



Cacao fino y de aroma: compuestos claves de aroma y comportamiento durante el proceso*

Fine and flavor cocoa: Key aroma compounds and their behavior during processing

Lea Wexler-Goering¹, Priscilla Alvarado-Marenco²

* Recepción: 3 de mayo, 2024. Aceptación: 23 de agosto, 2024. Este trabajo fue realizado como parte del proyecto de investigación "Evaluación preliminar del perfil sensorial, de compuestos volátiles y de metabolitos de tres variedades de cacao cultivadas en Costa Rica" financiado por la Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica.

¹ Universidad de Costa Rica, Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CITA). San José, Costa Rica. lea.wexler@ucr.ac.cr (autor para correspondencia, <https://orcid.org/0009-0005-4938-1021>).

² Universidad Técnica Nacional, Sede Atenas, Alajuela, Costa Rica. palvarado@utn.ac.cr (<https://orcid.org/0009-0005-2855-9353>).

Resumen

Introducción. Las variedades de cacao (*Theobroma cacao* L.) que se catalogan en el mercado mundial como finas y de aroma, representan un 6 % y se comercializan a un precio diferenciado. Estas variedades poseen características únicas determinadas por su genotipo, su complejidad de aromas es un factor fundamental que las distingue. **Objetivo.** Integrar información actualizada que proporcione evidencia científica sobre el cacao fino y de aroma, identificar los compuestos clave que le confieren esta denominación y describir su comportamiento durante las etapas de fermentación, secado y tostado. **Desarrollo.** El cacao fino y de aroma es muy apreciado en el mercado por su sabor y aromas únicos, es valorado en la elaboración de productos de tipo gourmet. El cacao de esta categoría es cultivado por pequeños productores de la región mesoamericana, que emplean sistemas de producción familiar, orgánicos y sostenibles. Esta región, la principal productora de cacao fino y de aroma, enfrenta el riesgo de perder su valiosa biodiversidad. Es crucial conservar la diversidad genética del cacao y comprender sus componentes fisicoquímicos, especialmente los volátiles responsables de sus atributos sensoriales. **Conclusión.** El procesamiento primario del cacao, en particular las etapas de fermentación y secado, influye significativamente en su perfil aromático. Controlarlo y estandarizarlo es esencial para que los productores obtengan su grano de cacao con una calidad diferenciada y así sea valorizado en el mercado por sus características sensoriales únicas. Futuros estudios deberían enfocarse en desarrollar métodos estandarizados para la fermentación y el secado, así como en la conservación de la diversidad genética del cacao fino y de aroma.

Palabras clave: aromas en cacao, compuestos volátiles, compuestos del sabor, perfil aromático, recursos genéticos, *Theobroma cacao*.



Abstract

Introduction. The cocoa varieties (*Theobroma cacao* L.) that are classified in the global market as fine and flavor, represent 6 % and are marketed at a differentiated price. These varieties have unique characteristics determined by their genotype, and their aroma complexity is a fundamental factor that distinguishes them. **Objective.** To integrate updated information that provides scientific evidence about fine and flavor cocoa, identify the key compounds that confer this denomination, and describe their behavior during the stages of fermentation, drying, and roasting. **Development.** Fine and flavor cocoa is highly valued in the market for its unique flavor and aromas, and is especially sought after for the production of gourmet and nutraceutical products. This type of cocoa is cultivated by small producers in the Mesoamerican region, who employ family-based, organic, and sustainable production systems. This region, the main producer of fine and flavor cocoa, faces the risks of losing its valuable biodiversity. It is crucial to conserve cocoa's genetic diversity and understand its physicochemical components, especially the volatiles responsible for its sensory attributes. **Conclusion.** The primary processing of cacao, particularly the stages of fermentation and drying, significantly influences its aromatic profile. Controlling and standardizing these processes is essential for producers to obtain their cocoa beans with a differentiated quality, thereby enhancing their value in the market due to their unique sensory characteristics. Future studies should focus on developing standardized methods for fermentation and drying, as well as on conserving the genetic diversity of fine and aromatic cocoa.

Keywords: aroma profile, cocoa aroma, flavor compounds, genetic resources, *Theobroma cacao*, volatile compounds.

Introducción

La denominación del cacao (*Theobroma cacao* L.) como “fino y de aroma” representa una ventaja competitiva para los pequeños productores que lo cultivan. Este tipo de cacao se puede comercializar a precios mayores en comparación con el que se cultiva en África, conocido como ‘bulk’ u ‘ordinario’, el cual domina entre 94 y 96 % de la producción mundial en las últimas cinco décadas (International Cocoa Organization [ICCO], 2023). El cultivo del cacao fino y de aroma se estima menor al 6 % del total en el mundo y se reconoce que países como Bolivia, Colombia, Costa Rica y México son productores de este, con 95 - 100 % de su cacao de exportación clasificado a nivel comercial en esta denominación (Arvelo et al., 2016; ICCO, 2023).

El mercado de los cacaos especiales está orientado a procesadores y consumidores que valoran productos diferenciados por sus características únicas y distintivas, tales como sabor y aroma específicos, y están dispuestos a pagar precios superiores. Su demanda ha venido en aumento, puesto que la mayoría de los principales fabricantes ha desarrollado productos que requieren cacao de orígenes específicos, con sabor y aromas distintivos (Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica [PROCOMER], 2023). En general, el mercado del cacao de especialidad está dirigido a empresas que colocan sus productos de acuerdo con sus características sensoriales únicas, fomentan un comercio justo y sostenible, y distinguen el origen y la producción primaria (Center for the Promotion of Imports from Developing Countries [CBI], 2020).

Para designar y catalogar el cacao fino y de aroma en el mercado, se utilizan diversos criterios que incluyen el origen genético, características morfológicas de la planta, propiedades sensoriales y fisicoquímicas de los granos, y el grado de fermentación y humedad. Sin embargo, algunos de estos indicadores pueden ser subjetivos, lo que resalta la necesidad de una base científica para determinar los atributos fisicoquímicos y sensoriales de este tipo especial de cacao (Carmioli González, 2017).

Los indicadores que más representan la categoría del cacao son su composición química y diversidad de aromas, en donde el fino y de aroma es el que contiene mayor complejidad de compuestos volátiles que son los

responsables de las notas a frutas, flores, hierbas, madera, nueces, y especias, entre otras (Aprotosoiaie et al., 2016; Arvelo et al., 2016; Engeseth & Pangan, 2018; Kongor et al., 2016). Diferentes autores han identificado alrededor de 600 compuestos volátiles en el cacao, de los cuales solo algunos proporcionan los aromas clave. Estos compuestos, como pirazinas, aldehídos, ésteres, alcoholes, ácidos carboxílicos, cetonas y terpenos, resultan de la variedad genética del cacao y de los procesos de fermentación, secado y tostado (Aprotosoiaie et al., 2016; Engeseth & Pangan, 2018; Kongor et al., 2016).

El conocimiento de los cambios que sufren los compuestos precursores de aromas claves durante la fermentación, el secado y el tostado, es determinante para obtener productos con características sensoriales únicas que distinguen su calidad. Mediante esta revisión bibliográfica, se pretende integrar información científica actualizada que aporte evidencia sobre el cacao fino y de aroma, los compuestos clave que le confieren sus atributos y que son los responsables de la denominación comercial. Así también, se describen las transformaciones bioquímicas que originan los precursores de los compuestos volátiles claves durante las etapas de los procesos de fermentación, secado y tostado.

El objetivo de esta revisión bibliográfica fue integrar información actualizada que proporcione evidencia científica sobre el cacao fino y de aroma, identificar los compuestos clave que le confieren esta denominación y describir su comportamiento durante las etapas de fermentación, secado y tostado.

Metodología

Se realizó una revisión bibliográfica sistemática durante los años 2022 - 2024, de publicaciones con no más de diez años de antigüedad. Se consultaron bases de datos disponibles en línea en el sistema de bibliotecas, documentación e información de la Universidad de Costa Rica (Sciverse, Elsevier, Scopus, Ebsco). También, se buscó información en redes de revistas científicas y bibliotecas virtuales de algunas universidades, así como en repositorios digitales de diferentes entidades gubernamentales y organismos internacionales relacionados con la producción, comercialización y formación técnica del sector productor y transformador del cacao. Se incluyó información de artículos y libros obtenidos durante una pasantía realizada en el instituto *Leibniz Institute for Food Systems Biology* en la Universidad Técnica de Munich, en el año 2016.

Desarrollo

Generalidades del cacao

El cacao es el fruto del árbol cuyo nombre científico es *Theobroma cacao* L., perteneciente a la familia Malvaceae, subfamilia Sterculioidea. Se conocen veintidós especies del género *Theobroma* y diecisiete de su familiar silvestre del género *Herrania* (Zarrillo et al. 2018). La especie *cacao* es la única que se cultiva y explota a nivel comercial (De La Cruz Medina et al., 2012).

