



## Generación de aromas y sabores en alimentos: una revisión de sus principales rutas metabólicas

### Generation of Aromas and Flavors in Foods: A Review of Their Main Metabolic Pathways

---

**Cristel Santamaría**

<https://orcid.org/0009-0000-6120-4224>

**Dionicio Rodríguez**

<https://orcid.org/0009-0000-8037-7067>

**Andrea Polo**

<https://orcid.org/0009-0003-4292-6012>

**Byron Álvarez**

<https://orcid.org/0009-0003-1351-0149>

*Universidad Autónoma de Chiriquí, Maestría en Ciencias Químicas con Énfasis en Inocuidad Alimentaria, Centro de Investigación de Productos Naturales y Biotecnología, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas.*

**Autor correspondiente:** [cristel.santamaria@unachi.ac.pa](mailto:cristel.santamaria@unachi.ac.pa)

**Enviado:** 4 de agosto de 2025. **Aceptado:** 21 de noviembre de 2025

<https://doi.org/10.59722/rcvn.v3i1.994>

---

### Resumen

Los metabolitos bioactivos, desempeñan un papel esencial en la calidad sensorial de los alimentos, influyendo en su color, aroma, sabor y aportando beneficios para la salud. En frutas y verduras, no solo determinan el dulzor, sino que también participan en procesos metabólicos y de regulación genética, modificando la calidad y las características organolépticas. La conversión de aminoácidos en compuestos volátiles y aromáticos, mediada por el etileno, es clave en el desarrollo de perfiles sensoriales. Asimismo, los ácidos grasos, mediante enzimas como lipoxigenasas y alcohol deshidrogenasas, se transforman en aldehídos, cetonas y ésteres que aportan aromas y sabores distintivos, mientras que los terpenos y carotenoides contribuyen a la pigmentación y el aroma característico de muchas especies vegetales. Por otro lado, existen rutas que generan compuestos distintivos, como la reacción de Maillard y la degradación térmica de lípidos. Estos procesos dan lugar a moléculas, como pirazinas, pirroles, piridinas, aldehídos, cetonas, alcoholes y ésteres, que enriquecen la complejidad sensorial de los alimentos procesados. Además, la variabilidad en la producción de estos compuestos entre diferentes frutas y verduras, junto con la interacción entre lípidos y productos de la reacción de Maillard, sigue siendo un área de gran interés. En este contexto, profundizar en el conocimiento de las rutas biosintéticas involucradas y optimizar su regulación permitirá mejorar la calidad y estabilidad de los compuestos aromáticos y bioactivos en los alimentos. La integración de enfoques biotecnológicos y analíticos es clave para potenciar los beneficios sensoriales y

nutricionales, promoviendo un mejor aprovechamiento de estos metabolitos en la industria alimentaria.

### Palabras clave

Alimentos, aromas, compuestos volátiles, reacción de Maillard, sabor.

### Abstract

Bioactive metabolites play an essential role in the sensory quality of foods, influencing their color, aroma, flavor, and providing health benefits. In fruits and vegetables, they not only determine sweetness but also participate in metabolic and genetic regulation processes, modifying quality and organoleptic characteristics. The conversion of amino acids into volatile and aromatic compounds, mediated by ethylene, is crucial for the development of sensory profiles. Likewise, fatty acids, through enzymes such as lipoxygenases and alcohol dehydrogenases, are transformed into aldehydes, ketones, and esters that impart distinctive aromas and flavors, while terpenes and carotenoids contribute to pigmentation and the characteristic aroma of many plant species. On the other hand, there are pathways that generate distinctive compounds, such as the Maillard reaction and the thermal degradation of lipids. These processes give rise to molecules such as pyrazines, pyrroles, pyridines, aldehydes, ketones, alcohols, esters, which enrich the sensory complexity of processed foods. Furthermore, variability in the production of these compounds among different fruits and vegetables, along with the interaction between lipids and Maillard reaction products, remains an area of great interest. In this context, deepening the understanding of the biosynthetic pathways involved and optimizing their regulation will enhance the quality and stability of aromatic and bioactive compounds in foods. The integration of biotechnological and analytical approaches is key to boosting sensory and nutritional benefits, promoting better utilization of these metabolites in the food industry.

### Keywords

Aromas, foods, Maillard reactions, taste, volatile formation.

### Introducción

La generación de aromas y sabores en frutas y vegetales es un proceso complejo que involucra múltiples rutas biosintéticas y mecanismos moleculares. Conocer en profundidad algunas de las rutas metabólicas que generan estos compuestos ofrece oportunidades significativas para mejorar la calidad alimentaria, desarrollar nuevos productos y optimizar procesos de producción de manera más sostenible y eficiente.

Por lo cual esta revisión se centra en analizar y determinar las principales rutas responsables de la generación de sabores y olores en los alimentos, un tema clave para comprender los

mecanismos bioquímicos que contribuyen a estas propiedades sensoriales. En primera instancia, indagaremos en la conversión de azúcares de frutas y vegetales, lo cual es de relevancia debido a su función como metabolitos que regulan muchos aspectos del metabolismo, entre ellos, el desarrollo y expresión de genes, generando sabores dulces (Hernández-Bernal et al., 2022 y Vázquez-Cuecuecha et al., 2023)

Asimismo, los ácidos grasos, mediante la lipólisis y la oxidación, generan alcoholes, aldehídos y cetonas, componentes clave en los aromas y sabores fuertes y suaves (Shahidi y Hossain, 2022). Además, los terpenos contribuyen con notas florales y cítricas, como en el té verde (Qin et al., 2024). Mientras que los carotenoides, como los encontrados en tomates y zanahorias, se descomponen para formar compuestos volátiles como iononas, que añaden notas dulces y afrutadas (Mele et al., 2020). Por otro lado, los aminoácidos, además de ser precursores de compuestos nitrogenados y sulfurados esenciales en el perfil de sabor, participan en la reacción de Maillard para generar volátiles específicos como pirazinas y tioles (Liu et al., 2022).

Por lo tanto, el tratamiento térmico, a través de reacciones como Maillard y la oxidación de lípidos, es crucial para la generación de compuestos aromáticos y de sabor, mejorando el perfil sensorial y afectando la estabilidad y liberación de compuestos (Troise et al., 2020). Los azúcares, como la glucosa y la fructosa, son esenciales en las reacciones de Maillard, donde reaccionan con aminoácidos para formar compuestos que aportan aromas tostados y sabores complejos (Arias-Giraldo y López-Velasco 2019).

Este conocimiento permitirá ajustar procesos para realzar perfiles sensoriales, desarrollar alimentos con beneficios para la salud y crear tecnologías de procesamiento innovadoras. Sin embargo, la complejidad de estas rutas, la variabilidad genética y ambiental, y la necesidad de técnicas analíticas avanzadas son desafíos que deben abordarse.

## Materiales y Métodos

El presente trabajo se desarrolló bajo el enfoque de una revisión con el objetivo de sintetizar y analizar críticamente la evidencia científica disponible sobre las principales rutas

metabólicas involucradas en la generación de aromas y sabores en alimentos. Para la búsqueda de información se consultaron las siguientes bases de datos científicas: Scopus, Web of Science (WoS), ScienceDirect, PubMed y Google Scholar. Estas plataformas fueron seleccionadas por su amplio alcance en literatura revisada por pares en el área de ciencias de los alimentos, bioquímica y biotecnología.

Los términos de búsqueda se definieron en español e inglés, combinando palabras clave, entre ellas: aromas, sabores, compuestos volátiles, metabolitos secundarios, rutas metabólicas, reacción de Maillard, flavor formation, aroma compounds, plant secondary metabolites, Maillard reaction, y lipid oxidation. Se priorizaron artículos publicados entre los años 2005 y 2025, con el fin de incluir estudios recientes sin excluir investigaciones clásicas relevantes.

Los criterios de inclusión fueron:

1. Artículos originales y de revisión publicados en revistas científicas indexadas,
2. Estudios relacionados con la biosíntesis de compuestos aromáticos en frutas, vegetales y alimentos procesados
3. Investigaciones que abordaran rutas metabólicas asociadas a azúcares, aminoácidos, ácidos grasos, terpenos y carotenoides, así como procesos térmicos como la reacción de Maillard.

Como criterios de exclusión, se descartaron trabajos que no presentaran conexión directa con el desarrollo de aromas y sabores en alimentos o aquellos con información insuficiente para su análisis comparativo.

Finalmente, la selección de los artículos se realizó en tres etapas:

- i) Revisión de títulos y resúmenes,
- ii) Lectura del texto completo,
- iii) Análisis de pertinencia científica y coherencia con los objetivos de la revisión.

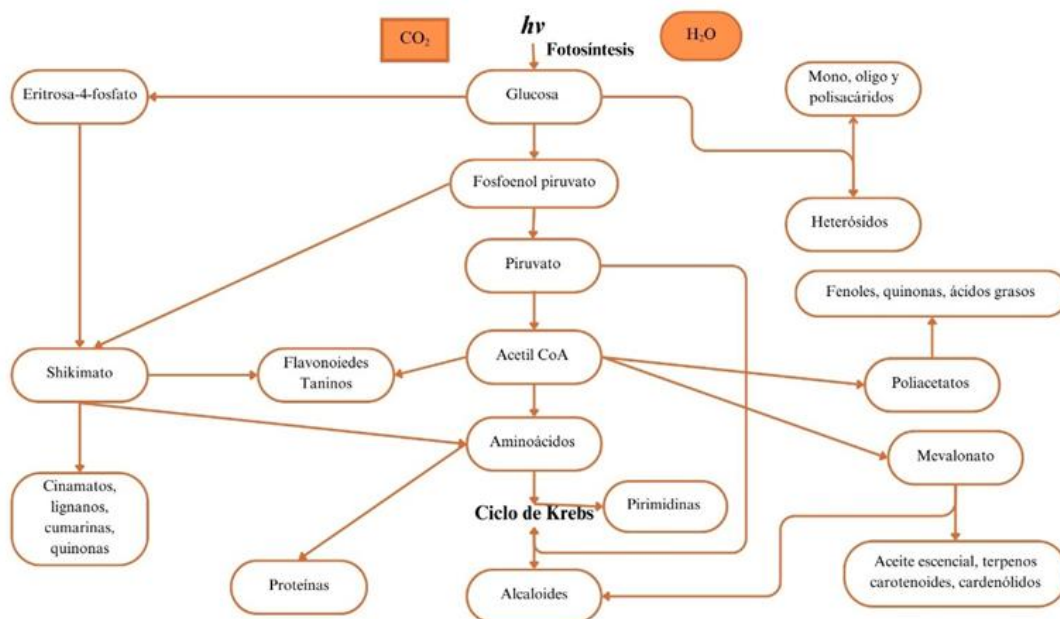
La información seleccionada se organizó y sistematizó según el tipo de ruta metabólica (azúcares, aminoácidos, ácidos grasos y terpenos/carotenoides) y según los procesos térmicos involucrados, permitiendo una integración coherente con el desarrollo temático

del presente artículo.

