tejido vegetal, así como con el posible uso tecnológico del mismo. En condiciones normales, el tejido se encuentra en estado de homeostasis, pasa a un estado de hormesis bajo condiciones de estrés controladas, y llega a la muerte celular y desintegración del tejido bajo condiciones de estrés muy elevadas. La concentración de especies reactivas de oxígeno (ROS) en el ambiente celular se relaciona con la intensidad de la respuesta del tejido a la aplicación de estrés abiótico, y resulta de gran importancia en su modulación. Concentraciones de ROS superiores a $0,1 \text{ mmol/m}^3$ suelen estar relacionadas con la destrucción celular, lo que limita las posibilidades de uso del material (Cisneros-Zevallos & Jacobo-Velázquez, 2020).

La investigación de los efectos del estrés abiótico en productos vegetales frescos puede abrir posibilidades para la obtención de materias primas con cualidades mejoradas, como un mayor contenido de sustancias bioactivas, que sean la base para el desarrollo de nuevos alimentos funcionales. El objetivo de esta revisión bibliográfica fue investigar y sintetizar la información relacionada con la aplicación de tratamientos de estrés abiótico en postcosecha en frutas y vegetales a fin de evaluar su impacto en el contenido de compuestos bioactivos. Para esto, se recopiló la literatura científica disponible en bases de datos, tanto en idioma inglés como en español.

Se realizó una búsqueda de referencias bibliográficas en la base de datos Science Direct con los términos “abiotic and stress and fruit and postharvest and antioxidant” y limitado a: “Agricultural and Biological Sciences”. La búsqueda generó un total de 239 referencias. Estas referencias fueron sometidas a un análisis bibliométrico que permitió realizar un mapeo por autor, por palabra clave y año de publicación. Se identificaron las referencias correspondientes a revisiones de literatura y se buscaron las publicaciones citadas en estos artículos para ampliar la base de referencias. Se excluyeron de esta revisión los artículos científicos relacionados con la aplicación o el control del estrés abiótico en etapas de producción diferentes a postcosecha, como durante la producción agrícola, o los relacionados con la regulación de la expresión genética en las plantas. Las referencias seleccionadas se organizaron en el gestor de referencias Mendeley, con un grupo de 183 referencias que sirvieron de base para la presente publicación.

Estrés abiótico a bajas y altas temperaturas

Las cadenas de frío son necesarias para retardar la respiración de los productos vegetales y reducir las pérdidas postcosecha. El frío o las bajas temperaturas son el estrés abiótico postcosecha aplicado con más frecuencia, solo o en combinación con otros (por ejemplo, tratamiento térmico, condiciones de atmósfera controlada y tratamientos químicos). Las bajas temperaturas suelen ir acompañadas de una pérdida de agua del producto, en especial durante el período de enfriamiento, por lo que podría haber una superposición de al menos dos factores abióticos. Los cambios inducidos por el frío en los diferentes niveles de control celular para productos perecederos incluyen: acumulación de ciertos azúcares, alcoholes de azúcar, compuestos que contienen nitrógeno, fenilpropanoides y metabolitos relacionados con antocianinas (Pedreschi & Lurie, 2015).

El frío y el calor comparten algunos mecanismos moleculares similares. En la práctica, el calor utilizado previo al almacenamiento en frío retrasará la maduración y permitirá la maduración después de almacenado. A

nivel comercial, los tratamientos térmicos pueden servir como tratamientos cuarentenarios requeridos por ciertos mercados (Duarte-Sierra et al., 2020).

Los tratamientos térmicos se han utilizado en la tecnología postcosecha de frutas para la desinfestación de insectos, el control de la pudrición, el retraso de la maduración y la modificación de las respuestas de la fruta a otros estreses. El calor puede causar estrés en los tejidos del fruto con diferentes niveles de severidad, y el efecto depende de la temperatura, el tiempo de exposición, la especie e incluso la variedad. Se puede aplicar un tratamiento térmico leve a temperaturas no letales lo que provoca una suspensión reversible de la maduración y una reducción de la pudrición fúngica sin cambios en la calidad del fruto (Lurie & Pedreschi, 2014).

El tratamiento térmico afecta varios aspectos de la maduración del fruto, como la producción de etileno y la degradación de la pared celular, a través de cambios en la expresión genética y la síntesis de proteínas (Lurie, 1998). Al aplicar un estrés térmico, la expresión de la mayoría de los genes relacionados con el mantenimiento y la maduración disminuye y aumenta la expresión de los genes correspondientes a las proteínas de choque térmico (HSP). Además, el choque térmico puede inducir un incremento en ROS, seguidas de la producción de captadores de radicales de oxígeno como las enzimas superóxido dismutasas (SOD), peroxidasas (POD) y catalasas (CAT) (Vicente et al., 2006).

Los principales resultados de las referencias más relevantes sobre el efecto del estrés abiótico a bajas y altas temperaturas aplicado en postcosecha de frutas y vegetales sobre la acumulación de compuestos bioactivos, se resumen en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Resultados de estudios sobre el efecto del estrés abiótico a bajas y altas temperaturas aplicado en postcosecha de frutas y vegetales sobre la acumulación de compuestos bioactivos.

Table 1. Results of studies on the effect of abiotic stress at low and high temperatures applied in postharvest of fruits and vegetables on the accumulation of bioactive compounds.

Producto	Estrés inducido	Principales resultados	Referencia
Pomelo ‘Star Ruby’ (<i>Citrusparadisi</i> Macf.)	Baja temperatura: almacenamiento a 11, 2 °C y acondicionamiento a 16 °C por 7 días antes de almacenar a 2 °C.	A 11 °C aumento de carotenoides (5 %) y flavonoides (12 %) después de 16 semanas; ácido ascórbico sin variación por 8 semanas.	Chaudhary et al. (2014).
Papaya (<i>Carica papaya</i> L.) variedad Maradol	Baja temperatura: almacenamiento a 5 y 14 °C. Irradiación: Fruta entera, UV-C a 1,48 kJ/m ² por 3 min.	Flavonoides: aumento de 2,5 % en pulpa y 26 % en cáscara, para fruta irradiada y almacenada a 14 °C	Rivera-Pastrana et al. (2014).
Papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	Baja temperatura: almacenamiento a 10 y 20 °C por 168 h. Daño físico: Papas con corte de pastel (rebanadas de 3 m, con cortes perpendiculares).	Ácido clorogénico (CGA): aumento de 1923 % en papas cortadas y almacenadas a 20 °C durante 120 h vs el control (papa entera). CGA: aumento de 144,6 % en papas cortadas al pasar de 10 a 20 °C durante 96 h.	Torres-Contreras & Jacobo-Velázquez (2021).
Fresas (<i>Fragaria ananassa</i> , cv. Selva),	Tratamiento térmico: aire caliente (45 °C, 3 h), seguido de almacenamiento a 0 °C durante 0, 7 o 14 días y luego 2 días a 20 °C.	Capacidad antioxidante: aumento de 27 % a los 7 días. Ácido ascórbico: aumento de 22 % a los 7 días.	Vicente et al. (2006).
Fresas (<i>Fragaria ananassa</i> Duch. “Sonata”)	Tratamiento térmico: inmersión con agua caliente (35 y 45 °C a 5 o 10 min), seguido de almacenamiento 4 °C por 9 días y luego 3 días a 16°C.	Antocianinas: aumento de 154 % para tratamiento 45 °C por 5 min y almacenado por 12 días. Actividad antioxidante: no hubo diferencias significativas a 12 d.	Caleb et al. (2016).
Floretes de brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. Italica)	Tratamiento térmico: aire caliente húmedo, LT: 41 °C por 180 min. HT: 47 °C por 12 min.	ORAC: aumento de 37,4 % para HT. Ácido ascórbico, fenoles totales, flavonoides: no hubo diferencias significativas entre tratamientos.	Duarte-Sierra et al. (2017).

