



**Somos calidad,
somos USC**

**Producción y eficacia de proteínas antioxidantes derivadas de hongos en comparación
con las obtenidas de bacterias: Una revisión sistemática**

Autor

Derly Juried Bastidas Jaramillo

Microbióloga

Director

Jonathan Arturo Bautista Carrillo

**Facultad de Ciencias Básicas
Microbiología
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2025**

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Evaluación del potencial biotecnológico de hongos y bacterias para la producción rentable de proteínas antioxidantes de alto valor agregado.	Industrias farmacéuticas, cosméticas, alimentarias y biotecnológicas interesadas en compuestos naturales con propiedades antioxidantes.
Responsabilidad Social		
Científico	Síntesis del conocimiento sobre los mecanismos de producción, purificación y eficacia comparativa de proteínas antioxidantes derivadas de hongos y bacterias.	Investigadores, académicos y estudiantes en biotecnología, microbiología, bioquímica y ciencias biomédicas.
Indicadores de Gestión		
Tecnológico	Desarrollo y optimización de procesos biotecnológicos para la obtención eficiente de proteínas antioxidantes a partir de microorganismos.	Empresas biotecnológicas, farmacéuticas, alimentarias y cosméticas que buscan innovar en bioproductos naturales.
Técnico		
Ambiental		
Social		
Cultural		

Fuente: Elaboración propia.

Producción y eficacia de proteínas antioxidantes derivadas de hongos en comparación con las obtenidas de bacterias: Una revisión sistemática

Derly Juried Bastidas Jaramillo (Derly.bastidas00@usc.edu.co.edu.co)

Programa de Microbiología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

El estrés oxidativo constituye un factor clave en la aparición de enfermedades crónicas y degenerativas, lo que ha impulsado el interés por antioxidantes naturales seguros y sostenibles. Los microorganismos, especialmente bacterias y hongos, se perfilan como fuentes valiosas de proteínas con actividad antioxidante y alto potencial biotecnológico. Esta revisión sistemática analizó estudios publicados entre 2015 y 2025 para comparar la producción, mecanismos de acción y eficacia de proteínas antioxidantes derivadas de hongos frente a las obtenidas de bacterias. Los resultados evidencian que las bacterias producen enzimas altamente estables ante variaciones de pH entre 2-10 y temperaturas de 5°C a 80°C, destacando las catalasas, superóxido dismutasas y glutatión peroxidadas, mientras que los hongos presentan una mayor diversidad de isoformas y metabolitos con actividad antioxidante y antimicrobiana. La optimización de medios de cultivo, el uso de residuos agroindustriales y la ingeniería genética se identifican como estrategias eficaces para mejorar el rendimiento y estabilidad de estas biomoléculas. En conclusión, las proteínas antioxidantes microbianas representan una alternativa prometedora frente a los compuestos sintéticos, con aplicaciones relevantes en las industrias alimentaria, farmacéutica, cosmética y ambiental, contribuyendo al desarrollo de procesos más sostenibles e innovadores.

Palabras clave: *Proteínas antioxidantes; hongos; bacterias; enzimas; biotecnología; estrés oxidativo; sostenibilidad.*

Production and efficacy of antioxidant proteins derived from fungi compared to those obtained from bacteria: A systematic review

ABSTRACT

Oxidative stress is a key factor in the onset of chronic and degenerative diseases, which has driven interest in safe and sustainable natural antioxidants. Microorganisms, especially bacteria and fungi, have emerged as valuable sources of proteins with antioxidant activity and high biotechnological potential. This systematic review analyzed studies published between 2015 and 2025 to compare the production, mechanisms of action, and efficacy of antioxidant proteins derived from fungi versus those obtained from bacteria. The results show that the bacteria produce highly stable enzymes under pH variations between 2-10 and temperatures from 5°C to 80°C, while fungi exhibit a greater diversity of isoforms and metabolites with antioxidant and antimicrobial activity. Optimization of culture media, the use of agro-industrial residues, and genetic engineering were identified as effective strategies to enhance the yield and stability of these biomolecules. In conclusion, microbial antioxidant proteins represent a promising alternative to synthetic compounds, with relevant applications in the food, pharmaceutical, cosmetic, and environmental industries, contributing to the development of more sustainable and innovative processes.

Keywords: *Antioxidant proteins; fungi; bacteria; enzymes; biotechnology; oxidative stress; sustainability.*

HIGHLIGHTS

- Las bacterias como *Lactobacillus plantarum* y *Alicyclobacillus thermoacidophilico*, así como los hongos como *Aspergillus fumigatus* y *Trichoderma reesei*, producen una amplia variedad de proteínas con actividad antioxidante, entre ellas catalasas, superóxido dismutasas (SOD) y glutatión peroxidadas (GPx).
- Las proteínas bacterianas muestran mayor estabilidad térmica frente a variaciones de pH entre 4 y 9, lo que favorece su aplicación en procesos industriales y alimentarios donde se requieren condiciones operativas variables.
- Los hongos presentan mayor diversidad enzimática y metabólica, reflejado en incrementos de hasta 150 veces en la actividad antioxidante y 23 veces en el contenido fenólico total en especies como *Trichoderma reesei*. Asimismo, producen compuestos con propiedades antioxidantes y antimicrobianas simultáneas, observada en géneros como *Aspergillus niger* y *Ganoderma lucidum*.
- El uso de residuos agroindustriales como sustratos favorece la producción sostenible de enzimas antioxidantes de alto valor biotecnológico, debido a su reducción de costos en medios de cultivo, el aprovechamiento de residuos orgánicos y proporcionando nutrientes que estimulan la síntesis enzimática.

1. Introducción

En los últimos años, el estrés oxidativo ha sido reconocido como un factor determinante en el desarrollo de diversas enfermedades crónicas humanas, entre las que se incluyen patologías neurodegenerativas, cardiovasculares, metabólicas, inflamatorias y también algunos tipos de cáncer (Liu et al., 2018). Este factor afecta al organismo cuando la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) supera la capacidad del cuerpo para eliminarlas mediante sus sistemas de protección antioxidante endógenos y exógenos (Vázquez-Ovando et al., 2022)

En este escenario, la búsqueda de compuestos antioxidantes eficaces, no tóxicos y respetuosos con el medio ambiente se ha convertido en una prioridad para la comunidad científica y para los sectores de biomedicina industrial, y alimentario, dado que los antioxidantes naturales representan una alternativa a los compuestos sintéticos potencialmente tóxicos (Salazar, 2025).

Estas biomoléculas pueden actuar de manera enzimática o no enzimática, contribuyendo a la neutralización de radicales libres y proporcionando protección celular frente al daño oxidativo. Entre las proteínas enzimáticas más destacadas se encuentran la Superóxido dismutasa (SOD), que cataliza la dismutación del anión superóxido en oxígeno y peróxido de hidrógeno, la catalasa (CAT), que degrada el peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno; y la glutatión peroxidasa (GPx) que reduce peróxidos lipídicos y de hidrógeno utilizando glutatión reducido. Otras proteínas relevantes incluyen la tiorredoxina (Trx), peroxirredoxinas (Prx) y algunas otras enzimas dependientes de NAD(P)H, que actúan indirectamente como antioxidantes (Fataliyeva et al., 2024; Klinsoda et al., 2019).

Entre las principales fuentes de antioxidantes naturales se encuentran los microorganismos, especialmente bacterias y hongos, los cuales han llamado el interés debido a su capacidad de producción de proteínas con importantes efectos antioxidantes, que pueden ser extraídas, purificadas

y empleadas como compuestos activos en la reducción del estrés oxidativo.

Algunos géneros de bacterias como *Lactobacillus*, *Bacillus* y *Pseudomonas*, se destacan por la síntesis de enzimas antioxidantes como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y glutatión peroxidasa (GPx). Con el mismo fin, se han identificado distintas especies de hongos que sintetizan moléculas con funciones antioxidantes de eficiencia comparables, entre ellas *Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum* o *Trichoderma reesei* (Fataliyeva et al., 2024).

Diversos estudios han demostrado que estas proteínas microbianas poseen una alta capacidad para reducir especies reactivas de oxígeno, proteger estructuras celulares y participar en rutas metabólicas clave para la defensa antioxidante. Esta versatilidad funcional ha abierto nuevas posibilidades para su explotación biotecnológica en aplicaciones médicas, cosméticas, ambientales y alimenticias (Vá et al., 2025; Salazar, 2025; Fataliyeva et al., 2024; Vázquez-Ovando et al., 2022)

Desde el ámbito biomédico, agregar antioxidantes a la terapia médica puede ayudar a tratar y prevenir enfermedades que surgen del estrés oxidativo, como el Alzheimer, el síndrome de Parkinson, la diabetes tipo 2 y enfermedades vasculares. Asimismo, en el sector alimentario e industrial el uso de este tipo de proteínas podría disminuir la dependencia de aditivos sintéticos y facilitar la seguridad alimentaria (Klinsoda et al., 2019; Salazar, 2025).

En el ámbito farmacéutico, estas biomoléculas representan una fuente valiosa para el desarrollo de medicamentos innovadores y suplementos funcionales con propiedades protectoras celulares, es decir, capaces de brindar protección contra eventos teóricamente dañinos como los procesos de iniciación del cáncer (Fataliyeva et al., 2024; Vázquez-Ovando et al., 2022; Al-Madboly et al., 2020).

En el sector ambiental, la capacidad de estas proteínas antioxidantes para neutralizar especies reactivas podría aprovecharse en procesos de biorremediación, mitigando la toxicidad de contaminantes oxidantes en aguas y suelos (Fataliyeva et al., 2024).

A pesar del interés creciente, aún persisten vacíos importantes en la comprensión comparativa entre bacterias y hongos como fuentes de proteínas antioxidantes. La diferencia en sus capacidades biológicas y metabólicas genera una variabilidad significativa en cuanto a los procesos de producción, rendimiento antioxidante, estabilidad funcional y eficacia terapéutica de las proteínas obtenidas de uno u otro grupo microbiano (Zhang et al., 2022).