## Desarrollo

### 1. Biosíntesis

Los metabolitos bioactivos en los alimentos, como los pigmentos, metabolitos secundarios, y los fitoquímicos contribuyen a las propiedades sensoriales, ellos confieren beneficios a la salud, y además imparten color, aroma, y sabor a las comidas, y enmascaran olores o sabores indeseables (Pavagadhi et al., 2020 y Diez-Simon et al., 2019). En este contexto, se destacan algunos metabolitos secundarios de relevancia y sus funciones (figura 1). Por ejemplo, el eugenol, responsable del aroma del clavo y la albahaca; la curcumina, un pigmento característico de la cúrcuma, y compuestos como la capsaicina (responsable del picante en el ají) están relacionados con las rutas de los shikimatos, derivados de fenilpropanoides (Chempakam y Ravindran, 2023; Deryabin et al., 2019; Chumroenphat et al., 2019 y Huang et al., 2021). Por otro lado, la alicina, el principio activo del ajo, se origina en la vía de biosíntesis de los glucosinatos, generan un sabor picante (Gulsen et al., 2024). Finalmente, los ácidos fenólicos (clorogénico, gálico y ferúlico), comunes en muchas especies, también derivan de estas rutas, particularmente a partir de los intermediarios relacionados con fenoles y quinonas (Marchiosi et al., 2020). Esta relación ilustra cómo las rutas metabólicas de metabolitos primarios, como el ciclo de Krebs y los shikimatos, están estrechamente conectadas con la biosíntesis de metabolitos secundarios de importancia biológica y ecológica.



**Figura 1.** Rutas que generan metabolitos primarios y secundarios. Adaptado de: Qaderi et al. (2023) y Aharoni y Galili (2011).

### 1.1 Conversión de azúcares

A partir de las rutas metabólicas ilustradas en la (figura 1), es posible identificar cómo se generan diversos sabores y aromas a partir de la glucosa, es ampliamente conocido que la cantidad de azúcares presente en las frutas y verduras contribuyen al dulzor, estos actúan como sustratos en el metabolismo del carbono y la energía, así como la biosíntesis de polímeros (Nookaraju et al., 2010); además actúan como moléculas de señal e influyen en los procesos metabólicos regulando la expresión genética, rigen la floración, las respuestas por medio de mecanismos de defensa (Du et al., 2024; Khan et al., 2022 y Khan et al., 2020) y la estructura celular, que desencadenan reacciones metabólicas, para controlar la actividades bioquímicas y procesos fisiológicos que alteran las características organolépticas (Durán-Soria et al., 2020) por lo que se ha demostrado que a medida que envejece o madura la planta el contenido de sacarosa aumenta (Lv et al., 2022).

No obstante, los azúcares transportados se almacenan o metabolizan en varias células y tejidos, desde donde pueden afectar a la calidad de la fruta; sin embargo, hay otros factores que modifican el contenido de azúcares en los frutos como son, los procesos fisiológicos, metabólicos interconectados, y la red reguladora de genes (Lu et al., 2020).

El azúcar en las frutas se sintetiza a través de la fotosíntesis vegetal, y la regulación de estos, se da por diversos factores de transcripción, mecanismos epigenéticos, y fitohormonas (Du et al., 2024). La sacarosa y el nitrato actúan como señales que regulan la expresión genética para optimizar los flujos metabólicos según las condiciones ambientales predominantes. Este proceso ocurre principalmente en el citosol, donde se lleva a cabo la síntesis de sacarosa (Ashihara et al., 2011 y Liu et al., 2023).

De forma coordinada, entran en juego, las vías de pentosa fosfato en los plastidios y el citosol se unen como vía para desplazar metabolitos, el traslado es realizado por la xilosa-5-fosfato y en menor instancia la ribulosa-5-fosfato, hacía el ciclo de Benson-Calvin, al mismo tiempo, en el citosol, la síntesis de la sacarosa es catalizada por la enzima suc-fosfato sintasa y suc-fosfato fosfatasa, produciendo la sacarosa cuando se libera ortofosfato y suc-6-fosfato, una vez utilizado UDP-glucosa y fructosa-6-fosfato como sustrato (Griffiths et al., 2016 y Kruger y Von Schaewen, 2003). Seguidamente, la sacarosa se hidroliza por las invertasas produciendo glucosa y fructosa o por la sacarosa sintasa que produce UPD-glucosa y fructosa; finalmente, la sacarosa presenta un distintivo sabor a fruta madura (Quick et al., 2017; Harish et al., 2017 y Liu et al., 2023).

Hay tres superfamilias principales de transportadores de azúcar: la superfamilia de facilitadores principales (MFS), los transportadores de glucosa dependientes del sodio y los transportadores de azúcar eventualmente exportados (DULCES) (Xuan et al., 2013). La proteína DULCE se identificó por primera vez en la ascidia (Hamada et al., 2005). Como transportador ubicado en vacuolas tanto para hexosa como para sacarosa, la sobreexpresión de AtSWEET16 resultó en una mayor tolerancia a la congelación y una mejor germinación, así como una eficiencia en el uso de nitrógeno en Arabidopsis (Klemens et al., 2013). SWEET9 fue identificado como un transportador de azúcar específico del nectario



que funciona en la secreción de néctar para recompensar a los polinizadores (Lin et al., 2014) Los patrones de expresión sugieren que la familia SWEET está involucrada en el crecimiento y desarrollo de todos los órganos de las plantas. Existe un conjunto de genes DULCES estrechamente relacionados con el desarrollo de flores, semillas y frutos en cada especie (Liu et al., 2019).

Cabe destacar que la edad del fruto de vainilla al momento de la cosecha influye significativamente en su aroma y sabor. La sacarosa es el principal azúcar presente en el fruto verde (80 %), acompañada de pequeñas cantidades de glucosa y fructosa, las cuales aumentan ligeramente a medida que el fruto madura debido a la hidrólisis de la sacarosa (Hernández et al., 2021). El contenido de macro y micronutrientes aumenta conforme avanza la edad del fruto; los macronutrientes con mayor concentración fueron el Ca y el K, mientras que el Mn fue el micronutriente más abundante. Por otro lado, se identificaron diez metabolitos relacionados con azúcares, siendo la D-glucosa el compuesto más enriquecido, en donde se reflejan en distintas cantidades de azúcares asociadas al nivel de dulzor (Li et al., 2020).

### **1.2 Conversión de aminoácidos**

A partir de las rutas metabólicas ilustradas en la (figura 1), es evidente que los metabolitos primarios, como los aminoácidos, desempeñan un papel central en la generación de metabolitos secundarios que contribuyen a los sabores, aromas y funciones biológicas en los vegetales. Entre los aminoácidos se destaca la metionina como un precursor esencial en diversas rutas metabólicas, su papel no se limita únicamente a la síntesis de proteínas, sino que también sirve como punto de partida para la formación de compuestos bioactivos clave. En este contexto, la conversión de aminoácidos desempeña un rol fundamental para los procesos de maduración en frutas y vegetales, siendo clave en la producción de etileno. Esta generación de etileno con sus respectivos mecanismos bioquímicos, tienen lugar en el citoplasma. Esta hormona, tiene como precursor principal la metionina (figura 2) que se considera fundamental para la síntesis de otras biomoléculas esenciales, como poliamidas,

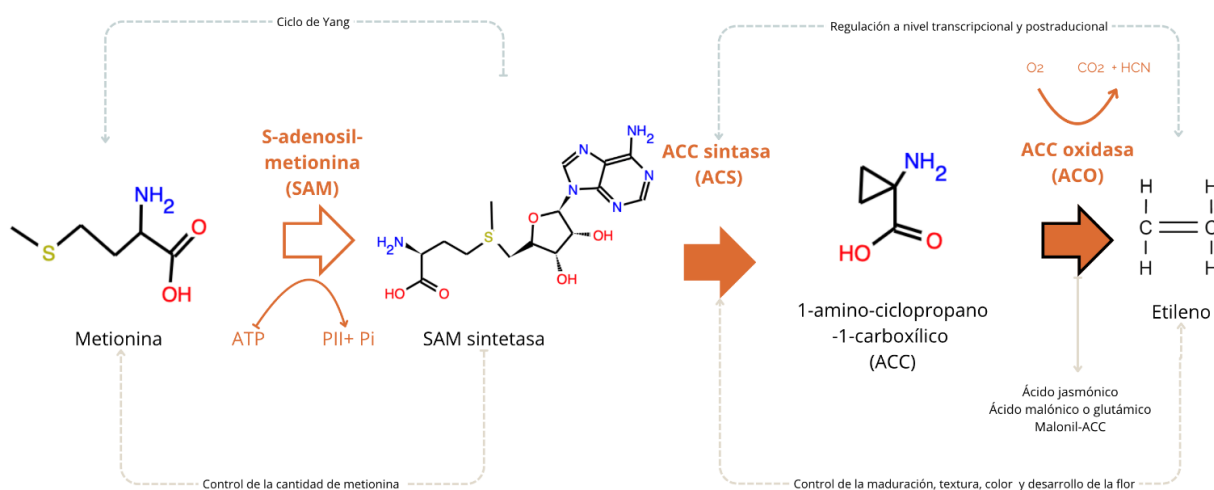


cisteína y glutatión (Liu et al., 2022), también existe una relación de la producción de compuestos volátiles con la expresión de genes diferencial y la biosíntesis de etileno, que promueven el ablandamiento y color de las frutas (Durán-Soria et al., 2020). La metionina se transforma en S-Adenosil-metionina (SAM) por acción de la enzima SAM sintetasa (SAMS). La misma por ejecución catalítica de la enzima AAC-sintasa (ACS) es metabolizada a ácido 1-Aminociclopropano-1carboxílico (ACC). Posteriormente actuará la ACC-oxidasa (ACO) como catalizador en la conversión de ACC a etileno, ácido cianhídrico (HCN) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Gavin et al., 2021).

En la formación de poliamidas la SAM es desviada para sintetizar espermina y espermidina por la acción de la enzima SAM-d Descarboxilasa en donde la metionina actúa como equilibrador en la síntesis de etileno (Franco et al., 2023). Sí bien observamos un papel antagonista, en el que la ACC puede transportarse de forma activa a las células objetivo, donde puede almacenarse o desactivarse mediante conjugación para hacer jasmonil-ACC, malonil-ACC, o  $\gamma$ -glutamil-ACC, por lo que la ACO produce la hormona activa que es percibida por la misma célula o se esparce a las células vecinas (Fernandez-Moreno y Stepanova, 2019). En ocasiones, por biosíntesis auto catalítica el etileno puede regular su propia producción. Sin embargo, en otro estudio donde se evalúa la putrescina exógena para extender la vida útil de las bananas en postcosecha, indican que la putrescina altera los parámetros respiratorios y los picos de producción de etileno se ven alterados, por lo que se ha observado en este estudio que en la biosíntesis de etileno y poliamidas, el carbono puede dirigirse a la formación de uno u otro, en donde se ve alterado el color y la textura en las bananas (Franco et al., 2023); lo observado muestra que, la biosíntesis toma diferentes rutas y hasta se indica que es autocatalítica por lo que se evidencian interacciones antagonista entre los compuestos iniciales y finales, que desencadenan una cascada de señalización y dan como resultado la activación y represión de factores de transcripción (Wang et al., 2023).

Conocer el proceso madurativo de los frutos climatéricos y no climatéricos por medio de la biosíntesis de etileno ayuda a controlar aromas, sabores, color y firmeza de los frutos; sin

embargo, durante el estudio de la biosíntesis se ha observado problemáticas en donde la S-Adenosil-metionina es limitada por la enzima ACC-oxidasa, por lo que se ha indagado en genes que controlan dicha biosíntesis (Gavin et al., 2021), sí bien estos sistemas no están del todo esclarecidos, se ha encontrado que hay genes que codifican la enzima ramnogalacturonano liasa durante el desarrollo y maduración del fruto y la producción de etileno en tomate, jugando un papel importante en la firmeza del fruto (Trillo-Hernández et al., 2021).



