

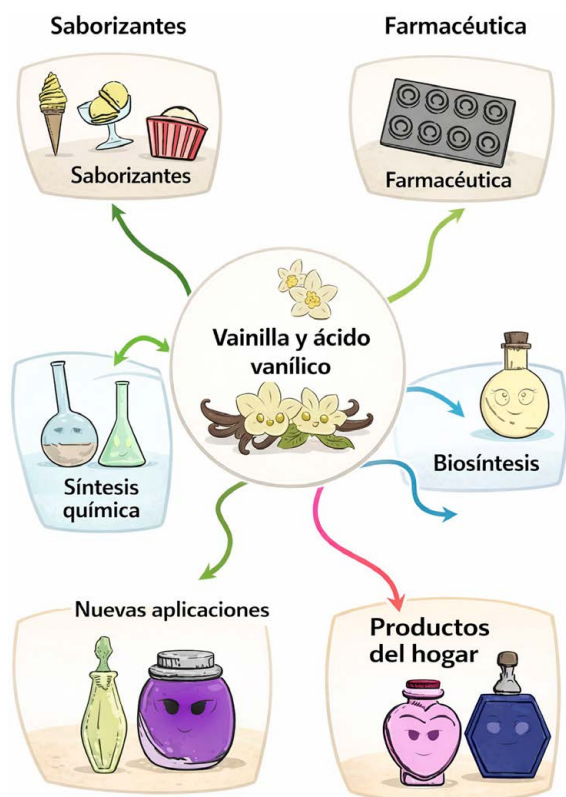
# Bacterias y vainilla: del sustrato al aroma

Esmeralda **Escobar Muciño**

Cuando percibimos el dulce y reconfortante aroma de la vainilla, en realidad estamos detectando la acción de una sola molécula que se produce en grandes cantidades: la vainillina. Este compuesto natural, cuyo nombre químico es 3-metoxi-4-hidroxibenzaldehído, se encuentra en las vainas de la orquídea *Vanilla planifolia* y es el principal responsable del sabor y olor que han hecho de la vainilla uno de los ingredientes gastronómicos más apreciados en el mundo (Escobar-Muciño *et al.*, 2020).

Aunque solemos asociar la vainillina únicamente con las vainas de vainilla, esta sustancia también aparece en pequeñas cantidades en otras plantas. Desde el punto de vista químico, pertenece al grupo de los compuestos aromáticos fenólicos, una característica que explica su aroma intenso y su amplia utilidad. Gracias a estas propiedades, la vainillina se emplea de forma habitual como saborizante y fragancia en alimentos, bebidas, perfumes y productos farmacéuticos, donde además ayuda a suavizar olores o sabores no deseados (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

Junto a la vainillina, existe otro compuesto aromático conocido como el ácido vanílico o ácido 4-hidroxi-3-metoxibenzoico. Aunque su aroma es menos intenso, también forma parte del perfil aromático de la vainilla y ha despertado interés por sus posibles beneficios para la salud. Tanto la vainillina como el ácido vanílico presentan propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas



**Figura 1.** Usos y aplicaciones de la vainillina y el ácido vanílico en la industria de los alimentos, farmacéutica y perfumería.

y neuroprotectoras, lo que ha ampliado su valor más allá de la cocina y la perfumería. Hoy en día, estos compuestos no solo aportan sabor y aroma, también se utilizan como base para la elaboración de medicamentos, fragancias y aditivos alimentarios, demostrando en particular que las vainas de vainilla son mucho más que un simple ingrediente dulce: es una fuente de moléculas con aplicaciones sorprendentes en distintos ámbitos de la vida cotidiana (Figura 1) (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

