

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y SENSORIALES DEL SABOR DE LA ALMENDRA DULCE

Jorge A. Pino^{1,2,*} y Ariel Ortega¹

¹ Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia. Carretera al Guatao km 3½, La Habana, C.P. 17 100, Cuba.

²Dpto. de Alimentos. Instituto de Farmacia y alimentos, Universidad de La Habana, Cuba.

E-mail: jpino@iiaa.edu.cu

Recibido: 09-12-2021 / Revisado: 14-12-2021 / Aceptado: 21-12-2021 / Publicado: 04-01-2022

RESUMEN

Este trabajo presenta una revisión bibliográfica sobre las características químicas y sensoriales del sabor de la almendra dulce. La calidad de consumo de las almendras depende de una serie de factores, donde se incluyen el desarrollo fisiológico en el campo, condiciones de cosecha y descascarado, así como condiciones de elaboración y almacenamiento. Las almendras tostadas, en contraste con las almendras crudas, contienen muchos más compuestos volátiles, pues el calor genera nuevos productos volátiles a través de una serie de reacciones, incluida la oxidación de lípidos, la pirólisis de los azúcares y reacciones de Maillard. Los componentes volátiles más importantes en el sabor de las almendras dulces dependen de si están crudas y del tipo de tostado. Entre ellos están la 1-octen-3-ona, metional, 2-metilbutanal, 3-metilbutanal, 2-acetil-1-pirrolina, 2-etil-3,5-dimetilpirazina, disulfuro de metilo y propilo, 2-propionil-1-pirrolina, fenilacetaldehído, 4-hidroxi-2,5-dimetil-3(2H)-furanona, (E,E)-2,4-nonadienal y 2-furfuriltiol.

Palabras clave: almendra dulce, *Prunus dulcis*, sabor, características químicas, características sensoriales.

ABSTRACT

Chemical and sensory characteristics of sweet almond

The chemical and sensory characteristics of the sweet almond flavor are reviewed. The quality of consumption of almonds depends on a series of factors, including physiological development in the field, harvesting and shelling conditions, as well as processing and storage conditions. Roasted almonds, in contrast to those raw, contain many more volatile compounds, as heat generates new volatile products through a series of reactions, including oxidation of lipids, sugar pyrolysis and Maillard reactions. The most important volatile components in the flavor of sweet almonds depend on whether they are raw and the type of roasting. Among them are 1-octen-3-one, methional, 2-methylbutanal, 3-methylbutanal, 2-acetyl-1-pyrroline, 2-ethyl-3,5-dimethylpyrazine, methyl propyl disulfide, 2-propionyl-1-pyrroline, phenylacetaldehyde, 4-hydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furanone, (E,E)-2,4-nonadienal and 2-furfurylthiol.

Keywords: sweet almond, *Prunus dulcis*, flavor, chemical characteristics, sensory characteristics.

INTRODUCCIÓN

La almendra es un término aplicado a la semilla del almendro (*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb), una especie dentro de la familia de las Rosáceas. Esta especie es nativa del centro-sur Asia y es cultivada en climas de tipo mediterráneo, incluyendo California, el Mar

***Jorge A. Pino-Alea:** Investigador titular del Departamento de Aromas del IIAA. Doctor en Ciencias Técnicas (CNIC, La Habana, 1980) y Doctor en Ciencias (IFAL, La Habana, 2011). Miembro titular de la Academia de Ciencias de Cuba. Investiga en la química y tecnología del aroma de los alimentos y aceites esenciales.

Mediterráneo, Asia central y Australia (1). A la especie se le ha designado con una variedad de sinónimos taxonómicos, que incluyen a *Amygdalus communis* L., *Amygdalus dulcis* Mill. y *Prunus amygdalus* Batsch (2). Además de las almendras cultivadas comercialmente, hay al menos 30 especies de almendras silvestres descritas que son generalmente más amargas que las variedades cultivadas (3, 4).

El fruto del almendro es una drupa, compuesta por una cáscara carnosa rodeando una cáscara dura, que protege la semilla comestible o núcleo. Los granos de la almendra dulce cultivada consisten principalmente de lípidos, proteínas, fibra y altas concentraciones de vitamina E, y estos comúnmente se consumen como frescos o tostados. Los granos de almendra contienen cantidades variables de amígdalina, un diglucósido que se descompone en cianuro de hidrógeno y benzaldehído en respuesta a la trituración del grano y exposición al agua o la saliva. Los fenotipos de almendra son caracterizados como dulce (no amarga), semirrigida o amarga, en dependencia de la concentración de amígdalina en el grano (5, 6).

La almendra dulce tiene un sabor más dulce y a nuez que la variedad amarga. Mientras que el benzaldehído se detecta en la almendra dulce cruda, no es el compuesto predominante que contribuye al aroma debido al menor nivel de amígdalina (4). Aunque una variedad de compuestos volátiles en la almendra dulce, su formación debido a reacciones enzimáticas no ha sido bien documentada. En un estudio de los compuestos volátiles liberados por reacciones enzimáticas en las almendras crudas dulces se identificaron los alcoholes 2-metil-1-propanol, 2-pentanol, 3-metil-1-butanol, 3-metil-3-buten-1-ol y 3-metil-2-buten-1-ol como los principales compuestos liberados por enzimas. Su liberación fue mayor en las almendras dulces que en las amargas, lo que sugiere que estos alcoholes pueden contribuir al aroma característico de las almendras dulces crudas (7).

La mayoría de productores y procesadores de almendras se centran en las almendras dulces cultivables y la popularidad de las almendras en comparación con otras nueces se ha disparado en los últimos años. Las almendras son la nuez de árbol más producida en el mundo, alcanzando más de 1,2 millones de toneladas métricas durante la temporada del 2017/2018 (8).