Los métodos utilizados para la producción, aislamiento y caracterización de estas proteínas varían considerablemente entre estudios, lo que dificulta la comparación directa de sus eficacias. Las condiciones de cultivo, el tipo de medio, la fase de crecimiento del microorganismo, el sistema de expresión utilizado y los métodos de purificación son todos factores que influyen en la calidad y actividad final del producto obtenido. Por ello, esta falta de estandarización en las metodologías representa una barrera significativa para la evaluación objetiva del potencial antioxidante de proteínas bacterianas versus fúngicas (Patel et al., 2023; Sharma & Singh, 2021; Zhang et al., 2022).

Por su parte, Colombia que alberga una rica variedad de ecosistemas, hábitats naturales de numerosas especies de hongos y bacterias con capacidades metabólicas únicas, tiene un potencial de exploración amplio. No obstante, la ausencia de una comparación científica sistemática entre las proteínas antioxidantes de origen bacteriano y fúngico limita la capacidad del para tomar decisiones informadas en procesos de innovación, sustitución de importaciones y aprovechamiento sostenible de los recursos biológicos locales (Álvarez et al., 2019; Orduz et al., 2020; Ramírez-Castrillón et al., 2021).

Adicional, hasta la fecha, la información disponible se encuentra dispersa y no existe una revisión

sistemática exhaustiva que compare de manera crítica y estructurada la evidencia científica disponible sobre las proteínas con actividad antioxidante derivadas de bacterias y hongos.

Este vacío limita el avance académico y la aplicación efectiva de estas biomoléculas en contextos reales donde se requiere eficiencia, seguridad y sustentabilidad (Choubey et al., 2021; Patel et al., 2023).

Por lo anterior, esta revisión sistemática se orienta a responder la siguiente pregunta: ¿Qué diferencias existen entre las proteínas con actividad antioxidante producidas por bacterias y hongos en términos de rendimiento de producción, mecanismos bioquímicos de acción y aplicabilidad biotecnológica?. Para ello, se analizó y sintetizó la evidencia científica recientemente reportada sobre la producción, mecanismos y eficacia de estas biomoléculas, con el propósito de identificar diferencias, similitudes y oportunidades de investigación que contribuyan a tomar decisiones fundamentadas para el objetivo terapéutico o industrial.

De esta manera, el estudio busca orientar mejor los esfuerzos de investigación y contribuir al desarrollo de soluciones bioindustriales sostenibles y de alto valor agregado.

2. Metodología

La presente revisión sistemática se lleva a cabo siguiendo una metodología basada en los lineamientos de PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), con el propósito de asegurar una recopilación, análisis y síntesis de información científica ordenada, clara y reproducible, que permitiera alcanzar los objetivos planteados frente a la problemática expuesta. Para tal fin, se establecieron las siguientes etapas: (I) formulación de la estrategia de búsqueda y construcción de la ecuación de investigación mediante la metodología PICO (Población, Intervención, Comparación y Resultados); (II) cribado y selección de los estudios, inicialmente a partir del título y el resumen, y posteriormente mediante la lectura de texto completo según los criterios de elegibilidad definidos; y (III) extracción, comparación y análisis de los datos de interés, cuyos resultados se discutieron de forma crítica para dar respuesta a los objetivos de la investigación. A continuación, se presentan en detalles las etapas y procedimientos desarrollados en este proceso.

2.1 Estrategia de búsqueda

La estrategia de búsqueda se diseñó mediante la combinación de descriptores y términos clave directamente relacionados con la temática de estudio, así como también sus términos equivalentes (es decir, sinónimos, variaciones léxicas o traducciones en otros idiomas utilizadas en diferentes bases de datos). Estos últimos fueron considerados para ampliar la recuperación de información y asegurar una búsqueda óptima. Entre los principales términos se incluyeron: “proteínas antioxidantes”, “hongos”, “bacterias”, “producción”, “actividad biológica”, “eficacia” y “biotecnología” (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de términos para la búsqueda de literatura.

Nº	Términos clave	Descriptores equivalentes
1	Proteínas antioxidantes	Antioxidant Proteins / Antioxidant Enzymes
2	Hongos	Fungi / Filamentous Fungi / Yeasts
3	Bacterias	Bacteria / Prokaryotic Cells / Microbial Sources
4	Producción microbiana	Microbial Production / Protein Biosynthesis / Fermentation
5	Actividad antioxidante	Antioxidant Activity / Free Radical Scavenging / Oxidative Stress Response
6	Purificación y caracterización	Protein Purification / Biochemical Characterization / Enzyme Assays
7	Eficacia biológica	Bioefficacy / Biological Activity / Functional Evaluation
8	Comparación de microorganismos	Comparative Study / Microbial Diversity / Taxonomic Comparison

Fuente: Elaboración propia.

Ecuaciones de Búsqueda

Para optimizar la precisión y la amplitud temática, se emplearon operadores booleanos (“AND”, “OR”, “NOT”) (Tabla 2), lo que permitió delimitar los resultados obtenidos.

Tabla 2. Matriz de operadores booleanos de búsqueda.

N°	Términos de combinación de búsqueda (español)	Search combination terms (English)
1+2	Proteínas antioxidantes AND Hongos	Antioxidant Proteins AND Fungi
1+3	Proteínas antioxidantes AND Bacterias	Antioxidant Proteins AND Bacteria
1+4	Proteínas antioxidantes AND Producción microbiana	Antioxidant Proteins AND Microbial Production
1+5	Proteínas antioxidantes AND Actividad antioxidante	Antioxidant Proteins AND Antioxidant Activity
4+6	Producción microbiana AND Purificación y caracterización	Microbial Production AND Protein Purification and Characterization
1+7	Proteínas antioxidantes AND Eficacia biológica	Antioxidant Proteins AND Biological Efficacy
2+3+8	Hongos AND Bacterias AND Comparación de microorganismos	Fungi AND Bacteria AND Comparative Study
1+4+9	Proteínas antioxidantes AND Producción microbiana AND Aplicaciones biotecnológicas	Antioxidant Proteins AND Microbial Production AND Biotechnology Applications
1+10	Proteínas antioxidantes AND Estudios experimentales	Antioxidant Proteins AND Experimental Studies
1+11	Proteínas antioxidantes AND Evaluación de proteínas microbianas	Antioxidant Proteins AND Microbial Protein Evaluation

Fuente: Elaboración propia.

La búsqueda se llevó a cabo en cada base de datos con base en TITLE-ABS-KEY y LIMIT-TO, para refinar y optimizar la búsqueda se ajustó la ecuación a cada base de datos bibliográficas, durante el periodo de 2015 a 2025, considerando finalmente las ecuaciones:

Para PubMed:

("antioxidant proteins" OR "antioxidant enzymes") AND ("bacteria" OR "fungi" OR "microorganisms") AND ("production" OR "antioxidant activity" OR "biotechnological applications"), limitando la búsqueda a artículos publicados entre el 1 de enero de 2015 y el 31 de diciembre de 2025.

Para Scopus:

TITLE-ABS-KEY("antioxidant proteins" OR "antioxidant enzymes") AND TITLE-ABS-KEY("bacteria" OR "fungi" OR "microorganisms") AND TITLE-ABS-KEY("production" OR "antioxidant activity" OR "biotechnological applications"), con filtro de año de publicación entre 2015 y 2025.

Para Web of Science:

TS=("antioxidant proteins" OR "antioxidant enzymes") AND TS=("bacteria" OR "fungi" OR "microorganisms") AND TS=("production" OR "antioxidant activity" OR "biotechnological applications"), con restricción de año entre 2015 y 2025.

Finalmente, se realizó una revisión manual de las referencias bibliográficas contenidas en los artículos seleccionados con el objetivo de identificar fuentes adicionales relevantes que no hubieran sido recuperadas durante la búsqueda inicial en las plataformas digitales. En todos los casos se consideraron los siguientes criterios de selección:

Criterios de inclusión:

- Artículos originales (experimentales o aplicados).
- Estudios publicados entre 2015 y 2025.
- Publicaciones en inglés o español.
- Estudios que aborden la producción, caracterización o evaluación de proteínas antioxidantes derivadas de hongos o bacterias.
- Trabajos que reporten datos sobre organismos productores, métodos de obtención y purificación, ensayos de actividad antioxidante (como DPPH, ABTS, FRAP, ORAC, entre otros) y/o comparaciones de eficacia biológica.