El cacao es autóctono del continente americano y se reporta su origen en la zona oriental de la Amazonía, desde donde se extendió hasta el sur de México. Investigaciones genómicas y arqueológicas confirman que la mayor diversidad genética de *T. cacao* se encontró en los bosques húmedos del norte del Amazonas y su uso y domesticación se originaron allí desde 5450 - 5300 años a.C. Existen fuentes etnográficas e históricas que respaldan su uso como alimento y medicina a partir de las semillas, la pulpa fresca o como bebida fermentada e infusiones hechas con las hojas y tallos del árbol de *Theobroma* (Zarrillo et al. 2018).

El árbol de cacao es semicaducifolio y alcanza una altura entre 5 y 8 m. Posee hojas alargadas dispuestas a lo largo de los tallos y flores pequeñas que brotan sobre el tronco y las ramas (De La Cruz Medina et al., 2012; D'Souza et al., 2018). Los frutos son vainas que crecen proximales al tronco y a ramas más gruesas. Cada vaina, conocida como mazorca, contiene entre veinte y cuarenta semillas con placentación axial (Aprotosoai et al., 2016; Cardona Velázquez et al., 2016). Las mazorcas tienen forma y apariencia variadas dependiendo de su origen genético (De La Cruz Medina et al., 2012). Por lo general, el fruto inmaduro es de color verde y se torna amarillo o anaranjado cuando está maduro.

La semilla de cacao consiste en dos cotiledones y un embrión, rodeados por una cubierta, la testa. A esta le cubre una pulpa mucilaginosa de color blanquecino, sabor dulce y un poco ácido. Los cotiledones con la semilla se conforman por 32 - 39 % de agua, 30 - 32 % de grasas, 8 - 10 % de proteínas, 5 - 6 % de polifenoles, 4 - 6 % de almidón, 4 - 6 % de pentosanos, 2 - 3 % de celulosa, 2 - 3 % de sacarosa, 1 - 3 % de teobromina, 1 % de ácidos (los principales son cítrico, málico y oxálico) y de 0,2 a 1 % de cafeína (Amoa-Awua, 2014; Voigt & Lieberei, 2014).

La pulpa representa cerca de un 40 % del peso de la semilla. Contiene de 10 a 15 % de azúcares, de los cuales los más abundantes son glucosa, fructosa y sacarosa. Además, en ella se encuentran pequeñas cantidades de proteínas, aminoácidos, minerales, vitaminas (vitamina C es la más importante), así como ácido cítrico en un 0,5 - 2 %, lo que causa su pH bajo de 3,3 a 4,0. La viscosidad la ocasionan compuestos como la pectina, que está entre 1 y 2 % y otros polisacáridos mucilaginosos (Amoa-Awua, 2014).

El continente africano lidera el volumen de la producción cacaotera, con un 62 - 64 % de la producción mundial en Costa De Marfil, Ghana, Nigeria y Camerún (Abbott et al., 2017; ICCO, 2023). Brasil era el segundo productor de cacao antes de 1989, fecha en la que la moniliasis, producida por la espora de *Moniliophthora perniciosa*, ingresó al país y afectó gran parte de los cultivos, lo que provocó una gran baja en sus volúmenes (D'Souza et al., 2018). El sudeste asiático (Indonesia y Papúa Nueva Guinea) comprende un 17 - 18 % del cultivo y América Latina un 15 - 17 %, con Brasil, Ecuador, Perú, República Dominicana y Colombia como los mayores productores (Abbott et al., 2017; ICCO, 2023).

La producción mundial del cacao supera los 4000 millones de toneladas anuales, de acuerdo con las estadísticas reportadas por la Organización Internacional del Cacao (ICCO, 2023), y Costa de Marfil tiene una participación productiva de 1800 millones de toneladas. Sin embargo, en los últimos años se ha dado un déficit importante de producción en el continente africano, lo que se refleja en una caída anual de un 10 % en el mundo. La ICCO indica que la baja en la oferta de cacao en África Occidental se debe a problemas del cambio climático, enfermedades del cultivo y precios remunerativos al productor (ICCO, 2023).

El cultivo comercial del cacao proporciona ingresos a más de 4,5 millones de familias en el mundo, de acuerdo con D'Souza et al. (2018). La mayor producción del cacao en grano se produce en pequeñas y medianas fincas y solo el 30 % de la producción se concentra en empresas que transforman el cacao en productos finales (Aprotosoai et al., 2016). En América el cultivo del cacao representa una tradición y un importante medio de subsistencia familiar, que se concentra en territorios rurales e implica dinámicas culturales y socioproductivas que van más allá de los aspectos económicos (Arvelo et al., 2016).

Variedades de cacao

La clasificación del árbol del cacao se basa en las características botánicas y morfológicas del fruto y de las semillas. A partir del árbol domesticado se reconocen tres grupos genéticos principales denominados Criollo, Trinitario y Forastero (Aprotosoai et al., 2016; Arvelo et al., 2016). Sin embargo, de acuerdo con Motamayor et al. (2008), se han identificado al menos diez cultivares, por lo que propone una nueva clasificación basada en el estudio del germoplasma de cada uno de ellos.

Variedad Criollo (Theobroma cacao L. ssp. Cacao Cuat.)

La variedad “criolla”, también conocida como “nativa”, tiene su origen en el norte de Sudamérica y Centroamérica y fue domesticada por los pueblos precolombinos de Mesoamérica (Arvelo et al., 2016). Se caracteriza por tener frutos alargados, superficie rugosa e irregular y punta pronunciada. Las mazorcas maduras son amarillas o rojas y las semillas son grandes, de color blanco y violeta (Aprotosoiaie et al., 2016; Cardona Velázquez et al., 2016). Se distingue por sus aromas intensos y variados (sutiles a nuez, frutales, florales y herbáceos). Es considerada de alta calidad, no obstante, es una variedad de baja productividad y susceptible a patógenos, por lo que no se utiliza para la industria chocolatera masiva (Aprotosoiaie et al., 2016).

Variedad Forastero (Theobroma cacao L. ssp. Sphaerocarpum)

Se le llama también “Calabacillo” y es originaria de la cuenca amazónica (ICCO, 2023). Incluye a la subvariedad más conocida que se cultiva en Brasil y África Occidental, denominada Amelonado (Aprotosoiaie et al., 2016; Arvelo et al., 2016; De La Cruz Medina et al., 2012). Es la variedad más resistente a enfermedades, presenta una alta variabilidad genética y proporciona gran cantidad de frutos por árbol. Pese a estas ventajas, produce el grano menos aromático, destacándose solo su fuerte aroma a chocolate. A nivel comercial, se clasifica como cacao a granel, básico u ordinario, se destaca por ser un grano ácido y amargo, y se utiliza para la fabricación de pasta o licor de cacao, polvo y manteca (Cardona Velázquez et al., 2016).

Variedad Trinitario

Los cacaos trinitarios son el resultado de la hibridación de las variedades Criollo y Forastero, su morfología es heterogénea, por lo que no es fácil distinguirlos por su aspecto externo (Arvelo et al., 2016). Se reporta en documentos históricos que los españoles introdujeron en Trinidad y Tobago las variedades nativas de cacao de Venezuela durante los años 1600. Allí ocurrió su cruce de forma espontánea y siguió el cultivo con híbridos resistentes a enfermedades y de alto rendimiento, pero no tan aromáticos como sus progenitores (Aprotosoiaie et al., 2016). Hoy se cultiva en América y en algunos países de África y Oceanía, y representa alrededor del 15 % de la producción mundial (ICCO, 2023).

Composición química y valor nutritivo del grano de cacao

La composición del grano de cacao seco, como suele exportarse desde su sitio de origen, puede variar de acuerdo con las variedades del fruto. Sus componentes se pueden dividir en dos grandes categorías que son los compuestos volátiles y no volátiles. Entre los compuestos no volátiles se encuentran, aparte del agua, grasas, carbohidratos, proteínas y fibra dietética. También, en este grupo, se encuentran los polifenoles que son muy importantes debido a su reconocido efecto en la salud humana, por su elevada capacidad antioxidante y al efecto protector que ejercen en el sistema cardiovascular (Aprotosoiaie et al., 2016; Borja Fajardo et al., 2022; Tuenter et al., 2020).

Los granos de cacao contienen cuatro tipos principales de proteínas, las más abundantes son las albúminas, solubles en agua, y las globulinas, solubles en sal, ambas proteínas de reserva; también se encuentran prolaminas (solubles en alcohol) y gluteninas (solubles en ácidos y bases diluidas). Durante los procesos de fermentación, secado y tostado, las proteínas sufren cambios bioquímicos que originan péptidos y aminoácidos libres, considerados precursores de compuestos aromáticos (Voigt et al., 2016). Entre estos compuestos se encuentran

pirazinas, alcoholes y ésteres, compuestos clave en la calidad del cacao fino y de aroma (Deus et al., 2021; Mori-Mestanza et al., 2021).