Las almendras son las nueces de árbol más consumidas con 984 g per cápita por año, aproximadamente cuatro veces la tasa de consumo de nueces, la segunda más alta nuez de árbol consumida (8). La calidad de consumo de las almendras está influenciada por una serie de factores, incluidos el desarrollo fisiológico en el campo, condiciones de cosecha y descascarado, así como condiciones de elaboración y almacenamiento. La nuez de la almendra se desarrolla rodeada por una cáscara; cuando se maduran, la cubierta se seca y se abre (9).

Todas las almendras cultivadas en California y vendidas en América del Norte (EE.UU., Canadá y México) requieren por ley pasteurizarlas, que se puede lograr por un procesamiento de vapor u óxido de propileno, que no disminuye los atributos sensoriales de los núcleos «crudos», o mediante un proceso de tratamiento térmico como escaldado o tostado (10). Las almendras a menudo se tratan más térmicamente (por ejemplo, tostado) para desarrollar el sabor y modificar la textura.

El objetivo de este trabajo fue realizar una revisión bibliográfica sobre las características químicas y sensoriales del sabor de la almendra dulce (*Prunus dulcis* [Mill.] D.A. Webb).

METODOLOGÍA

Para documentar la información en relación con las características químicas y sensoriales del sabor de la almendra dulce que brinde información para el desarrollo futuro de un saborizante, se hizo una búsqueda bibliográfica. Entre las bases de información científica mundiales, tales como *Google Scholar*, *Scopus*, *Web of Sciences*, *ScienceDirect*, *SciFinder*, *Chemical Abstract* y *Food Science and Technology Abstracts*, *Scopus* tiene una excelente reputación en la mayoría de las instituciones científicas y universidades pues proporciona un impacto positivo en la calidad de las investigaciones. Por tal razón, esta base fue seleccionada para analizar los documentos en relación con el aroma y sabor de las almendras. Además, se buscó en *Scholar Google*, *Web of Sciences* y diversos libros relacionados con la industria de los saborizantes y el análisis del aroma y sabor de los alimentos. La búsqueda automática principal se hizo con las palabras clave ‘*almond*’ combinada alternativamente con las palabras ‘*flavor*’, ‘*aroma*’ y ‘*volatiles*’. Esta estrategia buscó artículos que contengan las palabras antes mencionadas en su título, resumen o palabras clave.

El sabor de las almendras crudas

Si bien es importante asegurarse de que las almendras debidamente maduras, libres de insectos, moho y daño, y de un cierto tamaño y peso uniforme, el final determinante de la calidad de consumo de almendras es el sabor (11). El término sabor describe la integración e interpretación del cerebro de sensaciones de los receptores del gusto en la lengua y sensaciones de compuestos volátiles con olor detectados orto y retronasalmente durante la masticación (12). Esta sensación es por lo tanto influenciada por tres componentes principales del sabor: componentes no volátiles (gusto), el complemento de compuestos volátiles con olor activo (aroma), y la interpretación mental específica para el catador (psicología).

Entre los compuestos volátiles detectados en las almendras crudas se incluyen alcoholes C1-C9, aldehídos C4-C10, benzaldehído, ácidos, pirazinas, terpenos y compuestos de azufre (3,13-23).

La Tabla 1 recopila aquellos compuestos volátiles que, al menos, fueron reportados en dos estudios de almendras crudas, durante los últimos años. Esta información puede ser valiosa para el desarrollo de saborizantes de almendras crudas.

Es difícil evaluar qué compuestos son importantes para el aroma de la almendra cruda, ya que no todos los compuestos volátiles tienen olor y los compuestos con olor pueden que no tengan un efecto significativo sobre el aroma, ya que el efecto del aroma dependerá de la concentración y la intensidad del olor del compuesto volátil. En general, las clases de compuestos volátiles identificados en las almendras crudas por varios autores se superponen y las abundancias relativas de los compuestos informados son muy variables (13-21).

Así, se ha informado que los compuestos volátiles más abundantes en las almendras crudas fueron el metanol y etanol, y que estos pueden ser productos de descomposición de ácidos grasos (16), mientras que todos los demás estudios informaron que el compuesto más abundante en las almendras crudas fue el benzaldehído (13, 14, 17, 20). Este aldehído aromático se considera que tiene un olor clave en la almendra con un olor amargo y tiene un umbral de olor relativamente bajo (0,35 mg/L en agua) (24). Este se ha informado en concentraciones por encima del umbral en varios estudios,

haciendo de este compuesto un impulsor principal del sabor de la almendra cruda (13, 14, 17, 20). Los contenidos de benzaldehído son muy bajos en las almendras dulces crudas en comparación con los presentes en almendras amargas y semiamargas, lo que refleja altos contenidos de amigdalina en estas almendras (3, 25).

Los alcoholes se encontraron con mayor frecuencia en las almendras crudas (13, 14, 16-18, 24, 26, 27); sin embargo, su efecto sobre el aroma de almendras puede ser limitado, ya que los alcoholes tienen umbrales de aroma comparativamente altos (28).

Los aldehídos, además del benzaldehído, también fueron ampliamente reportados (13, 15, 17-9, 24, 26, 27), y estos tienden a tener menores umbrales sensoriales en comparación con los alcoholes (20) y en algunos casos, pueden contribuir significativamente al aroma de las almendras crudas. Sin embargo, los aldehídos C5-C11 son productos comunes de oxidación del ácido oleico y linoleico y se informa en concentraciones muy variables en los estudios de almendras amargas. Esto probablemente se deba a diferentes condiciones de edad, almacenamiento y grados de oxidación de lípidos antes del análisis. Algunos de estos compuestos que pueden tener influencia negativa en el aroma de almendras son el 2-hexenal, nonanal y octanal (4).