Criterios de exclusión:

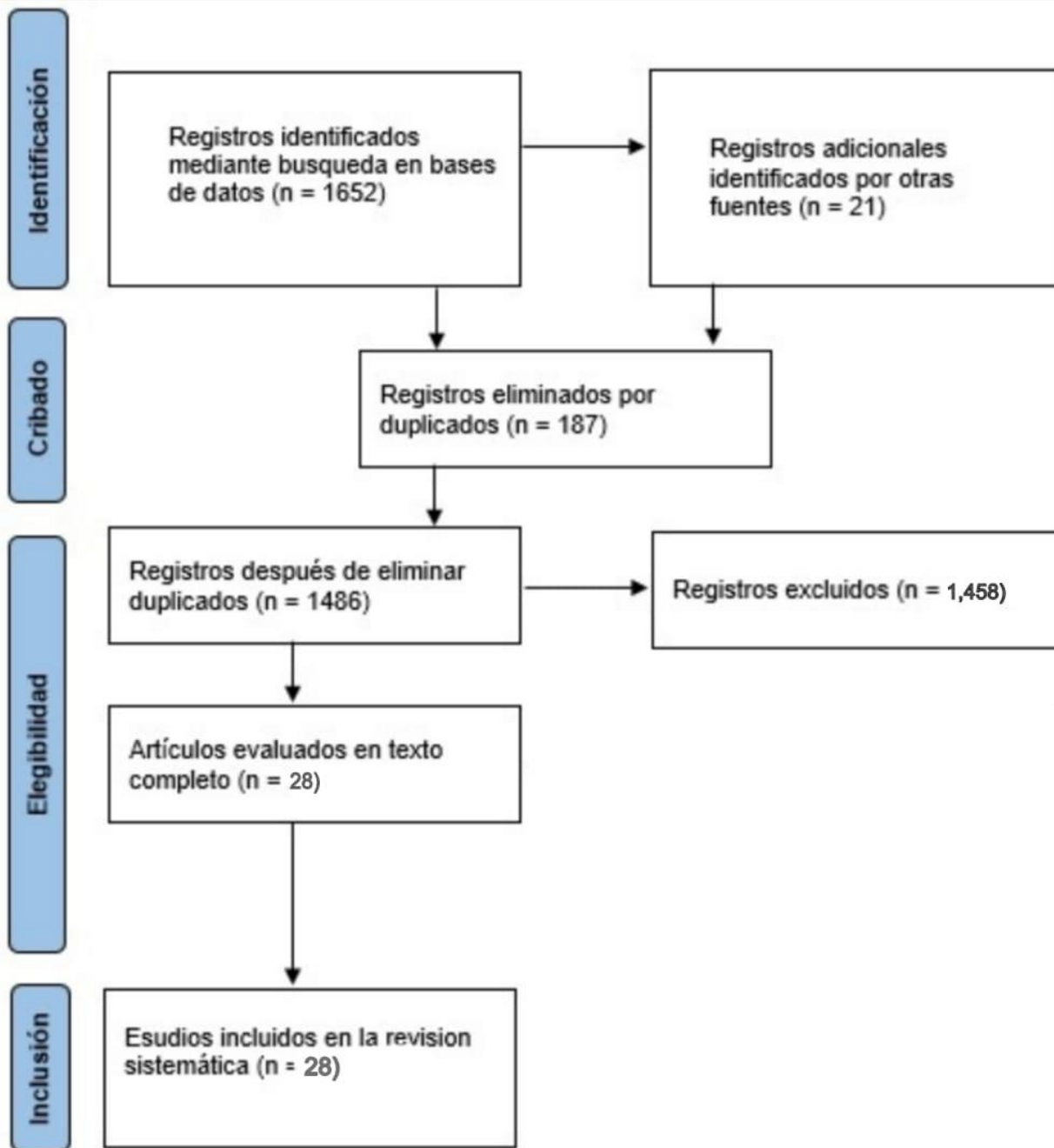
- Revisiones narrativas, cartas al editor, conferencias y/o tesis no publicadas.
- Estudios centrados exclusivamente en fuentes vegetales o animales de proteínas antioxidantes.
- Investigaciones que no incluyan hongos ni bacterias como fuentes de producción.
- Artículos sin disponibilidad de texto completo o sin descripción metodológica verificable.

2.2 Cribado y Selección de Estudios

Para la selección de los estudios incluidos en esta revisión sistemática, inicialmente se realizó la eliminación de duplicados utilizando gestores bibliográficos como Mendeley y herramientas de hojas de cálculo en Excel, con el fin de garantizar que cada artículo fuera considerado una sola vez.

Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación preliminar basada en el título y resumen de los documentos recuperados, aplicando los criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos para filtrar aquellos estudios que no cumplieran con los objetivos de la revisión.

Los artículos que superaron esta primera fase fueron sometidos a una lectura exhaustiva del texto completo para verificar su pertinencia y calidad metodológica. Finalmente, se aplicó la evaluación de pasos de la metodología PRISMA y los resultados del proceso se evidencian en el siguiente diagrama de flujo de la figura 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA que muestra el proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de los estudios considerados en la revisión sistemática.

3. Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los principales hallazgos de 28 estudios científicos seleccionados sobre la producción y eficacia de proteínas antioxidantes derivadas de hongos y bacterias (Tabla 3), para ello

se recopilaron datos como el título del estudio, año, país, tipo de microorganismo analizado y metodología, proporcionando una visión comparativa y actualizada sobre los enfoques experimentales y biotecnológicos aplicados en distintos contextos internacionales.

Los estudios abarcan desde la identificación y caracterización de proteínas antioxidantes microbianas, hasta la evaluación de su eficacia biológica y su potencial aplicación industrial o terapéutica, se destaca el impacto de estas investigaciones en el desarrollo de biomoléculas con alta capacidad antioxidante y en el fortalecimiento de estrategias biotecnológicas sostenibles, consolidando así el papel de los hongos y bacterias como fuentes valiosas de compuestos bioactivos con relevancia en múltiples sectores.

Tabla 3. Estudios seleccionados sobre la producción y eficacia de proteínas antioxidantes derivadas de hongos y bacterias.

Nº	Autor(es) y año	País	Microorganismo	Tipo de microorganismo	Tipo de proteína o enzima antioxidante	Metodología	Principal resultado
1	Picazo et al. (2019)	México	<i>Aspergillus oryzae</i> DIA-MF	Hongo	Complejo enzimático con actividad antioxidante	Fermentación, caracterización por SDS-PAGE y HPLC	FOS aumentó de $1,61 \pm 0,08$ a $31,01 \pm 3,42$ g/L; actividad antioxidante DPPH: 34,81–116,46 mg eq Trolox; FRAP: 42,65–298,86 mg eq Trolox
2	Rocha et al. (2018)	Brasil	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Hongo	Peroxirredoxinas 1-Cys (Prx1, PrxB, PrxC)	Expresión recombinante y análisis de delección génica	Prx1 descompuso H_2O_2 con constante de velocidad $\sim 10^7 M^{-1} s^{-1}$; esencial para supervivencia frente al estrés oxidativo
3	Lin et al. (2021)	Corea del Sur	<i>Bifidobacterium bifidum</i> BGN4-SK	Bacteria	Superóxido dismutasa (SOD) y catalasa recombinantes	Ingeniería genética y cultivo en medio suplementado	Mayor actividad SOD y CAT; disminución significativa de ROS intracelular ($p < 0,05$) y supresión de IL-6, TNF- α , IL-8 en células HT-29 y RAW 264.7
4	Mena et al. (2021)	Colombia	<i>Phanerochaete</i> spp.	Hongo	Metabolitos antioxidantes de hongo	Extracción con acetato de etilo, liofilización, biomasa seca; ORAC y DPPH	Actividad antioxidante liofilizada: $36,59 \pm 3,53$ μM Trolox/g; DPPH: $30,61 \pm 0,20$ μM Trolox/g; inhibición antibacteriana frente a <i>S. aureus</i> : 54,76%
5	Koleva et al. (2024)	Bulgaria / Antártida	<i>Penicillium rubens</i> III11-2	Hongo	Catalasa extracelular (CAT)	Selección de cepa, fermentación, purificación enzimática	Actividad específica: 513 U/mg proteína; rendimiento: 19,97%; tasa de purificación: 98,4x; actividad máxima: 5–40 °C; estabilidad térmica: 0–30 °C
6	Fadlillah et al. (2025)	Indonesia	<i>Pediococcus acidilactici</i> YKP4 y <i>Lactocaseibacillus rhamnosus</i> BD2	Bacterias	Péptidos antioxidantes (<2 kDa)	Fermentación de leche de soja germinada, identificación de péptidos	IC50 antioxidante: 471,16 $\mu g/ml$ (<i>P. acidilactici</i>) y 556,93 $\mu g/ml$ (<i>L. rhamnosus</i>); péptidos derivados de glicina y β -conglucina
7	Uddin et al. (2021)	Bangladesh	<i>Ganoderma lucidum</i> (cuerpos fructíferos)	Hongo	Compuestos antioxidantes y inhibidores de α -amilasa	Extracción metanólica, ensayos in vitro (DPPH, α -amilasa, antibacterial)	CE50 antioxidante DPPH: 22,14 $\mu g/ml$; CE50 inhibición α -amilasa: 22,60 $\mu g/ml$; actividad anti- <i>S. aureus</i> dependiente de dosis ($p < 0,05$)
8	Fataliyeva et al. (2024)	Turquía	Cianobacterias termófilas (aislados G1, G13, K42, 37)	Bacterias	Actividad antioxidante, antimicrobiana y enzimática (celulasa y lipasa)	Extracción metanólica, métodos de difusión en agar, medición enzimática	CI50 antioxidante: $0,78 \pm 0,055$ mg/ml (aislado 37); CI50 ácido ascórbico: $0,22 \pm 0,04$ mg/ml; celulasa: $25 \pm 5,66$ mm (G1); lipasa: $22 \pm 0,71$ mm (K42); antimicrobiana frente a <i>M. luteus</i> (G13)
9	Al-doori et al. (2025)	Iraq	<i>Aspergillus flavus</i>	Hongo	Metabolitos secundarios antioxidantes	Extracción de metabolitos fúngicos y bacterianos, cromatografía de capa fina	Actividad antioxidante DPPH significativa; bajo CI50; alto contenido de flavonoides; actividad antiproliferativa contra células de carcinoma hepatocelular