Procesamiento del cacao

Para obtener las características aromáticas y de sabor que se asocian con el cacao en grano como materia prima, se realiza un proceso poscosecha al que se le denomina procesamiento primario. Este incluye la fermentación y el secado, por medio de los que se obtiene el producto seco que se comercializa para la elaboración posterior de diversos productos de la industria de la chocolatería. El proceso secundario comienza con el tostado y continúa con la obtención de licor o pasta, cacao en polvo o manteca (Barišić et al., 2019; Santander Muñoz et al., 2020). A continuación, se detallan la fermentación, secado y tostado, que son claves para la obtención de un grano apto para las etapas subsecuentes.

Fermentación

La fermentación es un punto crítico del procesamiento primario del cacao, ya que en esta etapa se desarrollan la mayoría de los compuestos responsables de las características sensoriales del grano. Durante este proceso se genera gran cantidad de precursores claves de aromas, a partir de azúcares reductores y proteínas presentes en la semilla (Castro-Alayo et al., 2019). Se lleva a cabo por la acción de microorganismos propios del entorno, que propician una serie compleja de transformaciones bioquímicas en la pulpa y el cotiledón de la semilla, lo cual causa la muerte del embrión y la generación de gran diversidad de compuestos (De Vuyst & Weckx, 2016; Voigt & Lieberei, 2014).

Durante la fermentación, los azúcares de la pulpa se transforman en ácido acético y láctico, lo que provoca la acidificación de las semillas. Este proceso inicial se induce por las bacterias ácido-lácticas y levaduras de forma anaerobia, tarda entre 48 - 72 h y produce etanol. La segunda etapa es aerobia, requiere que la masa fermentativa se mueva o voltee para permitir el ingreso de aire y se puede subdividir en dos fases, en la que participan en un inicio bacterias ácido-lácticas, que consumen fructuosa remanente para transformarla en ácido láctico, seguida de la participación de bacterias ácido-acéticas que transforman el etanol en ácido acético (De Vuyst & Weckx, 2016; Herrera-Rocha et al., 2021).

Las reacciones de la fermentación ocurren de forma exotérmica, por lo que incrementan poco a poco la temperatura de la masa fermentativa hasta alcanzar 48 - 52 °C. El ácido acético penetra en la semilla y, junto con la temperatura alcanzada, causan la muerte del embrión; a partir de este punto continúan reacciones bioquímicas complejas que dan lugar a los compuestos precursores de aromas del cacao bien fermentado (Voigt & Lieberei, 2014). Se ha demostrado, que en esta compleja dinámica participan otros grupos de microorganismos, como *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Aspergillus*, que se han empezado a relacionar con la generación de aromas especiales (Herrera-Rocha et al., 2021).

Existe evidencia de la relevancia de la fermentación en la producción de los aromas florales, frutales y a nuez, asociados con el cacao fino y de aroma, así como de la complejidad relacionada con las interacciones entre las distintas comunidades microbianas que participan (Fernández-Niño et al., 2021). Al ser la fermentación un proceso que en la mayoría de los casos se realiza de forma artesanal, bajo las condiciones climáticas variantes de cada región, esta etapa puede ocasionar variabilidad en la calidad del grano (De Vuyst & Weckx, 2016). Es importante controlar los parámetros del proceso (pH y temperatura) para permitir que los microorganismos asociados produzcan los distintos metabolitos que darán origen a la formación de precursores.

Secado

La principal función del proceso de secado del cacao es detener la fermentación y garantizar la estabilidad del grano durante el almacenamiento al reducir su humedad inicial promedio desde 40 % a valores entre 6,0 y 7,5 % (Gutiérrez, 2017; Kongor et al., 2016). Esta operación está determinada por dos factores: la transferencia de calor del aire hacia el grano que proporciona la energía necesaria para la evaporación del agua interna, y el movimiento del agua evaporada al exterior circundante. La velocidad de secado se determina por estos factores que afectan en gran medida la calidad del grano seco (Amoa-Awua, 2014).

Durante las primeras etapas del secado se concluyen los procesos oxidativos iniciados durante la fermentación que reducen la astringencia, el amargor y la acidez del grano. El detrimento de acidez ocurre debido a la difusión del ácido acético y la astringencia baja por las reacciones de la enzima polifenol oxidasa que degrada los diferentes polifenoles presentes en el grano. El secado además contribuye a la generación del color café característico del cacao, mediante la formación de compuestos de Amadori, que son precursores de reacciones de Maillard que se llevan a cabo durante el tostado (Castro-Alayo et al., 2019; D'Souza et al., 2018; Kongor et al., 2016).

El método de secado de cacao más utilizado es el de exposición directa al sol. Este método tiene la ventaja de ser de bajo costo y fácil acceso, sin embargo, tiene algunas desventajas, como la imposibilidad de secar en las temporadas lluviosas y la falta de estandarización (Dzelagha et al., 2020). En varias regiones productoras se utilizan secadores solares con cubiertas que protegen del exterior (lluvia, plagas); en estos, el grano se coloca en camas o mesas separadas del suelo, en las que se extiende de manera uniforme, en capas de no más de 30 cm (Arvelo et al., 2016).

Tostado

El tostado consiste en la exposición del grano a temperaturas altas (120 - 190 °C) por tiempos que van de 5 a 120 min (Hu et al., 2016). Su finalidad es reducir la humedad del grano a niveles de 2 %, soltar su cascarilla, desarrollar el color café oscuro y algunos aromas característicos de los productos de chocolatería (Gutiérrez, 2017). Esta etapa se considera el punto crítico de control del procesamiento del cacao y se asocia con la producción de compuestos de aromas clave a partir de los precursores formados en las etapas anteriores (Vázquez-Ovando et al., 2016).

Durante el tostado, algunos precursores de aromas participan en la reacción de Maillard que ocasiona el oscurecimiento del grano (Aprotosoai et al., 2016). Se ha estudiado que los compuestos intermediarios en la formación de aromas especiales del cacao tostado se desarrollan a partir de aminoácidos, que generan aldehídos de Strecker y 1-amino-1-desoxi cetosas, conocidos como compuestos de Amadori, claves en la formación de compuestos volátiles con aromas (Hartmann & Schieberle, 2016). En las primeras etapas se generan bases de Schiff, que luego se isomerizan a 1,2-enaminos y a compuestos de Amadori (Hartmann & Schieberle, 2016). Luego, al final del tostado, estos se degradan por el calor generándose hidroximetil furfural, así como aldehídos y cetonas de bajo peso molecular (Aprotosoai et al., 2016).

Cacao fino y de aroma: características, origen y mercado

El cacao fino y de aroma se identifica en el mercado por medio de la evaluación de aspectos como su trazabilidad, genética, características del origen, buenas prácticas de cosecha y procesamiento y las certificaciones de su proveniencia (orgánico, comercio justo, producción sostenible, entre otros) (CBI, 2020). Sin embargo, para el consumidor de chocolates amargos y de especialidad la característica más determinante es su aroma. La diferenciación del cacao fino y de aroma respecto al cacao ordinario, o "bulk", se basa en las notas aromáticas

florales, frutales, herbales, a nuez y acarameladas que posee (Arvelo et al., 2016; Escobar et al., 2021; Rottiers et al., 2019).

La diversidad de aromas del cacao especial se debe, además de los antecedentes genéticos y de las prácticas de post-cosecha, al clima, la altitud y el suelo donde se cultiva. La influencia del lugar de procesamiento puede dar lugar al denominado efecto “terroir” que se utiliza en la comercialización de los vinos y que se asocia con características aromáticas especiales (Sukha et al., 2014). Esto se considera importante para poder distinguir los cacaos finos y de aroma y conferir una justa retribución económica a los agricultores que lo producen, que en su mayoría son pequeños productores de países de Latinoamérica, que poseen fincas de 0,5 a 1 ha en zonas rurales (Arvelo et al., 2016).

La variedad Forastero se considera ordinaria y el reconocido como fino y de aroma es específico de algunos cultivares de las variedades Criollo y Trinitario (Arvelo et al., 2016; Wattnem et al., 2022). El cacao ordinario cultivado en su mayoría en África Occidental y en Brasil, comparten entre ellos un sabor intenso a chocolate con pocos aromas secundarios diferenciados (Chocolate, Biscuits & Confectionery of Europe [CAOBISCO] et al., 2015). Estos se utilizan para la fabricación masiva de chocolates con leche, segmento principal del mercado chocolatero, que requieren para su fabricación cacao con alto sabor a chocolate, a diferencia del chocolate oscuro y de especialidad en el que se espera la complejidad en aromas.