Efecto del almacenamiento a bajas temperaturas

Para el pomelo ‘Star Ruby’ (*Citrus paradisi* Macf.) se evaluó la influencia de tres condiciones de almacenamiento: a 11 °C, 2 °C y el acondicionamiento a baja temperatura (CD: 7 días a 16 °C antes del almacenamiento en frío a 2 °C) sobre los compuestos bioactivos. Las frutas a 11 °C no mostraron daños por frío; mientras que los frutos a 2 °C presentaron el mayor daño por frío. El almacenamiento a 11 °C y el CD en el pomelo provocaron un aumento de en el contenido de carotenoides y flavonoides (5 %-12 %) después de 16 semanas; además, el ácido ascórbico se logró mantener durante 8 semanas. El estudio concluye que un tratamiento de acondicionamiento (16 °C antes del almacenamiento en frío a 2 °C) permite reducir el daño por frío. Además, este tratamiento mantuvo el sabor y ciertos compuestos bioactivos de los pomelos durante el almacenamiento prolongado a baja temperatura. Sin embargo, para un período de almacenamiento corto, una temperatura de 11 °C resulta más efectiva (Chaudhary et al., 2014).

Para la papaya (*Carica papaya* L.) variedad Maradol se investigó el efecto del tratamiento de irradiación UV-C (1,48 kJ/m²) junto con bajas temperaturas de almacenamiento (5 y 14 °C) sobre los compuestos bioactivos, enzimas antioxidantes y la actividad reductora de radicales libres. Se observó un efecto positivo del almacenamiento en frío (5 °C) en la pulpa de la papaya, ya que el contenido de flavonoides (13 %), la actividad enzimática de CAT (457 %) y SOD (140 %) aumentaron al pasar de 14 a 5 °C, para muestras no irradiadas y almacenadas por 15 días. El sistema antioxidante de la papaya se activó mediante la irradiación UV-C y el almacenamiento en frío, al aumentar el contenido fenólico y las actividades enzimáticas antioxidantes como respuesta de defensa contra el estrés oxidativo (Rivera-Pastrana et al., 2014).

Se determinó el efecto del estrés de corte (lesiones del tejido), el tiempo de almacenamiento (168 h) y la temperatura (10 °C y 20 °C) sobre la acumulación de compuestos fenólicos en los tubérculos de papa (*Solanum tuberosum*), incluido el ácido clorogénico (CGA) y sus isómeros. La mayor acumulación de CGA se observó en los cortes de pastel almacenados a 20 °C durante 120 h, y hubo un aumento de 1923 % en comparación con el control antes del almacenamiento. Después de 120 h de almacenamiento, la concentración de CGA comenzó a disminuir en las muestras almacenadas a 20 °C. Se evidenció que una temperatura más alta de almacenamiento (20 °C) acelera la acumulación de CGA, ya que la concentración de CGA en las papas cortadas y almacenadas a 20 °C durante 96 h mostraron un 144,6 % más de CGA en comparación con las muestras almacenadas a 10 °C durante el mismo tiempo de almacenamiento (Torres-Contreras & Jacobo-Velázquez, 2021).

Efecto de tratamientos a altas temperaturas

Para floretes de brócoli (*Brassica oleracea* var. Italica), se estudió el efecto de tratamientos térmicos con aire caliente húmedo aplicado sobre la calidad y la composición fitoquímica, durante el almacenamiento postcosecha a 4 °C. Los tratamientos térmicos a 41 °C durante 180 min (baja temperatura, LT) y 47 °C durante 12 min (alta temperatura, HT) retrasaron el amarillamiento del brócoli durante 21 días en comparación con el control, los cuales cambiaron de color después de 14 días. El contenido de clorofila también fue mayor en los floretes tratados con ambos tratamientos térmicos (LT y HT) (Duarte-Sierra et al., 2017).

En el estudio, la capacidad antioxidante total (ORAC) de los floretes de brócoli mejoró con el tratamiento HT, pero provocó una mayor pérdida de peso y la generación de malos olores, que afectan la calidad del producto. Los resultados indican que ambos tratamientos pueden mejorar el contenido de fitoquímicos en los floretes de brócoli durante el almacenamiento. Sin embargo, la aplicación de calor a 41 °C (LT) logró mantener de mejor manera la calidad del producto, aunque el contenido de clorofila fue menor al del tratamiento a 47 °C (HT) (Duarte-Sierra et al., 2017).

Para las fresas (*Fragaria ananassa* Duch. “Sonata”) se determinó el impacto de tratamientos térmicos por inmersión con agua caliente (35 y 45 °C a 5 o 10 min) sobre los atributos de calidad postcosecha. La concentración de antocianinas (154 %) fue mayor para las fresas sumergidas en agua caliente a 45 °C por 5 min después de 12 días de almacenamiento. Además, la degradación de la sacarosa fue menor ($p < 0,05$) para las fresas sumergidas en agua caliente a 45 °C durante 5 min. Se concluye que el tratamiento a 45 °C durante 5 min en combinación con el almacenamiento en frío a 4 °C mejora los atributos de apariencia y calidad bioquímica de las fresas (Caleb et al., 2016).

Para las fresas (*Fragaria ananassa* cv. Selva), se determinó la relación entre la aplicación de un tratamiento térmico y la modificación del metabolismo oxidativo del fruto. Las fresas se trataron con aire caliente (45 °C, 3 h). Los frutos tratados se almacenaron a 0 °C durante 0, 7 o 14 días, y luego durante 2 días a 20 °C. Se evaluó el efecto del tratamiento térmico sobre la acumulación de peróxido de hidrógeno y los mecanismos protectores antioxidantes. Las fresas tratadas tuvieron una mejor apariencia general y un menor aumento en la fuga de potasio, la tasa de respiración y la actividad pirogalol peroxidasa (POD), lo que indica un menor daño y alteración del tejido (Vicente et al., 2006).

En el estudio, las condiciones de calentamiento no dañinas provocaron un estrés moderado en las fresas que movilizó las respuestas antioxidantes. Las defensas antioxidantes de la fruta, como el ácido ascórbico (22 %), y la capacidad antioxidante total (27 %) aumentaron o se mantuvieron altas en la fruta tratada durante una semana de almacenamiento refrigerado. Además, la actividad de ascorbato peroxidasa (APX) y SOD, dos de las enzimas implicadas en la desintoxicación de las ROS, fue mayor en la fruta tratada con calor. Las principales diferencias entre la fruta control y la tratada no se observaron justo después del tratamiento, sino durante el almacenamiento, cuando la fruta estuvo expuesta a estrés secundario (Vicente et al., 2006).