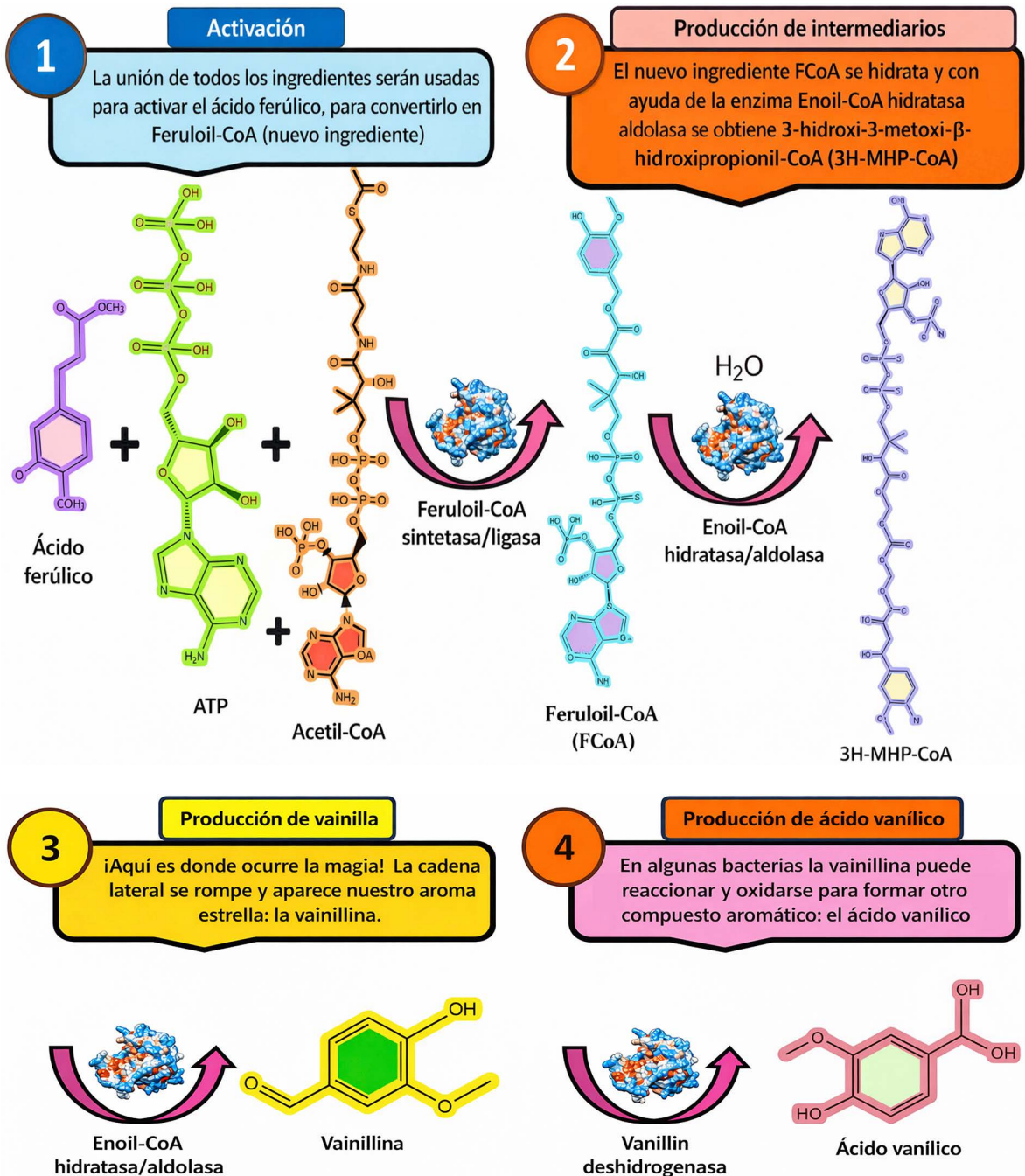
Este valor sensorial y funcional ha convertido a la vainillina en uno de los compuestos aromáticos más importantes utilizados a nivel mundial. Sin embargo, la cantidad que se obtiene de forma natural es sorprendentemente limitada. La producción anual de vainillina extraída directamente de la vainilla natural se estima entre 66 y 2600 toneladas, que son concentradas principalmente en países como Indonesia, Madagascar, China, México, Tonga y Comoras (Gu *et al.*, 2015; Banerjee y Chattopadhyay,

2019). Esta cifra contrasta fuertemente con la demanda global, lo que genera una presión constante sobre los países productores. El cultivo de la vainilla es costoso y laborioso: requiere polinización manual, largos tiempos de maduración y ofrece una productividad relativamente baja, siendo factores que encarecen significativamente su producción (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

Para hacer frente a este desequilibrio entre oferta y demanda, se han desarrollado alternativas para asegurar el suministro de vainilla a escala industrial. Una de las más utilizadas es la síntesis química, mediante la cual se obtiene vainillina sintética a partir de compuestos derivados del petróleo, como el eugenol y guayacol (Zamzuri *et al.*, 2014; Banerjee y Chattopadhyay, 2019). Este tipo de producción está estrictamente regulada por agencias de seguridad alimentaria en todo el mundo, con el fin de garantizar su uso seguro en alimentos y otros productos de consumo humano (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

Frente a las limitaciones de la extracción natural y las preocupaciones asociadas a la síntesis química, ha surgido una alternativa que combina innovación, seguridad y sostenibilidad: la producción biotecnológica de vainillina natural. Este enfoque ha despertado un creciente interés en las industrias alimentarias y farmacéutica, ya que permite obtener vainillina a partir de procesos más respetuosos con el medio ambiente (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

Estos métodos se basan en el uso de enzimas provenientes de plantas y de microorganismos seguros, capaces de aprovechar residuos vegetales generados por distintas actividades industriales. En estos residuos se encuentran carbohidratos complejos que, al ser hidrolizados, liberan compuestos que funcionan como precursores de la vainillina. A través de una serie de reacciones enzimáticas cuidadosamente controladas. Precursores, como el ácido ferúlico, se transforman en vainillina y ácido vanílico. Entre las enzimas clave de este proceso destaca la feruloil esterasa, que participa activamente en la liberación de estos compuestos aromáticos (Ito *et al.*, 2006; Zamzuri *et al.*, 2014).