10	Colla et al. (2023)	Brasil	<i>Aspergillus niger</i>	Hongo	Proteasas y biopéptidos antioxidantes	Fermentación en estado sólido (SSF) con salvado y cáscara de soja (70:30)	Proteasas: 677 U/g; proteínas solubles: 4154 µg/mL; actividad antioxidante: 2875,6 mg/mL equivalentes Trolox; 48–96 h de fermentación
11	Michalak et al. (2023)	Polonia	<i>Trametes versicolor</i>	Hongo	Proteínas y péptidos antioxidantes	Extracción y hidrólisis de hongos, ensayos DPPH y ABTS, MIC y MBC	Eliminación de radicales casi 100% (DPPH y ABTS); actividad antimicrobiana contra <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> y <i>S. Typhimurium</i>
12	Abdel-Aty et al. (2022)	Egipto	<i>Trichoderma reesei</i>	Hongo	Compuestos fenólicos antioxidantes y enzimas asociadas (α-amilasa, xilanasa, β-glucosidasa, poligalacturonasa, PAL)	SSF de semillas de chí, optimización RSM	Contenido fenólico total incrementado 23x; actividad antioxidante aumentó 113x (DPPH) y 150x (ABTS); nuevas moléculas fenólicas: kaempferol, apigenina, p-cumárico
13	Sa-Ard et al. (2015)	Tailandia	<i>Ganoderma lucidum</i>	Hongo	Proteínas antioxidantes, antibacterianas y protectoras de ADN	Extracción proteica, hidrolizados, purificación parcial por columnas DEAE y SP-Sepharosa	Cl ₄ ABTS: 2,47–2,77 µg/mL; Cl ₄ DPPH: 2,5–3,42 µg/mL; FRAP: 1,73–2,62 µmol Trolox/µg proteína; micelio proteico protege ADN frente a radicales OH
14	Dong et al. (2021)	China	<i>Alicyclobacillus thermoacidophilus</i>	Bacteria	Superóxido dismutasa (Aa SOD)	Identificación genética, expresión en medios con Mn y Fe, purificación	Actividad 16x mayor en medio con Mn; actividad enzimática 25x mayor unida a Mn; temperatura óptima: 35 °C; estable hasta 80 °C; pH 2–10
15	Martins et al. (2018)	EE. UU.	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Bacteria	Superóxido dismutasa (SOD)	Estudios en fase estacionaria, complementación genética y química	SOD clave para tolerancia a múltiples fármacos; inactivación disminuye resistencia a antibióticos; restauración mediante SOD recupera tolerancia
16	Mirzadi Gohari et al. (2024)	Países Bajos	<i>Zymoseptoria tritici</i>	Hongo	Catalasa-peroxidasa (ZtCpx1 y ZtCpx2)	Análisis genético, mutantes knock-out, fluorescencia	ΔZtCpx1 aumenta sensibilidad a H ₂ O ₂ y reduce virulencia; ZtCpx2 afecta biomasa; mutante doble: virulencia aún más reducida; ZtCpx1 localizado en peroxisoma
17	Yao et al. (2021)	China	Microbiota de fermentación de frambuesa roja	Hongo y Bacteria	Enzimas antioxidantes	Fermentación con y sin inoculación, secuenciación 16S rRNA e ITS1, análisis de correlación	Fermentación con cultivo iniciador aumenta actividad antioxidante; correlación positiva entre Rhodococcus, Kodamaea y capacidad antioxidante; contenido fenólico correlaciona con Gluconobacter
18	Al-Madboly et al. (2020)	Egipto	<i>Lactobacillus plantarum</i> KU720558	Bacteria	Glutación peroxidasa (GPx) y glutación S-transferasa (GST)	Producción bajo condiciones de estrés optimizadas (Plackett-Burman y Box-Behnken), caracterización bioquímica	GST: 1789,5 U/mg proteína (12x medio basal); GPx: 612,5 U/mg proteína (22x medio basal); bandas de 25 y 18 kDa; estable 40 °C y pH 4–7; análisis 3D muestra cavidades funcionales
19	Ağgez & Yüzüğüllü Karakuş, 2022	Turquía	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Hongo	Catalasa	Cultivo 7 días a 37 °C, 155 rpm; purificación 24x, SDS-PAGE	Peso molecular ~70 kDa; Km=7.4 mM; Vmax=1250 µM/min; estable pH 4-9 y T 30-50 °C
20	Yingqi et al., 2023	China	<i>Aspergillus niger</i> 1102, <i>Streptococcus hemolyticus</i> 2107	Hongo y Bacteria	Catalasa	Comparación de actividad enzimática frente a pH, T y iones metálicos	Variación en eficiencia catalítica según especie; propiedades termales y pH dependientes
21	Cubas-Gaona et al., 2020	España	<i>Tetrahymena thermophila</i>		Glutación peroxidasa (GPx)	Análisis comparativo, qRT-PCR frente a metales y agentes oxidantes	Expresión diferencial de 6 genes GPx según estrés; múltiples isoformas presentes

22	Czyzewska & Trusek, 2018	Polonia	<i>Serratia</i> sp.	Bacteria	Catalasa encapsulada	Inmovilización en hidrogel, pH 4.4–6.6, T 6–15 °C	Alta actividad en condiciones ácidas y bajas T; estable en leche; reutilizable
23	Fan et al., 2024	China	<i>Yersinia pseudotuberculosis</i>	Bacteria	Gpx, Tpx, AhpR	Análisis transcriptómico; regulación por OxyR	Gpx principal eliminador de OP; Tpx asistente; AhpR menor efecto
24	Najmuldeen et al., 2019	Arabia Saudita	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Bacteria	Superóxido dismutasas (SOD) isoenzimas	Mutantes simples, dobles y triples; pruebas de estrés oxidativo, biopelículas, morfología	Cada isoenzima tiene función única; interacción reguladora entre SOD
25	Ramadan et al., 2023	Egipto	<i>Aspergillus terreus</i>	Hongo	Lovastatina	Fermentación en estado sólido (SSF) usando residuos lignocelulósicos	Producción máxima 18,2 mg/g (bagazo caña azúcar); actividad antioxidante DPPH y antibacteriana
26	Hu et al., 2021	China	<i>Rhizobium leguminosarum</i>	Hongo	Glutación peroxidasa (Gpx), Glutación reductasa (GR)	Mutantes simples y dobles gpxA/gshR; proteómica TMT	Mutantes simples y dobles: nodulación ineficaz >50% reducción; mayor sensibilidad a H ₂ O ₂
27	Chen et al., 2023	China	<i>Cupriavidus necator</i>	Bacteria	Superóxido dismutasa (SOD)	Bioelectroquímica (BES); SOD exhibida en superficie celular	Crecimiento 2,7x mayor; producción 0,24 g/L/d PCS; mitigación de ROS
28	Wu et al., 2018	China	<i>Streptomyces ghanaensis</i> / <i>E. coli</i>	Bacteria	L-glutamato oxidasa (LGOX) y catalasa (KatG)	Biocatálisis en cascada in vitro e in vivo; optimización de promotores y RBS	α-KG 106 g/L; conversión 96%; eliminación eficiente de H ₂ O ₂

Fuente: Elaboración propia.

La distribución geográfica de los estudios recopilados en esta revisión sistemática muestra una fuerte concentración de investigaciones en Asia, que representa el 53,3 % del total, con China, Turquía, Corea del Sur, Indonesia, Bangladesh, Iraq, Arabia Saudita y Tailandia contribuyendo de manera significativa. Esta predominancia refleja el interés de la región por el estudio de enzimas antioxidantes como catalasas, superóxido dismutasas y glutación peroxidasas, aplicadas en contextos biotecnológicos e industriales diversos. La región Europea aporta el 20 % de los estudios, con Polonia, Bulgaria, Países Bajos, Eslovaquia y España, mientras que América del Sur y África representan cada una un 10 %, con publicaciones de Brasil, Colombia y Egipto, respectivamente; América del Norte suma un 6,7 %, con investigaciones de México y Estados Unidos (Figura 2).

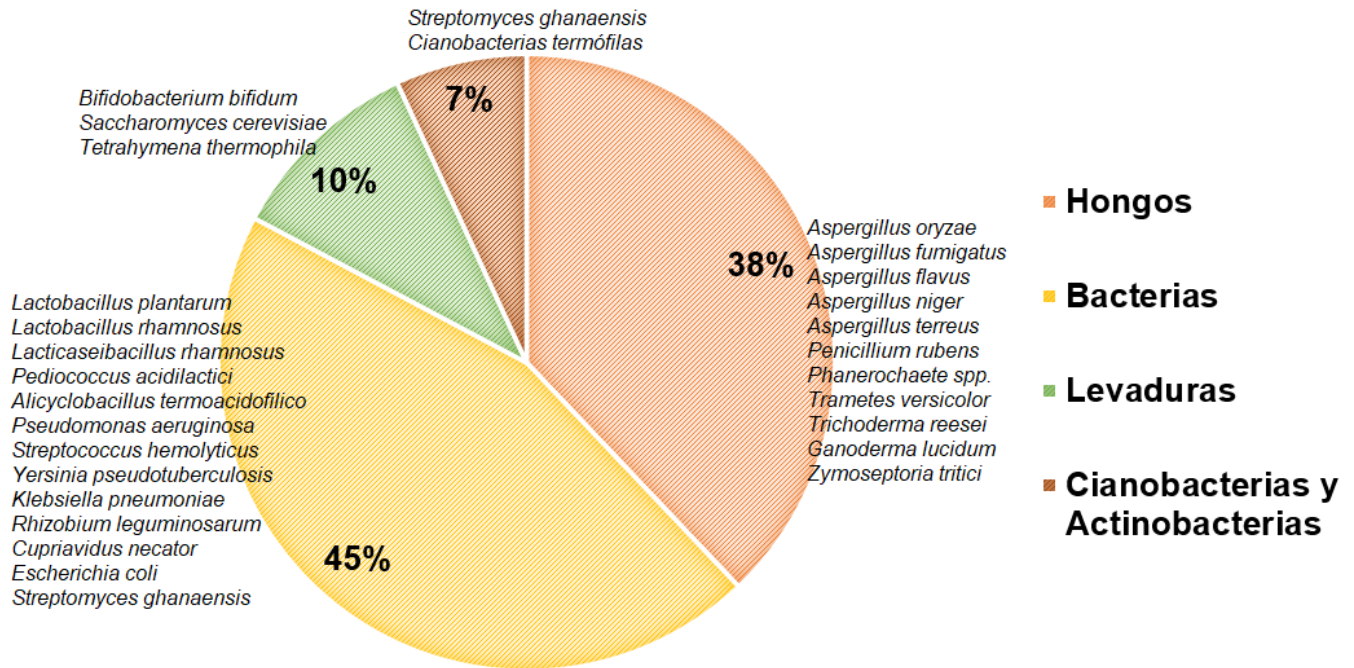


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Distribución geográfica de los artículos seleccionados.