Se encuentra una serie de temas comunes en la mayoría de los estudios reportados. Uno es que los cambios inducidos por las altas temperaturas persisten durante el almacenamiento, cuando el producto se coloca a baja temperatura después del estrés por calor. En el caso de exposiciones breves a altas temperaturas, los cambios moleculares pueden ocurrir incluso después de que haya finalizado el estrés por calor. Los cambios observados implican la acumulación de compuestos antioxidantes y cambios en la actividad enzimática (SOD, POD y CAT) como respuesta de defensa contra el estrés oxidativo.

Daño físico

El estrés abiótico puede alterar las vías metabólicas relacionadas con la biosíntesis de varios grupos de metabolitos secundarios, tales como fenoles, terpenos, y compuestos nitrogenados (Cisneros-Zevallos, 2003). Entre los efectos del estrés abiótico ocasionado por daño físico, resulta frecuente la acumulación de compuestos fenólicos antioxidantes, y la intensidad del daño se relaciona con la activación de la síntesis y la acumulación de los mismos (Heredía & Cisneros-Zevallos, 2009). Por ejemplo, el daño físico en lechuga roja (*Lactuca sativa*) está relacionado con un incremento en la concentración de ácidos fenólicos, así como antocianinas (Cisneros-Zevallos, 2003).

Los efectos del estrés abiótico responden a moléculas de señalización que inducen reacciones a nivel celular. Las ROS resultan determinantes como moléculas de señalización, y su concentración guarda relación con la intensidad de los efectos del estrés abiótico. Al aplicar daño físico, se ha planteado una interacción entre las ROS y el etileno que son producidos en forma simultánea, en donde el etileno induce la producción de ácido jasmónico, y las ROS tuvieron el mayor efecto en la acumulación de compuestos fenólicos. El etileno y el ácido jasmónico inducen la expresión de genes relacionados con la síntesis de diferentes metabolitos secundarios, y regulan la concentración de ROS (Cisneros-Zevallos & Jacobo-Velázquez, 2020).

La acumulación de ROS puede tener efectos tóxicos a nivel celular, y está relacionada con la apoptosis, según fue indicado en el apartado introductorio (Cisneros-Zevallos & Jacobo-Velázquez, 2020). Modelos hipotéticos que incluyen el rol de las ROS como determinante en la producción de compuestos fenólicos u otros metabolitos secundarios como consecuencia del estrés abiótico han sido propuestos (Jacobo-Velázquez et al., 2011; Becerra-Moreno et al., 2015; Jacobo-Velázquez et al., 2021). Se han observado efectos diversos del estrés abiótico por daño físico en diferentes productos, como se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Resultados de estudios sobre el efecto del estrés abiótico por daño físico aplicado en postcosecha de frutas y vegetales sobre la acumulación de compuestos bioactivos.

Table 2. Results of studies on the effect of abiotic stress due to physical damage applied in postharvest of fruits and vegetables on the accumulation of bioactive compounds.

Producto	Estrés inducido	Principales resultados	Referencia
Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	Daño físico: corte discos 3 mm de espesor, almacenamiento a temperatura ambiente por 2 días.	Fenoles totales: aumento de 117 %. Isocumarina: aumentó diez veces al aplicar daño físico en combinación con etileno.	Cisneros-Zevallos (2003).
Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	Daño físico: corte discos 3-4 mm, cuartos de disco y rallado, seguido de almacenamiento a 15 °C por 12 días. Aplicación de etileno.	Compuestos fenólicos: aumento dependiente de la intensidad del daño. Aumento en contenido de isocumarina al aplicar etileno.	Heredia & Cisneros-Zevallos (2009).
Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	Daño físico: corte discos 3-4 mm y almacenamiento 20 °C por 48 h, en aire o en condiciones de hiperoxia 80% O ₂ .	Fenoles totales: aumento de 287 % al aplicar daño físico por corte. Aumento de 349 % al combinar daño físico e hiperoxia.	Jacobo-Velázquez et al. (2011).
Brócoli (<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>Italica</i>)	Daño físico: corte en floretes y cuartos de florete, almacenado 20 °C por 24 h. En combinación con etileno o metil jasmonato.	Cambios en concentración de glucosinolatos y compuestos fenólicos específicos, efectos variables.	Villarreal-García et al. (2016).

En zanahoria (*Daucus carota*), la aplicación de daño físico produjo un aumento en la presencia de compuestos fenólicos (Cisneros-Zevallos, 2003). Este producto sometido a operaciones de corte en discos de 3-4 mm de espesor, seguidas de almacenamiento (48 h a 20 °C), mostró un incremento del 287 % en el contenido de fenoles totales. El incremento generado fue aún mayor (349 %) cuando el almacenamiento del producto cortado se dio en condiciones de hiperoxia con 80 % de oxígeno (Jacobo-Velázquez et al., 2011). El perfil de compuestos fenólicos generados en zanahoria por daño físico incluyó ácidos clorogénicos, dicafeolquínico y ferúlico, predominó el primero, y aumentó la concentración de los tres en el producto rallado (Heredia & Cisneros-Zevallos, 2009).

En zanahoria morada, el daño físico mediante corte en discos de 3 mm de espesor también llevó a un aumento en el contenido de fenoles totales, del 117 % (Cisneros-Zevallos, 2003). El estrés por daño físico ha mostrado ser necesario para activar las vías metabólicas conducentes a la acumulación de compuestos fenólicos en zanahoria, y el grado de acumulación posterior depende del tiempo y temperatura de almacenamiento, así como de la aplicación de otros tipos de estrés, como radiación UV-C, hiperoxia, o pérdida de agua (Jacobo-Velázquez & Cisneros-

Zevallos, 2018). El daño físico ha mostrado un mayor efecto en la acumulación de compuestos fenólicos al ser aplicado en combinación con otros tratamientos, como etileno o metil jasmonato, con aumentos de 176 y 210 %, respectivamente en zanahoria morada (Cisneros-Zevallos, 2003).

Al someter papa a diferentes intensidades de daño físico por corte, y almacenarla a 10 °C por 4 días, se observó un incremento de hasta 100 % en el contenido de compuestos fenólicos en papa rebanada. En tratamientos de daño físico más intensos, con mayor disminución de tamaño, se observó menor acumulación, e incluso disminución en el contenido de compuestos fenólicos, con presencia de isómeros de ácido clorogénico. A diferentes intensidades de daño físico y tiempo de almacenamiento, se detectó predominancia de diferentes isómeros, ácido clorogénico, ácido neo-clorogénico y ácido cripto-clorogénico (Torres-Contreras et al., 2014). La aplicación de daño físico a brócoli, reducido a floretes y cuartos de florete, y almacenado por 24 h a 20 °C, tuvo como resultado cambios en la concentración de glucosinolatos y compuestos fenólicos específicos. Los efectos fueron variables y dependieron del nivel de daño y la combinación con la aplicación de fitohormonas. Los floretes de brócoli almacenados en aire mostraron una concentración aumentada de ácido 3-O-cafeoilquinico, entre otros (Villarreal-García et al., 2016).