Se considera importante resguardar y estudiar el hábitat natural de la variedad Criollo y, pese a que existen pocas investigaciones en este campo, es conocido que su sistema productivo se ha mantenido aislado de poblaciones comerciales en América Latina. Un estudio realizado en la selva Lacandona en Chiapas, México, evidenció abundancia, riqueza y densidad de especies de árboles y plantas asociadas al cacao criollo; su estudio permitirá reconocer el beneficio de la diversidad dentro de los agroecosistemas propios a partir de la importancia de cada una de las especies forestales que se relacionan con el cultivo y, así poder diseñar sistemas agroforestales más eficientes que impacten el propio cultivo y la dinámica medioambiental (Avendaño-Arrazate et al., 2021).

Los mayores esfuerzos para clasificar a los países como productores de cacao fino y de aroma los ha realizado la Organización Internacional del Cacao (Abbott et al., 2017). De acuerdo con esta organización, se reconocen veintitrés orígenes de este cacao diferenciado y se estima que países como Bolivia, Costa Rica, México y Trinidad y Tobago, contribuyen con variedades de cacao fino y de aroma en 95 - 100 % del total de sus exportaciones (ICCO, 2023). Varios autores, sin embargo, reportan una falta de estandarización de especificaciones para conferir el distintivo de fino y de aroma, ya que no existen criterios homologados para evaluar estos atributos en particular (Wattnem et al., 2022).

Compuestos volátiles asociados con aromas del cacao y su comportamiento durante el proceso

La mayor cantidad de compuestos volátiles asociados con el aroma del cacao se clasifican en ácidos carboxílicos, alcoholes, cetonas, aldehídos y ésteres; en menor cantidad se encuentran pirazinas, terpenos, aminas, furanos y otros (Frauendorfer & Schieberle, 2008; Meneses Quelal et al., 2023). Diversos estudios señalan que el tiempo de fermentación y el tipo de secado influyen en el desarrollo de los compuestos asociados a la calidad del cacao fino y de aroma, por lo que algunos de ellos se consideran un indicador de su calidad (Kongor et al., 2016; Qin et al., 2017). En esta sección se recopilan los principales compuestos volátiles reportados y los aromas específicos relacionados.

Ácidos carboxílicos

Los ácidos carboxílicos son responsables de la acidificación de los granos de cacao, debido a la presencia de ácido acético, que aporta notas aromáticas avinagradas (Januszewska, 2018; Lin et al., 2022; Otero Rojas et al., 2022; Qin et al., 2017). Si bien en el cacao en baba (crudo) se encuentra presente una baja cantidad de ácido acético, este aumenta durante la fermentación aerobia (Calvo et al., 2021). Este ácido es indispensable para que las enzimas proteolíticas contribuyan a la muerte del embrión, lo que permite la liberación de sustratos y la formación de precursores de aroma (Barišić et al., 2019; Viesser et al., 2020).

Por ser un ácido volátil, la concentración del ácido acético que se genera durante la fase aerobia de la fermentación disminuye durante las etapas de secado y tostado (Vázquez-Ovando et al., 2016; Zapata Bustamante et al., 2015). Sin embargo, si el proceso de secado se realiza de forma industrial con temperaturas relativamente altas, la cascarilla que rodea los cotiledones se puede endurecer y afecta su permeabilidad, esto dificulta la difusión del ácido acético (CAOBISCO et al., 2015; Parra Rosero, 2014). Un resumen de ácidos reportados en distintos estudios y los aromas característicos asociados a ellos se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Ácidos volátiles identificados en diferentes muestras de cacao (*Theobroma cacao*).

Table 1. Volatile acids identified in different cocoa (*Theobroma cacao*) samples.

Compuesto	Descripción del aroma asociado	Referencia ¹
ácido acético	Vinagre, picante	[1], [3], [4], [6]
ácido 2-fenilacetico	Floral, chocolate, miel	[2], [6]
ácido L-láctico	Floral, lavanda, cítrico, arándano	[5]
ácido nonanoico	Césped recién cortado	[2]

¹ [1] Frauendorfer y Schieberle (2008); [2] Barbosa-Pereira et al. (2019); [3] Otero Rojas et al. (2022); [4] Januszewska (2018); [5] Kadow et al. (2013), [6] Hartmann (2015).

Alcoholes

Los alcoholes son compuestos importantes para la generación de los aromas del cacao. Se ha reportado presencia de este tipo de compuestos en el cacao crudo y en muestras analizadas durante las primeras 48 h de la fermentación, es decir, durante la fase anaerobia, cuando las levaduras metabolizan la glucosa. Muchos de los compuestos responsables de aromas deseables (a miel, florales y frutales) de granos de cacao al final de la fermentación, como el 1-feniletanol y el 2,3-butanodiol, pertenecen a esta familia (Cuadro 2). La concentración de alcoholes disminuye durante el secado (Rodríguez-Campos et al., 2012; Rodríguez-Velázquez et al., 2022).

Aldehídos

Junto con los alcoholes y cetonas, los aldehídos son compuestos aromáticos asociados en su mayoría con notas deseables en el cacao (Cuadro 3). Algunos de ellos se forman durante las primeras 24 - 48 h de la fermentación, por ejemplo, el 2-etilbutanal y el 2-metilpropanal, asociados con aromas a nuez, chocolate, malta y tostado (Barbosa-Pereira et al., 2019; Hartmann, 2015). Se reporta también que, durante la etapa de tostado, debido a la transformación de aminoácidos específicos por medio de la degradación de Strecker, se producen aldehídos con aromas únicos (Vázquez-Ovando, 2016).

Cuadro 2. Alcoholes volátiles identificados en diferentes muestras de cacao (*Theobroma cacao*).

Table 2. Volatile alcohols identified in different cocoa (*Theobroma cacao*) samples.

Compuesto	Descripción del aroma asociado	Referencia ¹
2-acetiltasol	Rostizado	[11]
alcohol bencílico	Afrutado, floral	[2], [7]
alcohol feniletílico	Miel, mora, floral, rosa, caramelo	[6]
bencenopropanol	Especias, canela, frutal, floral	[13]
2,3-butanodiol	Chocolate, frutal, floral	[8], [9], [12], [13]
1-butanol, 3-metil-etanol	Malta, chocolate, amargo	[1], [4], [7]
1-feniletanol	Alcohol	[8], [10]
1-feniletanol	Miel, floral, rosa, césped	[2], [3], [5], [7]
2-feniletanol	Floral, miel, flores: rosa, lila, violeta	[2], [4], [7], [11], [13]
fenol	Floral, frutal	[8]
2- heptanol	Cítrico, terroso, coco	[2], [3], [7], [11]
2-heptanol, 3-metil	Frutal, cítrico	[10], [7]
1- hexanol	Afrutado, césped, herbáceo, cítrico	[2], [12]
β-linalool	Tostado, Frutal	[2], [4]
3-metil, 1-butanol	Chocolate, malta	[7]
4-metilfenol	Establo, paja	[11]
2-metil, 1-propanol	Vino	[7]
2-metoxifenol	Ahumado	[11]
2-nonanol	Césped, cremoso, naranja cítrico	[2], [3]
1,6-octadien-3-ol	Cítrico, frutal	[11]
1-octanol	Nuez, floral	[2], [13]
2-pentanol	Césped, hojas	[3], [7]
1-propanol	Caramelo	[7]

¹ [1] Frauendorfer y Schieberle (2008); [2] Barbosa-Pereira et al. (2019); [3] Qin et al. (2017); [4] Januszewska (2018); [5] Liu et al. (2017); [6] Frauendorfer y Schieberle (2006); [7] Rodríguez-Campos et al. (2012); [8] Deuscher et al. (2020); [9] Otero Rojas et al. (2022); [10] Rottiers et al. (2019); [11] Hartmann (2015); [12] Lacerda Ramos et al. (2014); [13] Utrilla-Vázquez et al. (2020).

Cetonas

Las cetonas son compuestos asociados con aromas lácteos, florales y frutales, entre otros (Cuadro 4). Se forman durante la fermentación, a partir del metabolismo de las levaduras (Kadow et al., 2013) y también durante el tostado, a partir de productos de la reacción de Maillard; en esta etapa se han asociado, mediante reacciones de condensación de la acetoina, con la formación de compuestos clave presentes en cacao fino y de aroma, como las pirazinas (Mori-Mestanza et al., 2021). Diferentes estudios reportan la presencia de cetonas como la 2-heptanona, 2-nonanona, acetofenona y acetoina en cacao seco y tostado a lo largo de todo el tiempo de fermentación (Alvarado Marengo, 2024; Cruz Rojas, 2023).

Cuadro 3. Aldehídos volátiles identificados en diferentes muestras de cacao (*Theobroma cacao*).