**Figura 2.** Representación esquemática de la ruta de biosíntesis de etileno. Adaptado de: Pattyn et al. (2021).

Al mismo tiempo, en la etapa de maduración, se resaltan otros compuestos responsables del aroma como son los aldehídos, alcoholes y ésteres que son sintetizados por aminoácidos y ácidos grasos; en donde la  $\beta$ -oxidación de ácidos grasos, la vía lipoxigenasa y el metabolismo de aminoácidos son las tres rutas más importantes de la biosíntesis del aroma de manzana (Yang et al., 2022). Algo similar ocurre con el aminoácido fenilalanina que genera fenoles volátiles fundamentales, responsables de las características aromáticas, utilizando la vía shikimato/arogenato tales como el fenilpropanoide y benzoides (glucósidos) mediante la enzima fenilalanina amoníaco liasa (PAL) hasta la producción de p-alcohol *p*-coumárilico y alcohol coniferílico, en donde la hidroxilación del anillo aromático y la reducción del Ester forman los fenilpropanoides que desempeñan un papel esencial en

las cualidades organolépticas en plantas y verduras (Schieber y Wüst et al., 2020).

Además, los compuestos fenólicos (polifenoles) también se derivan a través de la vía del ácido acético tales como, cumarinas, lignanos, flavonoides, isoflavonoides, antiocianinas, proantocianidinas y estilbenos (Pinto et al., 2021). Un ejemplo de polifenoles son los elagitaninos, que son atribuidos como los antioxidantes más potentes, responsables de la astringencia en fresas, frambuesas, bayas y frutos secos (Bakkalbaşı et al., 2008); otro papel de los fenoles es que influyen en la reducción del brillo en el color de la fruta (Diamanti et al., 2015).

Cabe resaltar que, la biosíntesis de compuestos aromáticos y de sabor a partir de aminoácidos como la L-fenilalanina y la L-tirosina, así como del ácido cinámico, se lleva a cabo a través de rutas secundarias altamente especializadas como las derivadas del shikimato, por lo tanto, la formación de perfiles de sabores es un proceso complejo que implica múltiples vías metabólicas y una serie de reacciones enzimáticas (Shen et al., 2020). La figura 1 permite observar cómo estas rutas metabólicas interconectan los metabolitos primarios y secundarios, evidenciando la importancia de los aminoácidos como sustratos básicos en este proceso.

También cabe destacar que, dentro de la conversión de aminoácidos, resalta la L-fenilalanina, que es transformada en ácido cinámico a través de la acción de la enzima fenilalanina amonio-liasa (PAL). Esta es una reacción clave en la vía de los fenilpropanoides, que produce una amplia gama de compuestos aromáticos, entre estos se encuentra la conversión de ácido cinámico a ácido p-cumárico, un intermediario crucial en la biosíntesis de flavonoides y otros fenilpropanoides; de hecho, en los alimentos de origen vegetal influye notablemente en sus propiedades organolépticas, contribuyendo a la acidez o amargor; los derivados del ácido cinámico presentan aroma dulce y especiado y actúan como copigmentos (Schieber y Wüst, 2020; Pinto et al., 2021; Shen et al., 2020 y Petersen et al., 2020).

Finalmente, la L-tirosina, similar a la L-fenilalanina, es transformada en ácido p-hidroxicinámico mediante una serie de reacciones enzimáticas (Tan et al., 2020). La tirosina

amonio-liasa (TAL) convierte la tirosina en p-hidroxicinamato, que puede ser posteriormente convertido en otros compuestos aromáticos; los compuestos formados a partir de L-fenilalanina, L-tirosina y ácido cinámico son esenciales para el perfil sensorial de frutas y vegetales (Rhodes y Woollorton, 1978). Esta reacción contribuye a la conexión intrínseca entre la bioquímica vegetal y las propiedades organolépticas, afectando el aroma y el sabor, y creando una experiencia sensorial rica y compleja. A grandes rasgos, los compuestos generados por esta vía contribuyen a aromas florales, herbales, especiados y dulces (Ong et al., 2018 y Mostafa., 2022).

### 1.3 Utilización de ácidos grasos

En el recorrido por las rutas metabólicas claves, abordamos la importancia de los ácidos grasos, otro aspecto importante el cual cumple con diversas funciones esenciales en el metabolismo. Los ácidos grasos cumplen con diversas funciones en el metabolismo como ser el componente sustancial de todas las membranas, ajustan la expresión de genes, sirven como protección mecánica, como combustible metabólico, pero también actúan como biomarcadores, cumplen un papel en la regulación de la fluidez y de sus derivados (De Carvalho y Caramujo, 2018).

La vía metabólica de los ácidos grasos es fundamental en la biosíntesis de compuestos volátiles que contribuyen al aroma y sabor de frutas y vegetales. Esta vía incluye varias etapas y procesos enzimáticos que transforman los ácidos grasos en una variedad de compuestos aromáticos y de sabor; como son los aldehídos, alcoholes, cetonas y ésteres insaturados de cadena corta; entre las enzimas de mayor importancia que afectan esta vía metabólica, encontramos a las lipoxigenasas (LOX), hidroxiperóxido-liasa (HPL) y alcohol deshidrogenasa (ADH) (Dávila-Aviña et al., 2011).

Cabe señalar que los ácidos grasos son sintetizados endógenamente por la acción conjunta de la acetil-CoA carboxilasa (ACC) y los ácidos grasos sintasas (FAS), la enzima ACC cataliza la conversión de acetil-CoA en malonil-CoA; por lo que esta ruta conocida como biosíntesis de Novo proporciona ácido palmítico, 16:0, que pueden ser sustrato de elongasas para

transformarse en ácido esteárico 18:0 (Ohlrogge et al., 2018 y Carraro et al., 2019). Se puede señalar que, la actividad de la ACC se basa en el transporte de proteínas de biotina carboxil, biotina carboxilasa y la subunidad  $\alpha$  y  $\beta$  de la carboxiltransferasa (He et al., 2020).

Dado que las lipoxigenasas (LOX) son enzimas cruciales en la oxidación de ácidos grasos poliinsaturados como el ácido linoleico y el linolénico, esta ruta produce compuestos como hexanal, hexenales, hexanol y acetatos, responsables del aroma verde y afrutado (Christie y Harwood, 2020; Yadav et al., 2018 y Genovese et al., 2021). Se han identificado compuestos volátiles derivados de la ruta de la lipoxigenasa entre estos: (Z)-3-hexenal, (Z)-3-hexenol, hexanal, 1-penten-3-ona, 3-metilbutanal, (E)-2-hexenal, 6-metil-5-hepten-2-ona, salicilato de metilo, 2-isobutiltiazol y  $\beta$ -ionona, estos a diferentes concentraciones producen el aroma de un tomate fresco y maduro, y disminuyen a medida que el fruto madura (Ties y Barringer, 2012). Paralelamente, la vía de la 5-lipoxigenasa metaboliza el ácido araquidónico, conduciendo a la síntesis de leucotrienos (Cheng et al., 2025).

A la vez, la ruta de la lipoxigenasa da lugar a la inserción de oxígeno molecular en los ácidos grasos, formando hidroperóxidos de ácidos grasos, tales como los 13-hidroperóxidos (13-HPOD) y los 9-hidroperóxidos (9-HPOD) a partir del ácido linoleico y linolénico que son hidrolizados por la hidroperóxidos liasa (HPL) en compuestos volátiles como aldehídos de seis átomos de carbono, alcoholes y oxoácidos, a estos se le atribuye un aroma verde y fresco (Vincenti et al., 2019 y Tang et al., 2024).

Entre las moléculas generadas con olor y sabor a partir de la vía metabólica de los ácidos grasos, se encuentran varios compuestos, aldehídos como el hexanal, contribuyen a los aromas frescos y verdes en frutas y vegetales, y son responsables, por ejemplo, del característico olor a tomate (Dávila-Aviña et al., 2011). El trans-2-hexenal proporciona un aroma fresco y cortante, característico de manzanas, y es el componente principal en las hojas del té verde (Klee et al., 2018 y Uchida et al., 2022), el nonadienal aporta un aroma floral y dulce, común en pepinos (Zhao et al., 2021). Los alcoholes generados por la alcohol deshidrogenasa, incluyen el hexanol, con un aroma herbal y notas florales (Tomé-Rodríguez et al., 2022), el cis-3-hexen-1-ol, cis-3-hexenal, trans-2-hexen-1-ol, y 2,6-

dimethylcyclohexanol que presentan un aroma fresco, a hierba cortada, vegetales y frutas (Zhang et al., 2026) por otro lado, las cetonas como la 6-metil-5-hepten-2-ona contribuyen a los aromas afrutados, fresco y dulces, siendo el principal componente de los frutos maduros de tomate proveniente de la escisión oxidativa del licopeno (Diestefano et al., 2022) y los ésteres, que no son directamente productos de la vía de los ácidos grasos, pero se pueden formar debido a reacciones entre los alcoholes y ácidos generados en esta vía, los mismos son cruciales en el aroma frutal, como el éster hexílico, que presenta tonos frutales hasta cítricos o ligeramente florales (Mostafa et al., 2022 y Xu et al., 2024).

Una variante atractiva de los ácidos grasos son los omega-3 ( $\omega 3$ ), que son ácidos grasos polinsaturados que se presentan en los alimentos como:  $\alpha$ -linolénico (18:3  $\omega 3$ ,  $\alpha$ -ALA), ácido eicosapentaenoico (20:5  $\omega 3$ , EPA) y ácido docosahexaenoico (22:6  $\omega$ , DHA). El  $\alpha$ -ALA puede encontrarse en algunos aceites vegetales (de linaza, soja y canola), chía, nueces, maníes y aceitunas; el EPA, DPA y DHA en los aceites de pescado principalmente de aguas frías como salmón, atún, sardinas, algas y microalgas (Feliu et al., 2021).

#### 1.4 Síntesis de terpenos y carotenoides

Como última vía metabólica en las plantas, los terpenoides, son una amplia clase de metabolitos secundarios sintetizados en las plantas en cantidades pequeñas, desempeñan un papel esencial tanto en la pigmentación como en el aroma característico de diversas especies vegetales (Zhang et al., 2023). Los carotenoides, por ejemplo, son responsables del color naranja, rojo y amarillo, estos pigmentos de color pertenecen a los metabolitos secundarios lipófilos resultantes de la vía isoprenoide (Riaz et al., 2021).

Estos compuestos son sintetizados a partir de precursores como el isopentenil pirofosfato (IPP) y el dimetilalil pirofosfato (DMAPP), los cuales se generan en la vía del mevalonato (MVA) que tiene lugar en el citosol o la vía del metileritritol fosfato (MEP), que tiene lugar en los plastidios (figura 3), en las células vegetales estas rutas se dan en diferentes lados (Yao et al., 2022).

Se ha demostrado que los genes influyen significativamente en la regulación transcripcional

de la biosíntesis de carotenoides en el tomate, en la cual el nivel de expresión SIWRK35 aumentó durante la maduración de la fruta, sin embargo, la vía de etileno regula la señalización de esta proteína, lo que indica que los factores de transcripción controlan el crecimiento, la floración, la maduración, entre otros (Yuan et al., 2022).