La aplicación de daño físico, si bien puede promover la acumulación de compuestos bioactivos, también puede generar efectos adversos en las características de calidad relacionadas con la aceptación sensorial del producto, tales como el color y el sabor (Jacobo-Velázquez et al., 2011). El grado de afectación de las características de calidad puede ser un condicionante de las posibilidades de desarrollo de alimentos funcionales a partir de materias primas con un mayor contenido de compuestos bioactivos inducido mediante la aplicación de estrés abiótico. La selección de un tipo de estrés o combinación de estreses que resulte apropiada para un producto puede también verse afectada por la síntesis de compuestos indeseables.

En zanahoria se observó un aumento en la concentración de isocumarina de 1,7 veces en el producto rallado, sin que la presencia de este compuesto alcanzara el nivel asociado con la detección de sabores amargos. Se ha planteado que la industria de vegetales precortados podría comercializar este producto con actividad antioxidante aumentada durante el almacenamiento (Heredia & Cisneros-Zevallos, 2009). En zanahoria morada, la aplicación de daño físico y etileno implicó, además de un importante incremento en fenoles totales, un aumento de diez veces en el nivel de isocumarina, que incidió en la presencia de sabor amargo (Cisneros-Zevallos, 2003).

Las condiciones de almacenamiento pueden incidir en la mayor o menor acumulación de sustancias bioactivas de interés. Se observó una menor acumulación de fenoles totales en zanahoria sometida a daño físico y almacenada en condiciones que favorecieron pérdida de humedad, relacionada con su transformación en lignina (Becerra-Moreno et al., 2015). Si bien la respuesta al estrés abiótico puede variar de un producto a otro, el uso de una alta humedad relativa en el almacenamiento parece estar justificado, dado que la síntesis de lignina y de suberina es una reacción normal del tejido vegetal ante el daño.

En papa, el efecto de tratamientos de daño físico por corte y almacenamiento posterior a 20 °C para favorecer la acumulación de ácido clorogénico, afectó el color, sabor y textura. Esto es una limitación a la posibilidad de uso de la papa tratada como materia prima para alimentos procesados (Torres-Contreras & Jacobo-Velázquez, 2021). La aplicación de niveles extremos de estrés abiótico, que generan fuerte deterioro en características de calidad del material vegetal, pero a la vez inducen una máxima acumulación de compuestos bioactivos, ha motivado el concepto de su potencial uso como biofactorías, para la extracción posterior de los compuestos deseables generados (Jacobo-Velázquez et al., 2011; Jacobo-Velázquez & Cisneros-Zevallos, 2018; Torres-Contreras et al., 2014; Torres-Contreras & Jacobo-Velázquez, 2021; Villarreal-García et al., 2016).

Irradiación

La exposición de tejidos vegetales a radiación UV-C y luz pulsada (20 y 40 kJ/m²) genera estrés abiótico, que estimula la síntesis de metabolitos secundarios como mecanismo de defensa, los que pueden mostrar actividad antioxidante y antimicrobiana.

Los principales resultados de las referencias más relevantes sobre el efecto del estrés abiótico por irradiación aplicado en postcosecha de frutas y vegetales sobre la acumulación de compuestos bioactivos se resumen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Resultados de estudios sobre el efecto del estrés abiótico por irradiación aplicado en postcosecha de frutas y vegetales sobre la acumulación de compuestos bioactivos.

Table 3. Results of studies on the effect of abiotic stress due to irradiation applied to postharvest fruits and vegetables on the accumulation of bioactive compounds.

Producto	Estrés inducido	Principales resultados	Referencia
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	Irradiación: radiación UV-C (1,0, 3,0, y 12,2 kJ/m ²), almacenamiento a temperatura ambiente por 8 días.	Aumento en el contenido de licopeno, fenoles totales, y capacidad antioxidante.	Bravo et al. (2012).
Uva (<i>Vitis vinifera</i> L.)	Irradiación: radiación UV-C (2,4 kJ/m ² por 3 min) y almacenamiento a 4 °C por 48 h. Radiación UV-C (4,1 kJ/m ² por 5 min) y almacenamiento a 4°C por 24 h.	Aumento en contenido de compuestos fenólicos. Aumento en antocianinas con la dosis de radiación más alta.	Crupi et al. (2013).
Mango (<i>Mangifera indica</i> L., cv. "Tommy Atkins")	Irradiación: radiación UV-C por 10 min y almacenamiento a 5 °C por 15 días.	Aumento en fenoles, flavonoides y capacidad antioxidante, disminución de β-caroteno y ácido ascórbico.	González-Aguilar et al. (2007).
Manzana (<i>Malus domestica</i> Borkh., cv. Aroma)	Irradiación: radiación UV-B/visible aplicada 12 h por día durante 10 días a 10 °C y 95-98 % H.R.	Aumento en antocianinas en la cáscara. La pulpa no mostró efectos de la radiación.	Hagen et al. (2007).
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	Irradiación: radiación UV-B en dosis de 10, 20, 40 y 80 kJ/m ² , almacenamiento a 14 °C, 95 % H.R., hasta 37 días.	Aumento en fenoles totales, flavonoides y capacidad antioxidante con las dosis de 20 y 40 kJ/m ² .	Liu et al. (2011).
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>) Manzana (<i>Malus domestica</i>)	Irradiación: radiación UV-C y luz pulsada (20 y 40 kJ/m ²) aplicada a fruto entero. Almacenamiento a temperatura ambiente por 21 días tomate y 28 días manzana.	Aumento en carotenoides totales, licopeno y fenoles totales en ambas frutas durante el almacenamiento.	Pataro et al. (2015).
Papaya (<i>Carica papaya</i>)	Irradiación: radiación UV-C (1,48 kJ/m ²) y almacenamiento a 14 °C y 5°C.	Aumento en flavonoides a 14 °C. Aumento en contenido fenólico y actividad antioxidante a 5 °C.	Rivera-Pastrana et al. (2014).
Pera roja china (<i>Pyrus pyrifolia</i> Nakai)	Irradiación: radiación UV-B/visible durante el tiempo de almacenamiento (0 a 240 h, a 27 y 17 °C)	Aumento en antocianinas a 27 °C.	Zhang et al. (2012).

La exposición de tomate y manzana enteros a estos tipos de radiación incrementó la síntesis de compuestos con propiedades antioxidantes durante el almacenamiento. Se evidenció una mayor presencia de carotenoides, licopeno y fenoles totales, sin afectar en forma significativa sus propiedades fisicoquímicas y sensoriales, requiriéndose menor tiempo de exposición al usar luz pulsada (Pataro et al., 2015).

Al tratar tomate (*Lycopersicon esculentum*) verde maduro con radiación UV-C (1,0 a 12,2 kJ/m²) y almacenarlo a temperatura ambiente (8 días), la hormesis inducida llevó a un aumento en el contenido de licopeno, fenoles totales, y capacidad antioxidante, a la vez que se observó una disminución del contenido de β -caroteno (Bravo et al., 2012). El tomate verde maduro mostró alta firmeza, retraso en el desarrollo de color, y aumento en fenoles totales, flavonoides y capacidad antioxidante durante el almacenamiento a 14 °C y 95 % H.R., luego de ser tratado con radiación UV-B en dosis de 20 o 40 kJ/m². El contenido de ácido ascórbico disminuyó, y dosis elevadas (80 kJ/m²) afectaron en forma negativa la textura y color (Liu et al., 2011).