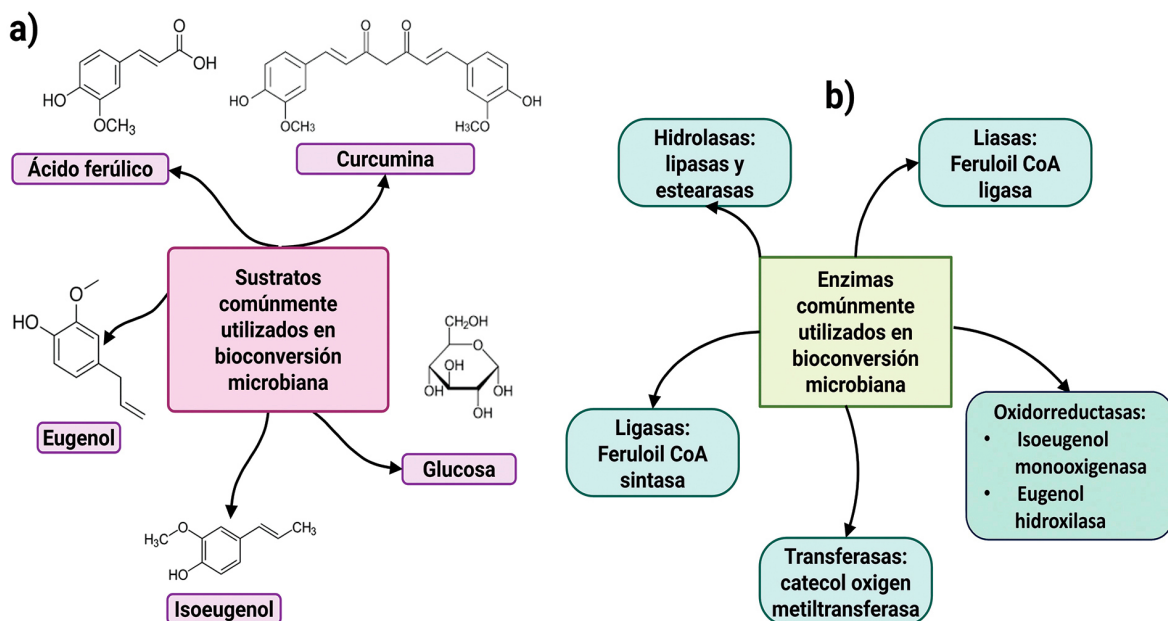


**Figura 2.** Representación didáctica de la ruta metabólica bacteriana dependiente de coenzima A (CoA) para la conversión del ácido ferúlico en vainillina y ácido vanílico. Inicialmente, el ácido ferúlico es activado y convertido en feruloil-CoA, que posteriormente es transformado mediante modificaciones de la cadena lateral, dando lugar a la vainillina; en algunas bacterias, esta puede oxidarse adicionalmente para formar ácido vanílico, un producto de degradación de la vainillina. La figura se basa en el trabajo de Ito *et al.*, 2006.

Para que estos procesos sean viables y seguros, es esencial emplear sustratos de grado alimenticio y microorganismos que no representen riesgos para la salud humana o animal. De esta manera, la biotecnología no solo permite satisfacer la creciente demanda de vainillina, sino que también ofrece una solución alineada con los principios

de sostenibilidad y economía circular, al dar valor a materiales que de otro modo serían considerados desechos (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

En el contexto de la bioconversión microbiana, esta se presenta como una de las estrategias más



**Figura 3.** Sustratos y enzimas más utilizados en la producción de vainillina natural usando microorganismos. Figura diseñada en BioRender bajo una licencia institucional.

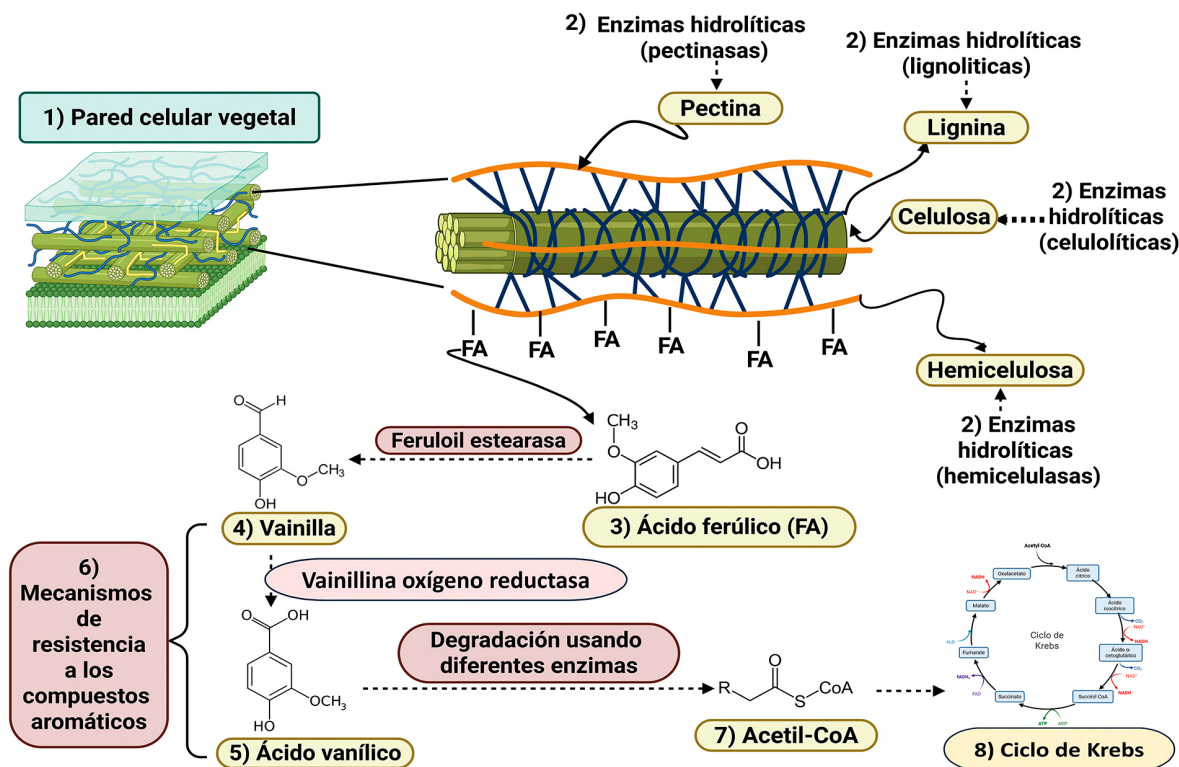
prometedoras dentro de la producción biotecnológica de la vainillina. Este enfoque aprovecha la capacidad metabólica de microorganismos para transformar compuestos naturales en productos de alto valor agregado, como la vainillina y el ácido vanílico, a través de procesos de biotransformación (Zamzuri *et al.*, 2014; Gu *et al.*, 2015; Escobar-Muciño *et al.*, 2020). Este tipo de procesos ofrece ventajas relevantes, entre ellas la reducción del impacto ambiental, el uso de condiciones de operación suaves y la posibilidad de emplear residuos vegetales como materia prima, contribuyendo así a un enfoque más sostenible en la obtención de compuestos aromáticos de interés industrial (Banerjee y Chattopadhyay, 2019).

