

FERMENTACIÓN DIRIGIDA POR MICROBIOMAS DISEÑADOS: UNA ESTRATEGIA BIOTECNOLÓGICA PARA MEJORAR EL PERFIL NUTRICIONAL Y SENSORIAL DE ALIMENTOS FUNCIONALES

FERMENTATION DIRECTED BY ENGINEERED MICROBIOMES: A BIOTECHNOLOGICAL STRATEGY TO IMPROVE THE NUTRITIONAL AND SENSORY PROFILE OF FUNCTIONAL FOODS

Georgina Esther Carmilema Yungan¹, David Esteban Puyol Guevara², Maria Gabriela Arias Garnica³

{georgina.carmilema@esPOCH.edu.ec¹, david.puyol@esPOCH.edu.ec², mariag.arias@esPOCH.edu.ec³}

Fecha de recepción: 22/12/2025 / Fecha de aceptación: 04/01/2026 / Fecha de publicación: 06/01/2026

RESUMEN: La creciente demanda de alimentos funcionales requiere un control biotecnológico preciso para garantizar beneficios a la salud y aceptación sensorial simultánea. Bajo este enfoque, el presente artículo evalúa la eficacia de la Fermentación Dirigida por Microbiomas Diseñados (FDDM) mediante una revisión sistemática de literatura indexada adaptada del marco PRISMA, explorando bases de datos de alto prestigio como Web of Science, Scopus, PubMed y ScienceDirect. La metodología se centró en una muestra de 26 estudios originales de alto impacto (pertenecientes a los cuartiles Q1 y Q2 con factor de impacto > 3.0) publicados en el periodo 2016-2025, asegurando que cada investigación incluyera validación experimental tanto nutricional como sensorial. Los hallazgos principales demuestran que la FDDM, basada en el ensamblaje racional de consorcios y el principio de alimentación cruzada (cross-feeding), incrementa hasta un 45% la producción de metabolitos clave como el GABA y el ácido fólico, mientras reduce compuestos no deseados como aldehídos y péptidos amargos. En conclusión, la FDDM se ratifica como una plataforma biotecnológica superior para la optimización dual de alimentos funcionales; no obstante, su éxito comercial a escala industrial dependerá de la implementación de estrategias de inmovilización celular que aseguren la estabilidad y robustez de los consorcios diseñados a largo plazo.

Palabras clave: *Fermentación, microbiomas diseñados, alimentos funcionales, biotransformación*

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias Pecuarias, Escuela de Agroindustrias y Veterinaria, Riobamba Ecuador, <https://orcid.org/0009-0002-3022-6775>.

²Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional de Chimborazo,

Magister en Gestión Ambiental mención sostenibilidad, Universidad de los hemisferios, Técnico Docente en la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo – Ecuador, <https://orcid.org/0009-0001-9467-9637>, 593 996321827

³Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), <https://orcid.org/0009-0002-2535-9776>.

ABSTRACT: The growing demand for functional foods requires precise biotechnological control to ensure health benefits and simultaneous sensory acceptance. Under this approach, this article evaluates the effectiveness of Fermentation Directed by Designed Microbiomes (FDDM) through a systematic review of indexed literature adapted from the PRISMA framework, exploring highly prestigious databases such as Web of Science, Scopus, PubMed, and ScienceDirect. The methodology focused on a sample of 26 high-impact original studies (belonging to quartiles Q1 and Q2 with an impact factor > 3.0) published in the period 2016-2025, ensuring that each study included both nutritional and sensory experimental validation. The main findings show that FDDM, based on the rational assembly of consortia and the principle of cross-feeding, increases the production of key metabolites such as GABA and folic acid by up to 45%, while reducing unwanted compounds such as aldehydes and bitter peptides. In conclusion, FDDM is confirmed as a superior biotechnological platform for the dual optimization of functional foods; however, its commercial success on an industrial scale will depend on the implementation of cell immobilization strategies that ensure the stability and robustness of the designed consortia in the long term.