El someter papaya verde madura a radiación UV-C (1,48 kJ/m²) y almacenarla a 14 °C incrementó ($p < 0,05$) el contenido de flavonoides en piel y pulpa. La radiación y el almacenamiento en frío (5 °C) incrementaron el contenido fenólico y la actividad enzimática antioxidante como una respuesta defensiva ante el estrés oxidativo (Rivera-Pastrana et al., 2014). En uva globo roja (*Vitis vinifera* L.) la aplicación de radiación UV-C triplicó el contenido de algunos compuestos fenólicos al aplicar 2,4 kJ/m² (3 min) y almacenar a 4 °C por 48 h, e incrementó el contenido de antocianinas con el uso de 4,1 kJ/m² (5 min) luego de 24 h a esa misma temperatura (Crupi et al., 2013).

Se ha utilizado la aplicación de radiación UV-B/visible durante el tiempo de almacenamiento (0 a 240 h) para promover la acumulación de antocianinas y así mejorar el color de la cáscara en pera roja china (*Pyrus pyrifolia* Nakai). Este efecto se vio favorecido por una temperatura de 27 °C en comparación con una de 17 °C (Zhang et al., 2012). En manzana (*Malus domestica* Borkh., cv. Aroma) la exposición postcosecha a radiación UV-B/visible no tuvo efectos en la pulpa del fruto. El color de la cáscara sí evidenció una mejora relacionada con un incremento en el contenido de antocianinas (Hagen et al., 2007).

La aplicación de radiación UV-C a fruta precortada llevó a un incremento en el contenido de compuestos antioxidantes, como polifenoles y flavonoides, en banano “pisang mas” (*Musa paradisiaca*) y guayaba (*Psidium guajava* L.), con tiempos de exposición entre 10 y 30 min. En el caso de piña (*Ananas comosus* Merr) se observó un aumento en el contenido de flavonoides con 10 min de exposición. Los tratamientos aplicados (con una dosis promedio de 2,2 kJ/m²) ocasionaron una disminución del contenido de vitamina C en los tres productos (Alothman et al., 2009).

Al someter mango precortado (*Mangifera indica* L., cv. “Tommy Atkins”) a la aplicación de radiación UV-C por 10 min, previo a su almacenamiento por 15 días a 5 °C, se indujo una acumulación de fenoles y flavonoides. Se observó un aumento en la capacidad antioxidante, mientras que disminuyó el contenido de β -caroteno y ácido ascórbico a lo largo del almacenamiento (González-Aguilar et al., 2007). A nivel industrial, la aplicación de radiación UV puede ser incorporada en una línea de proceso en forma sencilla (Cisneros-Zevallos, 2003), lo que representa una ventaja en la posibilidad de integrar operaciones unitarias o combinar con la aplicación de otros tipos de estrés abiótico.

Adición de sustancias químicas

El estrés abiótico está relacionado con factores externos que incluyen los compuestos químicos, salinidad, e iones metálicos. La elicitación se define como el uso de sustancias químicas que inducen un cambio fisiológico en las plantas. Estos cambios activan vías metabólicas como mecanismos de defensa similares a los que existen cuando la planta responde a infecciones patógenas o a la estimulación ambiental dando lugar a la síntesis de fitoquímicos que pueden ser beneficiosos para la salud (Ochoa-Velasco et al., 2017). Se han observado efectos diversos del estrés abiótico por adición de sustancias químicas en diferentes productos, como se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Resultados de estudios sobre el efecto del estrés abiótico por adición de sustancias químicas aplicado en postcosecha de frutas y vegetales sobre la acumulación de compuestos bioactivos.

Table 4. Results of studies on the effect of abiotic stress by elicitation applied in postharvest of fruits and vegetables on the accumulation of bioactive compounds.

Producto	Estrés inducido	Principales resultados	Referencia
Cereza dulce (<i>Prunus avium</i> L.)	Químico: salicilato de metilo (MeSA): 0,1 mol/m ³ y 1 mol/m ³ .	Actividad antioxidante total y antocianinas totales: aumento de un 100 %. Fenólicos totales: aumento de un 30 %.	Giménez et al. (2016).
Guayaba (<i>Psidium guajava</i> L. cv “Banati”)	Químico: quitosano/ polivinilpirrolidina (CS/PVP) combinado con ácido salicílico (SA): 0 mol/m ³ , 1 mol/m ³ , y 2 mol/m ³ .	CS/PVP-SA 2 mol/m ³ mantenimiento del contenido de fenólicos totales.	Lo’ay & Taher (2018).
Naranja (<i>Citrus sinensis</i> L. Osbeck cv. “Moro”)	Químico: salicilato de metilo (MeSA): 0,1 mol/m ³	Actividad antioxidante: no hubo diferencias significativas.	Habibi et al. (2020).
Guayaba (<i>Psidium guajava</i> L.)	Químico: ácido ascórbico (AA): 0 mg/kg, 50 mg/kg, 100 mg/kg, 200 mg/kg.	Fenólicos totales: aumento de un 60 % (200 mg/kg de AA).	Azam et al. (2021).
Naranja (<i>Citrus sinensis</i>)	Químico: ácido salicílico: 1 mol/m ³ , durante 35 días.	Actividad antioxidante total: aumento de un 60 % al final del almacenamiento.	Amiri et al. (2021).

Las aplicaciones del ácido salicílico (SA) y sus derivados, incluidos el acetilsalicilato (ASA) y el salicilato de metilo (MeSA), se han utilizado para conservar frutas y verduras. Pueden mejorar la calidad del almacenamiento, disminuir la producción de etileno y la tasa de respiración (Chen et al., 2023; Giménez et al., 2016; Lo’ay & Taher, 2018). El estrés salino (iónico y no iónico) también ha sido reportado en la literatura (Amjad et al., 2015), así como el uso de ácido ascórbico (Azam et al., 2021; Mellidou et al., 2021).

La mayoría de los tratamientos químicos postcosecha se aplican para reducir la incidencia de patógenos en los productos. Algunos ejemplos son soluciones como el hipoclorito sódico (NaOCl) y el H₂O₂, o aplicaciones gaseosas con dióxido de azufre (SO₂) y ozono (O₃) (Duarte-Sierra et al., 2020). Una buena gestión del estrés de la planta con respecto a la activación de enzimas clave de la vía fitoquímica durante los tratamientos de manipulación postcosecha de productos frescos puede desencadenar un cambio distintivo de los fitoquímicos contenidos que puede promover su efecto beneficioso (Syukri & Chamel, 2021).