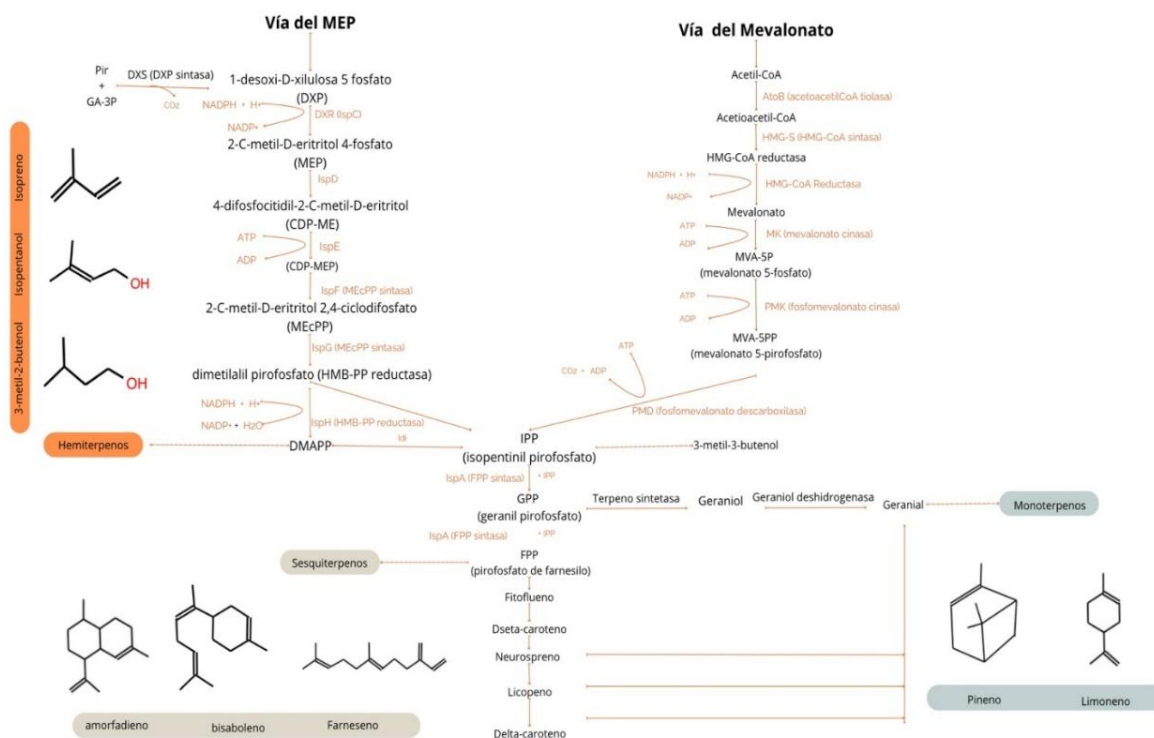
Este mismo efecto de activación de etileno en la biosíntesis de carotenoides se ve señalizada durante el desarrollo y coloración de la fruta, a medida que estos evolucionan, la expresión de los niveles de transcripción y la proteína CsERO61 aumentan (Sathasivam et al., 2021). Numerosas investigaciones han evidenciado que el etileno es una hormona vegetal crucial para el control de la maduración de los frutos, afectando aspectos como el color, la textura, el aroma, el sabor y diversos compuestos nutricionales (Pech et al., 2018).

Estos procesos bioquímicos no solo afectan la apariencia visual de las plantas, sino también su perfil sensorial. Desde los colores vibrantes hasta los aromas distintivos, cada grupo de terpenoides juega un papel crucial en la adaptación de las plantas al entorno y en su interacción con otros organismos (Simkin, 2021).

Aunque algunos compuestos aromáticos, como los apocarotenoides, también poseen propiedades beneficiosas para la salud, destacan el  $\beta$ -ciclocitral, la  $\beta$ -ionona, el geranial, la acetona de geranilo, la theaspirona, la  $\alpha$ -damascenona, la  $\beta$ -damascenona y la 6-metil-5-hepten-2-ona (MHO). Estos compuestos contribuyen significativamente a los perfiles aromáticos de diversas flores y frutos en plantas hortícolas y son altamente valorados en la industria del sabor y la fragancia (Shi et al., 2020).

En términos de diversidad, los terpenoides se clasifican en varios grupos según el número de unidades de isopreno que los componen, entre ellos podemos encontrar a los monoterpenos (figura 3), que consisten en dos unidades de isopreno (Mabou y Yossa, 2021), estos son los compuestos más volátiles, que suelen encontrarse en plantas y alimentos procesados (Paulino et al., 2022); aportando aromas afrutados, florales, mentados, cítricos, frescos, herbáceos, camporáceos, leñosos, pinos y picantes (Zhang et al., 2023; Mahanta et al., 201 y Cui et al., 2024).





**Figura 3.** Síntesis de geranil pirofosfato mediante las rutas del MEP y mevalonato. Adaptado de: Pathak et al. (2023).

Por otro lado, la figura 3. Nos muestra a los sesquiterpenos, constituyentes de tres unidades de isopreno, siendo sintetizados por la sesquiterpeno sintasa, lo que resulta en moléculas con mayor peso molecular, menos volátiles con aromas más persistentes que se perciben como “notas de salida” u olor similar a los cítricos (Harms et al., 2020), característicos de especias como la canela (Stevens y Allred, 2022) y el jengibre (Al-Tannak et al., 2022).

Así mismo, los di y triterpenos, por su parte, confieren diferentes sensaciones gustativas y la estimulación del receptor dulce hTAS1R2/R3, que a menudo confieren sabores amargos, dulces y regaliz (Schmid et al., 2021); mientras que los fenilpropanoides, conducen a la generación de fenoles volátiles activos derivados de ácidos grasos y aminoácidos por medio de la vía del shikimato, estos compuestos generan olor en alimentos derivados de plantas (Mostafa et al., 2022) que incluyen compuestos como el eugenol del clavo de olor y el anetol del anís estrellado, estos agregan aromas distintivos gracias a su estructura química que

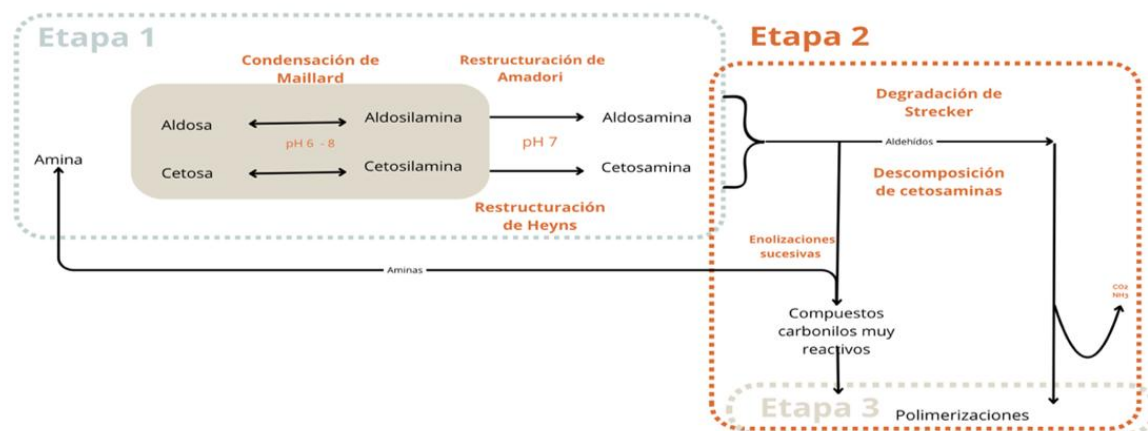
combina un anillo aromático con una cadena lateral; también, se puede encontrar eugenol en la salsa de chile jalapeño (*Capsicum annum*) y papaya (*Carica papaya*) (Fuentes et al., 2020). Además, se encuentran otros compuestos terpénicos menos volátiles y más complejos, así como derivados alifáticos y sustancias con contenido de azufre y nitrógeno, que contribuyen a los perfiles aromáticos y de sabor en plantas como el ajo y el brócoli (Pinto et al., 2021 y Marcinkowska y Jeleń, 2022).

## 2. Generación de aromas por tratamiento térmico

La generación de aromas y sabores no solo depende de las rutas metabólicas biosintéticas, sino que también puede ser influenciada por procesos térmicos. Uno de los mecanismos más relevantes en este contexto es la reacción de Maillard (MR), un proceso no enzimático que ocurre entre los azúcares reductores y los grupos aminos libres presentes en los alimentos. Esta reacción es clave en la formación de compuestos aromáticos y la modificación de las propiedades organolépticas, contribuyendo significativamente al desarrollo de nuevos perfiles sensoriales (Kathuria et al., 2023), en donde los sabores distintivos de los alimentos procesados térmicamente se generan comúnmente a través de la degradación de Strecker como etapa final de la MR (figura 4), que es responsable de generar diversos compuestos heterocíclicos, incluyendo pirazinas, pirroles, piridinas, entre otros (Salehi, 2021). Estos compuestos son sensorialmente activos e influyen directamente sobre la calidad de los alimentos, como el sabor, el color y la textura (Yu et al., 2021) dichos compuestos se dividen en tres grandes moléculas, las que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno, siendo estas últimas las moléculas claves que generan aromas en la RM (tabla 1) (Starowicz y Zieliński, 2019).

La reacción de Maillard se puede subdividir en tres etapas principales (figura 4). En primer lugar, la etapa inicial conduce a la formación reversible de glicosilaminas, las cuales se reordenan a través de los reordenamientos de Amadori o Heyns (Igartúa y Sceni, 2023). Esta etapa, además de influir considerablemente en el sabor y el color de los alimentos procesados, tiene la capacidad de producir sabores frescos y deseables (Han et al., 2024) se

ha demostrado que, los reordenamientos de aminoácidos de Amadori pueden servir como aditivos de sabor prometedores, ofreciendo una buena oportunidad para reemplazar los componentes de sabor inestables tradicionales, especialmente los productos de la reacción de Maillard (Luo et al., 2021).



**Figura 4.** Reacción de Maillard. Adaptado de: Yu et al. (2021) y Provost (2019).

Cabe resaltar que la impartición del color marrón se atribuye principalmente a las melanoidinas; sin embargo, debido a su naturaleza compleja y heterogénea, sus estructuras químicas aún no están completamente definida (Wang et al., 2011 y Zhang et al., 2024). Se ha demostrado que las modificaciones en el color pueden estar relacionadas con factores descritos por Muralla y Coelho, quienes sugieren que ciertos compuestos derivados de la reacción de Maillard influyen en estas variaciones cromáticas. Además, el sabor a caramelo o tostado se debe a la formación de matol, mientras que el sabor a fresa está asociado a la presencia de funareol (Coelho Neto et al., 2022). Estos cambios en el color y el perfil de sabor podrían estar relacionados con el reordenamiento de Amadori, ya que este proceso químico influye en la formación de compuestos intermedios que participan en la evolución de los pigmentos y sabores característicos de los alimentos procesados.

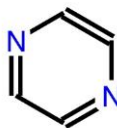
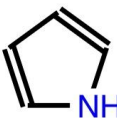
En segundo lugar, la segunda etapa corresponde a la degradación de los productos de los reordenamientos de Amadori y Heyns, se conoce como, degradación de Strecker, que conduce, en particular, a la formación de compuestos heterocíclicos responsables de los

lores. Se ha encontrado que los sabores de los productos secos y tostados a alta temperatura son fuertemente afectados por la formación de estos compuestos heterocíclicos que generan sabores térmicos. Estas estructuras cíclicas contienen un átomo diferente al carbono, como el nitrógeno (por ejemplo, en pirazinas y piridinas) (Parr et al., 2023).