En Colombia, la investigación sobre la obtención de enzimas con propiedades antioxidantes producidas por bacterias y hongos aún es limitada lo que evidencia la necesidad de fortalecer el estudio en este campo. En síntesis, la cobertura geográfica mundial ha demostrado una interesante variedad geográfica, aunque con un sesgo hacia asiáticos y algunos países europeos/africanos con mayor capacidad científica, subrayando la importancia de incentivar la cooperación internacional y de promover investigaciones en regiones que se encuentran poco representadas, para así avanzar en el desarrollo y aplicación de enzimas antioxidantes de forma más equilibrada y global.

En la figura 3 se muestra la distribución porcentual de los tipos de microorganismos reportados en los estudios analizados. Se evidencia, que los hongos son el grupo más representado, con un 36,7% del total, lo que evidencia su relevancia en la producción de enzimas y metabolitos antioxidantes; dentro de este grupo destacan géneros como *Aspergillus*, *Ganoderma*, *Trametes*, *Trichoderma*, *Phanerochaete* y *Penicillium*, reconocidos por su capacidad de generar complejos enzimáticos y metabolitos antioxidantes frente a estrés oxidativo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Diversidad microbiana asociada a la biorremediación de organoclorados identificados en la literatura revisada.

Las bacterias constituyen un 52% de los microorganismos reportados, incluyendo géneros como *Lactobacillus*, *Alicyclobacillus*, *Pediococcus*, *Pseudomonas*, *Streptococcus*, *Yersinia*, *Klebsiella*, *Rhizobium*, *Cupriavidus*, y *Bifidobacterium bifidum*, que han sido empleadas tanto en expresión recombinante como en biocatálisis, demostrando alta actividad antioxidante y tolerancia frente a radicales libres y estrés oxidativo.

Los hongos, incluyendo levaduras, representan un 48%, con especies como *Saccharomyces cerevisiae* y *Tetrahymena thermophila*, utilizadas en estudios de expresión enzimática y regulación de estrés oxidativo intracelular.

Estos resultados reflejan la amplia diversidad microbiana involucrada en la producción de compuestos antioxidantes y subrayan la importancia de enfoques multiespecíficos, donde hongos, bacterias, levaduras y cianobacterias interactúen de manera complementaria para maximizar la actividad antioxidante y la estabilidad frente al estrés oxidativo en sistemas biológicos.

3.1. Caracterización de las proteínas con actividad antioxidante producidas por bacterias y hongos:

Los estudios analizados muestran que las bacterias y los hongos producen un amplio espectro de proteínas con actividad antioxidante que varían tanto en estructura como en mecanismos de acción; entre estas, las catalasas, superóxido dismutasas (SOD) y glutatión peroxidasas (GPx) constituyen las enzimas antioxidantes más estudiadas, mientras que ciertos péptidos microbianos y proteínas no

enzimáticas desempeñan un papel complementario en la neutralización de especies reactivas de oxígeno (Ağgez & Yüzügüllü Karakuş, 2022; Cubas-Gaona et al., 2020; Najmuldeen et al., 2019).

La catalasa de *Aspergillus fumigatus*, por ejemplo, presenta un peso molecular cercano a 70 kDa y muestra alta estabilidad frente a variaciones de pH y temperatura, lo que permite su funcionamiento eficiente en diferentes condiciones industriales (Ağgez & Yüzügüllü Karakuş, 2022), resultados similares fueron observados en catalasas bacterianas como las de *Serratia* spp., que además conservaron actividad significativa incluso en medios ácidos y a bajas temperaturas (Czyzewska & Trusek, 2018). En el mismo aspecto, Yingqi et al. (2023) encontraron que la actividad de catalasas de *Aspergillus niger* y *Streptococcus hemolyticus* difiere según factores como temperatura, pH y presencia de iones metálicos, lo que evidencia la diversidad funcional de estas enzimas. Ya anteriormente, Wu et al. (2018) habían mostrado que la coexpresión de l-glutamato oxidasa y catalasa en *Escherichia coli* optimiza la biocatálisis y la eliminación de H₂O₂, destacando la importancia de la regulación de proporciones enzimáticas para maximizar la eficiencia antioxidante en sistemas biotecnológicos.

En cuanto a la SOD se ha evidenciado su producción por bacterias como *Klebsiella pneumoniae* y *Cupriavidus necator*, donde distintas isoenzimas contribuyen no solo a la resistencia al estrés oxidativo, sino también a la morfología celular, la formación de biopelículas y la eficiencia de crecimiento en sistemas bioelectroquímicos (Najmuldeen et al., 2019; Chen et al., 2023).

La glutatión peroxidasa (GPx) se ha evidenciado en protozoos como *Tetrahymena thermophila* y bacterias como *Rhizobium leguminosarum* con un mecanismo de acción distinto, ya que reducen peróxidos orgánicos y H₂O₂ mediante el oxidante glutatión, regulando la homeostasis redox celular. Además, entre estos microorganismos se evidencian isoformas de GPx que se expresan de manera diferencial frente a metales, agentes oxidantes y durante la simbiosis, lo que indica adaptaciones específicas y roles funcionales diferenciados dentro del mismo organismo (Cubas-Gaona et al., 2020; Hu et al., 2021),

Por otro lado, los péptidos antioxidantes microbianos generados durante la fermentación de subproductos agroindustriales, como soja, trigo o bagazo de caña de azúcar, han mostrado capacidad significativa para capturar radicales libres, además de actividad antimicrobiana en algunos casos (Ramadan et al., 2023; Michalak et al., 2023); la combinación de enzimas antioxidantes y péptidos no enzimáticos sugiere un sistema sinérgico que mejora la protección celular frente al estrés oxidativo, donde las enzimas eliminan especies reactivas de manera catalítica y los péptidos actúan como captadores directos de radicales (Colla et al., 2023; Abdel-Aty et al., 2022).

La Tabla 4 a continuación, presenta una síntesis de las principales propiedades evaluadas de las proteínas con actividad antioxidante producidas por bacterias y hongos, incluyendo características estructurales, tipo de proteína (enzimática o no enzimática) y mecanismos moleculares de acción; esta matriz resalta similitudes y diferencias en estabilidad de las moléculas antioxidantes frente a pH y temperatura, su afinidad por el sustrato, presencia de isoformas y eficacia antioxidante. De esta forma se facilita la identificación de tendencias generales en la funcionalidad de estas proteínas, así como de características específicas que podrían ser explotadas en aplicaciones biotecnológicas, alimentarias e industriales.

Tabla 4. Matriz de propiedades evaluadas de las proteínas antioxidantes.

No.	Proteína / Microorganismo	Caracterización	Propiedades evaluadas	Hallazgos relevantes	Referencia
1	Complejo enzimático de <i>Aspergillus oryzae</i> DIA-MF	Mezcla de enzimas transfructosilasa e hidrolasa; caracterización SDS-PAGE y HPLC	Actividad antioxidante y prebiótica	Mejoró el perfil de fructooligosacáridos y fortaleció las propiedades antioxidantes del aguamiel	Picazo et al., 2019
2	Prx1 de <i>Aspergillus fumigatus</i>	Peroxirredoxina 1-Cys citosólica; expresión recombinante	Detoxificación de H ₂ O ₂ ; mantenimiento del equilibrio redox	Esencial para la supervivencia frente al estrés oxidativo y clave en la virulencia del hongo	Rocha et al., 2018
3	SOD y catalasas recombinantes de <i>Bifidobacterium bifidum</i> BGN4-SK	Proteínas recombinantes; expresión génica optimizada	Actividad antioxidante intracelular; supresión de ROS y citocinas proinflamatorias	Mejoró la capacidad antioxidante y redujo la inflamación en células humanas y murinas	Lin et al., 2021
4	Metabolitos antioxidantes de <i>Phanerochaete spp.</i>	Extractos liofilizados, biomasa seca y acetato de etilo	Actividad antioxidante (ORAC, DPPH); actividad antibacteriana	Presentó alta actividad antioxidante y antibacterial	Mena et al., 2021
5	Catalasa extracelular de <i>Penicillium rubens</i> III11-2	Enzima purificada; actividad específica	Alta actividad antioxidante; estabilidad térmica	Se caracterizó como una catalasa extracelular activa y estable frente a bajas temperaturas	Koleva et al., 2024
6	Péptidos antioxidantes de <i>Pediococcus acidilactici</i> YKP4 y <i>Lactocaseibacillus rhamnosus</i> BD2	Fracción <2 kDa; péptidos derivados de glicinina y β-conglicinina	Actividad antioxidante	Generó péptidos bioactivos con propiedades antioxidantes	Fadlillah et al., 2025
7	Proteínas antioxidantes de <i>Ganoderma lucidum</i> (cuerpos fructíferos)	Hidrolizados proteicos; purificación parcial	Actividad antioxidante (DPPH, ABTS); inhibición α-amilasa; antibacterial	Mostró actividad antioxidante y propiedades antibacterianas	Uddin et al., 2021
8	Extractos de cianobacterias termófilas (G1, G13, K42, 37)	Extractos metanólicos; ensayos de difusión en agar	Actividad antioxidante; actividad antimicrobiana; enzimas celulasa y lipasa	Exhibió actividad antioxidante, antimicrobiana y enzimática	Fataliyeva et al., 2024
9	Metabolitos antioxidantes de <i>Aspergillus flavus</i>	Metabolitos fúngicos; cromatografía capa fina	Actividad antioxidante; antiproliferativa; antibacterial	Mostró actividad antioxidante y propiedades antiproliferativas	Al-doori et al., 2025
10	Proteasas y biopeptidos de <i>Aspergillus niger</i>	Proteínas solubles y proteasas; producción en estado sólido	Actividad antioxidante y enzimática	Producción simultánea de proteasas y biopéptidos con alta actividad antioxidante	Colla et al., 2023
11	Proteínas de <i>Trametes versicolor</i>	Extracto proteico y su hidrolizado; perfil por MALDI-TOF	Actividad antioxidante y antimicrobiana	Exhibió fuerte capacidad antioxidante y actividad antibacteriana	Michalak et al., 2023
12	Proteínas y compuestos fenólicos de <i>Trichoderma reesei</i> en semillas de chía	Enzimas fúngicas asociadas a fenólicos y compuestos fenólicos; optimización por RSM	Actividad antioxidante y enzimática	Incrementó significativamente la actividad antioxidante y mostró propiedades antibacterianas	Abdel-Aty et al., 2022
13	Proteínas de <i>Ganoderma lucidum</i> (micelio y cuerpos fructíferos)	Extractos crudos y purificados; peso molecular ~45 kDa	Actividad antioxidante, antibacteriana y protectora del ADN	Mostró potencial antioxidante, antibacterial y protección del ADN	Sa-Ard et al., 2015
14	Superóxido dismutasa de <i>Alicyclobacillus thermoacidofílica</i>	Proteína recombinante; actividad dependiente de Mn y Fe	Actividad antioxidante, estabilidad térmica y de pH	Enzima muy estable y con potencial como aditivo alimentario y uso médico	Dong et al., 2021
15	Superóxido dismutasa en <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Actividad antioxidante en fase estacionaria; relación con (p)ppGpp	Tolerancia a antibióticos mediada por antioxidantes	La actividad de SOD confiere tolerancia a múltiples antibióticos	Martins et al., 2018
16	Catalasa-peroxidasa de <i>Zyoseptoria tritici</i>	Genes ZtCpx1 y ZtCpx2; expresión intracelular y extracelular	Detoxificación de H ₂ O ₂ y virulencia	Los genes CP regulan la defensa frente al estrés oxidativo del huésped	Mirzadi Gohari et al., 2024