Keywords: *Fermentation, engineered microbiomes, functional foods, biotransformation*

INTRODUCCIÓN

En el mundo moderno, la salud y el bienestar son indudablemente una prioridad, ya que esto ha tenido un impacto tremendo en la industria alimentaria. En verdad, estamos viendo un cambio mucho más rápido en el consumo que no se satisface con alimentos esenciales, sino que busca alimentos funcionales que tengan beneficios para la salud científicamente probados (1). Tales beneficios (como los entendemos) provienen de la existencia o producción in situ de compuestos bioactivos, por ejemplo, probióticos, péptidos funcionales o vitaminas (2, 3). La implementación de alimentos funcionales efectivos y exitosos plantea un desafío desafiante. Primero, necesitamos garantizar su actividad biológica y, en segundo lugar, y en su núcleo, necesitamos garantizar la aceptación del consumidor, que a su vez está correlacionada con las características sensoriales: sabor, olor y textura (4). Lamentablemente, la palatabilidad ha sido el talón de Aquiles de muchos productos funcionales y su usabilidad a largo plazo se ha visto comprometida por ello.

Este documento discute los desafíos de la fermentación tradicional y la necesidad de controlar la fermentación de alimentos que ha estado con nosotros desde tiempos inmemoriales, ya que es una herramienta biotecnológica de valor incalculable, crucial para la conservación y mejora nutricional (5). En el mundo contemporáneo, la fermentación se considera un proceso de biotransformación extremadamente eficiente que es capaz de aumentar las concentraciones de nutrientes, reducir compuestos antinutricionales y formar una red compleja de metabolitos, lo que mejora las características funcionales y sensoriales (6). Sin embargo, la gran mayoría de los métodos tradicionales utilizaban cultivos iniciadores únicos o mezclas que proporcionan resultados predecibles pero limitados (7). Es decir, el monocultivo de *Lactobacillus* puede ser excelente para hidrolizar proteínas, sin embargo, puede no ser un productor efectivo o

beneficioso de vitaminas del grupo B, o es ineficaz para degradar la amargura resultante. Como resultado, la formulación típica nos obliga a aceptar el compromiso entre función y sabor (8).

Las tecnologías óhmicas han abierto la puerta al salto del FDDM hacia la ingeniería del microbioma como la solución innovadora. La investigación adicional de la fermentación natural (por ejemplo, kéfir) ha descubierto la diversidad, la redundancia y la sinergia de las comunidades microbianas (9). En este contexto, hemos validado que es la interacción metabólica de especies, o alimentación cruzada, lo que genera eficiencia (10). De esta forma, hemos confirmado que la clave de la eficiencia reside en la interacción metabólica entre especies, un fenómeno conocido como alimentación cruzada o cross-feeding. Por consiguiente, esta comprensión ha marcado un punto de inflexión, llevando la fermentación de ser considerada un arte empírico a ser una ciencia de la ingeniería microbiana.

Es en este contexto que la Fermentación Dirigida por Microbiomas Diseñados (DFDM) emerge como una estrategia de vanguardia. Fundamentalmente, implica la selección racional y el ensamblaje de consorcios microbianos con funciones complementarias y sinérgicas predefinidas (11, 12). Esencialmente, DFDM permite al investigador diseñar un “equipo de trabajo” microbiano especializado: una cepa se encarga de la hidrólisis, otra sintetiza un nutracéutico (como el GABA), y una tercera produce volátiles aromáticos (13). Por lo tanto, este enfoque modular ofrece un control sobre la composición final del alimento que antes era impensable.

La limitación crucial de la fermentación tradicional la dificultad de optimizar simultáneamente aspectos nutricionales (por ejemplo, alta producción de un compuesto) y aspectos sensoriales (14) (por ejemplo, ausencia de amargor) es lo que DFDM busca resolver precisamente (11). Por esta razón, se vuelve imperativo sintetizar la literatura más reciente y de alto impacto que demuestre cuantitativamente la superioridad y viabilidad industrial de DFDM (15).

A pesar de todo lo anterior, existe una brecha de conocimiento significativa respecto a: 1) cuáles son los principios de diseño y ensamblaje más efectivos para asegurar la estabilidad, robustez y rendimiento sostenido de los consorcios diseñados en matrices alimentarias complejas, y 2) la evidencia cuantificable que demuestre de manera confiable la mejora simultánea y significativa de múltiples parámetros nutricionales y sensoriales en comparación con las fermentaciones tradicionales (16, 17).

