

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Aumento de la producción de ácido linoleico y oleico en el micelio del hongo comestible *Lentinula edodes* producido por fermentación sumergida

Increased linoleic and oleic acid production in the mycelium of the edible mushroom *Lentinula edodes* produced by submerged fermentation

Authors/Autores: Mendoza-López, M.R., Navarro-Ramírez C., Ramírez, K., Landa-Cadena, M.G., Couttolenc, A., Espinoza, C.

ID: e1980

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e1980>

Received/Fecha de recepción: June 02th 2025

Accepted /Fecha de aceptación: October 29th 2025

Available online/Fecha de publicación: November 14th 2025

Please cite this article as/Como citar este artículo: Mendoza-López, M.R., Navarro-Ramírez C., Ramírez, K., Landa-Cadena, M.G., Couttolenc, A., Espinoza, C. (2025). Increased linoleic and oleic acid production in the mycelium of the edible mushroom *Lentinula edodes* produced by submerged fermentation. *Revista Bio Ciencias*, 13, e1980. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e1980>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo original

Aumento de la producción de ácido linoleico y oleico en el micelio del hongo comestible *Lentinula edodes* producido por fermentación sumergida

Increased linoleic and oleic acid production in the mycelium of the edible mushroom *Lentinula edodes* produced by submerged fermentation

Aumento de ácidos-grasos saludables/

Increase in healthy fatty-acids

Mendoza López, M.R.¹ (ORCID), Navarro Ramírez C.^{2,3} (ORCID), Ramírez, K.² (ORCID), Landa Cadena, M.G.³ (ORCID), Couttolenc, A.⁴ (ORCID), Espinoza, C.^{3*} (ORCID)

¹Adscripción: Instituto de Química Aplicada, Universidad Veracruzana, Dr. Luis Castelazo Ayala s/n, Industrial Ánimas, C.P. 91193, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

²Adscripción: Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Maestría en Ciencias Alimentarias, Universidad Veracruzana, Dr. Luis Castelazo Ayala s/n, Industrial Ánimas, C.P. 91193, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

³Adscripción: Centro de Investigación en Micología Aplicada, Universidad Veracruzana, Médicos 5, Unidad del Bosque, C.P. 91010, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

⁴Adscripción: Facultad de Química Farmacéutica Biológica, Universidad Veracruzana, Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, C.P. 91090, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

*Autor de correspondencia:

César Espinoza. Centro de Investigación en Micología Aplicada, Universidad Veracruzana, Médicos 5, Unidad del Bosque, C.P. 91010, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México. Teléfono +52 1 (228) 840 4255. E-mail: cespinoza@uv.mx

RESUMEN

Los hongos comestibles contienen ácido linoleico, α -linolénico y oleico (ω -6, ω -3, ω -9), ácidos grasos esenciales para el metabolismo humano. Consumirlos en proporciones equilibradas (1:1 o 2:1; ω -6/ ω -3) ayuda a prevenir obesidad, mientras que una proporción desequilibrada promueve adipogénesis. Tradicionalmente se extraen de cuerpos fructíferos, que pueden tardar entre 60-90 días en desarrollarse. En este sentido, se evaluó el efecto del medio de cultivo sobre la cinética de producción de micelio, cuerpos fructíferos de *Lentinula edodes* (shiitake), así como la caracterización de ácidos grasos y su comparación con shiitake comercial. La mayor cantidad de micelio se obtuvo a partir del medio de cultivo salvado de trigo (WB) durante 15 días de incubación mediante fermentación sumergida (SmF). Asimismo, entre los micelios cultivados, el WB presentó un mayor porcentaje de ácido linoleico (ω -6); y el contenido de ácido oleico (ω -9) supera 7 veces el del shiitake comercial, beneficiando la proporción de ácidos grasos insaturados/saturados (MUFA-PUFA/SFA). Además, esta proporción fue mayor en los cuerpos fructíferos obtenidos a partir del medio PD, seguido del WB, en comparación con el shiitake comercial. De esta forma, SmF disminuye el tiempo de producción del micelio y aumenta la producción de ácidos grasos de shiitake, preservando sus componentes nutraceuticos. Estos micelios también son ricos en nutrientes y componentes bioactivos que se utilizan como suplementos dietéticos o productos para el cuidado de la salud en la

industria alimentaria. Sin embargo, se requieren estudios toxicológicos del micelio de *L. edodes* para que se considere un alimento funcional seguro.

PALABRAS CLAVE:

Micelio, fermentación sumergida, shiitake, cuerpos fructíferos, ácidos grasos omega

Introducción

Lentinula edodes (Berk.), mejor conocido como “shiitake”, es un hongo comestible considerado en la cultura asiática como un hongo medicinal debido a las propiedades nutraceuticas que se le han atribuido; entre las principales bioactividades reportadas para *L. edodes* se encuentran efectos anticancerígenos, hipoglucemiantes, antiinflamatorios, antitumorales, antibacterianos, antioxidantes, inmunomoduladores, renoprotectores y reducción en la incidencia de hipercolesterolemia. (Ahmad *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2022; El-Ramady *et al.*, 2022; Lysakowska *et al.*, 2023). Estos efectos de *L. edodes* se relacionan con su contenido de diversos compuestos bioactivos, como carbohidratos (58-60 %), proteínas (20-23 %), fibra (9-10 %), lípidos (3-4 %), vitaminas, folatos, niacina y minerales (Sheng *et al.*, 2021). Entre los lípidos que contienen estos hongos se encuentran los ácidos grasos saturados (SFA) y monoinsaturados-poliinsaturados (MUFA-PUFA), que constituyen la principal reserva energética del organismo y desempeñan importantes funciones fisiológicas, inmunológicas y estructurales (García *et al.*, 2023; Kapoor *et al.*, 2021; Radzikowska *et al.*, 2019).