Table 3. Volatile aldehydes identified in different cocoa (*Theobroma cacao*) samples.

Compuesto	Descripción del aroma asociado	Referencia ¹
bencenoacetaldéhidó	Floral, miel, almendra, frutal	[9], [10]
denzaldehído	Chocolate, almendra tostada, caramelo	[4], [9]
decanal	Naranja	[2]
fenilacetaldéhidó	Floral, miel, rosa, césped, baya, nuez	[2], [5], [12], [7]
2-etilbutanal	Nuez, chocolate, tostado	[12]
2-fenil-2-butanal	Floral, cacao, ron	[2]
furfural	Nuez, almendra, caramelo, semilla de marañón	[1], [6], [8]
heptanal	Césped recién cortado	[2]
hexanal	Césped, herbal	[2], [3], [13]
2-isopropil-5-metil-2-hexanal	Cacao	[2]
2-metilpropanal	Cacao, chocolate, malta, tostado	[2], [8], [7], [12], [13]
2-metilbutanal	Chocolate, nuez	[11], [12], [13]
3-metilbutanal	Cacao, chocolate, malta, tostado, nuez	[2], [11], [12], [13]
5-metil-2-fenil-2-hexanal	Cacao tostado	[2]
metoxi benzaldehído	Almendrado, caramelo, vainilla	[2], [5], [4], [12]
nonanal	Cítrico, floral, césped, lavanda	[2], [3], [9]
2-nonanal	Césped	[2]
octanal	Cáscara de naranja	[2]
2-octanal	Naranja	[2], [5]
3-propanal	Papa cocinada	[12]

¹ [1] Frauendorfer y Schieberle (2008); [2] Barbosa-Pereira et al. (2019); [3] Qin et al. (2017); [4] Januszewska (2018); [5] Liu et al. (2017); [6] Frauendorfer y Schieberle (2006); [7] Deuscher et al. (2020); [8] Cocom Cantu (2021); [9] Suzuki et al. (2019); [10] Mori-Mestanza et al. (2021); [11] Rottiers et al. (2019); [12] Hartmann (2015); [13] Utrilla-Vázquez et al. (2020).

Cuadro 4. Cetonas volátiles identificadas en diferentes muestras de cacao (*Theobroma cacao*).

Table 4. Volatile ketones identified in different cocoa (*Theobroma cacao*) samples.

Compuesto	Descripción del aroma asociado	Referencia ¹
2-acetil-2-tiazolina	Tostado	[6]
acetofenona	Floral, violeta, almendra, mosto	[1], [3], [8]
acetofina	Crema, leche	[3]
2,3-butanodiona	Lácteo, dulce	[1], [5], [6], [7]
cafeína	Café	[4]
γ -decalactona	Frutal, coco	[9]
2-decanona	Floral	[1]
fenilacetona	Almendra	[1], [2]
2-heptanona	Banano, pera, uva, coco, madera, herbal, floral	[1], [3], [5], [7]
3-metil-2-ciclohexenona	Nuez y dulce	[1]
γ -nonalactona	Coco	[6]
2-nonanona	Floral, frutal	[1], [2]
2-pentanona	Frutal	[7]
2-undecanona	Frutal	[1]

¹ [1] Barbosa-Pereira et al. (2019); [2] Qin et al. (2017); [3] Januszewska (2018); [4] Liu et al. (2017); [5] Rottiers et al. (2019); [6] Hartmann (2015); [7] Kadow et al. (2013); [8] Aprotosoia et al. (2016).

Ésteres

La familia de los ésteres otorga al cacao la mayoría de los aromas diferenciados y están asociados a notas frutales (Rottiers et al., 2019). Se ha reportado que la presencia de este tipo de compuestos aumenta conforme avanza el tiempo de fermentación. Además de que se generan como metabolitos a partir de la fermentación, una de las razones de su incremento es la esterificación de alcoholes por acción de bacterias ácido-acéticas. Algunos ésteres, como el acetato de 2-pentanol, disminuyen en el tiempo y dan lugar a nuevos compuestos aromáticos (Rodríguez-Campos et al., 2012; Rottiers et al., 2019). A continuación, en el Cuadro 5 se describen los ésteres identificados en muestras de cacao de distintos orígenes y sus aromas característicos asociados.

Cuadro 5. Ésteres volátiles identificados en diferentes muestras de cacao (*Theobroma cacao*).

Table 5. Volatile esters identified in different cocoa (*Theobroma cacao*) samples.

Compuesto	Descripción del aroma asociado	Referencia ¹
acetato de 2-butilo	Banano	[7]
acetato de etilo	Piña, frutal, césped	[4], [6], [7]
acetato de isobutilo	Frutal	[6]
acetato de 3-metil, 1-butanol	Banano, frutal	[4], [6]
acetato de 2-pentanol	Tropical, herbal	[11]
bencil acetato	Floral, miel, rosas, frutal, jazmín	[3], [6], [8]
etil acetato	Piña	[10]
etil cinamato	Canela	[6]
etilfenil acetato	Frutal, miel	[3]
etil hexanoato	Frutal, césped	[6], [9]
etil octanoato	Frutal, piña, floral	[2], [6]
etil palmitato	Césped	[6]
2-feniletil acetato	Miel, floral	[2], [3], [6], [9]
feniletil butirato	Lácteo	[2]
hexil acetato	Frutal, césped	[9]
isoamil acetato	Frutal, banano	[4]
2-metilbutanato	Frutal	[10]
3-metilbutil acetato	Banano, pera y frutal	[2], [5], [9]
metilfenil acetato	Floral	[10]
metil hexadecanoato	Frutal	[1], [2]
metil 2-fenil acetato	Miel, jazmín	[2], [8]
2-metilpropanoato	Frutal	[9]
2-metilpropil benzoato	Balsámico y frutal	[2]

¹ [1] Frauendorfer y Schieberle (2008); [2] Barbosa-Pereira et al. (2019); [3] Qin et al. (2017); [4] Januszewska (2018); [5] Liu et al. (2017); [6] Rodríguez-Campos et al. (2012); [7] Otero Rojas et al. (2022); [8] Aprotosoie et al. (2016); [9] Hartmann (2015); [10] Utrilla-Vázquez et al. (2020); [11] Kadow et al. (2013).

Terpenos e isoterpenos

Los terpenos, aunque son pocos los compuestos de esta familia que se encuentran presentes en el grano de cacao, se asocian con notas florales y frutales que son muy apreciadas (Cuadro 6). En algunos estudios, se reporta el linalool, que es uno de los terpenos relacionados con los aromas característicos de la lavanda y bergamota. Este compuesto se ha encontrado presente en las etapas iniciales de la fermentación y en general, se reporta en concentraciones bajas (Cruz Rojas, 2023; Ohene Afoakwa, 2008), sin embargo, es posible encontrarlo en granos de cacao bien fermentados (Rodríguez-Campos et al., 2012).

Cuadro 6. Terpenos e isoterpenos volátiles identificados en diferentes muestras de cacao (*Theobroma cacao*).

Table 6. Volatile terpenes and isoterpenes identified in different cocoa (*Theobroma cacao*) samples.

Compuesto	Descripción del aroma asociado	Referencia ¹
β -cadineno	Césped, madera	[1]
cis-dihidrojasmonato de metilo	Frutal, floral y cítrico	[1]
β -damascenona	Floral	[1]
2,5-dimetilfuranona	Caramelo	[5]
genarilacetona	Floral y rosas	[1]
α -ionona	Floral	[1]
β -ionone	Madera, dulce y frutal	[1]
linalool	Nuez, frutal, floral, lavanda, bergamota, limón	[1], [2], [3], [4]
octen-3-ona	Hongos	[5]
α -terpineol	Hierbas y frutas	[1]
timol	Frutal	[3]

¹ [1] Barbosa-Pereira et al. (2019); [2] Januszewska (2018); [3] Suzuki et al. (2019); [4] Rottiers et al. (2019); [5] Hartmann (2015).

Pirazinas

Las pirazinas, que pueden encontrarse en concentraciones muy bajas, son el grupo de compuestos volátiles más importante en relación con las características diferenciadas del aroma del cacao fino. La formación de pirazinas sucede a partir de precursores formados durante la fermentación (Arvelo et al., 2016; Deus et al., 2021), durante el proceso de tostado, cuando el cacao es sometido a altas temperaturas (Hartmann & Schieberle, 2016; Rottiers et al., 2019). Las pirazinas se asocian con notas aromáticas a nuez, avellanas, caramelo, almendras, maní rostizado, entre otros (Cuadro 7).