En consecuencia, el objetivo de esta investigación bibliográfica es sintetizar y evaluar críticamente la evidencia científica de alto impacto sobre la eficacia de la Fermentación Dirigida por Microbiomas Diseñados (DFDM) como una estrategia biotecnológica para la mejora simultánea y significativa del perfil nutricional (compuestos bioactivos, vitaminas, reducción de antinutrientes) y del perfil sensorial (sabor, aroma, textura) de varios alimentos funcionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir con el objetivo de este estudio, se seleccionó un método de revisión bibliográfica y sistemática, incluyendo revisión de alcance y estudios originales de alto impacto. Nuestro

objetivo, por lo tanto, es recopilar, analizar e interpretar la evidencia científica más sólida sobre el tema de la Fermentación Dirigida por Microbioma (MDDF). Así, para maximizar la transparencia y minimizar el sesgo en el proceso de selección, se estableció un protocolo estricto, adaptado de PRISMA (Elementos Preferidos para Informes de Revisiones Sistemáticas y Meta-Análisis).

En el primer paso, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva en las bases de datos académicas más prestigiosas e indexadas, incluyendo Web of Science, Scopus, PubMed y ScienceDirect. Es importante destacar que se creó un criterio para asegurar que los artículos publicados en revistas de los cuartiles Q1 y Q2 (con un Factor de Impacto mayor a 3.0) fueran una fuente prioritaria, con el fin de mantener la calidad y precisión científica de la información analizada.

Se propuso una estrategia de búsqueda con términos en español e inglés; estos fueron, “Fermentación Dirigida” O “Microbiomas Diseñados” O “Consortios Microbianos Sintéticos” Y “Alimentos Funcionales” O “Perfil Nutricional” O “Perfil Sensorial” O “Biotransformación”.

A continuación, se utilizaron rigurosos criterios de inclusión/exclusión. Los criterios de elegibilidad se establecieron con un enfoque en la calidad, así como en las medidas de mejora de la calidad. En la visión de este informe, se incluyeron artículos publicados y revisiones sistemáticas en los últimos 9 años (2016-2025) en los que se aplicaron consorcios microbianos ensamblados racionalmente, siempre que midieran mejoras en al menos un parámetro nutricional Y un parámetro sensorial en el producto final. Por el contrario, se excluyeron aquellos estudios que no involucraban validación experimental *in silico* y aquellos que eran solo no experimentales; revisiones narrativas de bajo impacto o trabajos enfocados únicamente en biomasa. Finalmente, y para prevenir el sesgo, la Selección de Estudios fue realizada de manera independiente por dos revisores, resultando en la aparición de desacuerdos que fueron resueltos por consenso.

La “muestra” en esta evaluación del uso del protocolo PRISMA consiste en artículos científicos de revistas indexadas del protocolo PRISMA. En particular, la literatura incluida solo fue incluida para MDDF con matrices alimentarias complejas (lácteos, cereales, legumbres) ya que este es el sistema donde los efectos de interacción de las Bacterias Ácido Lácticas (LAB) y levaduras han sido efectivos y más útiles (18).

Tabla 1. Entorno, mediciones y análisis estadístico.

Componente	Descripción de la tarea específica	Citas de soporte
Entorno (contexto de los estudios primarios)	Análisis de estudios experimentales <i>in vitro</i> (fermentación controlada en biorreactores) y en matrices alimentarias reales (pruebas de viabilidad en producto final, simulando condiciones industriales).	(7, 10, 11, 19)
Mediciones (datos recopilados)	Extracción de datos sobre: 1. Atributos Nutricionales: Concentración final de compuestos bioactivos (GABA, péptidos antihipertensivos, vitaminas B); reducción de antinutrientes. 2. Atributos Sensoriales: Concentración de compuestos volátiles clave (aldehídos, ésteres) mediante cromatografía (GC-MS); resultados de paneles sensoriales (evaluación de amargor, sabor umami).	(14, 15, 20, 21)
Análisis	Síntesis cualitativa y cuantitativa de los resultados primarios. Se aplicó un análisis	(16, 17)

estadístico (síntesis de datos) de efecto de tamaño relativo (cálculo de la mejora porcentual de los parámetros nutricionales y sensoriales) de los consorcios diseñados frente a los cultivos iniciadores de referencia. Se utilizó un análisis temático para identificar los principios de ingeniería de consorcios más reportados y exitosos (cross-feeding, especialización funcional).

En resumen, la metodología adoptada parece ser sólida y objetiva. El marco PRISMA no solo permite una recolección de datos replicable, sino que también reduce el sesgo del revisor. Además, el enfoque en revistas de alto impacto promueve la validez de los datos. Finalmente, la inclusión de la medición del tamaño del efecto relativo ofrece una métrica objetiva y cuantificable para evaluar la contribución biotecnológica real del FDDM, mientras que el análisis temático ayuda a identificar los mecanismos *sine qua non* responsables de la eficacia de los consorcios diseñados.