El sabor de las almendras procesadas térmicamente

Las almendras generalmente se tuestan con aire caliente o aceite para generar el aroma de las almendras tostadas. Las almendras tostadas, en contraste con las almendras crudas, contienen muchos más compuestos volátiles, pues el calor genera nuevos productos volátiles a través de una serie de reacciones, incluida la oxidación de lípidos, la pirolisis de los azúcares y reacciones de Maillard (4).

La investigación pionera en relación con los compuestos volátiles de la almendra dulce tostada se debe a científicos japoneses (29, 30) en el siglo pasado. Con el empleo de técnicas convencionales de extracción con disolventes, destilación a vacío, cromatografía de capa fina y GC-MS se identificaron 43 compuestos.

La Tabla 1 presenta los compuestos volátiles identificados en las almendras dulces tostadas. Los compuestos volátiles resultantes de las reacciones de Maillard

están bien documentados en almendras tratadas térmicamente. Los productos de Maillard reportados incluyen al 2-furfural, 2,5-dimetilpirazina, 2-etilpirazina, 2-metilpirazina, 2-acetilpirrol, y 2- y 3-metilbutanal (17, 18, 20, 21, 25, 29, 30, 31, 32, 33). Las alquilpirazinas se informan con frecuencia en productos alimenticios sometidos a temperaturas superiores a 100 °C, como nueces, café, chocolate y carne, e individualmente muestran cualidades de olor pertenecientes a estos productos alimenticios, como nuez, cacao, tostado, avellana, corteza de pan, maní y caramelo, así como terroso y papa (31).

Los umbrales de olor para pirazinas generalmente disminuyen con el número de grupos alquilo y el número de carbonos, aunque el umbral de olor depende de la posición del grupo (24). Los umbrales de olor para las metilpirazinas simples suelen ser más altos que las concentraciones reportadas en almendras, excepto en la 2-metilpirazina (umbral: 0,06 mg/L en agua) en almendras Butte/Padre, Comuna y Marcona (20, 31, 32). Se reportaron pirazinas sustituidas con etilo en concentraciones de umbral superior para 2-etil-5-metilpirazina (umbral: 0,10 mg/L en agua) y 2-etil-6-metilpirazina (umbral: 0,13 mg/L en agua) en almendras Marcona y Comuna tostadas (31).

Los furanos, como el 2-furfural y el alcohol furfúrico, también son reportados frecuentemente en almendras tratadas térmicamente (Tabla 1) y tienen un olor a almendra dulce/pan y azúcar cocido, respectivamente (31). Aunque estos compuestos tienen un umbral de olor alto (3,0 y 1,9 mg/L, respectivamente), el 2-furfural y alcohol furfúrico se informaron en concentraciones superiores al umbral de olor en almendras Comuna tostadas (31).

Los aldehídos 2- y 3-metilbutanal y el metional tienen umbrales de olor muy bajos en aceite (0,01; 0,0054 y 0,0002 mg/kg, respectivamente) y son detectados frecuentemente en estudios de compuestos volátiles de almendras tostadas, donde pueden estar proporcionando notas a chocolate, malta y papa cocida a las muestras, respectivamente (34). Los compuestos 2- y 3-metilbutanal se encontraron en concentraciones por encima del umbral en Butte/Padre (17), Nonpareil (21) y almendras españolas fritas (20), mientras que concentraciones supraumbrales de metional fueron reportadas en almendras Nonpareil (21), así como Marcona y Comuna (31).

El análisis por HS-SPME-GC-MS para evaluar los compuestos volátiles en almendras crudas y blanqueadas mostró un total de 23 compuestos (35). Muchos de ellos detectados en las almendras que recibieron el tratamiento de blanqueado fueron considerados productos de descomposición de los ácidos grasos, entre ellos el hexanal, heptanal, octanal, nonanal, 3-octen-2-ona, tetrametilpirazina y decanal.

El estudio de Erten y Cadwallader (21) es el trabajo más completo realizado sobre la contribución sensorial de los compuestos volátiles en la almendra dulce cruda, tostada y tostada en aceite. Un total de 17 compuestos fueron detectados por la técnica AEDA en las almendras crudas, que incluyeron seis aldehídos, dos cetonas, dos compuestos nitrogenados, un compuesto azufrado, dos ácidos, una furanona y tres compuestos desconocidos. El compuesto predominante del aroma fue la 1-octen-3-ona (olor a hongo) con el valor mayor del factor-FD de 27. El resto de los componentes, principalmente aldehídos tuvieron bajos valores de factor-FD de tres, indicando que individualmente estos compuestos hacen un poco contribución al aroma. El bajo valor de factores-FD de los compuestos detectados está de acuerdo con el débil aroma de las almendras crudas.

El tostado de las almendras resultó en un incremento en el número y abundancia de componentes volátiles. Un total de 35 compuestos fueron detectados por el AEDA en las almendras tostadas en seco. Estos consistieron en 13 aldehídos, dos cetonas, siete compuestos nitrogenados, cuatro compuestos azufrados, un ácido, dos furanonas y seis compuestos desconocidos. Basados en sus relativamente altos factores-FD, los compuestos activos del aroma fueron aldehídos, seguido de los compuestos nitrogenados y azufrados, cetonas, furanonas y ácidos. El metional (papa horneada) tuvo el mayor factor-FD (2187), seguido del 2- y 3-metilbutanal (malta/chocolate oscuro), 2-acetil-1-pirrolina (tostado/rositas de maíz) y 2-etil-3,5-dimetilpirazina (papa horneada/terroso), todos con factores-FD ≥ 729 . El disulfuro de metilo y propilo (ajo), 1-octen-3-ona (hongo), 2-propionil-1-pirrolina (tostado/rositas de maíz), fenilacetaldehído (floral/miel) y 4-hidroxi-2,5-dimetil-3(2H)-furanona (HDMF) (fresa/caramelo) fueron también sensorialmente importantes con factores-FD ≥ 243 .