17	Proteínas antioxidantes de fermentación de frambuesa roja	Microbiota fermentada; diversidad bacteriana y fúngica	Actividad antioxidante	La fermentación con cultivos mejoró significativamente la actividad antioxidante	Yao et al., 2021
18	Glutación peroxidasa y glutación S-transferasa de <i>Lactobacillus plantarum</i>	Enzimas purificadas; SDS-PAGE y modelado 3D	Actividad antioxidante y estabilidad térmica/pH	Producción optimizada bajo estrés, con alta actividad y estabilidad	Al-Madboly et al., 2020
19	Catalasa de <i>Aspergillus fumigatus</i>	Enzima purificada (~70 kDa); estabilidad térmica y de pH	Actividad antioxidante y estabilidad	Alta estabilidad frente a pH, temperatura y solventes; potencial industrial	Ağgez & Yüzügüllü Karakuş, 2022
20	Catalasa de <i>Aspergillus niger</i> 1102 y <i>Streptococcus hemolyticus</i> 2107	Comparación enzimática; efecto de pH, temperatura e iones metálicos	Actividad antioxidante	Diferencias en actividad catalítica según especie y condiciones	Yingqi et al., 2023
21	Glutación peroxidasa (GPx) de <i>Tetrahymena thermophila</i>	Análisis filogenético y expresión génica; isoformas múltiples	Actividad antioxidante y respuesta a estrés	Expresión diferencial según estrés oxidativo y metales; diversidad funcional de GPx	Cubas-Gaona et al., 2020
22	Catalasa encapsulada de <i>Serratia</i>	Enzima recombinante encapsulada; actividad en pH ácido y baja temperatura	Actividad antioxidante	Alta actividad antioxidante en medios ácidos y lácteos; reutilizable	Czyzewska & Trusek, 2018
23	Glutación peroxidasa y proteínas Ohr de <i>Yersinia pseudotuberculosis</i>	Sistema de depuración de peróxidos orgánicos; regulación por OxyR	Actividad antioxidante	Gpx es principal depurador de peróxidos; OxyR regula la respuesta antioxidante	Fan et al., 2024
24	Superóxido dismutasa (SOD) en <i>Klebsiella pneumoniae</i>	Isoenzimas SOD; mutantes simples, dobles y triples	Actividad antioxidante y funciones celulares	Isoenzimas muestran roles diferenciados más allá de la protección antioxidante	Najmuldeen et al., 2019
25	Lovastatina producida por <i>Aspergillus terreus</i>	Producción en SSF; evaluación de actividad antioxidante DPPH	Actividad antioxidante y antimicrobiana	La lovastatina mostró actividad antioxidante y antibacteriana; método ecológico de producción	Ramadan et al., 2023
26	Glutación peroxidasa y reductasa de <i>Rhizobium leguminosarum</i>	Mutantes simples y dobles; análisis proteómico	Actividad antioxidante y nodulación	Gpx esencial para resistencia oxidativa y eficiente nodulación; mutantes muestran deficiencias	Hu et al., 2021
27	Superóxido dismutasa exhibida en <i>Cupriavidus necator</i>	SOD expresada en superficie celular; efecto en crecimiento BES	Actividad antioxidante	SOD mejoró crecimiento bacteriano y mitigó estrés oxidativo por ROS	Chen et al., 2023
28	Catalasa (KatG) en <i>E. coli</i> y L-glutamato oxidasa	Biocatálisis en cascada; ajuste de promotores y RBS	Actividad antioxidante y producción de α -KG	Eliminación de H_2O_2 permitió mayor producción de α -KG; estrategia de biocatálisis efectiva	Wu et al., 2018

Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, los hallazgos indican que ambos grupos, tanto las bacterias como los hongos, poseen proteínas antioxidantes con mecanismos conservados, pero con diferencias notables en estabilidad y adaptaciones funcionales, reflejando diferentes estrategias adaptativas frente al estrés oxidativo.

En bacterias, las catalasas y SOD presentan alta resistencia frente a variaciones de pH, temperatura y presencia de solventes orgánicos. Además de una elevada eficiencia catalítica, lo que les permite mantener una rápida descomposición de peróxidos y radicales superóxido incluso en condiciones extremas. Por ejemplo, la catalasa de *Serratia* mostró actividad sostenida en medios ácidos y bajas temperaturas, (Czyzewska & Trusek, 2018).

En hongos, se observa una mayor diversidad de isoformas y adaptaciones frente al estrés oxidativo ambiental (Dong et al., 2021; Mirzadi Gohari et al., 2024); la catalasa de *Aspergillus fumigatus* mostró

alta estabilidad frente a cambios de pH y temperatura, mientras que la fermentación de residuos agroindustriales por *Aspergillus terreus* generó péptidos antioxidantes con actividad antimicrobiana y capacidad de neutralización de radicales libres (Ağgez & Yüzügüllü Karakuş, 2022; Ramadan et al., 2023; Michalak et al., 2023). Por otra parte, estudios en *Tetrahymena thermophila* y *Rhizobium leguminosarum* evidenciaron que distintas isoformas de GPx se expresan de forma diferencial frente a metales, oxidantes y condiciones de simbiosis, sugiriendo adaptaciones específicas que optimizan la defensa antioxidante en distintos entornos celulares (Cubas-Gaona et al., 2020; Hu et al., 2021).

Esta complementariedad funcional entre bacterias y hongos también podría verse reflejada en un potencial de distintas aplicaciones. Por ejemplo, la encapsulación de catalasas bacterianas permite su uso repetido y estable en medios como la leche, mientras que las enzimas y péptidos fúngicos muestran potencial para nutracéuticos y alimentos funcionales debido a sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas combinadas (Czyżewska & Trusek, 2018; Michalak et al., 2023).

La evidencia sugiere que las bacterias y los hongos disponen de un sistema antioxidante complejo y multifactorial, en el que la interacción entre enzimas y péptidos antioxidantes asegura una defensa eficiente frente al estrés oxidativo, con importantes implicaciones para la biotecnología y la industria.

3.2. Potencial antioxidante de distintas proteínas obtenidas de bacterias y hongos:

Los hallazgos de los 28 estudios revisados demuestran que la eficacia de las proteínas antioxidantes obtenidas de hongos y bacterias fue evidente en la mayoría de los estudios, aunque con diferencias marcadas en su estabilidad, eficiencia y adaptabilidad funcional. Entre las proteínas evaluadas, destacan catalasas, con una actividad que varió entre 1250 $\mu\text{M min}^{-1}$ en *Aspergillus fumigatus* (Ağgez & Yüzügüllü Karakuş, 2022) y 513 U/mg en *Penicillium rubens*, esta última manteniendo estabilidad térmica entre 5 - 40 °C y un pH neutro. En *Serratia* spp., las catalasas encapsuladas conservaron su actividad en un pH 4,4–6,6 y temperaturas de 6–15 °C, siendo reutilizables y aptas para aplicaciones alimentarias (Czyżewska & Trusek, 2018). Las catalasas muestran distintos mecanismos de acción, mientras que los péptidos microbianos antioxidantes complementan la defensa celular capturando radicales libres directamente (Ağgez & Yüzügüllü Karakuş, 2022; Cubas-Gaona et al., 2020; Najmuldeen et al., 2019; Fan et al., 2024).