#### COMO NACE EL AROMA DE LA VAINILLA: EL ÁCIDO FERÚLICO COMO PRECURSOR CLAVE

El ácido ferúlico, también conocido como ácido 4-hidroxi-3-metoxicinámico es uno de los precursores más importantes en la producción biotecnológica de la vainillina y el ácido vanílico de origen natural. Este compuesto se encuentra de forma abundante en la pared celular de frutas, cereales y otros materiales

vegetales, donde forma parte de estructuras complejas. Gracias a su estructura química, el ácido ferúlico puede transformarse en vainillina mediante rutas enzimáticas específicas que involucran enzimas como ferulasas, descarboxilasas y aldehído deshidrogenasas. En la Figura 2 se muestran los pasos sencillos de la conversión del ácido ferúlico en vainillina y, posteriormente, en ácido vanílico como una receta que culmina en la formación de sabores agradables.

La amplia disponibilidad del ácido ferúlico en residuos agroindustriales lo convierte en una alternativa atractiva desde el punto de vista económico y ambiental, alineada con estrategias de producción sostenible (Ito *et al.*, 2006; Banerjee y Chattopadhyay, 2019). En este proceso, los microorganismos desempeñan un papel clave al actuar como verdaderas fábricas biológicas capaces de convertir compuestos aromáticos de origen vegetal en vainillina. Además del ácido ferúlico, otros sustratos como el eugenol y los residuos agrícolas lignocelulósicos también pueden ser aprovechados mediante rutas metabólicas bien definidas. Diversos microorganismos han demostrado una alta eficiencia en estas transformaciones, incluyendo bacterias y hongos que realizan la biosíntesis de vainillina a través de uno o dos pasos enzimáticos. Entre los géneros más



**Figura 4.** Procesos bacterianos involucrados en la transformación del ácido ferúlico en vainilla y ácido vanílico (Ito *et al.*, 2006; Escobar-Muciño *et al.*, 2020). La figura muestra cómo, a partir de la degradación de la pared celular vegetal por acción de enzimas, se inicia una serie de reacciones bioquímicas en las bacterias que conducen a la formación de estos compuestos aromáticos. Como parte final del proceso, se genera la acetil-CoA, una molécula que se integra al metabolismo energético de la célula. Figura diseñada en BioRender bajo una licencia institucional.

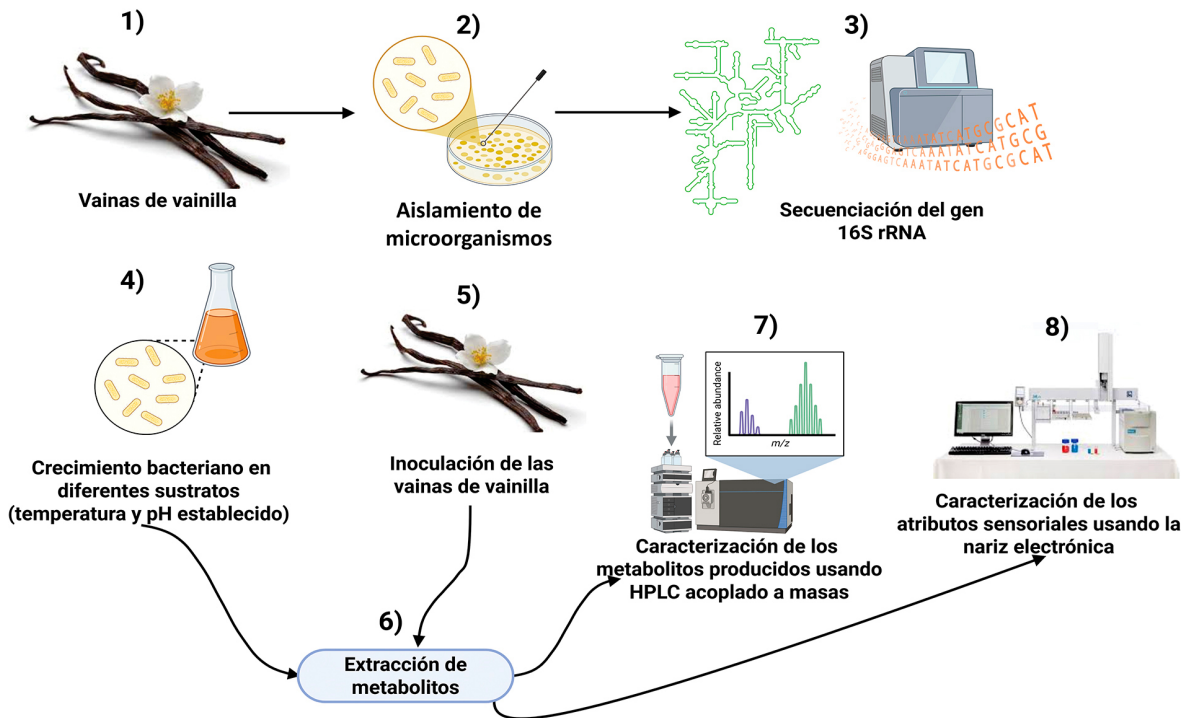
estudiados se encuentran *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Streptomyces* y *Amycolatopsis*, reconocidos por su eficacia y frecuencia de uso (Banerjee y Chattopadhyay, 2019; Escobar-Muciño *et al.*, 2021).