Por su parte, en las almendras tostadas en aceite, un total de 45 compuestos activos del aroma fueron detectados, que incluyen 11 aldehídos, cuatro cetonas, nueve compuestos nitrogenados, tres compuestos azufrados, dos ácidos, tres furanonas y 13 compuestos desconocidos (con factores-FD \geq 9). Los componentes sensorialmente más importantes fueron las furanonas, compuestos nitrogenados y azufrados, aldehídos, cetonas y ácidos. La HDMF (fresa/caramelo) tuvo el más alto factor-FD (6561), seguido del metional (papa horneada), 2-acetil-1-pirrolina (tostado/rosita de maíz) y 2-etil-3,5-dimetilpirazina (papa horneada/terroso), todos con factores-FD de 2187. Otros componentes sensorialmente importantes (factores-FD de 729) fueron el 2- y 3-metilbutanal (malta/chocolate oscuro), (*E,E*)-2,4-nonadienal (grasoso/frito), 2-propionil-1-pirrolina (tostado/rosita de maíz) y 2-furfuriltiol (café).

Nueve compuestos fueron detectados en las almendras tostadas en seco que no fueron encontrados en las tostadas en aceite, que incluyeron al (*E,Z*)-2,6-nonadienal, (*E*)-2-decenal, (*E*)-4,5-epoxi-(*E*)-2-decenal, disulfuro de metilo y propilo y 5 compuestos desconocidos. Por otra parte, las almendras tostadas en aceite contuvieron 18 componentes que no fueron detectados en las tostadas en seco. Estos fueron la 2-etil-5-metilpirazina, 3-etil-2,5-dimetilpirazina, diacetilo, (*Z*)-1,5-octadien-3-ona, ácido acético, (*E,E,Z*)-2,4,6-nonatrienal, cicloteno y 11 compuestos no identificados.

En el trabajo de Erten y Cadwallader (21) también se estudió el aporte sensorial por la determinación del VAO. Un total de 27 compuestos tuvieron valores de VAO \geq 1 en las almendras crudas, tostadas en seco y tostadas en aceite. Debido a que las almendras poseen un alto contenido de lípidos, los VAO se calcularon en base a los umbrales de detección de olor publicados en aceite. Entre los 6 compuestos cuantificados en las almendras crudas, la vainillina fue el más abundante, seguido del ácido acético y nonanal. El ácido acético fue el de mayor VAO. Los VAO para los otros cinco constituyentes cuantificados en las almendras crudas, incluyendo a la 1-octen-3-ona, fueron bajos (< 1).

En contraste con las almendras crudas, los VAO fueron mucho mayores en las almendras tostadas. Un total de 20 y 24 compuestos fueron cuantificados en las almendras tostadas en seco y en aceite, respectivamente. Con la excepción del fenilacetaldehído, todos los compuestos estuvieron en mayor abundancia en las

almendras tostadas en aceite. Once componentes estuvieron significativamente en mayor proporción en las almendras tostadas en aceite. En las tostadas en seco, el hexanal, HDMF y fenilacetaldehído estuvieron presentes en mayores concentraciones. Sobre la base de los altos VAO, la 2,3-pentanodiona, junto con el metional, 2-acetil-1-pirrolina, 2-acetil-3,4,5,6-tetrahidropiridina y 2-acetil-1,4,5,6-tetrahidropiridina fueron considerados los más importantes sensorialmente en las almendras tostadas en seco. Los VAO de los sensorialmente más importantes estuvieron en concordancia con los factores-FD determinados por la técnica AEDA.

Las furanonas, HDMF y cicloteno tuvieron la mayor abundancia en las almendras tostadas en aceite, seguido del 2-metilbutanal, hexanal, 3-metilbutanal y 2,3-pentanodiona. Basados en sus relativamente altos VAO, la 2,3-pentanodiona, HDMF, 2-acetil-3,4,5,6-tetrahidropiridina y 2-acetil-1,4,5,6-tetrahidropiridina, metional, 2,3-dietil-5-metilpirazina y 2-propionil-1-pirrolina fueron los componentes sensorialmente más importantes en las almendras tostadas en aceite. La contribución de la 2,3-pentanodiona no está clara, debido a su bajo factor-FD, pero alto VAO en ambos tipos de tostado. La falta de coincidencia entre los resultados del AEDA y VAO pudiera ser debido a inexactitudes en las concentraciones determinadas y a umbrales de detección de olor erróneos.

La almendra cruda tiene un carácter a nuez, graso, ligeramente verde y benzaldehído (36). Las almendras generalmente se tuestan para obtener el típico carácter tostado, a nuez, palomitas de maíz, ligeramente acaramelado con una nota muy baja de benzaldehído. Los compuestos del pardeamiento no enzimático: 2,5- y 2,6-dimetilpirazinas, y la 2,3,5-trimetilpirazina imparten el carácter fresco, verde, nuez, la 2-metil-6,7-dihidro-5*H*-ciclo-pentapirazina es responsable de la nota de nuez tostada y la 4-hidroxi-2,5-dimetil-3(2*H*)-furanona refuerzan la impresión general dulce como el caramelo. La mayoría de los saborizantes de almendra comerciales contienen una gran cantidad de benzaldehído, que representa más el tipo de almendra amarga fresca.