Aunque la concentración de ácidos grasos en los hongos suele ser baja en comparación con otros alimentos, contienen ácidos grasos que el cuerpo humano no produce, como el ácido linoleico y el α -linolénico, esenciales para el metabolismo humano y que, debido a sus características estructurales, se clasifican como ácidos grasos omega 6 y 3 (ω -6 y ω -3), respectivamente. El consumo de estos ácidos grasos esenciales en proporciones equilibradas (1:1 o 2:1 ω -6/ ω -3) puede ayudar a prevenir la obesidad, mientras que una proporción desequilibrada ω -6/ ω -3 se ha asociado con la adipogénesis. También participan en la formación de lipoproteínas de alta densidad, lo que reduce el riesgo de enfermedades cardiovasculares (Alagawany *et al.*, 2019; Martínez-Ramírez *et al.*, 2023; Saini *et al.*, 2021). Otros ácidos grasos ω -3, como el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA), contribuyen a mejorar la salud; en particular, suelen ser eficaces en la prevención de enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas, cáncer, enfermedad inflamatoria intestinal y artritis reumatoide, entre otras (Zhang *et al.*, 2021).

En cuanto a los compuestos bioactivos de los hongos comestibles, entre el 80-85 % se extrae de cuerpos fructíferos producidos en bloques de sustratos de madera; este proceso puede tardar entre 60-90 días. Esto ha requerido métodos alternativos para reducir los tiempos de producción, como la fermentación sumergida (SmF) (Bakratsas *et al.*, 2021; Yan *et al.*, 2023). Este sistema de fermentación es una alternativa para obtener micelio que produce compuestos bioactivos. Presenta ventajas como mantener una distribución uniforme del sustrato, reducir los problemas de contaminación y acortar el tiempo de incubación. Es un método más preciso y rápido que el cultivo de cuerpos fructíferos. Además, se ha demostrado que algunos hongos basidiomicetos pueden crecer en SmF y producir compuestos bioactivos beneficiosos en los campos de la nutrición, la medicina y la industria farmacéutica (Dudekula *et al.*, 2020). Estos micelios también son ricos en nutrientes y componentes bioactivos que se utilizan como suplementos dietéticos o productos para el cuidado de la salud en la industria alimentaria (Xv *et al.*, 2024).

La composición de los medios de cultivo incluye fuentes de carbono como la glucosa y la sacarosa, hasta medios más complejos (licor de maíz, melaza, almidones, caldo de dextrosa de patata, residuos agrícolas y líquido estéril), y las fuentes de nitrógeno más utilizadas son la peptona y el extracto de levadura. De esta manera, se ha reportado que la proporción y el tipo de fuentes de carbono y nitrógeno (rC/N) influyen en el rendimiento, la morfología, la producción de exopolisacáridos, el contenido proteico y la bioactividad del micelio de *L. edodes* producido por SmF (Bakratsas *et al.*, 2021; Colla *et al.*, 2023; Krupodorova *et al.*, 2021). En cuanto a la composición lipídica, en el cuerpo fructífero de *L. edodes* se observaron altos niveles de ácidos grasos C16:0 y C16:1, un alto contenido de monoglicéridos y ácidos grasos libres, y un bajo nivel de triglicéridos y fosfolípidos (fosfatidiletanolamina y cardiolipina). Asimismo, el micelio de *L. edodes* producido en SmF presentó triglicéridos y ácidos grasos libres como sus principales lípidos neutros, fosfatidilcolina y cardiolipina como fosfolípidos (Yu *et al.*, 2023).

Por lo anterior, evaluamos el efecto del medio de cultivo sobre la producción de micelio y cuerpos fructíferos de *L. edodes* en tres medios de cultivo diferentes. Además, se caracterizó el perfil de ácidos grasos tanto del micelio obtenido por SmF como de los cuerpos fructíferos obtenidos del cultivo en bloques de sustrato de madera.

Material y Métodos

Aislamiento de la cepa

El micelio utilizado en este estudio fue aislado de cuerpos fructíferos de shiitake (Monte blanco) obtenidos en un supermercado. El cultivo micelial se obtuvo mediante cortes de aproximadamente 0.5 cm de ancho en las partes interna y externa del himenio, los cuales se lavaron con agua potable y se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 4 % durante un minuto. Posteriormente, se realizaron dos lavados con agua destilada estéril, de los cuales se colocaron tres fragmentos de 0.5 cm en placas Petri de 5 cm de diámetro con agar papa dextrosa (PDA) y se incubaron durante 21 días a una temperatura de 25 ± 2 °C.

Medios de cultivo

Se utilizaron tres medios de cultivo diferentes para la producción de biomasa mediante SmF. Los medios de cultivo estudiados fueron: dextrosa de papa (PD), salvado de trigo (WB) y compost (CM). La cantidad de carbono soluble se determinó mediante el método de fenol-ácido sulfúrico total y el nitrógeno total mediante el método Kjeldahl.

Fermentación sumergida (SmF)

Antes de realizar la SmF, se preparó un pre-inóculo colocando pequeños círculos de PDA con micelio de *L. edodes* en matraces Erlenmeyer de 250 mL que contenían 50 mL de caldo de papa dextrosa. Los matraces se incubaron durante 21 días a 25 ± 2 °C con agitación constante a 120 rpm y en ausencia de luz. Posteriormente, se inocularon matraces Erlenmeyer de 500 mL conteniendo 100 mL de medio PD, WB y CM con 1 mL de una suspensión de micelio del pre-inóculo.

El período de incubación fue de 25 ± 2 °C con agitación a 100 rpm en condiciones de oscuridad. La producción de biomasa se evaluó cada tres días, separándola del caldo de cultivo mediante filtración al vacío y deshidratándola a 60 °C para determinar su peso seco. Los datos obtenidos de producción de biomasa fueron ajustados bajo el modelo logístico,

en el cual se obtuvo la velocidad de crecimiento, la tasa máxima de producción de biomasa y el factor de correlación de cada tratamiento.