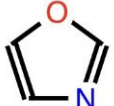
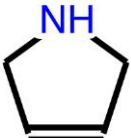
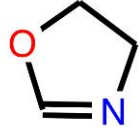
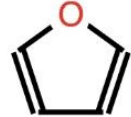
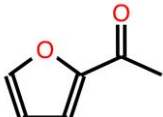
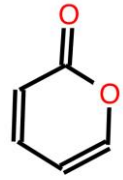
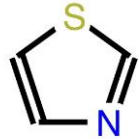
Sí observamos en detalle, las pirazinas no solo se forman en los alimentos a través del tratamiento térmico, sino que también se generan mediante la fermentación (Fayek et al., 2023). Estas pirazinas heterocíclicas volátiles contienen nitrógeno y contribuyen a los sabores de horneado, tostado y a nuez en los productos alimenticios (Starowicz y Zieliński, 2019).

El tercer paso corresponde a la polimerización de los intermedios de reacción producidos durante el segundo paso, formándose compuestos heterocíclicos nitrogenados (Gartúa y Sceni, 2023). Además, aunque se ha detectado que estos productos generados por la reacción de Maillard en una etapa avanzada pueden tener un impacto negativo y aumentar la citotoxicidad, no obstante, estos compuestos heterocíclicos y las melanoidinas tienen una función beneficiosa, como ejercer capacidades antioxidantes, antibacterianas y otras acciones biológicas (Ke y Li, 2023).

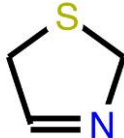
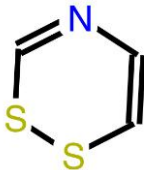
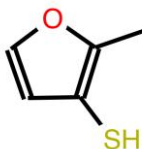
**Tabla 1.** Compuestos generados a partir de la reacción de Maillard.

	Compuesto	Características	Alimento	Estructura	Referencia
Moléculas que contienen nitrógeno	Pirazinas	Sabores a: Horneado, Tostado, Nuez	Carne de res, cebada tostada, cacao, café, maní, papas fritas y verduras.		Yu et al. (2021); Mortzfeld et al. (2020).
	Pirroles	Grano tostado Aroma a pan	Tés, arroz cocido y pan		Yang et al. (2023); Adams y De Kimpe (2006).

**Tabla 1.** Compuestos generados a partir de la reacción de Maillard.

	Oxazoles	Sabor a nuez, dulce, y notas verdes	No reportado		Maga y Katz. (1981)
	Pirrolinas	Aroma a pan	Pan, arroz, palomitas de maíz y trigo		Verma y Srivastav. (2020); Žuljević y Spaho (2024)
	Oxazolinas	Precursor de aroma en el chocolate oscuro	Chocolate oscuro con 70% de cacao		Granvogl et al. (2012)
Compuestos que contienen oxígeno	Furanos	Notas de olor a nuez y tostado. Sabor dulce, frutal, tostado, picante.	Pan, galletas, mermeladas, miel, cereales, café.		Liu et al. (2020)
	Furfurales	Dulce, amaderado	Pan sin gluten, pasta, dulce de leche		Starowi y Zieliński. (2019)
	Piranonas	No reportado	Té verde		Starowi y Zieliński. (2019)
Compuestos que contienen azufre	Tiazoles	Sabor a carne asada y nuez	Estofado de carne, papa, papas fritas, nueces tostadas (alimentos fritos, asados o a la parrilla)		Liu et al. (2020); Parr et al. (2023)

**Tabla 1.** Compuestos generados a partir de la reacción de Maillard.

Tiazolinas	Olores que van desde los salados (carnosos, grasos y de cebolla) hasta los dulces (palomitas de maíz, nueces y arroz tostado)	Cebada tostada, pollo hervido, carne hervida.		Parr et al. (2023); Yeo et al. (2022)
Ditiazinas	Sabor alimento calentado	a No reportado		Werkhoff et al. (1992)
Furantioles	Notas de nuez	Carne asada, nuez, patata		Sun et al. (2023)

El estudio de los compuestos generados en la reacción de Maillard es fundamental para comprender la complejidad de los sabores y aromas en los alimentos procesados. La tabla 1 refuerza la importancia de los compuestos generados en la reacción de Maillard, destacando su papel en la formación de sabores y aromas característicos en diversos alimentos. La presencia de compuestos heterocíclicos nitrogenados como pirazinas, pirroles y oxazoles confirma que la degradación de Strecker en la segunda etapa contribuye a la complejidad sensorial de productos como el café, la carne y el pan. Asimismo, la formación de furanos y furfurales en la tercera etapa sugiere su implicación en la polimerización y en la generación de melanoidinas, las cuales pueden influir tanto en el color como en la bioactividad de los alimentos.

Por otro lado, los compuestos que contienen azufre, como tiazoles, tiazolinas y ditiacinas,

desempeñan un papel crucial en los sabores asociados a alimentos cocidos y tostados. Estos compuestos aportan notas cárnicas, a nuez y a cebolla, lo que resalta la importancia de la reacción de Maillard en la generación de sabores complejos en productos como carne asada, cebada tostada y estofados. Sin embargo, la formación de ciertos compuestos azufrados puede estar vinculada a olores no deseados o incluso a la generación de sustancias con potencial impacto en la salud.

Este doble papel de los compuestos de Maillard abre el debate sobre la necesidad de optimizar las condiciones de procesamiento térmico para maximizar la formación de compuestos deseables y minimizar aquellos con efectos adversos. Si bien estos compuestos aportan características sensoriales atractivas y pueden tener propiedades antioxidantes y antibacterianas, su potencial citotoxicidad y la posibilidad de generar sustancias indeseables hacen necesario un control preciso en la producción de alimentos.

Tras la degradación por la reacción de Maillard, la temperatura también influye en la transformación de los lípidos presentes en los alimentos. La degradación térmica de estos compuestos genera una amplia variedad de sustancias volátiles y no volátiles, que afectan el aroma, el sabor y el color de los productos procesados (Ramos et al., 2023 y Marchesino et al., 2020). La degradación de lípidos a diferentes temperaturas produce compuestos que contribuyen al sabor y color de los alimentos (Wang et al., 2022). Esta degradación se produce fundamentalmente mediante autooxidación, fotooxidación y oxidación enzimática, que originan una gran variedad de compuestos volátiles (Shahidi y Hossain, 2022).

Dentro de este marco se ha demostrado que el linoleato de metilo afecta significativamente el perfil de sabor carnosos y que la oxidación de lípidos es evidente a altas temperaturas (Wang et al., 2022). Asimismo, indica que, durante las reacciones oxidativas, se forman principalmente aldehídos, cetonas, alcoholes y ácidos carboxílicos, algunos de los cuales son compuestos electroactivos (Ramírez-Montes et al., 2023). Mientras que, los resultados de muestran que las altas temperatura disminuyen el contenido de tocoferoles, polifenoles, benzopireno, que generan un sabor fuerte fragante y que el compuesto más influyente es



el 2,5-dimetilo proporcionando sabor a barbacoa (Dinh et al., 2021).

Además, los aldehídos saturados en la reacción de Maillard (RM) incrementan la acidez y disminuyen el sabor umami, mientras que los insaturados cambian los compuestos no volátiles como tioéteres arílicos y ácidos grasos. Por otro lado, los aldehídos saturados reducen el dorado, modificando sabores mediante productos de oxidación lipídica (Dinh y Schilling, 2021). Se ha demostrado que la oxidación de ácidos grasos insaturados genera hidroperóxidos que luego se descomponen en productos de oxidación de lípidos secundarios volátiles y olorosos, incluidos aldehídos, alcoholes y cetonas (Shahidi y Hossain, 2022).

Las interacciones entre los productos resultantes de la oxidación de lípidos y los compuestos formados por la reacción de Maillard desempeñan un papel más crucial en la formación del sabor de la carne de lo que se había considerado previamente, además, los compuestos volátiles originados de las grasas aportan matices de sabor que permiten la identificación de las especies (Dinh y Schilling, 2021). En los productos cárnicos, los lípidos son descompuestos por la lipasa para generar precursores de sabor como los ácidos grasos libres, estos precursores se oxidan adicionalmente, produciendo compuestos de sabor volátiles (Fu et al., 2022). Por lo que, la variación en los aromas de la carne cocida (res, cerdo, aves y ovejas) se debe a la existencia de una interacción entre los lípidos y la reacción de Maillard. Entre las moléculas que contribuyen a los aromas de la carne cocida se encuentran los aldehídos alifáticos de cadena corta (C6-C10), el 1-octen-3-ol (o 1-octen-3-ona) y los compuestos heterocíclicos que contienen azufre o nitrógeno (Sohail et al., 2022). En definitiva, la reacción de Maillard y la degradación de los lípidos son procesos clave en la generación de sabores y aromas en los alimentos procesados, con una compleja interacción entre compuestos nitrogenados, oxigenados y azufrados. Aunque estos procesos potencian el perfil sensorial y pueden conferir propiedades beneficiosas, también plantean desafíos en términos de control de calidad y seguridad alimentaria. La optimización de las condiciones térmicas y la comprensión de los factores que influyen en estas reacciones resultan esenciales para maximizar los beneficios sin comprometer la

estabilidad ni la inocuidad de los productos. Así, el estudio de estas interacciones sigue siendo un campo de gran interés para la industria alimentaria y la investigación científica.

## Conclusión

Los metabolitos bioactivos en alimentos, como terpenos, pigmentos, compuestos fenólicos y derivados de azúcares, aminoácidos y ácidos grasos, desempeñan un papel fundamental en la calidad sensorial y nutricional de los alimentos. La literatura revisada indica que la generación de aromas y sabores está influenciada por diversas rutas metabólicas, como la lipoxigenasa en la oxidación de lípidos, la descarboxilación y transaminación de aminoácidos, y la degradación térmica de azúcares, procesos que contribuyen al desarrollo de perfiles sensoriales únicos en los alimentos procesados.

Sin embargo, persisten desafíos en la producción y estabilidad de estos compuestos. La variabilidad en su biosíntesis, influenciada por factores genéticos y ambientales, dificulta su control y aplicación industrial. Además, la identificación y caracterización de estos metabolitos sigue siendo un reto debido a la complejidad de las reacciones químicas involucradas.

Es necesario seguir investigando la optimización de estas rutas metabólicas para mejorar la producción de compuestos aromáticos y bioactivos con impacto positivo en la calidad y seguridad de los alimentos. La integración de enfoques biotecnológicos y analíticos permitirá un mejor aprovechamiento de estos metabolitos, favoreciendo el desarrollo de alimentos con propiedades sensoriales mejoradas y beneficios potenciales para la salud.

## Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el valioso apoyo brindado a través del proyecto PNPAC-2023-9, el cual ha sido fundamental para el desarrollo de la Maestría en Ciencias Químicas con Énfasis en Inocuidad Alimentaria y para la realización de este trabajo. Agradezco igualmente a los profesores y colaboradores que, con su orientación y valiosas



aportaciones, enriquecieron este artículo. De manera especial, a la doctora Ariadna Batista, a la profesora Vielka de Guevara y a la profesora Jacqueline Jones, quienes, gracias a su experiencia y conocimientos, ofrecieron una guía invaluable durante la elaboración del manuscrito. Asimismo, extendo mi reconocimiento al doctor José Robinson Duggon por la revisión crítica del artículo titulado “Aromas y sabores naturales en alimentos: una revisión de sus principales rutas metabólicas”, cuyas observaciones y comentarios han contribuido de manera significativa a perfeccionar su contenido.