Tabla 1. Compuestos volátiles identificados en las almendras dulce y tostada

Compuesto	Dulce	Tostada
<i>Ácidos</i>		
Acético	19, 21, 22, 35	21, 23, 33
Propanoico	23	23
3-Metilbutanoico	-	21
Hexanoico	6, 17, 19, 35	6, 17
<i>Alcoholes</i>		
Metanol	16	16
Etanol	16, 22, 23	16, 23
1,2-Etanodiol	22	-
1-Propanol	19, 22	-
2-Propanol	22	-
2-Propanol	-	6, 17
1-Butanol	6, 16, 17, 19, 22	6, 16, 17
2-Butanol	17, 22	-
2-Metil-1-propanol	6, 17, 19, 20, 22	6, 17
1-Pentanol	6, 13, 15, 17-19, 22, 23	6, 17, 18, 20, 23
2-Pentanol	22	-
3-Pentanol	22	6, 17
2-Metil-1-butanol	18, 23	18, 23
3-Metil-1-butanol	6, 17, 19, 20, 22, 23	6, 17
3-Metil-2-butanol	19	-
3-Metil-2-buten-1-ol	13, 15, 17, 19, 20, 22	-
3-Metil-3-buten-1-ol	13, 15, 19, 20, 22	-
1-Penten-3-ol	22	-
3-Penten-2-ol	22	-
1-Hexanol	16-20, 22, 23, 35	6, 16, 17, 18, 23, 31, 37
2-Hexanol	-	31
3-Hexanol	22	-
(Z)-3-Hexen-1-ol	16	16
3-Metil-1-pentanol	22	-
2-Metil-3-pentanol	19, 22	-
2-Butoxi-etanol	22	-
1-Heptanol	6, 17, 19, 20, 22	6, 17, 31, 37
2-Heptanol	16	16
1-Octanol	6, 17, 19, 23	6, 16, 17, 23
1-Octen-3-ol	6, 16, 17, 19, 20	16, 31, 37
2-Etil-1-hexanol	17, 18, 19, 22	18, 31
1-Nonanol	6, 17, 19, 20	23
1,2-Propanodiol	6, 17, 19	6, 17
2,3-Butanodiol	5, 22, 23	-
2-Metil-2,3-pentanodiol	19	-
Alcohol bencílico	5, 13, 15-20, 22, 23	16, 18, 23, 31
2-Feniletanol	6, 13, 15, 17-20, 22	6, 17, 18, 23, 37

Tabla 1. (cont.)

Compuesto	Dulce	Tostada
2-Fenoxietanol	-	23
<i>Aldehídos</i>		
Butanal	6, 17, 22	6, 17, 20
2-Metilpropanal	-	21, 33
Pentanal	6, 17, 18, 22	6, 17, 18, 20
2-Metilbutanal	6, 17, 22	6, 17, 20, 21, 23, 33
3-Metilbutanal	6, 17, 22	6, 17, 20, 21, 33
3-Metil-2-butenal	22	-
Hexanal	6, 13, 15, 17-22, 35	6, 17, 18, 20, 21, 23, 37
(<i>E</i>)-2-Hexenal	16	17
Heptanal	6, 16-18, 20, 35	6, 16, 20, 31
(<i>Z</i>)-2-Heptenal	6, 17	6, 16-18, 20, 31, 37
(<i>Z</i>)-2-Heptenal	-	6, 17
(<i>E</i>)-2-Heptenal	16	16, 23, 37
Octanal	6, 17, 20, 21, 35	6, 17, 20, 21, 23, 31
(<i>E</i>)-2-Octenal	6, 16, 17	6, 16, 17, 37
Nonanal	6, 16, 17, 19-22, 35	6, 16, 20, 31, 37
(<i>Z</i>)-2-Nonenal	-	6
(<i>E</i>)-2-Nonenal	16	16, 17, 21, 37
Decanal	35	6, 20, 30, 37
Benzaldehído	5, 6, 13, 15-20, 22, 23	31
Fenilacetaldehído	18, 22	6, 17, 18, 21, 23, 31, 37
Salicilaldehído	23	23
(<i>E</i>)-Cinamaldehído	23	-
2-Fenil-2-butenal	-	21, 31
2,4-Nonadienal	-	31, 37
2,4-Decadienal	-	30
(<i>Z,Z</i>)-2,4-Decadienal	-	31
(<i>E,E</i>)-2,4-Decadienal	-	21, 31, 37
<i>Cetonas</i>		
Butan-2-ona	22	-
1-Hidroxipropan-2-ona	6, 17	6, 17, 23
1-Hidroxibutan-2-ona	-	23
3-Hidroxibutan-2-ona	16, 22	6, 16, 17, 23, 31, 33
4-Metil-3-penten-2-ona	-	30
Heptan-2-ona	6, 17, 18, 35	6, 17, 18, 31, 37
Heptan-3-ona	18	18
Octan-2-ona	35	-
1-Octen-3-ona	21	21
3-Octen-2-ona	35	37
Nonan-2-ona	-	37
Decan-2-ona	35	-
Undecan-2-ona	16	16
Butan-2,3-diona	6, 17	6, 17, 21

Tabla 1. (cont.)