Fermentación en estado solido (SSF)

Para comparar micelio y cuerpos fructíferos utilizando los medios de cultivo descritos en SmF, se realizaron cultivos sólidos tradicionales enriquecidos con estos mismos medios de cultivo. Obtención del preinóculo: El grano (mijo) se lavó e hidrató por 12 h con agua destilada en bandejas de plástico, transcurrido el tiempo se retiró el exceso de agua destilada y se mezcló con carbonato de calcio y sulfato de calcio (3.5 g/kg de grano, cada uno). Posteriormente, se prepararon bolsas de polipapel con 200 g de mijo y se esterilizaron a 121 °C durante 1 h. Posteriormente, cada bolsa se inoculó con 20 fragmentos de 1 cm² de micelio de *L. edodes* desarrollado en PDA y se incubó durante 30 días a 25 ± 2 °C en ausencia de luz.

Cultivo en bloques: Se utilizaron 3 bolsas de polipapel por tratamiento con 300 g de encino, las cuales se hidrataron durante 24 h con cada uno de los medios de cultivo evaluados. Posteriormente, se esterilizaron a 121 °C durante 1 h y cada bolsa fue inoculada con 30 g de mijo previamente invadido con micelio de *L. edodes*, enseguida se incubó en cámaras de cultivo durante 60-90 días a una temperatura de 30 ± 2 °C, con una humedad relativa de 60-80 % y en condiciones de oscuridad.

Extracción de grasa total

A partir de 5 g de micelio producido por cada uno de los medios de cultivo utilizados en la SmF, 5 g de cuerpos fructíferos obtenidos en cada bloque del cultivo SSF y 5 g de hongo shiitake comercial, se liofilizó y extrajo con hexano (EMSURE® ACS, Reag. Ph Eur) el contenido total de grasa utilizando un sistema Soxhlet durante 24 h. Posteriormente, se evaporó el exceso de disolvente para obtener un residuo de consistencia oleosa. Este se transfirió a un vial ámbar con tapa hermética y se conservó en refrigeración (-4 °C) hasta su posterior análisis.

Caracterización cromatográfica de ácidos grasos

Una vez obtenidos los extractos hexánicos de los micelios obtenidos por SF, carpóforos SSF y del carpóforo comercial, se procedió a analizar el contenido de ácidos grasos utilizando un equipo de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Para ello, se prepararon los ésteres metílicos mediante la técnica propuesta por Egan *et al.* (1981), utilizando BF₃ en metanol al 14 %. Se realizó la extracción de los ésteres metílicos utilizando 1.0 mL de hexano grado HPLC, el extracto hexánico fue secado con sulfato de sodio anhidro (Na₂SO₄) y filtrado para su posterior inyección. Para el análisis se utilizó un cromatógrafo de gases marca Agilent Technologies, modelo 6890N (Net Work GC system), equipado con una columna DB-5, 5 %-fenil-metilpolisiloxano (Agilent Technologies) de 60 m de longitud, 0.25 mm de diámetro interno y 0.25 µm de espesor de película. La temperatura de inicio fue 150 °C, la cual se mantuvo durante 5 min, posteriormente la temperatura se elevó hasta 210 °C usando una rampa de calentamiento de 30 °C/min. De 210 °C pasó a 213 °C a una velocidad de 1 °C/min; finalmente, de esta temperatura pasó a 225 °C a una velocidad de 20 °C /min, durante 40 min haciendo un total de 50.6 min por corrida para cada muestra. Se utilizó helio como gas acarreador a un flujo de 1 mL/min, la temperatura del inyector fué de 250 °C, inyección split, con una relación de split de 50:1.

Una vez obtenido el cromatograma, la identificación de cada uno de los picos se llevó a cabo mediante espectrometría de masas empleando un espectrómetro de masas marca Agilent Technologies modelo 5975 inert XL. Los espectros de masas se obtuvieron mediante ionización por impacto electrónico a 70 eV, para la identificación se compararon los espectros de masas obtenidos para cada compuesto, con una base de datos (HP Chemstation-NIST 05 Mass Spectral search program, versión 2.0d), además de la comparación con un estándar (FAME mix, C8:C22, No. de catálogo 18920-1AMP, Sigma-Aldrich) analizado bajo las mismas condiciones.

Análisis estadístico

La producción de biomasa se modeló con el software SigmaPlot y los resultados se ajustaron mediante el modelo logístico. El contenido de ácidos grasos se analizó con el software estadístico Minitab® 19 utilizando ANOVA. Las diferencias entre medias se compararon mediante la prueba post hoc de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$.

Resultados y discusión

Medios de cultivo

Los contenidos de C y N de los medios de cultivo analizados se obtuvieron mediante el método de azúcares totales, utilizando los métodos de fenol-ácido sulfúrico y Kjeldahl, y se calcularon las relaciones C/N de cada medio de cultivo.

La cantidad total de C fue de 22.9, 29.2 y 36.3 g/L, y la de N total fue de 4.6, 49.0 y 72.0 g/L para los medios de cultivo PD, WB y CM, respectivamente. En este sentido, la relación C/N obtenida de cada medio de cultivo fue de 4.98, 0.6 y 0.5, respectivamente.

Producción de biomasa de *L. edodes* mediante fermentación sumergida.

La Figura 1 muestra la producción de biomasa durante el tiempo de incubación y su ajuste al modelo logístico de los medios de cultivo PD, WB y CM utilizando SmF. Así, para PD, se observó una producción máxima de biomasa ($X_{max} = 2.2$ g/L) a los 30 días de incubación, observándose que la fase exponencial de crecimiento no cesó. Por otro lado, para CM, se observó la máxima producción de biomasa ($X_{max}=2.6$ g/L), y la fase estacionaria se alcanzó después de 12 días de incubación. Asimismo, la mayor producción de biomasa se observó en el medio de cultivo WB ($X_{máx} = 9.8$ g/L) en comparación con los otros dos medios de cultivo utilizados, alcanzando la fase estacionaria a los 15 días de incubación.