Compuestos volátiles generados por problemas de procesamiento del cacao

El control y estandarización del proceso primario y del tostado es fundamental para mantener las características diferenciadas del cacao fino y de aroma, lo cual es un desafío constante para muchas zonas productoras. Durante la fermentación se pueden producir algunos compuestos volátiles que generan aromas no deseados. La ausencia de este tipo de aromas es parte de los criterios de calidad del grano, y, entre los defectos de proceso a los que se asocia

Cuadro 7. Pirazinas volátiles identificadas en diferentes muestras de cacao (*Theobroma cacao*).

Table 7. Volatile pirazines identified in different cocoa (*Theobroma cacao*) samples.

Compuesto	Descripción del aroma asociado	Referencia ¹
2-acetil-3,5-dimetilpirazina	Nuez, avellana tostada, chocolate	[4]
2,5-dimetil-3-etilpirazina	Papa, terroso	[1]
2,3-dimetil-5-etilpirazina	Cacao, chocolate, almendra	[1]
3,5-dimetil-2-isobutilpirazina	Cacao, avellana, tostado, nuez	[1]
2-etil-3,5-dimetilpirazina	Tierra	[1], [8]
2-etil, 5-metil pirazina	Pan tostado	[3]
2-etil-6-metil pirazina	Terroso, avellana, cacao, papa asada	[1], [3]
2-etilpirazina	Mantequilla de maní, nuez, ron	[1]
2-isobutil-3-metilpirazina	Caramelo	[1]
2-isobutil-3-metoxipirazina	Pimiento	[8]
2-isopropil-3-metoxipirazina	Frutas amarillas, césped	[8]
2-metilpirazina	Cacao chocolate, nuez tostada, avellana	[4], [1], [3]
pirazina 2,3-dimetil	Caramelo, cacao, avellana, mantequilla maní, chocolate	[1], [3], [6], [9]
pirazina 2,5-dimetil	Chocolate, nuez, café, madera	[5], [3], [6]
pirazina 2,6-dimetil	Nuez tostada, café, terroso, herbal, chocolate	[1], [5], [8]
pirazina 3,5-dimetil	Terroso	[8], [9]
tetrametil pirazina	Tostado, chocolate, nuez, herbal	[3]
2,3,5,6-tetrametilpirazina	Tostado, chocolate, nuez, herbal	[3], [7]
trimetil pirazina	Cacao, tostado, nuez, maní	[2], [3], [7], [8]
2,3,5-trimetil-6-etilpirazina	Chocolate, avellana, caramelo	[1], [7]
2,3,5-trimetil-6-isopentilpirazina	Floral	[1]

¹ [1] Barbosa-Pereira et al. (2019); [2] Deucher et al. (2020); [3] Otero Rojas et al. (2022); [4] Aprotosoai (2016); [5] Cocom Cantu, 2021; [6] Suzuki et al. (2019); [7] Rodríguez-Campos et al. (2012), [8] Hartmann (2015); [9] Ohene Afoakwa et al. (2013).

su presencia, se mencionan una fermentación incompleta o excesiva. Si el secado no es homogéneo, se realiza rápido o a muy altas temperaturas, puede producir cacaos ácidos (CAOBISCO et al., 2015; Parra Rosero, 2014).

La mayoría de los compuestos asociados con aromas no deseados pertenecen a la familia de los ácidos carboxílicos. Sin importar la familia química a la que pertenezcan, en general los compuestos volátiles no deseados aportan al cacao notas grasosas, rancias, agrias, metálicas y similares al queso, entre otras. Una recopilación de compuestos volátiles generadores de aromas no deseados presentes en diferentes muestras de cacao se presenta en el Cuadro 8. Los compuestos se presentan separados de acuerdo con la familia orgánica a la que pertenecen.

Cuadro 8. Compuestos volátiles no deseados en el cacao (*Theobroma cacao*).

Table 8. Undesirable volatile compounds in cocoa (*Theobroma cacao*).

Compuesto	Descripción del aroma	Referencia ¹
Ácidos carboxílicos		
ácido 3-butanoico	Rancio	[4], [9]
ácido 2-butilbutanoico	Mantequilla	[2]
ácido decanoico	Grasoso, rancio	[6]
ácido dodecanoico	Metálico	[6]
ácido heptanoico	Rancio, agrio, sudor	[1], [6]
ácido hexanoico	Sudor, rancio, queso azul, pungente, acre	[3], [6], [8]
ácido isobutírico	Rancio, mantequilla	[6]
ácido isovalérico	Rancio	[6]
ácido 2-metilbutanoico	Queso derretido	[5]
ácido 3-metilbutanoico	Queso derretido, rancio, viejo	[2], [3], [5]
ácido 3-metilpentanoico	Agrio, sudor	[2], [9]
ácido 4-metilpentanoico	Queso	[2]
ácido 2-metilpropanoico	Queso, lácteo, mantecoso, rancio	[2], [9]
ácido nonanoico	Grasoso, sudor, cera	[2], [6]
ácido octanoico	Sudor, queso, grasoso	[2], [4], [5], [6]
ácido propanoico	Pungente	[6]
Alcoholes		
2-butanol	Gomoso	[5]
2-metilbutanol	Pungente, picante	[1], [3]
1-octanol	Grasoso, cera	[2], [11]
Aldehídos		
decanal	Cera	[2]
heptanal	Aceitoso, grasoso	[2]
2,4-nonadienal	Grasoso	[9]
nonanal	Grasoso, cera, picante	[2], [3], [7]
octanal	Aceitoso, grasoso	[2]
2-octanal	Ceroso, grasoso	[10]
Cetonas		
acetofina	Grasoso	[4]
6-metil-5-hepten-2-ona	Acre y verdoso	[1], [3]
2-nonanona	Grasoso	[1], [3]
2-undecanona	Grasoso	[1]
Ésteres		
feniletil butirato	Rancio	[2]

¹ [1] Frauendorfer y Schieberle (2008); [2] Barbosa-Pereira et al. (2019); [3] Qin et al. (2017); [4] Januszewska (2018); [5] Deuscher et al. (2020); [6] Rodríguez-Campos et al. (2012); [7] Suzuki et al. (2019); [9] Hartmann (2015); [10] Ohene Afoakwa et al. (2013); [11] Utrilla-Vázquez et al. (2020).

Conclusiones

En esta revisión bibliográfica se ha integrado información actualizada a partir de diversos trabajos científicos realizados en el mundo. La mayoría se refieren al cacao en general o analizan determinadas subvariedades, por lo que se considera que hace falta información sobre las características sensoriales y compuestos volátiles de las variedades de cacao considerado fino y de aroma. El procesamiento del cacao, en las etapas de fermentación y secado, influye significativamente en su perfil aromático. Controlarlo y estandarizarlo es esencial para que el cacao fino y de aroma sea valorizado por sus características sensoriales únicas. Es común que ocurran defectos de calidad debido a la falta de la estandarización de los procesos y se considera relevante conocer cuáles son los compuestos volátiles que se relacionan a los aromas no deseados en el grano de cacao. En esta revisión bibliográfica se aporta una compilación de dichos compuestos, la familia química a la que pertenecen y los aromas asociados. Futuros estudios deberían enfocarse en desarrollar métodos estandarizados para la fermentación y el secado, así como en la conservación de la diversidad genética del cacao fino y de aroma.

Conflicto de intereses

Las autoras de esta revisión bibliográfica declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Abbott, P. C., Benjamin, T. J., Burniske, G. R., Croft, M. M., Fenton, M. C., Kelly, C. R., Lundy, M. M., Rodríguez Camayo, F., & Wilcox, M. D. (2017). *Análisis de la cadena productiva del cacao en Colombia*. Universidad de Purdue, & Centro Internacional de Agricultura Tropical. <https://www.purdue.edu/colombia/partnerships/cacaoforpeace/docs/2019FinalCacaoReport-Spanish.pdf>
- Amoa-Awua, W. K. (2014). Methods of cocoa fermentation and drying. In R. F. Schwan, & G. H. Fleet (Eds.), *Cocoa and coffee fermentations* (Chapter 3, pp. 71–128). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17536>
- Alvarado Marengo, P. (2024). *Evaluación del efecto del tiempo de fermentación y condiciones de secado de cinco subvariedades de cacao (Theobroma cacao L.) cultivadas en Upala, Costa Rica, sobre el perfil de ácidos orgánicos, compuestos volátiles y péptidos precursores de aromas claves para su calidad final* [Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica]. Repositorio Kerwá. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/90940>
- Aprosoaie, A. C., Luca, S., & Miron, A. (2016). Flavor chemistry of cocoa and cocoa products—An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 73–91. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12180>
- Arvelo, M. A., Delgado, T., Maroto, S., Rivera, J., Higuera Ciapara, I., & Navarro, I. (2016). *Estado actual sobre la producción, el comercio y cultivo del cacao en América*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/2793>
- Avendaño-Arrazate, C. H., Suárez-Venero, G. M., Mendoza-López, A., Martínez-Bolaños, M., Reyes-Reyes, J., & Espinosa-Zaragoza, S. (2021). Composición arbórea de especies asociadas al cacao: selva Lacandona y sistemas agroforestales, Chiapas, México. *Agronomía Mesoamericana*, 32(2), 365–381. <https://doi.org/10.15517/am.v32i2.41630>