Por otro lado *Cupriavidus necator* con SOD en superficie celular mostró la capacidad de neutralización del radical superóxido en sistemas bioelectroquímicos, incrementando la biomasa y eficiencia de producción de proteína unicelular (Chen et al., 2023) Esta complementariedad funcional también se refleja en la aplicación práctica, ya que la encapsulación de catalasas bacterianas permite su uso repetido y estable en medios como la leche, las cepas recombinantes de *Lactobacillus rhamnosus* coexpresando *sodA* y *katA* alcanzaron 147,8 U/mg de actividad SOD, con una notable resistencia oxidativa en condiciones purificadas. En cambio, en *Klebsiella pneumoniae* se observaron isoenzimas con funciones diferenciadas en la tolerancia al estrés oxidativo y formación de biopelículas (Najmuldeen et al., 2019). Mientras que las enzimas y péptidos fúngicos muestran potencial para nutracéuticos y alimentos funcionales debido a sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas combinadas (Czyżewska & Trusek, 2018; Michalak et al., 2023). En hongos como *Alicyclobacillus thermoacidophilico*, la SOD presentó una actividad 16–25 veces mayor en presencia de Mn^{2+} frente a Fe^{2+} , mostrando además un rango de estabilidad de pH entre 2 y 10 (Mirzadi Gohari et al., 2024).

La comparación entre bacterias y hongos muestra que ambos grupos poseen mecanismos antioxidantes efectivos, los cuales se basan principalmente en la actividad coordinada de catalasas, superóxido dismutasas (SOD) y glutatión peroxidasas (GPx). Las proteínas bacterianas son especialmente resistentes y reutilizables en condiciones extremas, lo que las hace aptas para

aplicaciones industriales y alimentarias (Czyzewska & Trusek, 2018; Ağgez & Yüzügüllü Karakuş, 2022); por su parte, las proteínas y péptidos fúngicos aportan diversidad de isoformas y funciones adaptativas, lo que favorece su potencial en nutracéuticos y alimentos funcionales (Mirzadi Gohari et al., 2024; Ramadan et al., 2023).

Las bacterias destacan por su alta estabilidad catalítica y resistencia ambiental, mientras que los hongos presentan una mayor diversidad estructural y funcional de enzimas antioxidantes.

Una observación clave es la sinergia entre proteínas enzimáticas y péptidos antioxidantes, mientras catalasas, SOD y GPx actúan de manera catalítica sobre especies reactivas de oxígeno, los péptidos antioxidantes actúan como captadores directos de radicales, potenciando la protección celular frente al estrés oxidativo (Colla et al., 2023; Abdel-Aty et al., 2022), esta complementariedad resalta la importancia de evaluar combinaciones de proteínas antioxidantes para aplicaciones biotecnológicas, optimizando su eficiencia y versatilidad funcional.

A continuación, la siguiente tabla resume las propiedades evaluadas de proteínas antioxidantes provenientes de bacterias y hongos, incluyendo microorganismo productor, tipo de proteína, estabilidad frente a pH y temperatura, presencia de isoformas y eficiencia antioxidante; esta matriz permite comparar sistemáticamente los hallazgos y resalta patrones generales y características específicas que podrían explotarse en aplicaciones industriales, alimentarias o farmacológicas.

No.	Proteína	Microorganismo	Eficiencia	Condiciones de producción	Referencia
1	Complejo enzimático (transfructosilasa e hidrolasa)	<i>Aspergillus oryzae</i> DIA-MF	Alta, aumento FOS y actividad antioxidante (34,81–116,46 mg eq Trolox DPPH)	Cinética: 30 °C, 10% fracción enzimática-sustrato, 10 h	Picazo et al., 2019
2	1-Cys peroxirredoxinas (Prx1, PrxB, PrxC)	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Alta actividad catalítica (10^7 M ⁻¹ s ⁻¹)	Citosólica, regulada por SakA HOG1 MAP y Yap1	Rocha et al., 2018
3	Superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT)	<i>Bifidobacterium bifidum</i> BGN4-SK	Mejorada actividad antioxidante intracelular	Medio con 500 µM MnSO ₄ , 30 µM hematina, 24 h	Lin et al., 2021
4	Metabolitos antioxidantes (extracto liofilizado)	<i>Phanerochaete</i> spp.	Moderada, ORAC 36.59 ± 3.53 µM Trolox/g	Variaciones: acetato de etilo, liofilizado, biomasa seca	Mena et al., 2021
5	Catalasa (CAT) extracelular	<i>Penicillium rubens</i> III11-2	Alta actividad específica 513 U/mg	Fluido de cultivo, 5–40 °C, purificación eficiente	Koleva et al., 2024
6	Péptidos antioxidantes <2 kDa	<i>Pediococcus acidilactici</i> YKP4 y <i>Lactocaseibacillus rhamnosus</i> BD2	Alta, IC ₅₀ 471–556 µg/ml	Fermentación leche de soja germinada	Fadlillah et al., 2025
7	Proteínas antioxidantes (extracto metanólico)	<i>Ganoderma lucidum</i>	Moderada, CE ₅₀ 22,14 µg/mL	Extracto metanólico de cuerpos fructíferos	Uddin et al., 2021
8	Enzimas antioxidantes (celulasa, lipasa)	Cianobacterias termófilas	Moderada, CI ₅₀ 0,78 mg/mL	Métodos DPPH y difusión agar, pH 7–8	Fataliyeva et al., 2024
9	Metabolitos antioxidantes	<i>Aspergillus flavus</i>	Alta, bajo CI ₅₀	Cromatografía, bioensayo DPPH	Al-doori et al., 2025
10	Proteasas y biopéptidos	<i>Aspergillus niger</i>	Alta, proteasas 677 U/g, antioxidante 2875,6 mg eq Trolox	SSF en salvado y cáscara de soja, pH 7, 50% humedad	Colla et al., 2023
11	Proteínas antioxidantes y péptidos	<i>Trametes versicolor</i>	Muy alta, casi 100% radical scavenging	Extracto y hidrolizado, DPPH y ABTS	Michalak et al., 2023
12	Compuestos fenólicos antioxidantes y enzimas asociadas	<i>Trichoderma reesei</i>	Muy alta, DPPH y ABTS aumentados 113–150x	SSF semillas de chía, 28 °C, pH 7, 20% humedad, 7 días	Abdel-Aty et al., 2022
13	Proteínas crudas y hidrolizados	<i>Ganoderma lucidum</i>	ABTS++ 2,47–2,77 µg/mL; DPPH+ 2,5–3,42 µg/mL; FRAP 1,73–2,62 µmol Trolox/µg proteína; actividad antibacteriana; protección ADN	Cultivo de micelios y cuerpos fructíferos	Sa-Ard et al., 2015
14	Superóxido dismutasa (SOD)	<i>Alicyclobacillus thermoacidofílico</i>	16–25 veces mayor actividad según cofactor Mn ²⁺ vs Fe ²⁺	Expresada en medio de enriquecimiento con manganeso; temperatura óptima 35°C; pH 2–10	Dong et al., 2021
15	SOD	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Clave en tolerancia a antibióticos en fase estacionaria; restauración de tolerancia con SOD	Estudios genéticos de mutantes ΔrelA spoT	Martins et al., 2018
16	Catalasa-peroxidasa (CP)	<i>Zymoseptoria tritici</i>	ΔZtCpx1: sensibilidad a H ₂ O ₂ y reducción de virulencia; ΔZtCpx2: menor desarrollo de biomasa; mutante doble: efecto sinérgico	Análisis genético y expresión in vitro / infección de trigo	Mirzadi Gohari et al., 2024
17	Enzimas antioxidantes de frambuesa	<i>Microbiota diversa</i> (<i>Rhodococcus</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Kodamaea</i> , <i>Candida</i> spp.)	Mayor actividad antioxidante con fermentación microbiana; correlación con fenoles totales	Fermentación de frambuesa roja, con o sin inoculantes, análisis 16S rRNA/ITS1	Yao et al., 2021

18	Glutación peroxidasa (GPx) y S-transferasa (GST)	<i>Lactobacillus plantarum</i> KU720558	GPx: 612,5 U/mg; GST: 1789,5 U/mg	Diseño Plackett-Burman y Box-Behnken, MRS + estrés (H ₂ O ₂ , etanol, SDS), pH 6, 40°C, 24 h	Al-Madboly et al., 2020
19	Catalasa	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Km = 7,4 mM; Vmax = 1250 μ M min ⁻¹	Cultivo 7 días, 37°C, 155 rpm; pH 7; estable pH 4–9, 30–50°C	Ağgez & Karakuş, 2022
20	Catalasa	<i>Aspergillus niger</i> 1102 / <i>Streptococcus hemolyticus</i> 2107	Comparación actividad según temperatura, pH e iones metálicos	Aislamiento, mutagénesis y pruebas en paralelo	Yingqi et al., 2023
21	Glutación peroxidasa (GPx)	<i>Tetrahymena thermophila</i>	Expresión diferencial según agentes oxidantes, metales y apoptóticos; duplicaciones génicas	Cultivo y análisis qRT-PCR	Cubas-Gaona et al., 2020
22	Catalasa encapsulada	<i>Serratia</i>	Alta actividad pH 4,4–6,6 y 6–15°C; estable en leche; reutilizable	Encapsulación en hidrogel	Czyzewska & Trusek, 2018
23	GPx	<i>Yersinia pseudotuberculosis</i>	Gpx 0,3 mM	Análisis transcriptómico; regulación por OxyR	Fan et al., 2024
24	SOD (isoenzimas)	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Isoenzimas muestran roles diferenciales en estrés oxidativo, biofilms y morfología	Mutantes simples, dobles y triples; evaluación funcional	Najmuldeen et al., 2019
25	Lovastatina (metabolito antioxidante)	<i>Aspergillus terreus</i> AUMC 15760	18,2 mg/g sustrato; CI50 DPPH = 69,536 \pm 5,73 μ M	SSF en bagazo de caña de azúcar, pH 6, 25°C, 70% humedad, 10 días	Ramadan et al., 2023
26	Glutación peroxidasa (Gpx)	<i>Rhizobium leguminosarum</i>	Mutantes GpxA: nodulación \leq 50%; mayor sensibilidad H ₂ O ₂	Mutantes simples y dobles; análisis proteómico TMT	Hu et al., 2021
27	SOD	<i>Cupriavidus necator</i>	Mejora crecimiento en BES 2,7x; producción SCP 0,24 g/L/d	Construcción cepa con SOD en superficie; cultivo BES	Chen et al., 2023
28	Catalasa	<i>Escherichia coli</i> W3110 (KatG)	Optimización α -KG: 106 g/L, 96% conversión	Biocatálisis en cascada con L-glutamato oxidasa; ingeniería promotores y RBS	Wu et al., 2018

Fuente: elaboración propia

En diferentes campos biotecnológicos, la producción y rendimiento de las enzimas antioxidantes microbianas depende de la estabilidad estructural y de las condiciones del entorno de cultivo. Diversos estudios han demostrado que el ajuste de condiciones como pH, temperatura y componentes del medio puede influir significativamente en la actividad catalítica y la eficiencia antioxidante.