Compuesto	Dulce	Tostada
Pentan-2,3-diona	-	21, 33
Acetofenona	-	31
<i>Furanos</i>		
2,5-Furanodiona	-	31
2-Acetilfurano	-	20, 30
2-Metil-4,5-dihidro-3(2H)-furanona	-	6, 17, 31, 32
2-Butilfurano	35	-
2-Pentilfurano	6, 17, 23, 35	6, 17, 20, 23, 33
3-Hidroxi-4,5-dimetil-2(5H)-furanona (sotolona)	-	21
4-Hidroxi-2,5-dimetil-3(2H)-furanona (HDMF)	21	21, 23
5-Hidroximetil-2-furfural (HMF)	16, 21	16, 23, 30
Dihidro-3-metil-2(3H)-furanona	22	-
5-Metilfurfural	-	20, 23, 30, 31, 32
2-Furfural	16, 17, 22	6, 16, 17, 20, 23, 30, 31, 32, 37
5-Etildihidro-2(3H)-furanona	22	-
Furoato de metilo	-	30
Acetato de furfurilo	-	30
Furfuril metil éter	-	30
Alcohol furfurílico	6, 17, 22	6, 17, 20, 23, 30, 31, 32
γ -Dihidrofuran-2(3H)-ona	6	-
1,4-Butirolactona	16, 17, 19, 23, 35	6, 16, 17, 23, 33
γ -Pentalactona	19	-
γ -Hexalactona	35	-
γ -Octalactona	35	-
γ -Nonalactona	35	-
<i>Pirazinas</i>		
2-Metilpirazina	16-18	6, 16, 17, 18, 20, 23, 31, 32, 33, 37
2-Etilpirazina	-	6, 17, 18, 20, 23, 31, 32, 33
2,3-Dietil-5-metilpirazina	-	21, 32
2,3-Dimetil-5(2-propenil)-pirazina	-	32
2,3-Dimetil-5-etilpirazina	-	31, 32
2,3-Dimetilpirazina	-	6, 17, 18, 20, 31, 32, 33
2,5-Dietilpirazina	-	31, 32
2,5-Dietil-3-metilpirazina	-	30, 32
2,5-Dimetil-3-vinilpirazina	-	32
2,5-Dimetil-3-etilpirazina	-	20, 30, 31, 32
2,5-Dimetilpirazina	6, 17	6, 16, 17, 18, 20, 23, 29, 30, 31, 32, 33, 37

Tabla 1. (cont.)

Compuesto	Dulce	Tostada
2,6-Dietilpirazina	-	17, 20, 29, 32
2,6-Dimetilpirazina	-	6, 17, 20, 37
2,6-Dimetil-3-etilpirazina	-	30, 31
2-Acetil-3-metilpirazina	-	32
2-Etil-3-metilpirazina	-	31, 32
6-Etil-2-metilpirazina	-	30
2-Etil-5-metilpirazina	-	20, 21, 23, 31-33, 37
2-Etil-6-metilpirazina	-	6, 17, 20, 23, 33
2-Metil-((<i>E</i>)-1-propenil)pirazina	-	32
2-Metil-((<i>Z</i>)-1-propenil)pirazina	-	32
2-Metil-5-(1-propenil)pirazina	-	31
3,5-Dimetil-2-etilpirazina	-	32
3-Etil-2,5-dimetilpirazina	-	21, 23, 33, 37
2,3,5-Trimetilpirazina	16	6, 16, 17, 20, 21, 23, 29, 30, 33
Tetrametilpirazina	35	-
2-(2'-Furyl)pirazina	-	29, 30
Acetilpirazina	-	31, 32
2-Metil-5-vinilpirazina	-	31
6,7-Dihidro-5 <i>H</i> -ciclopentapirazina	-	30
5-Metil-6,7-dihidro-5 <i>H</i> -ciclopentapirazina	-	29
<i>Piridinas</i>		
2-Acetil-1,4,5,6-tetrahidropiridina	-	21
2-Acetilpiridina	-	20, 33
<i>Pirroles</i>		
1 <i>H</i> -Pirrol	16	6, 16, 17, 23, 31, 32
1-(2-furfuril)-Pirrol	-	31, 32
1 <i>H</i> -Pirrol-2-carboxaldehido	-	20, 23
2-Acetilpirrol	-	21
2-Propionil-1-pirrolina	-	21
2-Acetilpirrol	-	6, 17, 21, 30, 31, 32
2-Metil-1 <i>H</i> -pirrol	-	31
2-Formilpirrol	-	30
4-Metil-2-formilpirrol	-	30
1-Etil-2-formilpirrol	-	30
2-Propionil-1-pirrolina	-	21
Piranona	-	23
<i>Compuestos azufrados</i>		
2-(Metiltio)-etanol	22	-
2-Furfuriltiol	-	21
2-(Etiltio)-etanol	6, 17	17

Tabla 1. (cont.)