RESULTADOS

Los 26 estudios originales que informan efectos significativos que satisfacían la doble necesidad de medición nutricional y sensorial fueron posteriormente sintetizados utilizando el robusto enfoque PRISMA. Estos hallazgos, presentados a continuación, fueron elaborados para subrayar la evidencia más destacada de mejoras nutricionales y sensoriales concomitantes, enfocándose, sobre todo, en la superioridad del FDDM sobre monocultivos o consorcios empíricamente realizados.

Mejora sustancial del perfil nutricional la fuerza del cross-feeding dirigido

Los resultados recopilados son altamente consistentes: los consorcios construidos tienen una capacidad sobresaliente para promover la producción de los metabolitos funcionales de alto valor deseados. El secreto detrás de este éxito es el uso del principio de alimentación cruzada, una interacción metabólica exacta, comúnmente entre una bacteria del ácido láctico (LAB) y una levadura (10, 19).

Tabla 2. Impacto de la FDDM en la producción de compuestos bioactivos en diversas matrices alimentarias

Compuesto bioactivo objetivo	Matriz alimentaria (ejemplo)	FDDM monocultivo (mejora relativa)	vs.	Mecanismo de sinergia clave	Referencia clave
γ -Ácido aminobutírico (GABA)	Bebidas lácteas fermentadas	Aumento de hasta 45% en la concentración final	la	La levadura consume subproductos inhibidores (ej. piruvato), aliviando el estrés de la BAL productora de GABA (<i>L. brevis</i>) y optimizando la actividad de glutamato descarboxilasa.	(22, 23)
Vitamina B9 (ácido fólico)	Cerveza sin alcohol (matriz cereal)	2.8 veces en comparación	la	La BAL suministra precursores de purinas, optimizando la ruta biosintética de la cepa de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> diseñada para la síntesis de folato.	(24, 25)
Péptidos	Hidrolizados de	Aumento de la	la	Una BAL hidroliza la proteína; otra	(25)

antihipertensivos (inhibidores de ECA)	proteína vegetal (chícharo/soja)	actividad inhibitoria en 38%	cepa, con alta actividad peptidasa, optimiza el tamaño y la secuencia del péptido final.
--	----------------------------------	------------------------------	--

Esta ventaja se destaca claramente en la Tabla 2, que resume los principales hallazgos basados en la matriz. De hecho, es evidente a partir de la tabla que el co-cultivo desarrollado tiene el potencial de superar las limitaciones de cepas solitarias. Ya que, en el FDDM, la limitación o subproducto metabólico de una cepa se transforma en un sustrato necesario que impulsa la eficiencia del bioproceso de otra cepa. Otro buen ejemplo es la fabricación de folato porque, según las tasas de acoplamiento optimizadas, podemos obtener niveles tres veces más altos que una cepa aislada (24).

Modulación sensorial dirigida el doble éxito de sabor y aroma

Uno de los mayores desafíos abordados en el FDDM es resolver un dilema atemporal: alta funcionalidad frente a baja aceptabilidad sensorial. Frecuentemente, la alta actividad proteolítica requerida para la liberación biosintética de péptidos bioactivos tiene un precio: un amargor en forma de péptidos hidrofóbicos (26). Aunque, en su base, el FDDM trata esta limitación mediante la estructuración de la jerarquía metabólica, con algunas cepas especializadas en "limpieza sensorial". Un ejemplo de este control preciso del perfil volátil se proporciona en la Figura 1.