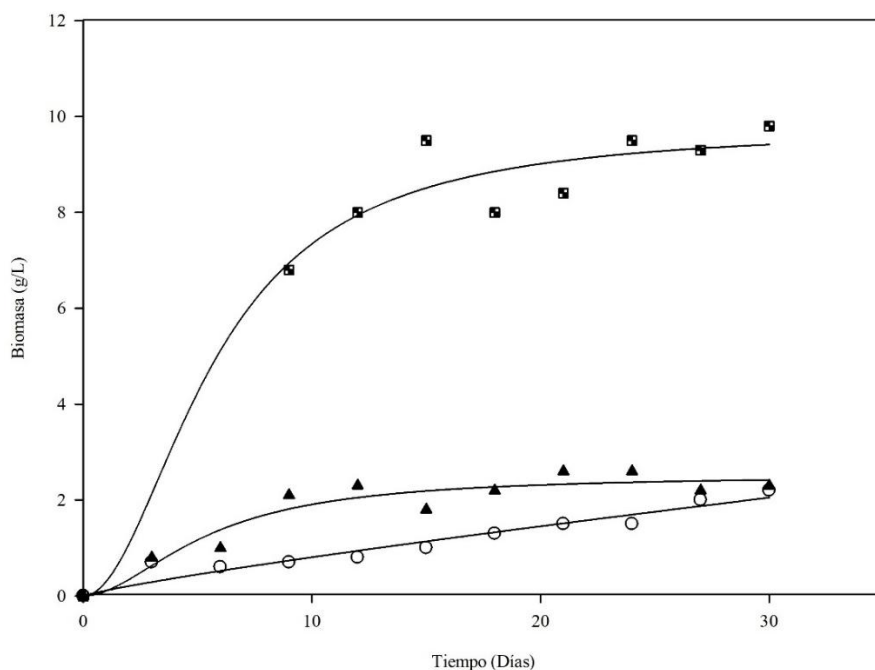


Figura 1. Cinética de crecimiento de *L. edodes* utilizando SmF con diferentes medios de cultivo: ○ Papa Dextrosa, ▲ Compost y ■ Salvado de Trigo. La línea continua es el ajuste logístico.

A partir del modelo logístico se obtuvieron diferentes valores de tasa de crecimiento específico (μ) y coeficiente de correlación (R^2) para cada uno de los medios evaluados, donde se observó que el medio de cultivo WB presentó la mayor tasa de crecimiento específico, $\mu = 0,8 \text{ día}^{-1}$ y $R^2 = 0,9$, seguido del medio de cultivo CM ($\mu = 0,4 \text{ día}^{-1}$ y $R^2 = 0,9$) y PD ($\mu = 0,1 \text{ día}^{-1}$ y $R^2 = 0,9$). Los datos obtenidos para los medios de cultivo PD y CM fueron similares a los reportados en otros estudios (Adil *et al.*, 2020), donde mostraron una producción de biomasa de 3 g/L para el medio control, por otro lado, el medio WB presentó una mayor producción de biomasa en comparación a lo reportado, donde la máxima producción de biomasa reportada corresponde a 8.6 g/L para un medio sintético suplementado con Ca^{+2} . Con base en los resultados anteriores, podemos observar que la proporción de C/N = 0.6 del medio de cultivo WB alcanzó su (X_{max}) aproximadamente después de 15 días de incubación, por lo tanto, estas condiciones se consideran adecuadas para escalar la producción del hongo comestible *L. edodes*, lo cual coincide con lo reportado en otros estudios, en donde se reporta que una cantidad ideal de nitrógeno influye directamente en la producción de micelio, ya que si se utiliza mayor cantidad de nitrógeno que de carbono, ocurre inhibición del crecimiento micelial del hongo (Bellettini *et al.*, 2019).

Perfil de ácidos grasos de micelio y cuerpos fructíferos de *L. edodes*

El contenido total de grasa fue de 0.125 g para el medio de cultivo PD, 0.115 g para CM y 0.149 g para WB. En cuanto al contenido de ácidos grasos presentes en cada una de las muestras analizadas, se encontró una amplia variedad de ácidos grasos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados. En la Tabla 1 se muestra el perfil de ácidos grasos del micelio producido por SmF en los diferentes medios de cultivo evaluados, así como la comparación del contenido de ácidos grasos de los cuerpos fructíferos comerciales. En este

sentido, se presentan ácidos grasos que contienen de 10 a 22 átomos de carbono, entre ellos se encuentra el ácido linoleico (ω -6), el cual se encuentra en todos los medios de cultivo, destacando el de mayor porcentaje (WB = 51.12 %), acercándose a los valores obtenidos en los cuerpos fructíferos comerciales (68.17 %). Asimismo, destaca la producción de ácido oleico (ω -9) con valores de 13.35, 22.14 y 21.53 % para los medios de cultivo CM, WB y PD, respectivamente, lo cual incrementó 7 veces en WB en comparación con lo detectado en cuerpos fructíferos comerciales (3.25 %). En cuanto al ácido α -linolénico (ω -3), no fue detectado en los medios de cultivo evaluados, mientras que en los cuerpos fructíferos comerciales, se encuentra alrededor del 1 %. Finalmente, en los cuerpos fructíferos comerciales no se detectaron: ácido trans-9-hexadecenoico, ácido cis-9-hexadecenoico, ácido heptadecanoico y ácido dodecanoico, mientras que en el medio CM alcanzaron valores entre 1.42 a 2.65 %.

Tabla 1. Perfil de ácidos grasos presentes en el micelio de *L. edodes* obtenido por SmF con diferentes medios de cultivo y a partir de los cuerpos fructíferos comercial.