A esta lista se suman bacterias ácido-lácticas como *Pediococcus*, hongos ligninolíticos como *Phanerochaete* y bacterias ambientales pertenecientes a géneros como *Sphingomonas* y *Halomonas*. Esta diversidad microbiana pone de manifiesto el amplio potencial biotecnológico de los microorganismos para la producción de compuestos aromáticos de alto valor industrial, como la vainillina. En la Figura 3 se ilustran los principales sustratos y enzimas involucradas en los procesos de bioconversión microbiana que conducen a la formación de vainillina y ácido vanílico (Banerjee y Chattopadhyay, 2019; Escobar-Muciño *et al.*, 2021).

Dentro de esta diversidad microbiana, algunos de los microorganismos que más interés han despertado entre los investigadores pertenecen al género *Pseudomonas*. Diversas cepas de este grupo han

sido estudiadas por su capacidad para transformar compuestos fenólicos en moléculas de interés industrial, entre ellas *Pseudomonas* sp. Az10 UPM, *P. fluorescens* AN103, *P. putida* y *P. aeruginosa* IF-VB. Estas bacterias son capaces de producir ácido vanílico, un compuesto que, como se ha señalado previamente, forma parte del perfil aromático característico de las vainas de vainilla natural (Zamzuri *et al.*, 2014; Escobar-Muciño *et al.*, 2020).

La bioconversión realizada por estas cepas ocurre a partir del ácido ferúlico bajo condiciones de fermentación controladas, generalmente a temperaturas entre 25-30°C, pH cercano a la neutralidad. Estos procesos se llevan a cabo en volúmenes relativamente pequeños, que van de 20 a 200 ml, lo que facilita su estudio en condiciones de laboratorio. En esta ruta metabólica participa una enzima clave, la vainillina deshidrogenasa, responsable de oxidar la vainillina y convertirla en ácido vanílico, marcando un lapso fundamental



**Figura 5.** Esquema del proceso de producción natural de compuestos aromáticos por bacterias tanto en condiciones de cultivo *in vitro* como mediante la inoculación directa de las vainas de *V. planifolia* durante el proceso de curado. El procedimiento incluye el aislamiento e identificación molecular de las bacterias, su cultivo en presencia de ácido ferúlico como precursor, la detección de vainillina y ácido vanílico por HPLC-MS, así como el análisis del perfil aromático en las vainas mediante nariz electrónica (Gu *et al.*, 2015; Escobar-Muciño *et al.*, 2020; Manyatsi *et al.*, 2024). Figura diseñada en BioRender bajo una licencia institucional.