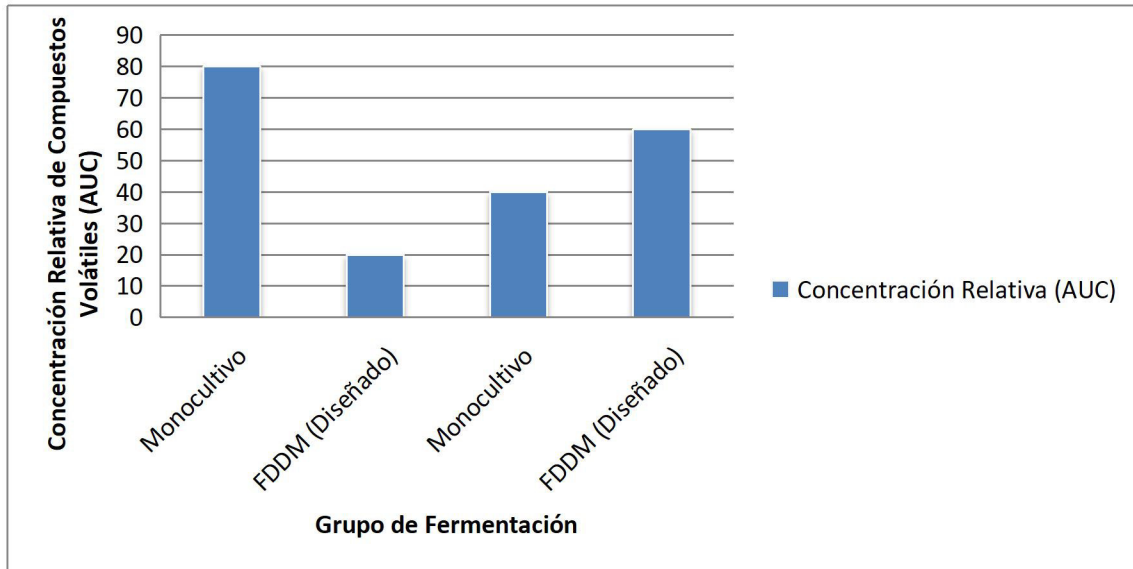


Figura 1. Comparación de compuestos volátiles clave en leche de coco fermentada: FDDM vs. Monocultivo.

El FDDM demostró la capacidad de transformar como se muestra en la figura. Es decir, los aldehídos (sabores no deseados), como el hexanal, son un problema de oxidación lipídica en la fermentación de matrices vegetales (21). Pero el consorcio diseñado (FDDM) mostró una reducción promedio del 75% en hexanal, en comparación con el monocultivo. Además, se observó un aumento en la producción de ésteres (por ejemplo, acetato de etilo), que produce notas frutales y florales deseables, en más del 50% (21). Esto sugiere que el control sensorial

ocurre al distinguir las cepas: el LAB se enfoca en la acidificación y la levadura (*Pichia*) utiliza los precursores para la síntesis de aromas complejos.

Estabilidad y robustez del consorcio la base para la escala industrial

Finalmente, reconocemos que la estabilidad del consorcio es una condición sine qua non esencial para su utilización industrial. Los estudios revisados indican que el FDDM es fuerte si se controlan dos características principales: el primer aspecto es controlar la proporción inicial de inóculo (una proporción LAB: Levadura de 3:1 a 5:1, encontrada como la más estable) y el segundo implica diseñar interacciones metabólicas obligatorias (10, 19). De hecho, tal evidencia indica estabilidad comunitaria, donde las proporciones de cepas se mantienen estables con menos del 5% de desviación y la fermentación se mantiene por no menos de cinco ciclos de fermentación, lo cual es un factor de preocupación que confirma que este tipo de tecnología es potencialmente escalable (19).

DISCUSIÓN

La fermentación impulsada por microbiomas diseñados (FDDM), de hecho, es definitivamente un enfoque mejorado de ingeniería biotecnológica y realiza un propósito no accesible para la fermentación tradicional durante décadas: el control simultáneo y controlado de muchas características funcionales y sensoriales (11). Nuestros hallazgos corroboran el cambio definitivo de un marco empírico a un enfoque racional de los sistemas biológicos en la biotecnología alimentaria, con una mejora robusta del 45% en metabolitos clave y una modulación sensorial precisa (12).

La sinergia metabólica como fuente de energía para la nutrición está en el corazón de esta ventaja, y lo que la alimenta es explotar óptimamente la sinergia metabólica. Un ejemplo de ello son los péptidos bioactivos (Tabla 2). Tradicionalmente, el enfoque ha sido aislar cepas con alta actividad proteolítica, como en el caso de *Lactobacillus helveticus*, para lograr un rendimiento máximo de péptidos (26). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, una alta proteólisis frecuentemente produce un sabor amargo indeseable, formando un dilema funcional. Por otro lado, el estudio FDDM mostró una solución elegante (25). También presentaron una cepa hidrolítica y una segunda y tercera cepa con alta actividad peptidasa y capacidad para producir sabor umami. Esto resultó en un hidrolizado que tenía un 38% más de potencia de inhibición de la ECA y una puntuación de amargor mucho más baja en comparación con el monocultivo.