- Barbosa-Pereira, L., Rojo-Poveda, O., Ferrocino, I., Giordano, M., & Zeppa, G. (2019). Assessment of volatile fingerprint by HS-SPME/GC-qMS and E-nose for the classification of cocoa bean shells using chemometrics. *Food Research International*, *123*, 684–696. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.05.041>
- Barišić, V., Kopjar, M., Jozinović, A., Flanjak, I., Ačkar, Đ., Miličević, B., Šubarić, D., Jokić, S., & Babić, J. (2019). The chemistry behind chocolate production. *Molecules*, *24*(17), Article 3163. <https://doi.org/10.3390/molecules24173163>
- Borja Fajardo, J. G., Horta Tellez, H. B., Peñalosa Atuesta, G. C., Sandoval Aldana, A. P., & Mendez Arteaga, J. J. (2022). Antioxidant activity, total polyphenol content and methylxanthine ratio in four materials of *Theobroma cacao* L. from Tolima, Colombia. *Heliyon*, *8*(5), Article e09402. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09402>
- Calvo, A. M., Botina, B. L., García, M. C., Cardona, W. A., Montenegro, A. C., & Criollo, J. (2021). Dynamics of cocoa fermentation and its effect on quality. *Scientific Reports*, *11*, Article 16746. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95703-2>
- Cardona Velásquez, L., Rodríguez-Sandoval, E., & Cadena Chamorro, E. (2016). Diagnóstico de las prácticas de beneficio del cacao en el departamento de Arauca. *Revista Lasallista de Investigación*, *13*(1), 94–104. <http://revistas.unilasallista.edu.co/index.php/rldi/article/view/986>
- Carmioli González, G. (2017). *Análisis de la actividad cacaotera costarricense y perspectivas de su reactivación*. Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. http://www.sepsa.go.cr/docs/2017-001-Diagnostico_cacao.pdf
- Castro-Alayo, E. M., Idrogo-Vásquez, G., Siche, R., & Cardenas-Toro, F. P. (2019). Formation of aromatic compounds precursors during fermentation of Criollo and Forastero cocoa. *Heliyon*, *5*(1), Article e01157. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01157>
- Center for the Promotion of Imports from Developing Countries. (2020). *The European market potential for specialty cocoa*. <https://www.cbi.eu/market-information/cocoa-cocoa-products/specialty-cocoa/market-potential>
- Chocolate, Biscuits & Confectionery of Europe, European Cocoa Association, & Federation of Cocoa Commerce. (2015). *Cacao en grano: requisitos de calidad de la industria del chocolate y del cacao*. https://cocoaquality.eu/data/Cacao%20en%20Grano%20Requisitos%20de%20Calidad%20de%20la%20Industria%20Apr%202016_es.pdf
- Cocom Cantu, B. A. (2021). *Estudio del proceso de fermentación de los granos de cacao (Theobroma cacao L.) en México* [Tesis doctoral, Universidad de Almería]. Repositorio riUAL. <https://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/9936/01.%20Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cruz Rojas, L. L. (2023). *Dinámica de los compuestos volátiles en el cacao nativo fino de aroma y el clon comercial CCN-51 durante el proceso de fermentación espontánea* [Tesis de grado, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. Repositorio Institucional de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/13596/Dinamica_CruzRojas_Lorena.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- D'Souza, R., Grimbs, A., Grimbs, S., Behrends, B., Corno, M., Ullrich, M., & Kuhnert, N. (2018). Degradation of cocoa proteins into oligopeptides during spontaneous fermentation of cocoa beans. *Food Research International*, *109*, 506–516. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.068>
- De La Cruz Medina, J., Vargas Ortiz, M., & Del Ángel Coronel, O. (2012). *Cacao: operaciones poscosecha*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://openknowledge.fao.org/items/2cf7c149-9c9a-434e-aead-35d7d1448f74>

- De Vuyst, L., & Weckx, S. (2016). The cocoa bean fermentation process: from ecosystem analysis to starter culture development. *Journal of Applied Microbiology*, 121(1), 5–17. <https://doi.org/10.1111/jam.13045>
- Deus, V. L., Bispo, E. S., Franca, A. S., & Gloria, M. B. A. (2021). Understanding amino acids and bioactive amines changes during on-farm cocoa fermentation. *Journal of Food Composition and Analysis*, 97, Article 103776. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103776>
- Deuscher, Z., Gourrat, K., Repoux, M., Boulanger, R., Labouré, H., & Le Quéré, J.-L. (2020). Key aroma compounds of dark chocolates differing in organoleptic properties: A GC-O comparative study. *Molecules*, 25(8), Article 1809. <https://doi.org/10.3390/molecules25081809>
- Dzelagha, B. F., Ngwa, N. M., & Nde Bup, D. A. (2020). Review of Cocoa Drying Technologies and the Effect on Bean Quality Parameters. *International Journal of Food Science*, 2020, Article 8830127. <https://doi.org/10.1155/2020/8830127>
- Engeseth, N. J., & Ac Pangan, M. F. (2018). Current context on chocolate flavor development – a review. *Current Opinion in Food Science*, 21, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.07.002>
- Escobar, S., Santander, M., Zuluaga, M., Chacón, I., Rodríguez, J., & Vaillant, F. (2021). Fine cocoa beans production: Tracking aroma precursors through a comprehensive analysis of flavor attributes formation. *Food Chemistry*, 365, Article 130627. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130627>
- Fernández-Niño, M., Rodríguez-Cubillos, M. J., Herrera-Rocha, F., Anzola, J., Cepeda-Hernández, M., Aguirre, J., Chica, M., Olarte, H., Rodríguez-López, C., Calderón, D., Ramírez-Rojas, A., Del Portillo, P., Restrepo, S., & González, A. (2021). Dissecting industrial fermentations of fine flavour cocoa through metagenomic analysis. *Scientific Reports*, 11, Article 8638. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88048-3>
- Fraudendorfer, F., & Schieberle, P. (2006). Identification of the key aroma compounds in cocoa powder based on molecular sensory correlations. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(15), 5521–5529. <https://doi.org/10.1021/jf060728k>
- Fraudendorfer, F., & Schieberle, P. (2008). Changes in key aroma compounds of Criollo cocoa beans during roasting. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(21), 10244–10251. <https://doi.org/10.1021/jf802098f>
- Gutiérrez, T. J. (2017). State of the Art Chocolate Manufacture: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(6), 1313–1344. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12301>
- Hartmann, S. (2015). Studies on the formation of odorants and their possible precursors during cocoa processing. Dt. Forschungsanstalt. für Lebensmittelchemie.
- Hartmann, S., & Schieberle, P. (2016). On the role of amadori rearrangement products as precursors of aroma-active strecker aldehydes in cocoa. In M. Granvogl, D. Peterson, & P. Schieberle (Eds.), *Browned flavors: Analysis, formation, and physiology* (Vol. 1237, Chapter 1, pp. 1–13). American Chemical Society. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/bk-2016-1237.ch001>
- Herrera-Rocha, F., Cala, M. P., Aguirre Mejía, J. L., Rodríguez-López, C., Chica, M. J., Olarte, H. H., Fernández-Niño, M., & Gonzalez Barrios, A. F. (2021). Dissecting fine-flavor cocoa bean fermentation through metabolomics analysis to break down the current metabolic paradigm. *Scientific Reports*, 11, Article 21904. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01427-8>
- Hu, S., Kim, B.-Y., & Baik, M.-Y. (2016). Physicochemical properties and antioxidant capacity of raw, roasted and puffed cacao beans. *Food Chemistry*, 194, 1089–1094. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.126>