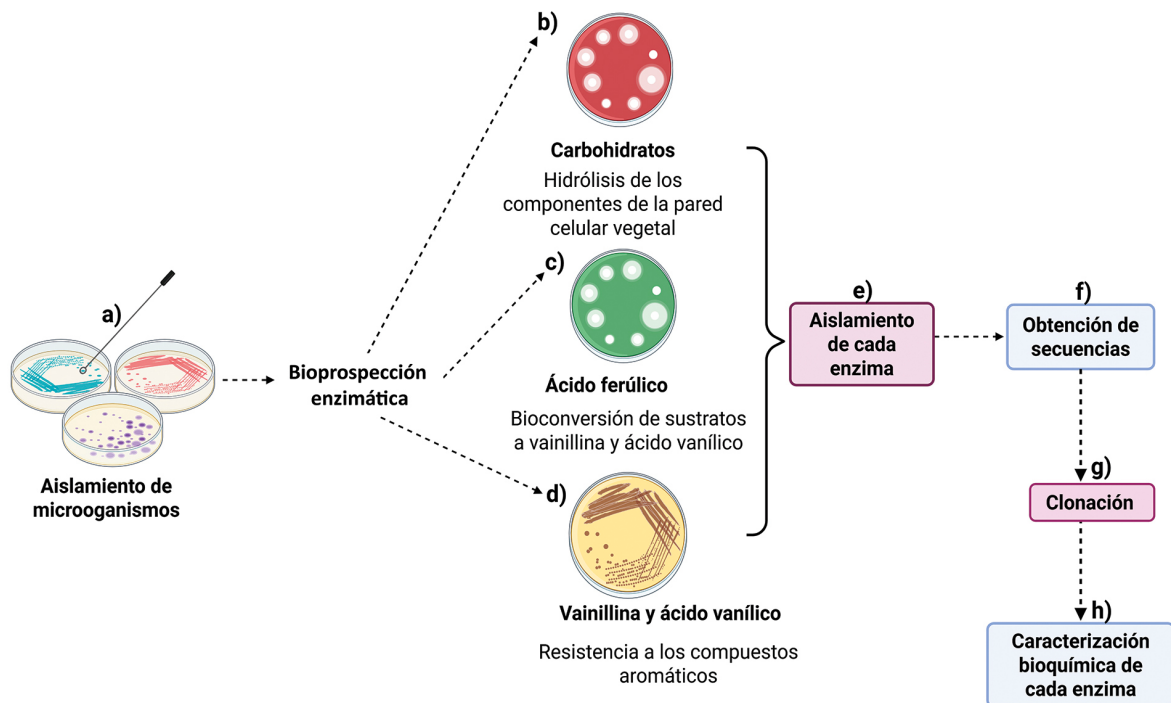
dentro del procesos de transformación microbiana (Zamzuri *et al.*, 2014; Escobar-Muciño *et al.*, 2020).

En la Figura 4 se representa de manera esquemática el proceso de bioconversión bacteriana del ácido ferúlico en vainillina y ácido vanílico. El mecanismo inicia con la degradación de la pared celular vegetal, que puede ser llevada a cabo tanto por enzimas hidrolíticas propias de la planta como por enzimas producidas por las bacterias. Posteriormente, entran en acción las enzimas específicas de la bioconversión bacteriana, que conducen a la formación de intermediarios metabólicos y, finalmente, de acetil-CoA, el cual puede reincorporarse al ciclo de Krebs como parte del metabolismo energético celular (Ito *et al.*, 2006).

Un aspecto clave para la selección de bacterias con potencial biotecnológico es su resistencia al efecto antimicrobiano de la vainillina, el ácido ferúlico y otros compuestos intermediarios generados durante el proceso. Esta tolerancia ha sido previamente demostrada en distintas cepas y resulta esencial para

garantizar una producción eficiente bajo condiciones de laboratorio, ya que la acumulación de estos compuestos puede inhibir el crecimiento microbiano y limitar el rendimiento del proceso (Ito *et al.*, 2006; Escobar-Muciño *et al.*, 2020).

En conjunto, estos resultados indican que algunas cepas no solo pueden colonizar tejidos vegetales, sino también iniciar la degradación de la pared celular y aprovechar los compuestos liberados para producir aromas característicos. La capacidad de resistir los propios compuestos que generan es un aspecto clave, ya que permite que el proceso continúe sin inhibir el crecimiento bacteriano. Por estas razones, estas bacterias se consideran candidatas ideales para aplicaciones en biotecnología del aroma (Escobar-Muciño *et al.*, 2020 y 2021). La Figura 6 ilustra el enfoque de la bioprospección enzimática, es decir, la búsqueda de microorganismos que producen enzimas con aplicaciones biotecnológicas útiles en el contexto de los aromas. En este caso, la bioprospección es utilizada para identificar bacterias capaces de generar sus propios sustratos por la hidrólisis de componentes



**Figura 6.** Bioprospección de bacterias con capacidad para transformar materiales vegetales en compuestos aromáticos naturales. La figura ilustra cómo estos microorganismos degradan el tejido vegetal, producen moléculas aromáticas y toleran los compuestos generados, lo que los convierte en candidatos para aplicaciones biotecnológicas (Gu *et al.*, 2015; Escobar-Muciño *et al.*, 2020; Dos Santos *et al.*, 2022). Figura diseñada en BioRender bajo una licencia institucional.