## Referencias

- Adams, A., y De Kimpe, N. (2006). Chemistry of 2-acetyl-1-pyrroline, 6-acetyl-1, 2, 3, 4-tetrahydropyridine, 2-acetyl-2-thiazoline, and 5-acetyl-2, 3-dihydro-4 H-thiazine: Extraordinary Maillard flavor compounds. *Chemical reviews*, 106(6), 2299-2319.  
<https://doi.org/10.1021/cr040097y>
- Aharoni, A., y Galili, G. (2011). Metabolic engineering of the plant primary–secondary metabolism interface. *Current opinion in biotechnology*, 22(2), 239-244.
- Al-Tannak, N. F., Anyam, J. V., Igoli, N. P., Gray, A. I., Alzharani, M. A., y Igoli, J. O. (2022). A new sesquiterpene from South African wild ginger (*Siphonochilus aethiopicus* (Schweinf) B.L. Burtt). *Natural Product Research*, 36(19), 4943-4948.  
<https://doi.org/10.1080/14786419.2021.1914029>
- Arias-Giraldo, S., y López-Velasco, D. M. (2019). Reacciones químicas de los azúcares simples empleados en la industria alimentaria. *Lámpsakos*, 22, 123-135.  
<https://doi.org/10.21501/21454086.3252>
- Ashihara, H., Crozier, A., y Komamine, A. (Eds.). (2011). *Plant metabolism and biotechnology*. Chichester: Wiley. 1-25. doi:10.1002/9781119991311
- Bakkalbaşı, E., Menteş, Ö., y Artik, N. (2008). Food ellagitannins—occurrence, effects of processing and storage. *Critical reviews in food science and nutrition*, 49(3), 283-298. doi: 10.1080/10408390802064404
- Carraro, P. C., Da Silva, E. D., y Oliveira, D. E. (2019). Palmitic acid increases the abundance of mRNA of genes involved in de novo synthesis of fat in mammary explants from lactating ewes. *Small Ruminant Research*, 174, 99-102.  
<https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.02.020>
- Chempakam, B., y Ravindran, P. N. (2023). Spices as Cosmeceuticals. In *Handbook of Spices in India: 75 Years of Research and Development* (pp. 4107-4189). Singapore: Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-3728-6\\_65](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3728-6_65)
- Cheng, J., Yang, K., Li, X., Liu, B., Chen, M., y Li, C. (2025). Identification of the arachidonic acid 5-lipoxygenase and its function in the immunity of *Apostichopus japonicus*. *Fish & Shellfish Immunology*, 157, 110095.  
<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.110095>
- Christie, W. W., y Harwood, J. L. (2020). Oxidation of polyunsaturated fatty acids to produce lipid mediators. *Essays in biochemistry*, 64(3), 401-421.  
<https://doi.org/10.1042/EBC20190082>
- Chumroenphat, T., Somboonwatthanakul, I., Saensouk, S., y Siriamornpun, S. (2019). The diversity of biologically active compounds in the rhizomes of recently discovered Zingiberaceae plants native to North Eastern Thailand. *Pharmacognosy Journal*, 11(5). <https://doi.org/10.5530/pj.2019.11.160>
- Coelho Neto, D. M., Moreira, L. L., de Castro, E. V., Souza, W. B., Filgueiras, P. R., Romão, W., ... y Lacerda Jr, V. (2022). Estudo do perfil químico de cervejas brasileiras: uma avaliação entre as bebidas artesanais e industriais. *Química Nova*, 45, 518-530.  
<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170857>

- Cui, Q., Jiang, L. J., Wen, L. L., Tian, X. L., Yuan, Q., y Liu, J. Z. (2024). Metabolomic profiles and differential metabolites of volatile components in Citrus aurantium Changshan-huyou pericarp during different growth and development stages. *Food Chemistry: X*, 23, 101631. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101631>
- Dávila-Aviña, J. E. D. J., González-Aguilar, G. A., Ayala-Zavala, J. F., Sepúlveda, D. R., y Olivas, G. I. (2011). Compuestos volátiles responsables del sabor del tomate. *Revista fitotecnica mexicana*, 34(2), 133-143.  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802011000200012&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802011000200012&lng=es&tlng=es)
- De Carvalho, C. C., y Caramujo, M. J. (2018). The various roles of fatty acids. *Molecules*, 23(10), 2583. <https://doi.org/10.3390/molecules23102583>
- Deryabin, D., Galadzhieva, A., Kosyan, D., y Duskaev, G. (2019). Plant-derived inhibitors of AHL-mediated quorum sensing in bacteria: Modes of action. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(22), 5588. <https://doi.org/10.3390/ijms20225588>
- Diamanti, J., Balducci, F., Di Vittori, L., Capocasa, F., Berdini, C., Bacchi, A., ... y Mezzetti, B. (2015). Physico-chemical characteristics of thermally processed purée from different strawberry genotypes. *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, 106-118. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.05.006>
- Diez-Simon, C., Mumm, R., y Hall, R. D. (2019). Mass spectrometry-based metabolomics of volatiles as a new tool for understanding aroma and flavour chemistry in processed food products. *Metabolomics*, 15(3), 41. <https://doi.org/10.1007/s11306-019-1493-6>
- Dinh, T. T., To, K. V., y Schilling, M. W. (2021). Fatty acid composition of meat animals as flavor precursors. *Meat and Muscle Biology*, 5(1). doi:  
<https://doi.org/10.22175/mmb.12251>
- Distefano, M., Mauro, R. P., Page, D., Giuffrida, F., Bertin, N., y Leonardi, C. (2022). Aroma Volatiles in Tomato Fruits: The Role of Genetic, Preharvest and Postharvest Factors. *Agronomy*, 12(2), 376. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020376>
- Du, M., Zhu, Y., Nan, H., Zhou, Y., y Pan, X. (2024). Regulation of sugar metabolism in fruits. *Scientia Horticulturae*, 326, 112712.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112712>
- Durán-Soria, S., Pott, D. M., Osorio, S., y Vallarino, J. G. (2020). Sugar signaling during fruit ripening. *Frontiers in Plant Science*, 11, 564917.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.564917>
- Fayek, N. M., Xiao, J., y Farag, M. A. (2023). A multifunctional study of naturally occurring pyrazines in biological systems; formation mechanisms, metabolism, food applications and functional properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(21), 5322-5338. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2017260>
- Feliu, M. S., Fernández I., y Slobodianik, N. (2021). Importancia de los ácidos grasos omega 3 en la salud Importance of omega 3 fatty acids in health. *Actualización en nutrición*, 22(1), 25-32.
- Fernandez-Moreno, J. P., y Stepanova, A. N. (2019). Monitoring ethylene in plants:

- genetically encoded reporters and biosensors. *Small Methods*, 4(8), 1900260. Doi: <https://doi.org/10.1002/smtd.201900260>
- Franco, M. F. S., Preczenhak, A. P., Bonandi, R., Oliveira, E. R., Rocha, T., y Kluge, R. (2023). La aplicación de putrescina exógena extiende la vida útil de las bananas en postcosecha. *Investigación Joven*, 10(2), 258-262. <https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/article/view/15941/15617>
- Fu, Y., Cao, S., Yang, L., y Li, Z. (2022). Flavor formation based on lipid in meat and meat products: A review. *Journal of Food Biochemistry*, 46(12), e14439. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14439>
- Fuentes, J. M., Loza, M. T., Murillo, I. V., Carrión, L. C., Ortega, H. S., y Antúnez, H. D. (2020). Efecto del eugenol en la vida útil de una salsa de chile jalapeño (*Capsicum annum*) y papaya (*Carica papaya*). *Nexo Revista Científica*, 33(01), 69-76 <https://doi.org/10.5377/nexo.v33i01.10046>
- Gavin, C., Barzallo, D., Vera, H., y Lazo, R. (2021). Revisión bibliográfica: Etileno en poscosecha, tecnologías para su manejo y control. *Ecuadorian Science Journal*, 5(4), 163-178. <https://doi.org/10.46480/esj.5.4.179>
- Genovese, A., Caporaso, N., y Sacchi, R. (2021). Flavor Chemistry of Virgin Olive Oil: An Overview. *Applied Sciences*, 11(4), 1639. <https://doi.org/10.3390/app11041639>
- Granvogl, M., Beksan, E., y Schieberle, P. (2012). New insights into the formation of aroma-active Strecker aldehydes from 3-oxazolines as transient intermediates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(25), 6312-6322. <https://doi.org/10.1021/jf301489j>
- Griffiths, C. A., Paul, M. J., y Foyer, C. H. (2016). Metabolite transport and associated sugar signalling systems underpinning source/sink interactions. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1857(10), 1715-1725. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2016.07.007>
- Gulsen, S. H., Touray, M., Cimen, H., y Hazir, S. (2024). Antiprotozoal Activity of Secondary Metabolites. In *Plant Specialized Metabolites: Phytochemistry, Ecology and Biotechnology* (pp. 1-33). Cham: Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30037-0\\_4-1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30037-0_4-1)
- Hamada, M., Wada, S., Kobayashi, K., y Satoh, N. (2005). Ci-Rga, a gene encoding an MtN3/saliva family transmembrane protein, is essential for tissue differentiation during embryogenesis of the ascidian *Ciona intestinalis*. *Differentiation*, 73(7), 364-376. <https://doi.org/10.1111/j.1432-0436.2005.00037.x>
- Han, Z., Zhu, M., Wan, X., Zhai, X., Ho, C. T., y Zhang, L. (2024). Food polyphenols and Maillard reaction: regulation effect and chemical mechanism. *Critical reviews in food science and nutrition*, 64(15), 4904-4920. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2146653>
- Harish, B. S., y Uppuluri, K. B. (2017). Sucrose Transforming Enzymes: Hydrolysis and Isomerization. In *Microbial Enzyme Technology in Food Applications* (pp. 85-101). CRC Press.
- Harms, V., Schröder, B., Oberhauser, C., Tran, C. D., Winkler, S., Dräger, G., y Kirschning, A.



- (2020). Methyl-shifted farnesyldiphosphate derivatives are substrates for sesquiterpene cyclases. *Organic Letters*, 22(11), 4360-4365.  
<https://doi.org/10.1021/acs.orglett.0c01345>
- He, M., Qin, C. X., Wang, X., y Ding, N. Z. (2020). Plant unsaturated fatty acids: biosynthesis and regulation. *Frontiers in Plant Science*, 11, 390.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00390>
- Hernández, J. V., Galarza, M. D. L. A., Alvarado, A. D., García, C. O., Monter, Á. V., y Mancera, H. A. Z. (2021). Características del fruto de vainilla verde y beneficiada cosechados a diferente edad. *Acta agrícola y pecuaria*, 7(1), 1-12
- Hernández-Bernal, A. F., Gregorio-Jorge, J., y León, P. (2022). El papel de los azúcares como moléculas de señalización en las plantas. TIP. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas* 25, e519.  
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.519>
- Huang, H., Chu, B., Yuan, Q., Gao, P., Zhong, W., Yin, J., ... y Wang, X. (2024). Effect of enzymatic Maillard reaction conditions on physicochemical properties, nutrition, fatty acids composition and key aroma compounds of fragrant rapeseed oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(4), 1953-1961.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.13082>
- Huang, L., Ho, C. T., y Wang, Y. (2021). Biosynthetic pathways and metabolic engineering of spice flavors. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(12), 2047-2060. doi:10.1080/10408398.2020.176954
- Igartúa, D., y Sceni, P. (2023). Abordaje experimental para la enseñanza y el aprendizaje de la reacción de Maillard en química de los alimentos. Universidad Nacional Autónoma de México; *Educación Química*; 34; 9-2023; 2-14  
<http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.4.86124e>
- Kathuria, D., Gautam, S., y Thakur, A. (2023). Maillard reaction in different food products: Effect on product quality, human health and mitigation strategies. *Food Control*, 153, 109911. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109911>
- Ke, C., y Li, L. (2023). Influence mechanism of polysaccharides induced Maillard reaction on plant proteins structure and functional properties: A review. *Carbohydrate Polymers*, 302, 120430. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120430>
- Khan, F. S., Gan, Z. M., Li, E. Q., Ren, M. K., Hu, C. G., y Zhang, J. Z. (2022). Transcriptomic and physiological analysis reveals interplay between salicylic acid and drought stress in citrus tree floral initiation. *Planta*, 255(1), 24.  
<https://doi.org/10.1007/s00425-021-03801-2>
- Khan, N., Bano, A., Ali, S., y Babar, M. A. (2020). Crosstalk amongst phytohormones from planta and PGPR under biotic and abiotic stresses. *Plant Growth Regulation*, 90(2), 189-203. <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00571-x>
- Klee, H. J., y Tieman, D. M. (2018). The genetics of fruit flavour preferences. *Nature Reviews Genetics*, 19(6), 347-356. <https://doi.org/10.1038/s41576-018-0002-5>
- Klemens, P. A., Patzke, K., Deitmer, J., Spinner, L., Le Hir, R., Bellini, C., ... y Neuhaus, H. E. (2013). Overexpression of the vacuolar sugar carrier AtSWEET16 modifies