Compuesto	Dulce	Tostada
1-(Metiltio)-2-propanol	6, 17	6, 17
3-(Metiltio)-1-propanol	22	-
Metional	16, 21	16, 21, 31
Sulfuro de dimetilo	-	6, 17
Trisulfuro de dimetilo	-	21
Disulfuro de metilo	-	20
1-Octeno	23	-
<i>n</i> -Decano	23	23
3-Metilnonano	-	23
<i>n</i> -Undecano	16, 23, 35	16, 23
<i>n</i> -Dodecano	16, 35	16, 23, 31
<i>n</i> -Tridecano	23	23
1-Trideceno	23	-
<i>n</i> -Tetradecano	23	23, 31
<i>n</i> -Pentadecano	-	31
<i>n</i> -Hexadecano	-	31
2,2,4,6,6-Pentametil heptano	-	31
α -Pino	6, 17, 18, 20	6, 17
Limoneno	6, 17, 20, 35	6, 17, 31, 37
γ -Terpineno	23	23
Tolueno	13, 15, 16, 20, 22, 23	16, 20, 23, 31
Etilbenceno	20, 23	23
1,2-Dimetilbenceno	20	-
1,3-Dimetilbenceno	20, 23	23
1,4-Dimetilbenceno	23	23
1,3,5-Trimetilbenceno	20, 23	-
1-Etil-2-metilbenceno	-	23
1-Etil-3-metilbenceno	23	23
1-Etil-4-metilbenceno	-	23
4-Etil-1,2-dimetilbenceno	23	-
1,2,3,4-Tetrametilbenceno	23	-
Acetato de etilo	22, 23	6, 17, 23
Bifenilo	23	23
2,2'-Dimetilbifenilo	23	23
3,3'-Dimetilbifenilo	23	23
<i>o</i> -Hidroxibifenilo	23	23
1,2-Difenilbenceno	23	23
Estireno	20, 23	-
Fenol	23, 35	23
4-Metilfenol	23	-
2-Fenoxietanol	23	-
Vainillina	21	-
2-Metoxifenol	22	-

Tabla 1. (cont.)

Compuesto	Dulce	Tostada
4-Vinilguayacol	18	-
Decil octil éter	-	23
1,8-Cineol	23	23
Isomentol	-	31
(Z)-Óxido de linalol	22	-
Carvona	-	31
β -Ionona	-	31
Acetonitrilo	22	-
γ -Oxepan-2-ona	6, 17	6, 17
5-Metilquinoxalina	-	29, 30

CONCLUSIONES

El sabor de las almendras dulces está influenciado principalmente por la composición no volátil y la textura. La astringencia en las almendras se debe a los compuestos fenólicos de la piel. Sin embargo, algunos componentes volátiles son los más importantes en el aroma. En las almendras dulces crudas, el compuesto predominante del aroma parece ser la 1-octen-3-ona (olor a hongo). El tostado de las almendras dulces resulta en un incremento en el número y abundancia de componentes volátiles. En las almendras dulces tostadas en seco los más importantes son el metional (papa horneada), 2-metilbutanal y 3-metilbutanal (malta/chocolate oscuro), 2-acetil-1-pirrolina (tostado/rositas de maíz), 2-etil-3,5-dimetilpirazina (papa horneada/terroso), disulfuro de metilo y propilo (ajo), 1-octen-3-ona (hongo), 2-propionil-1-pirrolina (tostado/rositas de maíz), fenilacetaldehído (floral/miel) y 4-hidroxi-2,5-dimetil-3(2H)-furanona (fresa/caramelo). Asimismo, en las almendras dulces tostadas en aceite, la 4-hidroxi-2,5-dimetil-3(2H)-furanona (fresa/caramelo), metional (papa horneada), 2-acetil-1-pirrolina (tostado/rosita de maíz) y 2-etil-3,5-dimetilpirazina (papa horneada/terroso), 2-metilbutanal y 3-metilbutanal (malta/chocolate oscuro), (E,E)-2,4-nonadienal (grasoso/frito), 2-propionil-1-pirrolina (tostado/rosita de maíz) y 2-furfuriltiol (café) parecen ser los sensorialmente más importantes.