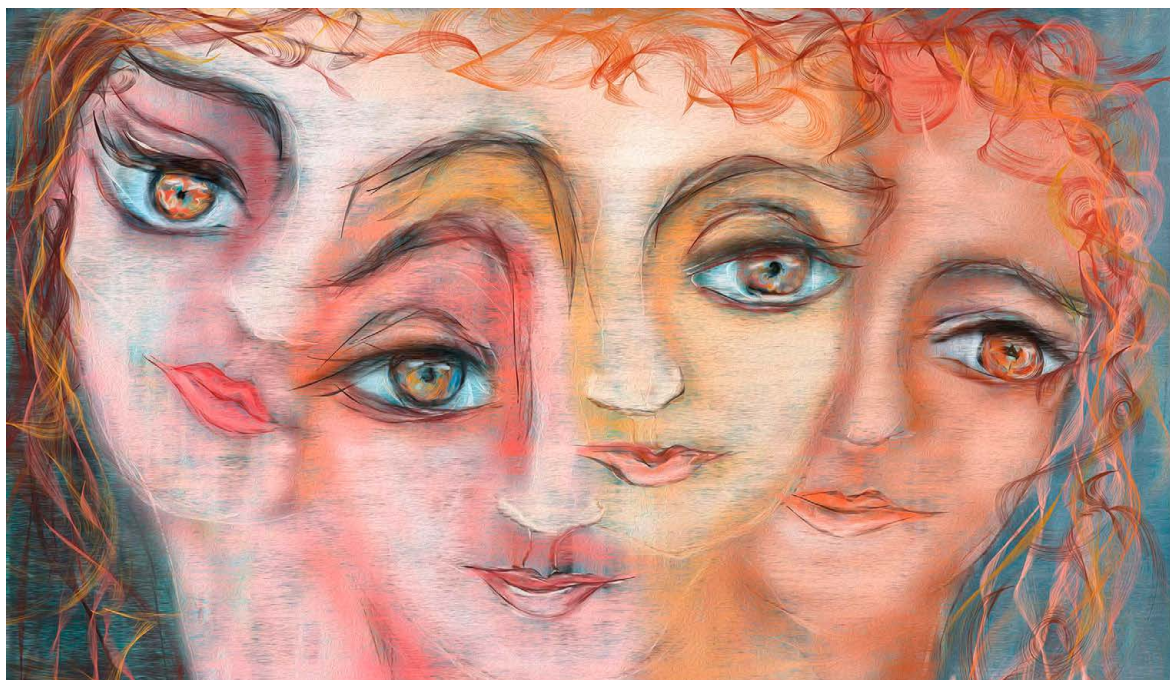
de la pared celular vegetal, producir compuestos aromáticos por bioconversión bacteriana a partir de precursores como el ácido ferúlico y presentar mecanismos de resistencia a compuestos aromáticos resultantes, como la vainillina y el ácido vanílico.

#### VAINILLINA Y ÁCIDO VANÍLICO: DEL LABORATORIO A LA INDUSTRIA

Producir vainillina y ácido vanílico a partir de fuentes naturales es una alternativa cada vez más atractiva frente a los métodos químicos tradicionales, especialmente por su menor impacto ambiental. Sin embargo, llevar estos procesos del laboratorio a la industria no es sencillo. A diferencia de la producción química, que se realiza bajo condiciones estrictamente controladas, la producción biológica depende de organismos vivos, cuya actividad está influida por factores como la temperatura, el tipo de nutriente disponible, las condiciones de cultivo y las rutas enzimáticas disponibles en cada microorganismo (Ito *et al.*, 2006; Zamzuri *et al.* 2014).

Algunos microorganismos han demostrado una notable capacidad para transformar el ácido ferúlico en ácido vanílico o vainillina. Estudios como el de Zamzuri *et al.* (2014) han mostrado que ciertas bacterias del género *Pseudomonas* pueden realizar esta transformación de manera eficiente. No todas las cepas se comportan igual: algunas producen mayores cantidades, otras actúan más rápido y en otros casos son más eficientes, lo que muestra que cada microorganismo tiene ventajas particulares (Zamzuri *et al.* 2014; Gu *et al.*, 2015; Escobar-Muciño *et al.*, 2020 y 2021).

En el caso de la vainillina, los métodos biotecnológicos todavía producen cantidades menores que la síntesis química. Sin embargo, su gran fortaleza radica en el uso de materias primas renovables y en su aceptación como producto de origen natural. De hecho, investigaciones recientes han logrado avances importantes utilizando bacterias modificadas genéticamente, capaces de producir cantidades relevantes de vainillina en poco tiempo (Zamzuri *et al.* 2014; Liziatelli *et al.* 2019).



© Malú Méndez Lavielle. *Derostros*.

Uno de los mayores desafíos es que tanto el material de partida como los compuestos aromáticos producidos pueden resultar tóxicos para los propios microorganismos. Esto limita los rendimientos que pueden obtenerse en un solo proceso (Zamzuri *et al.* 2014; Gu *et al.*, 2015). Para superar este problema, los científicos trabajan en la búsqueda de métodos que permitan seleccionar bacterias resistentes (Escobar-Muciño *et al.*, 2020).

En conjunto, aunque estos métodos aún no sustituyen a la producción química tradicional, representan una alternativa prometedora. La posibilidad de obtener vainillina y ácido vanílico de origen natural a partir de residuos vegetales y con menor impacto ambiental, posiciona a la biotecnología como una opción clave para el futuro de la industria de los aromas (Liziatelli *et al.* 2019).

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El aroma de la vainilla es el resultado de un sistema biológico mucho más complejo de lo que comúnmente se imagina. Lejos de depender únicamente de la

planta *V. planifolia* o de una sola molécula, como la vainillina, este aroma surge de la interacción entre compuestos vegetales y microorganismos que habitan naturalmente en las vainas. Comprender esta relación ha permitido reconocer a las bacterias como actores clave en la formación y enriquecimiento del perfil aromático de la vainilla natural.

A lo largo de este trabajo se muestra que la bioconversión microbiana del ácido ferúlico representa una alternativa sostenible para la obtención de vainillina y ácido vanílico, dos compuestos de alto valor en las industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica. Microorganismos pertenecientes a géneros como *Pseudomonas* y *Bacillus* destacan por su capacidad para transformar precursores de origen vegetal en moléculas aromáticas, así como por su tolerancia a condiciones que resultan desafiantes para otros organismos. En particular, las bacterias del género *Bacillus* sobresalen por su habilidad para colonizar tejidos vegetales, degradar la pared celular de la planta y aprovechar los compuestos liberados para la producción de aromas característicos.