Ácidos grasos saturados (SFA)	Porcentaje de abundancia en g/muestra seca			
	Cuerpos fructíferos comerciales	Micelio de medios de cultivo-SmF		
		PD	WB	CM
C10:0 Ácido decanoico (ácido cáprico)	0.11 ^c	1.06 ^a	Nd	0.22 ^b
C12:0 Ácido dodecanoico (ácido láurico)	1.34 ^b	1.90 ^a	0.18 ^d	0.78 ^c
C14:0 Ácido tetradecanoico (ácido mirístico)	0.76 ^c	8.46 ^a	0.45 ^d	1.69 ^b
C15:0 Ácido pentadecanoico	4.40 ^a	1.37 ^c	0.71 ^d	2.40 ^b
C16:0 Ácido hexadecanoico (ácido palmítico)	18.42 ^b	27.38 ^a	15.26 ^c	27.34 ^a
C17:0 Ácido heptadecanoico	Nd	Nd	0.59 ^b	1.42 ^a
C18:0 Ácido octadecanoico (ácido esteárico)	2.56 ^d	8.65 ^a	5.19 ^c	5.50 ^b
C22:0 Ácido docosanoico (ácido behénico)	Nd	0.48 ^c	2.45 ^b	2.51 ^a
Ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados (MUFA y PUFA)				
C16:1 Ácido trans-9-hexadecenoico	Nd	1.38 ^b	0.86 ^c	2.65 ^a
C16:1 Ácido cis-9-hexadecenoico (ácido palmitoleico)	Nd	0.28 ^c	1.05 ^b	2.17 ^a
C18:1 Ácido cis-9-octadecenoico (ácido oleico)	3.25 ^d	21.53 ^b	22.14 ^a	13.35 ^c
C18:2 Ácido cis-9,12-octadecadienoico (ácido linoleico)	68.17 ^a	27.51 ^d	51.12 ^b	39.97 ^c
C18:3 Ácido cis-9,12,15-octadecatrienoico (ácido α -linolénico)	0.99	Nd	Nd	Nd

Leyenda: Nd – No detectado; letras diferentes indican una diferencia estadística significativa entre muestras según la prueba de Tukey ($p = 0.05$).

Respecto a la comparación de los ácidos grasos de los cuerpos fructíferos producidos por SSF (Tabla 2), observamos que el ácido mirístico presente en los cuerpos fructíferos comerciales es aproximadamente 6 veces mayor en los cuerpos fructíferos obtenidos en los bloques enriquecidos con medios medios de cultivo WB y CM. Lo mismo ocurre con el

ácido esteárico, con valores hasta 5.7 veces mayores en los bloques enriquecidos con medio de cultivo CM. Lo mismo ocurre con el ácido esteárico, encontrando valores hasta 5.7 veces mayores en el bloque enriquecido con medio de cultivo CM. Respecto al ácido palmítico, fue ligeramente mayor al valor de los cuerpos fructíferos comerciales (18.42 %), obteniendo valores de 19.20, 19.06 y 24.89 % en los cuerpos fructíferos obtenidos de los bloques enriquecidos con medios de cultivo PD, WB y CM, respectivamente. Así mismo, para el ácido linoleico (ω -6), los cuerpos fructíferos obtenidos de los bloques enriquecidos con medio de cultivo PD presentaron valores de 75.82 %, seguido del bloque enriquecido con medio WB con 73.10 %, mientras que el comercial presentó 68.17%. No se detectó ácido palmitoleico en los cuerpos fructíferos comerciales, mientras que en los cuerpos fructíferos obtenidos de los bloques PD, WB y CM se obtuvieron valores de 0.15, 0.2 y 1.06 %, respectivamente. Los hongos comestibles son bajos en grasa, libres de colesterol, tienen un alto contenido de ácidos grasos insaturados, incluyendo principalmente ácido linoleico, y son una fuente saludable de ácidos grasos esenciales (Martínez-Ramírez *et al.*, 2023; Wang & Zhao, 2023), se ha reportado que están presentes en diferentes especies de hongos comestibles de 0-81 % para linoleico y en un rango de 1-61 % para oleico (Bulam *et al.*, 2021; Dimitrijevic *et al.*, 2019), además, estudios reportan (Chung *et al.*, 2020) contenidos de 77-81 % presentes en diferentes muestras de shiitake evaluadas de diferentes ciclos de cosecha y sustratos de cultivo. No se detectaron ácidos α -linolénico y oleico (ω -3 y ω -9) en los cuerpos fructíferos obtenidos de los bloques, mientras que se detectaron 0.99 y 3.25 % en los cuerpos fructíferos comerciales, respectivamente.

En la Figura 2, podemos observar los porcentajes de SFA y MUFA-PUFA de los cuerpos fructíferos comerciales y cuerpos fructíferos y micelio obtenidos en los diferentes medios de cultivo. De esta manera, el cuerpo fructífero comercial (FB-C) presenta una relación MUFA-PUFA/SFA de 2.6, igual al cuerpo fructífero obtenido del bloque enriquecido con medio WB (FB-WB = 2.7). Sin embargo, la mayor proporción se presentó en el cuerpo fructífero del bloque enriquecido con PD (FB-PD = 3.2), seguido del micelio obtenido en el medio WB (M-WB = 3.0).

Tabla 2. Perfil de ácidos grasos presentes en los cuerpos fructíferos de *L. edodes* cultivados en bloques enriquecidos con diferentes medios de cultivo y en el espécimen comercial.

Ácidos grasos saturados (SFA)	Porcentaje de abundancia en g/muestra seca			
	Comercial	PD	WB	CM
C10:0 Ácido decanoico (ácido cáprico)	0.11 ^b	0.19 ^a	0.14 ^{ab}	0.05 ^c
C12:0 Ácido dodecanoico (ácido láurico)	1.34 ^b	0.42 ^d	1.17 ^c	3.85 ^a
C14:0 Ácido tetradecanoico (ácido mirístico)	0.76 ^d	2.65 ^c	4.85 ^a	4.55 ^b
C15:0 Ácido pentadecanoico	4.40 ^a	1.57 ^c	1.48 ^d	1.76 ^b
C16:0 Ácido hexadecanoico (ácido palmítico)	18.42 ^d	19.20 ^b	19.06 ^c	24.89 ^a
C18:0 Ácido octadecanoico (ácido esteárico)	2.56 ^b	Nd	Nd	14.69 ^a
C22:0 Ácido docosanoico (ácido behénico)	Nd	Nd	Nd	0.64
Ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados (MUFA y PUFA)				
C16:1 Ácido cis-9-hexadecenoico (ácido palmitoleico)	Nd	0.15 ^c	0.2 ^b	1.06 ^a
C18:1 Ácido cis-9-octadecenoico (ácido oleico)	3.25	Nd	Nd	Nd
C18:2 Ácido cis-9,12-octadecadienoico (ácido linoleico)	68.17 ^c	75.82 ^a	73.10 ^b	48.51 ^d
C18:3 Ácido cis-9,12,15-octadecatrienoico (ácido α -linolénico)	0.99	Nd	Nd	Nd

Leyenda: Nd – No detectado; letras diferentes indican una diferencia estadística significativa entre muestras según la prueba de Tukey ($p = 0.05$).