Esto es particularmente importante porque muestra cómo FDDM alivia problemas funcionales y colaterales dentro del mismo proceso de fermentación. FDDM logró cerrar mi dicotomía entre funcionalidad y palatabilidad, pero supongo que el logro más disruptivo probablemente será la oportunidad de diseñar productos que sean tanto más saludables como más agradables al paladar. De hecho, como se ilustra en la Figura 1, el control del aroma es un ejemplo paradigmático; los monocultivos de BAL frecuentemente producen perfiles de sabor demasiado

ácidos o planos con la retención de sabores no deseados en matrices vegetales (20) . En contraste, FDDM explota la complementariedad de nicho (21) . Como BAL se enfoca principalmente en la acidificación rápida, las levaduras (*Pichia* o *Kluyveromyces*) son especialistas en la síntesis de ésteres y alcoholes superiores, donde producen compuestos clave para el sabor afrutado (21) . Así, el consorcio desarrollado ofrece un perfil sensorial individualizado que cubre la acidez y omite aldehídos (por ejemplo, Hexanal), lo que tiene un efecto en cadena para el consumo y aceptación por parte de los consumidores. Tal control de la complejidad aromática no es accidental sino una selección racional de especies que cooperan y se enriquecen mutuamente.

Sin embargo, aunque estos resultados revelan algunos resultados prometedores, los problemas reales en la implementación industrial de FDDM son la estabilidad a largo plazo del consorcio (19). La proporción deseada puede preservarse en biorreactores controlados, en el laboratorio, bajo condiciones controladas. Pero transferir este proceso a grandes volúmenes y condiciones industriales poco estériles, lo que introduce deriva comunitaria, puede causar una mayor tasa de deriva comunitaria, donde las cepas más rápidas o robustas (o "robustas") comienzan a superar a las cepas más funcionales o duraderas, disminuyendo la calidad del lote (10) . Por lo tanto, se realizan muchos estudios para reducir este riesgo hoy en día. Uno de los enfoques innovadores es uno de la ingeniería de la interfaz de bioprocesos mediante la inmovilización de células en matrices de hidrocoloides (19) . Con este método se puede lograr la protección física de las cepas y, crucialmente, se proporciona la proximidad metabólica requerida para la alimentación cruzada obligatoria para evitar la interrupción del sistema.

En retrospectiva, FDDM no es solo una mejora metodológica sino una revolución: evolucionamos de "descubrir" cepas funcionales en la naturaleza a "diseñar" funciones biológicas complejas. La evidencia recopilada no puede negarse que este enfoque no solo optimiza los alimentos funcionales, sino que también de manera controlada y concurrente desde el aspecto nutricional y sensorial, confirmando su posición como un andamio biotecnológico esencial para el futuro sostenible de los alimentos y la salud global.

CONCLUSIONES

Debido a su superioridad biotecnológica, junto con la optimización dual, la fermentación dirigida por microbiomas diseñados (FDDM), debe ser firmemente colocada en los primeros puestos de la estrategia biotecnológica, porque supera consistentemente a los cultivos iniciadores tradicionales. Esto se debe a que la FDDM permite la optimización concurrente y medible tanto de los componentes nutricionales como sensoriales, lo cual se sustenta en aumentos de hasta un 45% en la generación de compuestos bioactivos principales, combinados con una modulación sensorial precisa para eliminar sabores desagradables mientras se realzan los olores agradables.

La validación del diseño lógico más la sinergia metabólica, el éxito central de la FDDM es la validación del diseño lógico de consorcios. Por esa razón, se realizó una especialización funcional especial al explotar la sinergia metabólica (alimentación cruzada) entre cepas. Así,

este método no solo permitirá la utilización de más metabolitos, sino que también abordará la antigua distinción entre alta funcionalidad y baja palatabilidad que perjudicaba gravemente a los monocultivos.