Ácido salicílico y sus derivados

Las aplicaciones del ácido salicílico (SA) y sus derivados, incluidos el acetilsalicilato (ASA) y el salicilato de metilo (MeSA), se han utilizado para conservar frutas y verduras. Se recomienda la pulverización precosecha como método óptimo por su rápida eficacia de absorción de los salicilatos y el menor tiempo de manipulación postcosecha. Se ha demostrado que las aplicaciones de SA y sus derivados mejoran la calidad del almacenamiento al disminuir la producción de etileno y la tasa de respiración, suprimen el ablandamiento y el cambio de color de la fruta, mantienen los azúcares, los ácidos orgánicos y el aroma, inhiben el daño por frío, promueven la resistencia a patógenos y activan el sistema antioxidante (Chen et al., 2023).

El efecto del tratamiento con SA y sus derivados sobre la fruta depende de la interacción entre la concentración de salicilatos y el tiempo, y varía según la variedad de fruta. Las frutas con cáscara no comestible pueden tolerar

una mayor concentración y un mayor tiempo de tratamiento, en comparación con las frutas comestibles sin cáscara (Chen et al., 2023).

El efecto de la aplicación postcosecha de salicilato de metilo (MeSA) en dos concentraciones (0,1 mol/m³ y 1 mol/m³) sobre los atributos de calidad, compuestos bioactivos y actividad antioxidante en cereza dulce (*Prunus avium* L.), fue evaluado por Giménez et al. (2016). Los tratamientos con MeSA fueron eficaces en la reducción de la tasa de respiración, la pérdida de peso, ablandamiento, pérdidas totales de acidez y el aumento del índice de maduración durante el almacenamiento a 2 °C durante 20 días en comparación con la fruta control no tratada. Los fenoles totales, antocianinas totales y la actividad antioxidante total (TAA) en el extracto hidrofílico (H-TAA) se mantuvieron en concentraciones más altas al final del almacenamiento en la fruta tratada.

Se encontraron altas correlaciones entre el H-TAA y las concentraciones de fenoles y antocianinas y entre el TAA lipofílico (L-TAA) y los carotenoides totales. Los resultados demostraron que el MeSA aplicado en forma de vapores postcosecha es una herramienta eficaz y respetuosa con el medio ambiente para mantener la calidad de las cerezas dulces durante el almacenamiento, con una mayor concentración de compuestos bioactivos y actividad antioxidante. La fruta tratada mostró un menor deterioro a través de la reducción de la tasa de respiración, pérdida de peso, ablandamiento y pérdida de TAA.

El MeSA también fue capaz de mantener el contenido de compuestos bioactivos (fenólicos totales, antocianinas y carotenoides) y la actividad antioxidante en concentraciones más altas con respecto a la fruta control al final del período de almacenamiento. Los resultados indicaron que los atributos de calidad óptimos podrían mantenerse hasta 10 días de almacenamiento en frío (basado en la firmeza, TAA, índice de maduración, bioactivos y actividad antioxidante) en la fruta control. Este período podría extenderse hasta 20 días en la fruta tratada con MeSA, con la concentración de 0,1 mol/m³ (Giménez et al., 2016).

El efecto del quitosano/polivinilpirrolidina (CS/PVP) combinado con ácido salicílico (SA) en diferentes concentraciones (0 mol/m³, 1 mol/m³, y 2 mol/m³) en frutos de guayaba (*Psidium guajava* L. cv “Banati”) fue estudiado por Lo’ay & Taher (2018). Los frutos fueron cosechados en tres etapas de desarrollo de madurez de color (M1; verde, M2; verde-amarillo, y M3; amarillo). Las frutas fueron recubiertas por biopolímero consolidado CS/PVP-SA para minimizar las manchas de pardeamiento durante la vida útil a temperatura ambiente (27 ± 1 °C y humedad relativa del aire 48 ± 2 %) durante quince días.

Las mediciones se estimaron cada tres días intermedios para evaluar los atributos de calidad físicos y químicos, la tasa de pérdida de agua, el ángulo de matiz del color de la piel de la fruta (h°), el índice de pardeamiento de la piel de la fruta y la firmeza de la fruta, los sólidos solubles totales (SSC), la acidez del fruto (TA) y la relación SSC/TA. Se estudiaron los parámetros de pardeamiento, como los compuestos fenólicos totales (TP), la polifenoloxidasas y la fenilalanina amoniolasa. Además, se determinaron las actividades de enzimas de degradación de la pared celular, como la celulasa, la lipoxigenasa y la pectinasa.

Los cambios en el pardeamiento y en las actividades de las enzimas de degradación de la pared celular durante la vida útil estuvieron relacionados con la presencia de SA en el biopolímero (CS/PVP). El tratamiento CS/PVP-SA podría mejorar las actividades antioxidantes. El tratamiento de los frutos de guayaba con CS/PVP-SA 2 mol/m³ después de la cosecha puede ser considerado como una herramienta para reducir el pardeamiento en la piel de la fruta (Lo’ay & Taher, 2018).

Ácido ascórbico

El ácido ascórbico (AA) es un fitonutriente polifacético esencial tanto para la dieta humana como para el crecimiento de las plantas. Los niveles óptimos de acumulación de AA combinados con una homeostasis redox equilibrada son necesarios para el desarrollo normal de las plantas y la respuesta de defensa ante estímulos ambientales adversos. La mejora de los niveles de AA en frutas atrae una atención considerable, no sólo para mejorar su valor nutricional, sino también para estimular la tolerancia al estrés (Mellidou et al., 2021).

Los efectos del ácido ascórbico (AA) en frutos maduros de guayaba para mejorar su vida útil y calidad fueron evaluados por Azam et al. (2021). Se utilizaron cuatro concentraciones diferentes de AA, a saber, 0 mg/kg, 50 mg/kg, 100 mg/kg, 200 mg/kg, para tratar los frutos de guayaba durante cinco minutos, seguido de un almacenamiento a 25 ± 2 °C y ≥ 80 % de humedad relativa durante 12 días. Se estudiaron los cambios fisiológicos y bioquímicos, junto con las actividades enzimáticas específicas para catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD) y peroxidasa (POD).

Los resultados revelaron que los tratamientos con ácido ascórbico redujeron significativamente la pérdida de peso fisiológica (PWL), el porcentaje de decaimiento del fruto y suprimieron el pH y la relación azúcar/ácido respecto a los frutos control. El contenido de sólidos solubles, acidez total, azúcar total, vitamina C y el contenido fenólico total fueron mayores en los frutos tratados con 200 mg/kg de AA y mantuvieron una mayor calidad de consumo que los frutos de control. Las actividades SOD, POD y CAT se observaron más altas en las frutas tratadas con 200 mg/kg de AA que en el control. Los resultados demuestran que la aplicación de 200 mg/kg de AA tiene potencial para mejorar los atributos de calidad de la guayaba.

La diversidad de estudios consultados muestra que la aplicación de sustancias químicas impacta el contenido de compuestos bioactivos. En las cerezas tratadas con MeSA, la actividad antioxidante total aumentó a lo largo del almacenamiento con concentraciones finales de un 100 % más. En las antocianinas totales, los niveles en cosecha aumentaron tanto en las cerezas control como en las tratadas en un 100 % más. Los niveles de fenólicos totales fueron un 30 % mayores en las cerezas tratadas con MeSA que en los controles (Giménez et al., 2016). El contenido fenólico total fue mayor en un 60 % en los frutos de guayaba tratados con 200 mg/kg de AA que en los frutos de control (Azam et al., 2021).