REFERENCIAS

1. Yada S, Lapsley K, Huang GA. Review of composition studies of cultivated almonds: macronutrients and micronutrients. *J Food Comp Anal* 2011; 24:469-80.
2. Cadwallader KR, Puangphaphant S. Flavor and volatile compounds in tree nuts. En: *Tree Nuts: Composition, Phytochemicals, and Health Effects*. Boca Raton: FL, EE.UU. CRC Press, Taylor & Francis Group; 2009. pp. 109-26.
3. Moayed A, Rezaei K, Moini S, Keshavarz B. Chemical compositions of oils from several wild almond species. *J Am Oil Chem Soc* 2011; 88:503-8.
4. Franklin LM, Mitchell AE. Review of the sensory and chemical characteristics of almond (*Prunus dulcis*) flavor. *J Agric Food Chem* 2019; 67:2743-53.
5. Wirthensohn MG, Chin WL, Franks TK, Baldock G, Ford CM, Sedgley M. Characterising the flavour phenotypes of almond (*Prunus dulcis* Mill.) kernels. *J Hort Sci Biotechnol* 2008; 83:462-8.
6. Lee J, Zhang G, Wood E, Castillo CR, Mitchell AE. Quantification of amygdalin in nonbitter, semibitter, and bitter almonds (*Prunus dulcis*) by UHPLC-(ESI)QqQ MS/MS. *J Agric Food Chem* 2014; 61:7754-9.
7. Kwak J, Faranda A, Henkin JM, Gallagher M, Preti G, McGovern PE. Volatile organic compounds released by enzymatic reactions in raw nonpareil almond kernel. *Eur Food Res Technol* 2015; 241:441-6.
8. INDFC. *Nuts & Dried Fruits Statistical Yearbook 2017/2018*. Reus, España: International Nut & Dried Fruit Council; 2018.
9. Almond Board of California. Almond lifecycle: harvest 2018. Disponible en: <http://www.almonds.com/consumers/about-almonds/almondlifecycle/harvest>. Acceso 16 agosto 2021.
10. Almond Board of California. Processing safe products: pasteurization 2018. Disponible en: <http://www.almonds.com/processors/processingsafe-product/pasteurization>. Acceso 16 agosto 2021.
11. Socias R, Kodad O, Alonso JM, Gradziel TM. Almond quality: a breeding perspective. *Hortic Rev* 2008; 34:197-238.
12. Lawless HT, Heymann H. *Sensory Evaluation of Food. Principles and Practices*. 2nd ed., New York, USA: Springer Science+Business Media LLC; 2010.
13. Mexis SF, Badeka AV, Chouliara E, Riganakos KA, Kontominas MG. Effect of α -irradiation on the physicochemical and sensory properties of raw unpeeled almond kernels (*Prunus dulcis*). *Innov Food Sci Emerg Technol* 2009; 10:87-92.
14. Mexis SF, Badeka AV, Kontominas MG. Quality evaluation of raw ground almond kernels (*Prunus dulcis*): Effect of active and modified atmosphere packaging, container oxygen barrier and storage conditions. *Innov Food Sci Emerg Technol* 2009; 10:580-9.
15. Mexis SF, Kontominas MG. Effect of oxygen absorber, nitrogen flushing, packaging material oxygen transmission rate and storage conditions on quality retention of raw whole unpeeled almond kernels (*Prunus dulcis*). *LWT* 2010; 43:1-11.
16. Agila A, Barringer S. Effect of roasting conditions on color and volatile profile including HMF level in sweet almonds (*Prunus dulcis*). *J Food Sci* 2012; 77:C461-8.
17. Xiao L, Lee J, Zhang G, Ebeler SE, Wickramasinghe N, Seiber J, Mitchell AE. HS-SPME GC/MS characterization of volatiles in raw and dry-roasted almonds (*Prunus dulcis*). *Food Chem* 2014; 151:31-9.
18. Manzano P, Diego JC, Bernal JL, Nozal MJ, Bernal J. Comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled with static headspace sampling to analyze volatile compounds: Application to almonds. *J Sep Sci* 2014; 37:675-83.
19. Rogel-Castillo C, Zuskov D, Chan BL, Lee J, Huang G, Mitchell AE. The effect of temperature and moisture on the development of concealed damage in raw almonds (*Prunus dulcis*). *J Agric Food Chem* 2015; 63:8234-40.
20. Valdés A, Beltrán A, Karabagias I, Badeka A, Kontominas MG, Garrigos MC. Monitoring the oxidative stability and volatiles in blanched, roasted and fried almonds under normal and accelerated storage conditions by DSC, thermogravimetric analysis and ATR-FTIR. *Eur J Lipid Sci Technol* 2015; 117:1199-1213.
21. Erten ES, Cadwallader KR. Identification of predominant aroma components of raw, dry roasted and oil roasted almonds. *Food Chem* 2017; 217:244-53.
22. King ES, Chapman DM, Luo K, Ferris S, Huang G, Mitchell AE. Defining the sensory profiles of raw almond (*Prunus dulcis*) varieties and the contribution of key chemical compounds and physical properties. *J Agric Food Chem* 2019; 67:3229-41.
23. Xu Y, Liao M, Wang D, Jiao S. Physicochemical quality and volatile flavor compounds of hot air-assisted radio frequency roasted almonds. *J Food Process Preserv* 2020; 44 (4):e14376. doi: 10.1111/jfpp.14376.
24. Belitz H.-D., Grosch W., Schieberle, P. (2009). Aroma compounds. En: *Food Chemistry*, 4th ed.; Springer-Verlag: Berlin, Germany, pp 340-402.
25. Sathe SK, Teuber SS, Gradziel TM, Roux KH. Electrophoretic and immunological analyses of almond (*Prunus dulcis* L.) genotypes and hybrids. *J Agric Food Chem* 2001; 49:2043-52.
26. Rinaldi A. The scent of life. *EMBO Rep*. 2007; 8:629-33.

27. Varela P, Salvador A, Fiszman S. On the assessment of fracture in brittle foods II. Biting or chewing? *Food Res Int* 2009; 42:1468-74.
28. Morales MT., Rios JJ, Aparicio R. Changes in the volatile composition of virgin olive oil during oxidation: flavors and off flavors. *J Agric Food Chem* 1997; 45:2666-73.
29. Takei Y, Shimada K, Watanabe S, Yamanishi T. Volatile components of roasted almonds: Basic fraction. *Agr Biol Chem* 1974; 38 (3):645-8.
30. Takei Y, Yamanishi T. Flavor components of roasted almond. *Agr Biol Chem* 1974; 38 (12):2329-36.
31. Vazquez-Araújo L., Enguix L., Verdú A., García-García E., Carbonell-Barrachina A. (2008). Investigation of aromatic compounds in toasted almonds used for the manufacture of turrón. *Eur. Food Res. Technol.* 227, 243-254.
32. Vazquez-Araújo L., Verdú A., Navarro P., Martínez-Sánchez F., Carbonell-Barrachina A. (2009). Changes in volatile compounds and sensory quality during toasting of Spanish almonds. *Int. J. Food Sci. Technol.* 44, 2225-2233.
33. Franklin LM, Chapman DM, King ES, Mau M, Huang G, Mitchell AE. Chemical and sensory characterization of oxidative changes in roasted almonds undergoing accelerated shelf life. *J Agric Food Chem* 2017; 65:2549-63.
34. Parker JK. (2015). Thermal generation of aroma. En: Parker JK, Elmore S, Methven L, Eds. *Flavour Development, Analysis and Perception in Food and Beverages*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
35. Beck JJ, Mahoney NE, Cook D, Gee WS. (2011). Volatile analysis of ground almonds contaminated with naturally occurring fungi. *J Agric Food Chem* 2011; 59:6180-7.
36. Ziegler H. *Flavourings. Production, Composition, Applications, Regulations*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.
37. Yang J, Pan Z, Takeoka G, Mackey B, Bingol G, Brandl MT, Garcin K, McHugh TH, Wang H. Shelf-life of infrared dry-roasted almonds. *Food Chem.* 2013; 138:671-8.