- germination, growth, and stress tolerance in Arabidopsis. *Plant Physiology*, 163(3), 1338-1352. <https://doi.org/10.1111/j.1432-0436.2005.00037.x>
- Kruger, N. J., y Von Schaewen, A. (2003). The oxidative pentose phosphate pathway: structure and organisation. *Current opinion in plant biology*, 6(3), 236-246.
- Li, L., Wu, H. X., Ma, X. W., Xu, W. T., Liang, Q. Z., Zhan, R. L., y Wang, S. B. (2020). Transcriptional mechanism of differential sugar accumulation in pulp of two contrasting mango (*Mangifera indica* L.) cultivars. *Genomics*, 112(6), 4505-4515. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2020.07.038>
- Lin, I. W., Sosso, D., Chen, L. Q., Gase, K., Kim, S. G., Kessler, D., ... y Frommer, W. B. (2014). Nectar secretion requires sucrose phosphate synthases and the sugar transporter SWEET9. *Nature*, 508(7497), 546-549. <https://doi.org/10.1038/nature13082>
- Liu, H. T., Lyu, W. Y., Tian, S. H., Zou, X. H., Zhang, L. Q., Gao, Q. H., ... y Duan, K. (2019). The SWEET family genes in strawberry: identification and expression profiling during fruit development. *South African Journal of Botany*, 125, 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.07.002>
- Liu, H., Ma, L., Chen, J., Zhao, F., Huang, X., Dong, X., ... y Qin, L. (2023). Effect of aliphatic aldehydes on flavor formation in glutathione-ribose Maillard reactions. *Foods*, 12(1), 217. <https://doi.org/10.3390/foods12010217>
- Liu, Z., Liang, T., y Kang, C. (2023). Molecular bases of strawberry fruit quality traits: Advances, challenges, and opportunities. *Plant Physiology*, 193(2), 900-914
- Liu, S., Sun, H., Ma, G., Zhang, T., Wang, L., Pei, H., ... y Gao, L. (2022). Insights into flavor and key influencing factors of Maillard reaction products: A recent update. *Frontiers in Nutrition*, 9, 973677. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.973677>
- Liu, X., Xia, B., Hu, L. T., Ni, Z. J., Thakur, K., y Wei, Z. J. (2020). Maillard conjugates and their potential in food and nutritional industries: A review. *Food frontiers*, 1(4), 382-397. <https://doi.org/10.1002/fft2.43>
- Liu, Y., Lei, X., Deng, B., Chen, O., Deng, L., y Zeng, K. (2022). Methionine enhances disease resistance of jujube fruit against postharvest black spot rot by activating lignin biosynthesis. *Postharvest Biology and Technology*, 190, 111935. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111935>
- Lü, J., Tao, X., Yao, G., Zhang, S., y Zhang, H. (2020). Transcriptome analysis of low-and high-sucrose pear cultivars identifies key regulators of sucrose biosynthesis in fruits. *Plant and Cell Physiology*, 61(8), 1493-1506. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcaa068>
- Luo, Y., Li, S., y Ho, C.-T. (2021). Key Aspects of Amadori Rearrangement Products as Future Food Additives. *Molecules*, 26(14), 4314. <https://doi.org/10.3390/molecules26144314>
- Lv, Y. Q., Li, D., Wu, L. Y., Zhu, Y. M., Ye, Y., Zheng, X. Q., ... y Ye, J. H. (2022). Sugar signal mediates flavonoid biosynthesis in tea leaves. *Horticulture Research*, 9, uhac049. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac049>
- Mabou, F. D., y Yossa, I. B. N. (2021). TERPENES: Structural classification and biological

- activities. *IOSR J Pharm Biol Sci*, 16, 25-40.
- Maga, J. A., y Katz, I. (1981). The chemistry of oxazoles and oxazolines in foods. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 14(3), 295-307.  
<https://doi.org/10.1080/10408398109527307>
- Mahanta, B. P., Bora, P. K., Kemprai, P., Borah, G., Lal, M., y Haldar, S. (2021). Thermolabile essential oils, aromas and flavours: Degradation pathways, effect of thermal processing and alteration of sensory quality. *Food Research International*, 145, 110404. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110404>
- Marchesino, M. A., López, P. L., Guerberoff Enemark, G. K., y Olmedo, R. H. (2020). Los procesos de fritura y su relación con los valores nutricionales y la inocuidad: una visión integral desde la seguridad alimentaria. *Nexo agropecuario* 8(1), 43-51.  
<http://hdl.handle.net/11336/144678>
- Marchiosi, R., dos Santos, W. D., Constantin, R. P., de Lima, R. B., Soares, A. R., Finger-Teixeira, A., ... y Ferrarese-Filho, O. (2020). Biosynthesis and metabolic actions of simple phenolic acids in plants. *Phytochemistry Reviews*, 19(4), 865-906.  
<https://doi.org/10.1007/s11101-020-09689-2>
- Marcinkowska, M. A., y Jeleń, H. H. (2022). Role of sulfur compounds in vegetable and mushroom aroma. *Molecules*, 27(18), 6116.  
<https://doi.org/10.3390/molecules27186116>
- Mele, M. A., Kang, H. M., Lee, Y. T., y Islam, M. Z. (2020). Terpenoides de uva: importancia del sabor, regulación genética y potencial futuro. *Reseñas críticas en Ciencia y Nutrición de los Alimentos*, 61(9), 1429-1447.  
<https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1760203>
- Mortzfeld, F. B., Hashem, C., Vranková, K., Winkler, M., y Rudroff, F. (2020). Pyrazines: Synthesis and industrial application of these valuable flavor and fragrance compounds. *Biotechnology Journal*, 15(11), 2000064.  
<https://doi.org/10.1002/biot.202000064>
- Mostafa, S., Wang, Y., Zeng, W., y Jin, B. (2022). Floral scents and fruit aromas: Functions, compositions, biosynthesis, and regulation. *Frontiers in plant science*, 13, 860157.
- Nookaraju, A., Upadhyaya, C. P., Pandey, S. K., Young, K. E., Hong, S. J., Park, S. K., y Park, S. W. (2010). Molecular approaches for enhancing sweetness in fruits and vegetables. *Scientia Horticulturae*, 127(1), 1-15.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.09.014>
- Ohlrogge, J. B.; Jaworski, J. G.; y Post-Beittenmiller, D. (2018) De novo fatty acid biosynthesis. *Lipid metabolism in plants*. CRC Press. 3-32
- Ong, P. K., y Liu, S. Q. Flavor and sensory characteristics of vegetables. *Handbook of vegetables and vegetable processing* 2018, 135-156.
- Parr, H., Bolat, I., y Cook, D. (2023). Identification and categorization of volatile sulfur flavor compounds in roasted malts and barley. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 81(1), 76-87. <https://doi.org/10.1080/03610470.2021.2003669>
- Pathak, G., Dudhagi, S. S., Raizada, S., Singh, R. K., Sane, A. P., & Sane, V. A. (2023). Phosphomevalonate kinase regulates the MVA/MEP pathway in mango during

- ripening. *Plant Physiology and Biochemistry*, 196, 174-185.
- Pattyn, J., Vaughan-Hirsch, J., y Van de Poel, B. (2021). The regulation of ethylene biosynthesis: a complex multilevel control circuitry. *New Phytologist*, 229(2), 770-782.
- Paulino, B. N., Silva, G. N., Araujo, F. F., Neri-Numa, I. A., Pastore, G. M., Bicas, J. L., y Molina, G. (2022). Beyond natural aromas: The bioactive and technological potential of monoterpenes. *Trends in Food Science & Technology*, 128, 188-201. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.006>
- Pavagadhi, S., y Swarup, S. (2020). Metabolomics for evaluating flavor-associated metabolites in plant-based products. *Metabolites*, 10(5), 197. <https://doi.org/10.3390/metabo10050197>
- Pech, JC.; Purgatto, E.; Bouzayen, M.; y Latché A. (2018). Etileno y maduración de frutas. En: Roberts JA, ed. *Revisiónes anuales de plantas en línea* 44. <https://doi.org/10.1002/9781119312994.apr0483>
- Petersen, M., Hans, J., y Matern, U. (2010). Biosynthesis of phenylpropanoids and related compounds. *Annual Plant Reviews Volume 40: Biochemistry of Plant Secondary Metabolism*, 182-257. (49). <https://doi.org/10.1002/9781444320503.ch4>
- Pinto, T., Aires, A., Cosme, F., Bacelar, E., Morais, M. C., Oliveira, I., Ferreira-Cardoso, J., Anjos, R., Vilela, A., y Gonçalves, B. (2021). Bioactive (Poly)phenols, Volatile Compounds from Vegetables, Medicinal and Aromatic Plants. *Foods*, 10(1), 106. <https://doi.org/10.3390/foods10010106>
- Provost, J. (2019). The Maillard Reaction. In *Food Aroma Evolution* (pp. 281-291). CRC Press.
- Qaderi, M. M., Martel, A. B., y Strugnelli, C. A. (2023). Environmental Factors Regulate Plant Secondary Metabolites. *Plants*, 12(3), 447. <https://doi.org/10.3390/plants12030447>
- Qin, M.; Zhou, J.; Luo, Q.; Zhu, J.; Yu, Z.; Zhang, D.; Ni, D.; Chen, Y. (2024). The Key Aroma Components of Steamed Green Tea Decoded by Sensomics and Their Changes under Different Withering Degree. *Food Chem.*, 439, 138176. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138176>
- Quick, W. P., y Schaffer, A. A. (2017). Sucrose metabolism in sources and sinks. *Photoassimilate Distribution Plants and Crops Source-Sink Relationships*, 115-158.
- Ramírez-Montes, S., Rodríguez-Ávila, J. A., Santos-López, E. M., Galán-Vidal, C. A., y Tavizón-Pozos, J. A. (2023). Clasificación de aceites vegetales comestibles de acuerdo con su degradación. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11, 1-4. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial.10220>
- Ramos, M., Bustillos, R., Santolalla, S., Tuesta, T., Silva-Paz, R., y Jordán-Suárez, O. (2023). Effect of five cooking methods on the physicochemical, nutritional and sensory characteristics of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Scientia Agropecuaria*, 14(2).
- Rhodes, J. M., y Wooltorton, L. S. C. (1978). The biosynthesis of phenolic compounds in wounded plant storage. *Biochemistry of wounded plant tissues*, 243-286.