- International Cocoa Organization. (2023). *Cocoa market report for September 2023*. <https://www.icco.org/cocoa-market-report-for-september-2023/>
- Januszewska, R. (2018). *Hidden persuaders in cocoa and chocolate. A flavor lexicon for cocoa and chocolate sensory professionals*. Woodhead Publishing.
- Kadow, D., Bohlmann, J., Phillips, W., & Lieberei, R. (2013). Identification of main fine flavour components in two genotypes of the cocoa tree (*Theobroma cacao* L.). *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 86, 90–98. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2013.086.013>
- Kongor, J. E., Hinneh, M., Van de Walle, D., Ohene Afoakwa, E., Boeckx, P., & Dewettinck, K. (2016). Factors influencing quality variation in cocoa (*Theobroma cacao*) bean flavour profile — A review. *Food Research International*, 82, 44–52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.012>
- Lacerda Ramos, C., Ribeiro Dias, D., da Cruz Pedrozo Miguel, M. G., & Freitas Schwan, R. (2014). Impact of different cocoa hybrids (*Theobroma cacao* L.) and *S. cerevisiae* UFLA CA11 inoculation on microbial communities and volatile compounds of cocoa fermentation. *Food Research International*, 64, 908–918. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.08.033>
- Lin, L.-Y., Chen, K.-F., Changchien, L.-L., Chen, K. C., & Pen, R. (2022). Variación volátil de los granos de *Theobroma cacao* Malvaceae L. cultivados en Taiwán afectados por el procesamiento mediante fermentación y tostado. *Molecules*, 27, artículo 3058. <https://doi.org/10.3390/molecules27103058>
- Liu, M., Liu, J., He, C., Song, H., Liu, Y., Zhang, Y., Wang, Y., Guo, J., Yang, H., & Su, X. (2017). Characterization and comparison of key aroma-active compounds of cocoa liquors from five different areas. *International Journal of Food Properties*, 20(10), 2396–2408. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1238929>
- Meneses Quelal, O., Pilamunga Hurtado, D., Arroyo Benavides, A., Vidaurre Alanes, P., & Vidaurre Alanes, N. (2023). Key aromatic volatile compounds from roasted cocoa beans, cocoa liquor, and chocolate. *Fermentation*, 9(2), Article 166. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020166>
- Mori-Mestanza, D., Zuta-Chamoli, V., Barrena Gurbillon, M., Oliva Cruz, M., & Chávez Quintana, S. (2021). Análisis de los compuestos volátiles de cacao nativo fino de aroma de granos tostados y sin tostar. *Revista Científica Pakamuros*, 9(4), 133–147. <https://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros/article/view/157>
- Motamayor, J. C., Lachenaud, P., Wallace da Silva e Mota, J., Loor, R., Kuhn, D. N., Brown, J. S., & Schnell, R. J. (2008). Geographic and genetic population differentiation of the Amazonian chocolate tree (*Theobroma cacao* L.). *PLOS ONE*, 3(10), Article e3311. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003311>
- Ohene Afoakwa, E., Paterson, A., Fowler, M., & Ryan, A. (2008). Flavor formation and character in cocoa 79 and chocolate: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48(9), 840–857. <https://doi.org/10.1080/10408390701719272>
- Ohene Afoakwa, E., Quao, J., Takrama, J., Simpson Budu, A., & Kwesi Saalia, F. (2013). Chemical composition and physical quality characteristics of Ghanaian cocoa beans as affected by pulp pre-conditioning and fermentation. *Journal of Food Science and Technology*, 50(6), 1097–1105. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0446-5>
- Otero Rojas, E. J., Herrera Ruales, F. C., Perdomo, D. A., & Jimenez Mora, J. P. (2022). Evaluación del método de extracción SPME-GC-MS para el análisis de compuestos orgánicos volátiles en licor de cacao de Nariño-Colombia. *Revista ION*, 35(1), 103–116. <https://doi.org/10.18273/revion.v35n1-2022007>

- Parra Rosero, P. (2014). *Secado artificial de cacao. Estado del arte*. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10984>
- Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica. (2023, julio 12). *Factores climáticos comprometen la producción africana de cacao*. https://www.procomer.com/alertas_comerciales/exportador-alerta/factores-climaticos-comprometen-la-produccion-africana-de-cacao/
- Qin, X.-W., Lai, J.-X., Tan, L.-H., Hao, C.-Y., Li, F.-P., He, S.-Z., & Song, Y.-H. (2017). Characterization of volatile compounds in Criollo, Forastero, and Trinitario cocoa seeds (*Theobroma cacao* L.) in China. *International Journal of Food Properties*, 20(10), 2261–2275. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1236270>
- Rodríguez-Campos, J., Escalona-Buendía, H. B., Contreras-Ramos, S. M., Orozco-Avila, J., Jaramillo-Flores, E., & Lugo-Cervantes, E. (2012). Effect of fermentation time and drying temperature on volatile compounds in cocoa. *Food Chemistry*, 132(1), 277–288. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.078>
- Rodríguez-Velázquez, N. D., Chávez-Ramírez, B., Gómez de la Cruz, I., Vázquez-Murrieta, M.-S., & Estrada de los Santos, P. (2022). El cultivo del cacao, sus características y su asociación con microorganismos durante la fermentación. *Alianzas y Tendencias BUAP*, 7(25), 36–51. <http://doi.org/10.5281/zenodo.6326782>
- Rottiers, H., Tzompa Sosa, D. A., De Winne, A., Ruales, J., De Clippeleer, J., De Leersnyder, I., De Wever, J., Everaert, H., Messens, K., & Dewettinck, K. (2019). Dynamics of volatile compounds and favor precursors during spontaneous fermentation of fine favor Trinitario cocoa beans. *European Food Research and Technology*, 245, 1917–1937. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03307-y>
- Santander Muñoz, M., Rodríguez Cortina, J., Vaillant, F. E., & Escobar Parra, S. (2020). An overview of the physical and biochemical transformation of cocoa seeds to beans and to chocolate: Flavor formation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(10), 1593–1613. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1581726>
- Sukha, D. A., Butler, D. R., Comissiong, E. A., & Umaharan, P. (2014). The impact of processing location and growing environment on flavor in cocoa (*Theobroma cacao* L.) implications for “Terroir” and Certification Processing Location study. *ISHS Acta Horticulturae*, 1047, 255–262. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1047.31>
- Suzuki, D., Sato, Y., Nishiura, H., Harada, R., Kamasaka, H., Kuriki, T., & Tamura, H. (2019). A novel extraction method for aroma isolation from dark chocolate based on the oiling-out effect. *Food Analytical Methods*, 12, 2857–2869. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01642-0>
- Tuenter, E., Delbaereb, C., De Winne, A., Bijttebier, S., Custers, D., Foubert, K., Van Durme, J., Messens, K., Dewettinck, K., & Pieters, L. (2020). Non-volatile and volatile composition of West African bulk and Ecuadorian fine-flavor cocoa liquor and chocolate. *Food Research International*, 130, Article 108943. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108943>
- Utrilla-Vázquez, M., Rodríguez-Campos, J., Avendaño-Arrazate, C. H., Gschaedler, A., & Lugo-Cervantes, E. (2020). Analysis of volatile compounds of five varieties of Maya cocoa during fermentation and drying processes by Venn diagram and PCA. *Food Research International*, 129, Article 108834. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108834>
- Vázquez-Ovando, A., Ovando-Medina, I., Adriano-Anaya, L., Betancur-Ancona, D., & Salvador-Figueroa, M. (2016). Alcaloides y polifenoles del cacao, mecanismos que regulan su biosíntesis y sus implicaciones en el sabor y aroma. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 66(3), 239–254. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_alan/article/view/20727

- Viesser, J. A., de Melo Pereira, G. V., de Carvalho Neto, D. P., Vandenberghe, L. P. de S., Azevedo, V., Brenig, B., Rogez, H., Góes-Neto, A., & Soccol, C. R. (2020). Exploring the contribution of fructophilic lactic acid bacteria to cocoa beans fermentation: Isolation, selection, and evaluation. *Food Research International*, 136. Article 109478. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109478>
- Voigt, J., Janek, K., Textoris-Taube, K., Niewienda, A., & Wöstemeyer, J. (2016). Partial purification and characterization of the peptide precursors of the cocoa-specific aroma components. *Food Chemistry*, 192, 706–713. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.068>
- Voigt, J., & Lieberei, R. (2014). Biochemistry of cocoa fermentation. In R. Achwan, & H. Fleet (Eds.), *Cocoa and coffee fermentations* (Chapter 5, pp. 193-225). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b17536-10/biochemistry-cocoa-fermentation-r-gen-voigt-andr-ei-nhardli-eber-ei>
- Wattnem, T., Wiegel, J., González, C., & Reyes, B. (2022). Who defines fine chocolate? The construction of global cocoa quality standards from Latin America. *International Journal of Sociology of Agriculture, and Food*, 28(1), 73–87. <https://www.ijisaf.org/index.php/ijisaf/article/view/448>
- Zapata Bustamante, S., Tamayo Tenorio, A., & Rojano, B. A. (2015). Efecto del tostado sobre los metabolitos secundarios y la actividad antioxidante de clones de cacao colombiano. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(1), 7497–7507. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47836>
- Zarrillo, S., Gaikwad, N., Lanaud, C., Powis, T., Viot, C., Lesur, I., Fouet, L., Argout, X., Guichoux, E., Salin, F., Loor Solrzano, R., Bouchez, O., Vignes, H., Severtz, P., Hurtado, J., Yopez, A., Grivetti, L., Blake, M., & Valdez, F. (2018). The use and domestication of *Theobroma cacao* during the mid-Holocene in the upper Amazon. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 1879–1888. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0697-x>