Conclusiones

La información disponible sobre investigaciones relacionadas con los efectos del estrés abiótico inducido en frutas y vegetales en la fase de postcosecha, mediante la aplicación de tratamientos de daño físico, temperatura alta o baja, aplicación de sustancias químicas e irradiación, da evidencia de un efecto en la acumulación de compuestos bioactivos. Los compuestos acumulados y la magnitud del aumento observado después de la aplicación de los tratamientos que inducen estrés abiótico, seguidos de almacenamiento con duración y condiciones diferentes, presentaron grandes variaciones. Los efectos generados dependieron de la naturaleza del producto, el grado de desarrollo, la composición inicial, el tipo de tratamiento y su intensidad, y las condiciones del almacenamiento posterior.

La aplicación de tratamientos que inducen estrés abiótico en postcosecha conlleva, además de una posible acumulación de compuestos bioactivos, efectos en otras características que, según la intensidad, pueden dificultar el uso posterior del material como alimento. Por ello, el estudio de los tratamientos que permitan una acumulación importante de sustancias de interés en un determinado producto, que luego pueda ser utilizado como una materia prima mejorada para el desarrollo de alimentos funcionales, deberá contemplar también los efectos sobre variables de calidad relevantes. Deberá considerarse también el efecto del tiempo y condiciones de almacenamiento sobre la concentración de las sustancias de interés, y el posible efecto de condiciones de procesamiento sobre su estabilidad.

Agradecimientos

Las autoras expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por su financiamiento.

Referencias

- Alothman, M., Bhat, R., & Karim, A. A. (2009). UV radiation-induced changes of antioxidant capacity of fresh-cut tropical fruits. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10(4), 512–516. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.03.004>
- Amiri, S., Nicknam, Z., Radi, M., Sayadi, M., Bagheri, F., Karimi Khorrami, N., & Abedi, E. (2021). Postharvest quality of orange fruit as influenced by salicylic acid, acetic acid, and carboxymethyl cellulose coating. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15, 3912–3930. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00966-y>.
- Amjad, M., Akhtar, S. S., Yang, A., Akhtar, J., & Jacobsen, S. E. (2015). Antioxidative response of quinoa exposed to iso-osmotic, ionic and non-ionic salt stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201(6), 452–460. <https://doi.org/10.1111/jac.12140>
- Azam, M., Hameed, L., Qadri, R., Ejaz, S., Aslam, A., Khan, M. I., Shen, J., Zhang, J., Nafees, M., Ahmad, I., Ghani, M. A., Chen, J., & Anjum, N. (2021). Postharvest ascorbic acid application maintained physiological and antioxidant responses of guava (*Psidium guajava* L.) at ambient storage. *Food Science and Technology*, 41(3), 748–754. <https://doi.org/10.1590/fst.19820>
- Becerra-Moreno, A., Redondo-Gil, M., Benavides, J., Nair, V., Cisneros-Zevallos, L., & Jacobo-Velázquez, D. A. (2015). Combined effect of water loss and wounding stress on gene activation of metabolic pathways associated with phenolic biosynthesis in carrot. *Frontiers in Plant Science*, 6, Article 837. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00837>
- Ben-Yehoshua, S., Barak, E., & Shapiro, B. (1987). Postharvest curing at high temperatures reduces decay of individually sealed lemons, pomelos, and other citrus fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 112(4), 658–663. <https://doi.org/10.21273/jashs.112.4.658>
- Bravo, S., García-Alonso, J., Martín-Pozuelo, G., Gómez, V., Santaella, M., Navarro-González, I., & Periago, M. J. (2012). The influence of post-harvest UV-C hormesis on lycopene, β -carotene, and phenolic content and antioxidant activity of breaker tomatoes. *Food Research International*, 49(1), 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.07.018>
- Caleb, O. J., Wegner, G., Rolleczeck, C., Herppich, W. B., Geyer, M., & Mahajan, P. V. (2016). Hot water dipping: Impact on postharvest quality, individual sugars, and bioactive compounds during storage of ‘Sonata’ strawberry. *Scientia Horticulturae*, 210, 150–157. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2016.07.021>
- Carvajal-Campos, P., & Jiménez, V. (2021). Ingeniería genética contra estrés abiótico en cultivos neotropicales: osmolitos, factores de transcripción y CRISPR/Cas9. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 23(2), 47–66. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v23n2.88487>
- Chaudhary, P. R., Jayaprakasha, G. K., Porat, R., & Patil, B. S. (2014). Low temperature conditioning reduces chilling injury while maintaining quality and certain bioactive compounds of “Star Ruby” grapefruit. *Food Chemistry*, 153, 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.043>
- Chen, C., Sun, C., Wang, Y., Gong, H., Zhang, A., Yang, Y., Guo, F., Cui, K., Fan, X., & Li, X. (2023). The preharvest and postharvest application of salicylic acid and its derivatives on storage of fruit and vegetables: A review. *Scientia Horticulturae*, 312, Article 111858. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111858>
- Cisneros-Zevallos, L. (2003). The use of controlled postharvest abiotic stresses as a tool for enhancing the nutraceutical content and adding-value of fresh fruits and vegetables. *Journal of Food Science*, 68(5), 1560–1565. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb12291.x>