- Riaz, M., Zia-Ul-Haq, M., y Dou, D. (2021). Chemistry of carotenoids. In *Carotenoids: structure and function in the human body* (pp. 43-76). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46459-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46459-2_2)
- Salehi, F. (2021). Rheological and physicochemical properties of vegetable juices and concentrates: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(4), e15326. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15326>
- Sathasivam, R., Radhakrishnan, R., Kim, J. K., y Park, S. U. (2021). An update on biosynthesis and regulation of carotenoids in plants. *South African Journal of Botany*, 140, 290-302. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.05.015>
- Schieber, A., y Wüst, M. (2020). Volatile phenols—Important contributors to the aroma of plant-derived foods. *Molecules*, 25(19), 4529. <https://doi.org/10.3390/molecules25194529>
- Schmid, C., Brockhoff, A., Shoshan-Galeczki, Y. B., Kranz, M., Stark, T. D., Erkaya, R., ... y Hofmann, T. (2021). Comprehensive structure-activity-relationship studies of sensory active compounds in licorice (*Glycyrrhiza glabra*). *Food Chemistry*, 364, 130420. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130420>
- Shahidi, F., y Hossain, A. (2022). Role of Lipids in Food Flavor Generation. *Molecules*, 27(15), 5014. <https://doi.org/10.3390/molecules27155014>
- Shen, Y. P., Niu, F. X., Yan, Z. B., Fong, L. S., Huang, Y. B., y Liu, J. Z. (2020). Recent advances in metabolically engineered microorganisms for the production of aromatic chemicals derived from aromatic amino acids. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 407. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00407>
- Shi, J., Cao, C., Xu, J., y Zhou, C. (2020). Research advances on biosynthesis, regulation, and biological activities of apocarotenoid aroma in horticultural plants. *Journal of Chemistry*, 2020(1), 2526956. <https://doi.org/10.1155/2020/2526956>
- Simkin, A. J. (2021). Carotenoids and apocarotenoids in planta: Their role in plant development, contribution to the flavour and aroma of fruits and flowers, and their nutraceutical benefits. *Plants*, 10(11), 2321. <https://doi.org/10.3390/plants10112321>
- Sohail, A., Al-Dalali, S., Wang, J., Xie, J., Shakoar, A., Asimi, S., ... y Patil, P. (2022). Aroma compounds identified in cooked meat: A review. *Food Research International*, 157, 111385. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111385>
- Starowicz, M., y Zieliński, H. (2019). How Maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products? *Food Reviews International*, 35(8), 707-725. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1600538>
- Stevens, N., y Allred, K. (2022). Antidiabetic Potential of Volatile Cinnamon Oil: A Review and Exploration of Mechanisms Using In Silico Molecular Docking Simulations. *Molecules*, 27(3), 853. <https://doi.org/10.3390/molecules27030853>
- Sun, A., Chen, L., Wu, W., Soladoye, O. P., Zhang, Y., y Fu, Y. (2023). The potential meat flavoring generated from Maillard reaction products of wheat gluten protein hydrolysates-xylose: Impacts of different thermal treatment temperatures on flavor. *Food Research International*, 165, 112512.



- <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112512>
- Tan, X.; Song, W.; Chen, X.; Liu, L.; y Wu, J. (2020). Recent advances in biocatalytic derivatization of L-tyrosine. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104, 9907-9920. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10949-6>
- Tang, Y., Zhou, C., Yu, Z., Jiang, M., Chen, Y., Wang, H., y Yang, Z. (2024). Formation of lipid-derived volatile products through lipoxygenase (LOX)-and hydroperoxide lyase (HPL)-mediated pathway in oat, barley and soy bean. *Food Chemistry: X*, 22, 101514. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101514>
- Ties, P., y Barringer, S. (2012). Influence of lipid content and lipoxygenase on flavor volatiles in the tomato peel and flesh. *Journal of food science*, 77(7), C830-C837. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02775.x>
- Tomé-Rodríguez, S., Ledesma-Escobar, C. A., Penco-Valenzuela, J. M., Calderon-Santiago, M., y Priego-Capote, F. (2022). Metabolic patterns in the lipoxygenase pathway associated to fruitiness attributes of extra virgin olive oil. *Journal of Food Composition and Analysis*, 109, 104478. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104478>
- Trillo-Hernández, E. A., Orozco-Avitia, J. A., Ojeda-Contreras, Á. J., Berumen-Varela, G., Ochoa-Jiménez, V. A., Troncoso-Rojas, R., ... y Tiznado-Hernández, M. E. (2021). Expression analysis of genes encoding rhamnogalacturonan lyase isoenzymes during tomato fruit development and ripening. *Revista fitotecnica mexicana*, 44(4), 529-536.
- Troise, A. D., Berton-Carabin, C. C., Vitaglione, P., y Fogliano, V. (2020). Formation of taste-active pyridinium betaine derivatives is promoted in thermally treated oil-in-water emulsions and alkaline pH. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(18), 5180-5188. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c01446>
- Uchida, K., Terada, N., Sanada, A., Myoda, T., y Koshio, K. (2022). Development of a practical method to produce GABA rich green tea by vapor treatment with trans-2-hexenal. *Journal of ISSAAS*, 28(2), 52-61.
- Vázquez-Cuecuecha, O. G., García-Gallegos, E., y Chávez-Gómez, J. A. (2023). Caracterización física y química de los frutos de tres variedades de Prunus persica L. Batsch en Tlaxcala. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 14(5), 90-99. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i5.3197>
- Verma, D. K., y Srivastav, P. P. (2020). Extraction, identification and quantification methods of rice aroma compounds with emphasis on 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) and its relationship with rice quality: A comprehensive review. *Food Reviews International*, 38(2), 111-162. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1720231>
- Vincenti, S., Mariani, M., Alberti, J. C., Jacopini, S., Brunini-Bronzini de Caraffa, V., Berti, L., y Maury, J. (2019). Biocatalytic synthesis of natural green leaf volatiles using the lipoxygenase metabolic pathway. *Catalysts*, 9(10), 873. <https://doi.org/10.3390/catal9100873>
- Wang, H. Y., Qian, H., y Yao, W. R. (2011). Melanoidins produced by the Maillard reaction: Structure and biological activity. *Food chemistry*, 128(3), 573-584.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.075>  
Wang, Y. ; Li, Z.; Xu, M. ; Xiao, Z.; Liu, C. ; Du, B. ; Xu, D. ; Li, L . (2023). Signal molecules regulate the synthesis of secondary metabolites in the interaction between endophytes and medicinal plants. *Processes*, 11(3), 849.
- <https://doi.org/10.3390/pr11030849>  
Wang, Y., Xie, J., Zhang, C., Xu, Y., y Yang, X. (2022). Effect of lipid on formation of Maillard and lipid-Maillard meaty flavour compounds in heated cysteine-xylose-methyl linoleate system. *Flavour and Fragrance Journal*, 37(5), 274-284.
- <https://doi.org/10.1002/ffj.3710>  
Werkhoff, P., Guntert, M., y Hopp, R. (1992). Dihydro-1, 3, 5-dithiazines: Unusual flavor compounds with remarkable organoleptic properties. *Food Reviews International*, 8(3), 391-442. <https://doi.org/10.1080/87559129209540947>
- Xu, S., Deng, J., Wu, S., Fei, Q., Lin, D., Chen, H., ... y Ma, F. (2024). Dynamic changes of active components and volatile organic compounds in rosa roxburghii fruit during the process of maturity. *Foods*, 13(18), 2893.
- <https://doi.org/10.3390/foods13182893>  
Xuan, Y. H., Hu, Y. B., Chen, L. Q., Sosso, D., Ducat, D. C., Hou, B. H., y Frommer, W. B. (2013). Functional role of oligomerization for bacterial and plant SWEET sugar transporter family. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(39), E3685-E3694 <https://doi.org/10.1073/pnas.1311244110>
- Yadav, R. K., Singh, M., Roy, S., Ansari, M. N., Saeedan, A. S., y Kaithwas, G. (2018). Modulation of oxidative stress response by flaxseed oil: Role of lipid peroxidation and underlying mechanisms. *Prostaglandins & other lipid mediators*, 135, 21-26.
- <https://doi.org/10.1016/j.prostaglandins.2018.02.003>  
Yang, P., Wang, H., Cao, Q., Song, H., Xu, Y., y Lin, Y. (2023). Aroma-active compounds related to Maillard reaction during roasting in Wuyi Rock tea. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115, 104954.
- <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104954>  
Yang, S., Li, D., Li, S., Yang, H., y Zhao, Z. (2022). GC-MS metabolite and transcriptome analyses reveal the differences of volatile synthesis and gene expression profiling between two apple varieties. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(6), 2939. <https://doi.org/10.3390/ijms23062939>
- Yao, R., Fu, W., Du, M., Chen, Z.-X., Lei, A.-P., y Wang, J.-X. (2022). Carotenoids Biosynthesis, Accumulation, and Applications of a Model Microalga *Euglenagracilis*. *Marine Drugs*, 20(8), 496. <https://doi.org/10.3390/md20080496>
- Yeo, H., Balagiannis, D. P., Koek, J. H., y Parker, J. K. (2022). Comparison of odorants in beef and chicken broth—Focus on thiazoles and thiazolines. *Molecules*, 27(19), 6712. <https://doi.org/10.3390/molecules27196712>
- Yu, H., Zhang, R., Yang, F., Xie, Y., Guo, Y., Yao, W., y Zhou, W. (2021). Control strategies of pyrazines generation from Maillard reaction. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 795-807. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.028>
- Yuan, Y., Ren, S., Liu, X., Su, L., Wu, Y., Zhang, W., ... y Zhang, Y. (2022). SIWRKY35





- positively regulates carotenoid biosynthesis by activating the MEP pathway in tomato fruit. *New Phytologist*, 234(1), 164-178.  
<https://doi.org/10.1111/nph.17977>
- Zhang, J., Zhang, M., Bhandari, B., y Wang, M. (2023). Basic sensory properties of essential oils from aromatic plants and their applications: a critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(20), 6990-7003.  
<https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2177611>
- Zhang, L., Liu, T., Xue, Y., Liu, C., Ru, H., Dong, M., y Yu, Z. (2016). Effects of Drying Methods on the Aroma Components and Quality of *Capsella Bursa-Pastoris* L. *Journal of Food Process Engineering*, 39(2), 107-120.  
<https://doi.org/10.1111/jfpe.12204>
- Zhang, X., Wang, X., Zhang, Y., Wang, F., Zhang, C., y Li, X. (2023). Development of isopentenyl phosphate kinases and their application in terpenoid biosynthesis. *Biotechnology Advances*, 64, 108124.  
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108124>
- Zhang, Y., Li, W., y Xie, J. (2024). Unraveling the mysteries of melanoidins: insights into formation, structure, and health potential in fermented blacken foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-15.  
<https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2433610>
- Zhao, Y., Zuo, J., Yuan, S., Shi, W., Shi, J., Feng, B., y Wang, Q. (2021). UV-C Treatment Maintains the Sensory Quality, Antioxidant Activity and Flavor of Pepino Fruit during Postharvest Storage. *Foods*, 10(12), 2964.  
<https://doi.org/10.3390/foods10122964>
- Žuljević, S. O., y Spaho, N. (2024). Bread Aroma and Flavour Creation Factors. IntechOpen  
<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.115114>