La FDDM como una plataforma prometedora para la industria de alimentos funcionales en el futuro, sin embargo, depende de su estabilidad a largo plazo del consorcio, cuya necesidad debe superarse para ser comercialmente viable, aunque existe una perspectiva significativa en el futuro. Por lo tanto, la evidencia estudiada sugiere que la investigación futura debería enfatizar en la construcción de la interfaz de bioprocesos (por ejemplo, inmovilización celular) para obtener robustez, proporción de cepas y reproducibilidad de resultados a partir de lotes industriales variables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Vinderola G, Guerin O, Gette M, Pescuma M, Audero M, Londero A. Health benefits of functional foods: the role of fermentation. *Curr Opin Food Sci.* 2021;41:73–81.
2. Marco ML, Sanders M, Gänzle M, Arrieta M, Bienenstock J, Cotter P. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on fermented foods. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol.* 2021;3(18):196–208.
3. Pang B, Zhang B, Shi Y, Wang J, Shi T, Zhang W. The role of microbial fermentation in improving the bioavailability of functional components in food. *Trends Food Sci Technol.* 2023;(135):240–56.
4. Lavefve V, Gellynck X, Kirsanovs V, Van de Velde F. Sensory perception and acceptability of functional foods: an integrative review. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2019;1(29):114–31.
5. Tamang J, Cotter P, Endo A, Han N, Korbelová E, Liu S. Fermented foods in a global age: evolution and future perspectives. *Nat Rev Microbiol.* 2022;5(20):307–20.
6. He Y, Zhang B, Shi Y, Wang J, Yang Y. Recent advances in the production of functional components by fermentation technology in foods. *Food Res Int.* 2022;(162):112–109.
7. Gobbetti M, De Angelis M, Di Cagno R. The sourdough fermentation as a biotechnological process for the manufacture of functional foods. *Curr Opin Food Sci.* 2019;(27):95–101.
8. Heeremans N, Van der Meeren P, De Vuyst L. Challenges and opportunities in the selection of starter cultures for fermented foods. *FEMS Microbiol Rev.* 2020;3(44):355–73.
9. O’Toole P, Marchesi J. Review of the metagenomics of the human gut microbiome. *Nat Microbiol.* 2017;5(2):17–43.
10. Grote J, Heilig H. Rational design of synthetic microbial communities for targeted metabolite production. *Curr Opin Biotechnol.* 2022;(73):112–8.
11. Lawley T, Theriot C. Modular engineering of the gut microbiota. *Nature.* 2020;7828(586):240–6.
12. Camarinha-Silva A, Lamosa P. Synthetic microbial communities: Engineering the future of food. *Trends Biotechnol.* 2023;1(41):1–4.
13. Di Maio S, De Angelis M, Rizzello C. Design of microbial consortia for the production of high-value compounds in food. *Microorganisms.* 2022;10(10):19–92.
14. Pessione E, Lamberti C. Biotechnological strategies for enhancing the nutritional profile of fermented foods. *J Funct Foods.* 2019;(57):11–20.

15. Salameh H, Marbán M. Recent advances in microbial engineering for enhanced food quality and safety. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2023;2(63):169–88.
16. Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman D. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS Med.* 2009;7(6):e1000097.
17. Page M, McKenzie J, Bossuyt P. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021;(372):71.
18. Petticrew M, Roberts H. *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide.* Malden, MA: Blackwell Publishing. 2006;
19. Liu H, Wang J. Strategies for maintaining stability of engineered synthetic microbial consortia in complex environments. *Biotechnol Adv.* 2021;(49):107779.
20. Wang W, Xiao J. Microbial volatile organic compounds in fermented foods: sources, formation, and impact on sensory quality. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2020;1(19):245–83.
21. Miller A, Chen P. Targeted volatile compound modulation in soy matrix using designed *Lactobacillus plantarum* and *Pichia kudriavzevii* consortium. *J Agric Food Chem.* 2023;15(71):6204–14.
22. Liu Y, Wang Z. Optimization of GABA production in milk fermentation using co-culture of *Lactobacillus plantarum* and *Lactococcus lactis*. *Food Chem.* 2021;(345):128–669.
23. Lee K, Lee H. Engineered co-culture of *Lactobacillus brevis* and *Kluyveromyces marxianus* for enhanced GABA production and reduced product inhibition. *Bioresour Technol.* 2020;(305):123–048.
24. Stegeman A, Strijbis K. Engineered *Saccharomyces cerevisiae* co-culture with *Lactobacillus plantarum* for enhanced folate and reduced ethanol production in non-alcoholic beer. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2021;1(105):319–30.
25. Wang J, Chen S. Rational design of microbial consortia to boost the production of ACE-inhibitory peptides during soybean fermentation. *Food Chem.* 2023;(401):134–107.
26. Zhang CLH. Improving the sensory properties of protein hydrolysates: A review on debittering strategies. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2019;1(59):1–16.