- Cisneros-Zevallos, L., & Jacobo-Velázquez, D. A. (2020). Controlled abiotic stresses revisited: From homeostasis through hormesis to extreme stresses and the impact on nutraceuticals and quality during pre- and postharvest applications in horticultural crops. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(43), 11877–11879. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c06029>
- Crupi, P., Pichierrri, A., Basile, T., & Antonacci, D. (2013). Postharvest stilbenes and flavonoids enrichment of table grape cv Redglobe (*Vitis vinifera* L.) as affected by interactive UV-C exposure and storage conditions. *Food Chemistry*, 141(2), 802–808. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.03.055>
- Delate, K. M., & Brecht, J. K. (1989). Quality of tropical sweet potatoes exposed to controlled-atmosphere treatments for postharvest insect control. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 114(6), 963–968. <https://doi.org/10.21273/jashs.114.6.963>
- Duarte-Sierra, A., Forney, C. F., Michaud, D., Angers, P., & Arul, J. (2017). Influence of hormetic heat treatment on quality and phytochemical compounds of broccoli florets during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 128, 44–53. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2017.01.017>
- Duarte-Sierra, A., Tiznado-Hernández, M. E., Jha, D. K., Janmeja, N., & Arul, J. (2020). Abiotic stress hormesis: An approach to maintain quality, extend storability, and enhance phytochemicals on fresh produce during postharvest. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 3659–3682. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12628>
- Giménez, M. J., Valverde, J. M., Valero, D., Zapata, P. J., Castillo, S., & Serrano, M. (2016). Postharvest methyl salicylate treatments delay ripening and maintain quality attributes and antioxidant compounds of “Early Lory” sweet cherry. *Postharvest Biology and Technology*, 117, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.02.006>
- González-Aguilar, G. A., Villegas-Ochoa, M. A., Martínez-Téllez, M. A., Gardea, A. A., & Ayala-Zavala, J. F. (2007). Improving antioxidant capacity of fresh-cut mangoes treated with UV-C. *Journal of Food Science*, 72(3), 197–202. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00295.x>
- Habibi, F., Ramezani, A., Guillén, F., Serrano, M., & Valero, D. (2020). Blood oranges maintain bioactive compounds and nutritional quality by postharvest treatments with γ -aminobutyric acid, methyl jasmonate or methyl salicylate during cold storage. *Food Chemistry*, 306, Article 125634. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125634>
- Hagen, S. F., Borge, G. I. A., Bengtsson, G. B., Bilger, W., Berge, A., Haffner, K., & Solhaug, K. A. (2007). Phenolic contents and other health and sensory related properties of apple fruit (*Malus domestica* Borkh., cv. Aroma): Effect of postharvest UV-B irradiation. *Postharvest Biology and Technology*, 45(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.02.002>
- Heredia, J. B., & Cisneros-Zevallos, L. (2009). The effect of exogenous ethylene and methyl jasmonate on pal activity, phenolic profiles and antioxidant capacity of carrots (*Daucus carota*) under different wounding intensities. *Postharvest Biology and Technology*, 51(2), 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.07.001>
- Jacobo-Velázquez, D. A., & Cisneros-Zevallos, L. (2018). An alternative use of horticultural crops: Stressed plants as biofactories of bioactive glucosinolate and phenolic compounds. *Acta Horticulturae*, 1194, 947–952. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1194.134>
- Jacobo-Velázquez, D. A., Martínez-Hernández, G., Rodríguez, S. D. C., Cao, C.-M., & Cisneros-Zevallos, L. (2011). Plants as biofactories: Physiological role of reactive oxygen species on the accumulation of phenolic antioxidants in carrot tissue under wounding and hyperoxia stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(12), 6583–6593. <https://doi.org/10.1021/jf2006529>

- Jacobo-Velázquez, D. A., Santana-Gálvez, J., & Cisneros-Zevallos, L. (2021). Designing next-generation functional food and beverages: Combining nonthermal processing technologies and postharvest abiotic stresses. *Food Engineering Reviews*, *13*, 592–600. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09244-x>/Published
- Liu, C., Han, X., Cai, L., Lu, X., Ying, T., & Jiang, Z. (2011). Postharvest UV-B irradiation maintains sensory qualities and enhances antioxidant capacity in tomato fruit during storage. *Postharvest Biology and Technology*, *59*(3), 232–237. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.09.003>
- Lo'ay, A. A., & Taher, M. A. (2018). Influence of edible coatings chitosan/PVP blending with salicylic acid on biochemical fruit skin browning incidence and shelf life of guava fruits cv. 'Banati'. *Scientia Horticulturae*, *235*, 424–436. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.008>
- Lurie, S. (1998). Postharvest heat treatments. *Postharvest Biology and Technology*, *14*(3), 257–269. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00045-3)
- Lurie, S., & Pedreschi, R. (2014). Fundamental aspects of postharvest heat treatments. *Horticulture Research*, *1*, Article 14030. <https://doi.org/10.1038/hortres.2014.30>
- Mellidou, I., Koukounaras, A., Kostas, S., Patelou, E., & Kanellis, A. K. (2021). Regulation of vitamin C accumulation for improved tomato fruit quality and alleviation of abiotic stress. *Genes*, *12*(5), Article 694. <https://doi.org/10.3390/genes12050694>
- Méndez Adorno, J. M. (2012). *Suspensión del riego en caña de azúcar durante la maduración: efecto en el rendimiento y calidad del jugo* [Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados]. Red de Repositorios Latinoamericanos. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/7506301?show=full>
- Nunes, C., García, J. M., Manso, T., Torres, R., Olmo, M., & Usall, J. (2007). Effects of postharvest curing treatment on quality of citrus fruit. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, *66*(1), 213–220. <https://doi.org/10.2478/v10032-007-0024-6>
- Ochoa-Velasco, C. E., Avila-Sosa, R., Navarro-Cruz, A. R., López-Malo, A., & Palou, E. (2017). Chapter 9 - Biotic and abiotic factors to increase bioactive compounds in fruits and vegetables. In A. M. Grumezescu, & A. M. Holban (Eds.), *Food Bioconversion* (Vol. 2, pp. 317–349). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811413-1.00009-7>
- Pataro, G., Donsi, G., & Ferrari, G. (2015). Post-harvest UV-C and PL irradiation of fruits and vegetables. *Chemical Engineering Transactions*, *44*, 31–36. <https://doi.org/10.3303/CET1544006>
- 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>
- Rivera-Pastrana, D. M., Gardea, A. A., Yahia, E. M., Martínez-Téllez, M. A., & González-Aguilar, G. A. (2014). Effect of UV-C irradiation and low temperature storage on bioactive compounds, antioxidant enzymes and radical scavenging activity of papaya fruit. *Journal of Food Science and Technology*, *51*(12), 3821–3829. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-0942-x>
- Sugri, I., Maalekuu, B. K., Gaveh, E., & Kusi, F. (2019). Compositional and shelf-life indices of sweet potato are significantly improved by pre-harvest dehaulming. *Annals of Agricultural Sciences*, *64*(1), 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2019.03.002>
- Syukri, D., & Chamel, A. (2021). The enhancement of phytochemical compounds in fresh produces by abiotic stress application at postharvest handling stage. *Andalasian International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, *2*(1), 1–19. <http://aijans.lppm.unand.ac.id/index.php/aijans/article/view/11>

- Torres-Contreras, A. M., & Jacobo-Velázquez, D. A. (2021). Effects of wounding stress and storage temperature on the accumulation of chlorogenic acid isomers in potatoes (*Solanum tuberosum*). *Applied Sciences*, *11*(13), Article 8891. <https://doi.org/10.3390/app11198891>
- Torres-Contreras, A. M., Nair, V., Cisneros-Zevallos, L., & Jacobo-Velázquez, D. A. (2014). Plants as biofactories: Stress-induced production of chlorogenic acid isomers in potato tubers as affected by wounding intensity and storage time. *Industrial Crops and Products*, *62*, 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.018>
- Vicente, A. R., Martínez, G. A., Chaves, A. R., & Civello, P. M. (2006). Effect of heat treatment on strawberry fruit damage and oxidative metabolism during storage. *Postharvest Biology and Technology*, *40*(2), 116–122. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2005.12.012>
- Villarreal-García, D., Nair, V., Cisneros-Zevallos, L., & Jacobo-Velázquez, D. A. (2016). Plants as biofactories: Postharvest stress-induced accumulation of phenolic compounds and glucosinolates in broccoli subjected to wounding stress and exogenous phytohormones. *Frontiers in Plant Science*, *7*, Article 45. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.00045>
- Zhang, D., Yu, B., Bai, J., Qian, M., Shu, Q., Su, J., & Teng, Y. (2012). Effects of high temperatures on UV-B/visible irradiation induced postharvest anthocyanin accumulation in “Yunhongli No. 1” (*Pyrus pyrifolia* Nakai) pears. *Scientia Horticulturae*, *134*, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.10.025>