Un aspecto central que emerge de estos estudios es la importancia de identificar cepas microbianas con múltiples capacidades complementarias. Para

que un organismo sea realmente útil en la producción biotecnológica de aromas, no solo debe ser capaz de convertir el ácido ferúlico en vainillina o ácido vanílico, sino también de romper la pared celular vegetal para acceder a los sustratos y resistir las propiedades antimicrobianas de la propia vainillina. En este contexto, el desarrollo de métodos de *screening* o selección temprana de cepas resulta fundamental. Estas estrategias permiten evaluar de manera rápida y eficiente que microorganismos combinan la producción enzimática adecuada, la capacidad de bioconversión y la tolerancia a compuestos aromáticos, optimizando la búsqueda de candidatos con verdadero potencial biotecnológico.

Desde una perspectiva ambiental y económica, el aprovechamiento de residuos agroindustriales ricos en ácido ferúlico representa una oportunidad clara para fortalecer la sostenibilidad del proceso. El uso de subproductos vegetales no solo reduce costos, sino que también transforma desechos en materias primas valiosas, alineando la producción de aromas naturales con los principios de la economía circular.

Si bien la producción microbiana de vainillina y ácido vanílico aún no alcanza los volúmenes de la síntesis química tradicional, su valor radica en la posibilidad de obtener compuestos de origen natural, con menor impacto ambiental y mayor aceptación por parte de los consumidores. Las perspectivas futuras apuntan a la optimización de cepas, al diseño de procesos de fermentación más eficientes y al fortalecimiento de estrategias de selección microbiana, que permitan avanzar del laboratorio hacia aplicaciones industriales.

En conjunto, la biotecnología microbiana se perfila como una herramienta clave para el futuro de la industria de los aromas. Al integrar conocimientos sobre microbiología, química y sostenibilidad, se abre la puerta a nuevas formas de producir vainillina y ácido vanílico, demostrando que detrás del aroma dulce y familiar de la vainilla existe un sofisticado mundo microbiano con un enorme potencial por explotar.

#### AGRADECIMIENTOS

Al SECIHTI, por el otorgamiento de la beca de estancia postdoctoral (CVU: 406969). Asimismo, se

agradece a la ingeniera en mecatrónica Estrella Escobar Muciño por el diseño y la elaboración de las imágenes incluidas en este trabajo.

#### R E F E R E N C I A S

- Banerjee G and Chattopadhyay P (2019). Vanillin biotechnology: the perspectives and future. *Journal of The Science of Food and Agriculture* 99(2):499-506.
- Escobar-Muciño E, Arenas-Hernández MM and Luna-Guevara ML (2021). Screening of pectinolytic activity and bioconversion of ferulic acid to aromatic compounds from *B. cereus* IFVB and *B. subtilis* IFVB isolated mexican vanilla (*Vanilla planifolia* ex. Andrews) beans from the curing process. In *International Conference on Applied Science and Advanced Technology* (pp. 93-106). Cham: Springer International Publishing.
- Zamzuri NA, Abd-Aziz S, Rahim RA et al. (2014). A rapid colorimetric screening method for vanillic acid and vanillin-producing bacterial strains. *Journal of Applied Microbiology* 116(4):903-910.
- Escobar-Muciño E, Luna-Guevara ML, Ramos-Cassellis ME et al. (2020). Evaluation of process involved in the production of aromatic compounds in Gram-negative bacteria isolated from vanilla (*Vanilla planifolia* ex. Andrews) beans. *Journal of Applied Microbiology* 128(4):1086-1098.
- Ito N, Itakura M, Eda S et al. (2006). Global gene expression in *Bradyrhizobium japonicum* cultured with vanillin, vanillate, 4-hydroxybenzoate and protocatechuate. *Microbes and Environments* 21(4):240-250.
- Hariom, Shyamala BN, Prakash M and Bhat KK (2006). Vanilla flavor evaluation by sensory and electronic nose techniques. *Journal of Sensory Studies* 21(2):228-239.
- Gu F, Chen Y, Fang Y et al. (2015). Contribution of *Bacillus* isolates to the flavor profiles of vanilla beans assessed through aroma analysis and chemometrics. *Molecules* 20(10):18422-18436.
- Manyatsi TS, Lin YH and Jou YT (2024). The isolation and identification of *Bacillus velezensis* ZN-S10 from vanilla (*V. planifolia*), and the microbial distribution after the curing process. *Scientific Reports* 14(1):1-14.
- Dos Santos OAL, Goncalves TA, Sodre V et al. (2022). Recombinant expression, purification and characterization of an active bacterial feruloyl-CoA synthase with potential for application in vanillin production. *Protein Expression and Purification* 197:1-7.
- Luziatelli F, Brunetti L, Ficca AG and Ruzzi M (2019). Maximizing the efficiency of vanillin production by biocatalyst enhancement and process optimization. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 7:279.

**Esmeralda Escobar Muciño**  
**Instituto Potosino de Investigación Científica**  
**y Tecnológica A.C.**  
[eemmicrobio2025@gmail.com](mailto:eemmicrobio2025@gmail.com)

© Malú Méndez Lavielle. *Rostros.*