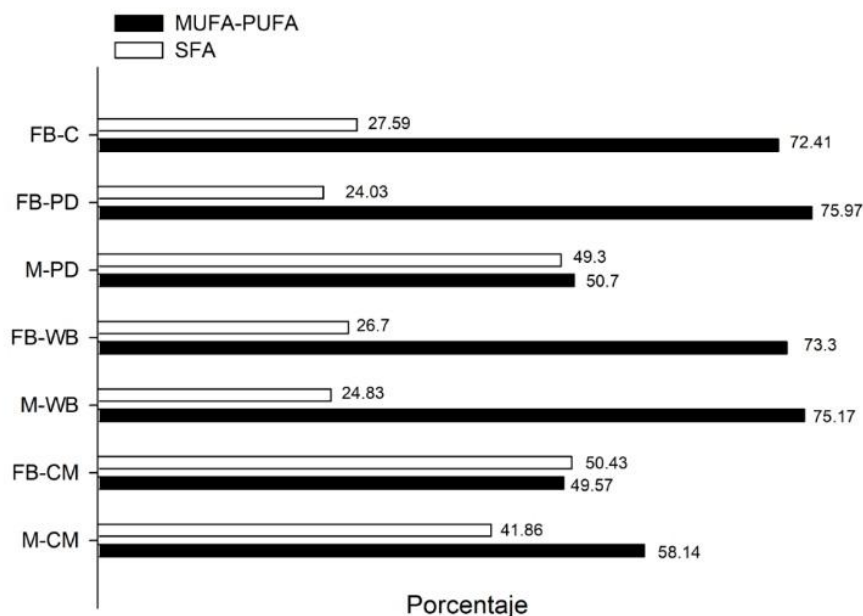


Figura 2. Porcentaje de abundancia de MUFA-PUFA y SFA presentes en el micelio de shiitake (M) y cuerpos fructíferos (FB) por g/muestra seca.

De los datos obtenidos se observa que en el caso de FB-C, presenta ácidos grasos esenciales, como el omega-3 y omega-6, que pertenecen a los PUFA (Christi & Harwoo, 2020; Watanabe & Tatsuno, 2020). Por otro lado, en cuanto al contenido de ácido linoleico, este se encontró en mayor presencia en el medio FB-PD seguido del FB-WB en el caso del ácido oleico, solo se detectó en el micelio producido por fermentación líquida.

La caracterización del perfil de ácidos grasos del hongo comercial (shiitake) mostró que este contiene tres tipos de ácidos omega (ω -3, ω -6, ω -9), siendo el más abundante el ácido linoleico (ω -6). De los medios de cultivo evaluados, el micelio WB fue el que presentó mayor porcentaje de ácido linoleico (ω -6) y ácido oleico (ω -9), este último mostrando un incremento de 7 veces respecto al carpóforo comercial. La proporción de MUFA-PUFA/SFA fue mayor en los cuerpos fructíferos obtenidos del medio de cultivo PD, seguido del WB, siendo ambos mayores respecto a los cuerpos fructíferos comerciales. De igual forma, en la relación MUFA-PUFA/SFA en micelio, se observó que el medio de cultivo WB presentó mayor proporción respecto a lo detectado en los cuerpos fructíferos comerciales.

El micelio del cultivo sumergido contiene hasta un 20 % (en masa seca) de lípidos, mientras que los cuerpos fructíferos contienen solo entre un 3 % y un 4 %. Los lípidos de los cuerpos fructíferos de *L. edodes* contienen elevados niveles de ácido palmítico C16:0 y ácido linoleico, principalmente. Por otro lado, estudios realizados con otros hongos comestibles, *Pleurotus pulmonarius* y *Morchella crassipes*, presentaron una diferencia en la composición y abundancia de ácidos grasos según la fuente de carbono utilizada. Además, se ha descrito que las fracciones lipídicas de los hongos también desempeñan un papel importante en la mejora de las propiedades organolépticas. Los ácidos grasos insaturados y esenciales mejoran el valor nutricional de la biomasa, mientras que el sabor y el aroma difieren debido a algunos productos de autooxidación de ácidos grasos insaturados como los ácidos palmitoleico, oleico, linoleico y linolénico (Smiderle *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2020), también, se ha demostrado que el ácido oleico y linoleico ayudan a reducir el colesterol sérico, el primero es un precursor del 1-octen-3-ol, un compuesto aromático clave responsable del sabor de los hongos (Feng *et al.*, 2023).

Los hongos comestibles son fuente de compuestos bioactivos y agentes nutraceuticos que muestran un amplio espectro de acciones, incluyendo inmunomoduladoras, antiinflamatorias, antioxidantes, antiproliferativas, antimicrobianas, hipoglucemiantes, etc. Además, se ha demostrado que los lípidos de los hongos comestibles, a diferencia de otras fuentes naturales, tienden a tener una mayor biodisponibilidad, lo que contribuye a estas propiedades (Martínez-Ramírez *et al.*, 2023). A pesar del progreso sustancial en la tecnología SmF y SSF para la producción de metabolitos bioactivos, un gran desafío es la producción de basidiomas y la extracción de sus metabolitos bioactivos de tal manera que el proceso no dure meses y también evite la contaminación en el proceso. De esta manera, SmF es una alternativa favorable para la obtención de compuestos bioactivos en condiciones de cultivo con mejor control (Zhang *et al.*, 2019). Se sabe que los metabolitos bioactivos de los hongos comestibles constituyen una base sólida para integrarlos en alimentos funcionales y posibles adyuvantes en terapias clínicas (Venturella *et al.*, 2021). De esta manera, los hongos comestibles son una opción para combatir la desnutrición, especialmente en países subdesarrollados y en desarrollo, ya que poseen metabolitos nutraceuticos (Dudekula *et al.*, 2020).

Conclusiones

La SmF demostró ser una buena alternativa para la producción de micelio y ácidos grasos a partir de *L. edodes*. Así, el micelio del medio de cultivo WB presentó el mayor porcentaje de ácido linoleico (ω -6) y ácido oleico (ω -9), este último mostrando un incremento de 7 veces comparado con los cuerpos fructíferos comerciales. Con respecto a la proporción MUFA-PUFA/SFA en el micelio, solo el tratamiento WB mostró una relación mayor comparada con la observada en los cuerpos fructíferos comerciales. Asimismo, la relación MUFA-PUFA/SFA fue mayor en los carpóforos obtenidos en bloques enriquecidos con medio PD, seguido de WB, ambos con una proporción mayor comparada con los cuerpos fructíferos comerciales. Lo anterior, respalda que la SmF es una alternativa de cultivo adecuada para producir micelio de hongos comestibles con aportes nutraceuticos. Sumado a algunas otras ventajas, como tiempos más cortos y condiciones ambientales más controlables necesarias para el crecimiento del micelio de *L. edodes* que para los cuerpos fructíferos. Estos micelios también son ricos en nutrientes y componentes bioactivos que se utilizan como suplementos dietéticos o productos para el cuidado de la salud en la industria alimentaria. Sin embargo, se requieren estudios toxicológicos del micelio de *L. edodes* para que se considere un alimento funcional seguro.

Contribuciones de autores

Ma Remedios Mendoza-López - Análisis formal, Investigación, Validación, Redacción, Revisión y edición; **Cindy Navarro-Ramírez, Karina Ramírez** - Metodología, Validación, Visualización, Redacción del borrador original. **Mahatma G. Landa-Cadena** - Metodología, Investigación, Visualización. **Alan Couttolenc** - Análisis formal, Investigación, Redacción, Revisión y edición. **César Espinoza** - Administración del proyecto, Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Redacción del borrador original.

Financiación

Esta investigación no recibió financiación externa.

Agradecimientos

Agradecimientos a los proyectos SIREI-UV (31506202571), SECIHTI (CBF-2025-I-1519) y al grupo de investigación UV-CA-354 Química y Biotecnología de Hongos.

Conflicto of Intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Adil, B., Xiang, Q., He, M., Wu, Y., Asghar, M. A., Arshad, M., Qin, P., Gu, Y., Yu, X., Zhao, K., Zhang, X., Ma, M., Chen, Q., Chen, X., & Yan, Y. (2020). Effect of sodium and calcium on polysaccharide production and the activities of enzymes involved in the polysaccharide synthesis of *Lentinus edodes*. *AMB Express*, 10(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-00985-w>
- Ahmad, I., Arif, M., Xu, M., Zhang, J., Ding, Y., & Lyu, F. (2023). Therapeutic values and nutraceutical properties of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*): A review. *In Trends in Food Science and Technology*, 134, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.007>
- Alagawany, M., Elnesr, S., Farag, M., Abd El-Hack, M., Khafaga, A., Taha, A., Tiwari, R., Iqbal Yatoo, M., Bhatt, P., Khurana, S., & Dhama, K. (2019). Omega-3 and omega-6 fatty acids in poultry nutrition: Effect on production performance and health. *Animals*, 9(8), 1-19. <https://doi.org/10.3390/ani9080573>

- Bakratsas, G., Polydera, A., Katapodis, P., & Stamatis, H. (2021). Recent trends in submerged cultivation of mushrooms and their application as a source of nutraceuticals and food additives. *Future Foods*, 4, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100086>
- Bellettini, M., Fiorda, F., Maievas, H., Teixeira, G., Ávila, S., Hornung, P., Júnior, A., & Ribani, R. (2019). Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. In *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(4), 633–646. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005>
- Bulam, S., Sule, N., & Peksen, A. (2021). A review on fatty acid profiles of edible wild mushrooms from Turkey. *European Food Science and Engineering*, 2(2), 46-51. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/efse>
- Chen, F., Martín, C., Finell, M., & Xiong, S. (2022). Enabling efficient bioconversion of birch biomass by *Lentinula edodes*: regulatory roles of nitrogen and bark additions on mushroom production and cellulose saccharification. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12, 1217–1227. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00794-y>
- Christi, W. W., & Harwoo, J. (2020). Oxidation of polyunsaturated fatty acids to produce lipid mediators. *Essays in Biochemistry*, 64(3), 401-421. <https://doi.org/10.1042/EBC20190082>
- Chung, I., Kim, S., Han, J., Kong, W., Jung, M., & Kim, S. (2020). Fatty acids and stable isotope ratios in shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) indicate the origin of the cultivation substrate used: A preliminary case study in Korea. *Foods*, 9(9), 1-13. <https://doi.org/10.3390/foods9091210>
- Colla, I. M., de, O. B. Q., Bertéti, M. B. D., de Freitas, J. D. S., Avelino, K. V., Ruiz, S. P., do Valle, J. S., Linde, G. A., & Colauto, N. B. (2023). Carbon-to-nitrogen ratios on laccase and mushroom production of *Lentinus crinitus*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(4), 3941–3952. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04233-5>
- Dimitrijevic, M., Mitic, V., Nikolic, J., Djordjevic, A., Mutic, J., Stankov, V., & Stojanovic, G. (2019). First Report about Mineral Content, Fatty Acids Composition and Biological Activities of Four Wild Edible Mushrooms. *Chemistry and Biodiversity*, 16(2), 1-22. <https://doi.org/10.1002/cbdv.201800492>
- Dudekula, U. T., Doriya, K., & Devarai, S. K. (2020). A critical review on submerged production of mushroom and their bioactive metabolites. *Biotech*, 10(8), 337. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02333-y>
- Egan, H., Kirk, R., & Sawyer, R. (1981). Chemical Analysis of Food (8a ed.). Persons.
- El-Ramady, H., Abdalla, N., Badgar, K., Llanaj, X., Törös, G., Hajdú, P., Eid, Y., & Prokisch, J. (2022). Edible Mushrooms for Sustainable and Healthy Human Food: Nutritional and Medicinal Attributes. *Sustainability*, 14(9), 1-30. <https://doi.org/10.3390/su14094941>
- Feng, Y., Xu, H., Sun, Y., Xia, R., Hou, Z., Li, Y., Wang, Y., Pan, S., Li, L., Zhao, C., Ren, H., & Xin, G. (2023). Effect of light on quality of preharvest and postharvest edible mushrooms and its action mechanism: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 139, 104-119. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104119>
- Garcia, C., Andersen, C., & Blesso, C. (2023). The Role of Lipids in the Regulation of Immune Responses. *Nutrients*, 15(8), 1-27. <https://doi.org/10.3390/nu15183899>
- Kapoor, B., Kapoor, D., Gautam, S., Singh, R., & Bhardwaj, S. (2021). Dietary Polyunsaturated Fatty Acids (PUFAs): Uses and Potential Health Benefits. *Current Nutrition Reports*, 10(3), 232-242. <https://doi.org/10.1007/s13668-021-00363-3>
- Krupodorova, T., Barshteyn, V., & Sekan, A. (2021). Review of the basic cultivation conditions influence on the growth of basidiomycetes. *Current Research in Environmental and Applied Mycology*, 11, 494–531. <https://doi.org/10.5943/cream/11/1/34>
- Łysakowska, P., Sobota, A., & Wirkijowska, A. (2023). Medicinal Mushrooms: Their Bioactive Components, Nutritional Value and Application in Functional Food Production—A Review. *Molecules*, 28(14), 1-15. <https://doi.org/10.3390/molecules28145393>
- Martínez-Ramírez, F., Riecan, M., Cajka, T., & Kuda, O. (2023). Analysis of fatty acid esters of hydroxy fatty acids in edible mushrooms. *LWT*, 173, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114311>
- Radzikowska, U., Rinaldi, A., Sözen, Z., Karaguzel, D., Wojcik, M., Cypryk, K., Akdis, M., Akdis, C. A., & Sokolowska, M. (2019). The influence of dietary fatty acids on immune responses. *Nutrients*, 11(12), 1-52. <https://doi.org/10.3390/nu11122990>
- Saini, R., Prasad, P., Sreedhar, R., Naidu, K., Shang, X., & Keum, Y. (2021). Omega-3 polyunsaturated fatty acids (PUFAs): Emerging plant and microbial sources, oxidative stability, bioavailability, and health benefits—A review. *Antioxidants*, 10(10), 1-23. <https://doi.org/10.3390/antiox10101627>
- Sheng, K., Wang, C., Chen, B., Kang, M., Wang, M., Liu, K., & Wang, M. (2021). Recent advances in polysaccharides from *Lentinus edodes* (Berk.): Isolation, structures and bioactivities. *Food Chemistry*, 358, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129883>
- Smiderle, F., Olsen, L., Ruthes, A., Czelusniak, P., Santana-Filho, A., Sassaki, G., Gorin, P., & Iacomini, M. (2012). Exopolysaccharides, proteins and lipids in *Pleurotus pulmonarius* submerged culture using different carbon sources. *Carbohydrate Polymers*, 87(1), 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.07.063>
- Sun, L. bin, Zhang, Z. yong, Xin, G., Sun, B. xin, Bao, X. jing, Wei, Y. yun, Zhao, X. mei, & Xu, H. ran. (2020). Advances in umami taste and aroma of edible mushrooms. *Trends in Food Science and Technology*, 96, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.018>
- Venturella, G., Ferraro, V., Cirlincione, F., & Gargano, M. (2021). Medicinal mushrooms: Bioactive compounds, use, and clinical trials. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(2), 1-31. <https://doi.org/10.3390/ijms22020634>
- Wang, M., & Zhao, R. (2023). A review on nutritional advantages of edible mushrooms and its industrialization development situation in protein meat analogues. *Journal of Future Foods*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2022.09.001>

- Watanabe, Y., & Tatsuno, I. (2020). Prevention of cardiovascular events with omega-3 polyunsaturated fatty acids and the mechanism involved. *Journal of Atherosclerosis and Thrombosis*, 27(3), 183-198. <https://doi.org/10.5551/jat.50658>
- Xv, W., Zheng, Q. W., Ye, Z. W., Wei, T., Guo, L. Q., Lin, J. F., & Zou, Y. (2024). Submerged culture of edible and medicinal mushroom mycelia and their applications in food products: a review. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 26(3).
- Yan, M., Feng, J., Liu, Y., Hu, D., & Zhang, J. (2023). Functional Components from the Liquid Fermentation of Edible and Medicinal Fungi and Their Food Applications in China. *Foods*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/foods12102086>
- Yu, C., Zhang, Y., Ren, Y., Zhao, Y., Song, X., Yang, H., & Chen, M. (2023). Composition and contents of fatty acids and amino acids in the mycelia of *Lentinula edodes*. *Food Science and Nutrition*, 11(7), 4038–4046. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3392>
- Zhang, B., Guan, Y., Hu, P., Chen, L., Xu, G., Liu, L., & Cheung, P. (2019). Production of bioactive metabolites by submerged fermentation of the medicinal mushroom *Antrrodia cinnamomea*: recent advances and future development. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39(4), 541-554. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1577798>
- Zhang, H., Gao, X., Guo, X., Li, K., Li, S., Sinclair, A., & Li, D. (2021). Effects of dietary eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid supplementation on metabolic syndrome: A systematic review and meta-analysis of data from 33 randomized controlled trials. *Clinical Nutrition*, 40(7), 4538–4550. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2021.05.025>