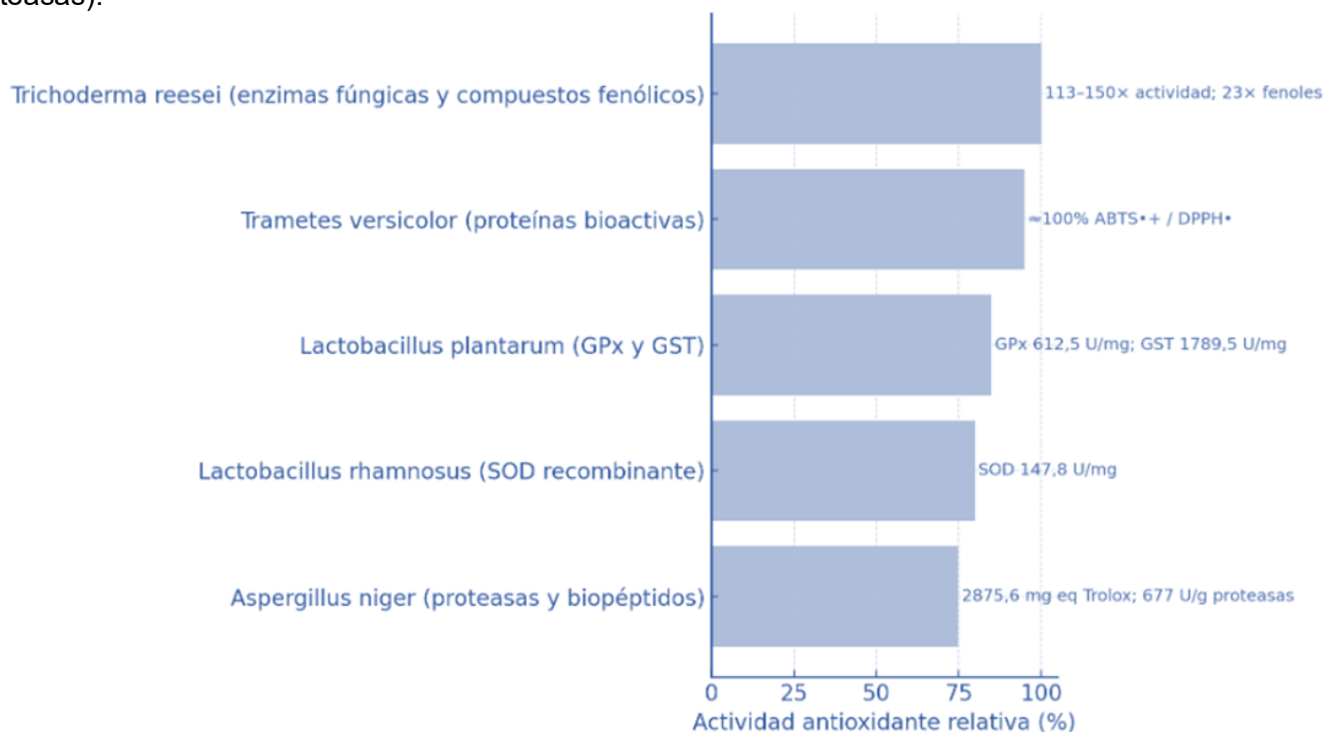
La optimización de las condiciones de cultivo y la ingeniería genética han demostrado aumentar notablemente la actividad antioxidante de las proteínas microbianas. Por ejemplo, *Trichoderma reesei* ante el aumento de pH, temperatura y humedad elevó la actividad antioxidante entre 113 y 150 veces (Abdel-Aty et al., 2022).

Los estudios revisados evidencian además que la ingeniería genética, la selección de isoformas y la optimización de condiciones de cultivo permiten potenciar la actividad antioxidante y la estabilidad de estas proteínas microbianas, facilitando su aplicación biotecnológica en producción de alimentos, bioelectroquímica, biocatálisis y desarrollo farmacéutico (Wu et al., 2018; Fan et al., 2024; Ramadan et al., 2023).

En síntesis, los resultados sugieren que las bacterias y los hongos poseen un arsenal antioxidante multifactorial y complementario; las bacterianas destacan por estabilidad y adaptabilidad a condiciones

extremas, mientras que las fúngicas ofrecen diversidad de isoformas y adaptaciones funcionales, la combinación de ingeniería genética, selección de isoformas y optimización de condiciones de cultivo representa una estrategia efectiva para potenciar la actividad antioxidante, con aplicaciones potenciales en biotecnología, producción de alimentos funcionales y desarrollo farmacéutico (Wu et al., 2018; Fan et al., 2024; Ramadan et al., 2023).

En la figura 5 se presenta un diagrama comparativo de las principales proteínas con mayor potencial antioxidante obtenidas de bacterias y hongos, expresadas en valores normalizados (0–100%). Entre paréntesis se indican los valores originales reportados en la literatura: *Trichoderma reesei* (113–150× de actividad antioxidante; 23× aumento de compuestos fenólicos), *Trametes versicolor* (≈100% de eliminación de radicales ABTS•+ y DPPH•), *Lactobacillus plantarum* (612,5 U/mg GPx; 1789,5 U/mg GST), *Lactobacillus rhamnosus* (147,8 U/mg SOD) y *Aspergillus niger* (2875,6 mg eq Trolox; 677 U/g proteasas).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Actividad antioxidante relativa de las cinco proteínas microbianas más eficientes reportadas en los estudios revisados.

3.3. Aplicaciones biotecnológicas de estas proteínas en distintos campos industriales

Las proteínas antioxidantes producidas por bacterias y hongos muestran un notable potencial para diversas aplicaciones industriales, debido a su capacidad de neutralizar especies reactivas de oxígeno (ROS) y mantener la estabilidad de sistemas biológicos y químicos (Ağgez & Yüzügüllü Karakuş, 2022; Wu et al., 2018).

3.3.1. Industria alimentaria

En la industria alimentaria, las catalasas bacterianas encapsuladas, como las de *Serratia spp.*, permiten la eliminación de H₂O₂ en leche y otros productos lácteos, en condiciones ácidas y bajas temperaturas, lo que favorece su reutilización y prolonga la vida útil de los alimentos (Czyzewska & Trusek, 2018). En otros usos, en alimentos funcionales y nutracéuticos, podrían emplearse los péptidos antioxidantes derivados de hongos, producidos a partir de subproductos agroindustriales como soja, trigo o bagazo de caña de azúcar, (Ramadan et al., 2023; Michalak et al., 2023).

3.3.2. Biocatálisis y producción de compuestos químicos

En biocatálisis y producción de compuestos químicos, como el ácido α -cetoglutarico, cuya producción se optimiza por catalasas de *Escherichia coli* (Wu et al., 2018); de forma similar, Colocar otro ejemplo.

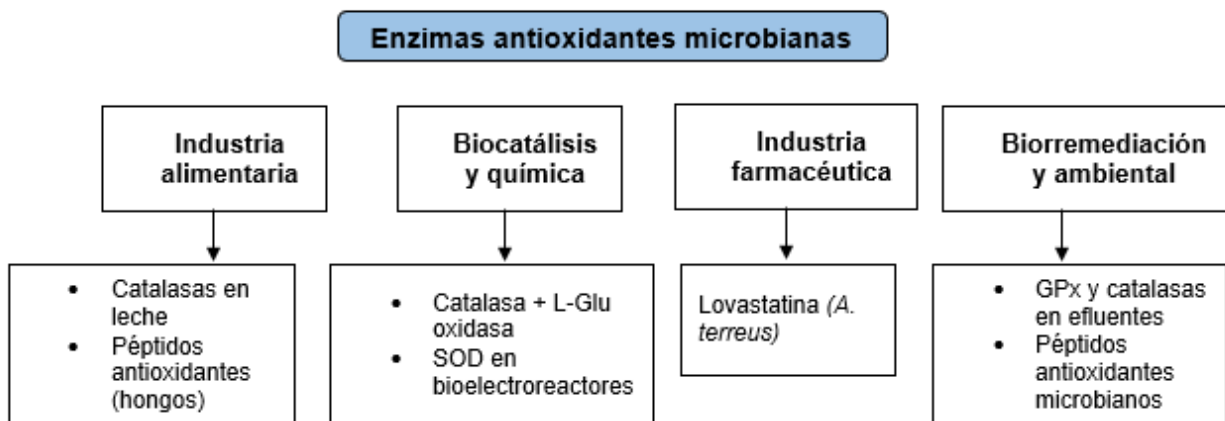
3.3.3. Industria farmacéutica

En el ámbito farmacéutico, enzimas antioxidantes y metabolitos microbianos, como la lovastatina producida por *Aspergillus terreus*, combinan actividad antioxidante y antimicrobiana, lo que indica su potencial en el desarrollo de fármacos o aditivos bioactivos con doble funcionalidad (Ramadan et al., 2023; Abdel-Aty et al., 2022). Del mismo modo, se han identificado otros compuestos de interés farmacéutico, entre ellos la ergotioneína obtenida de *Pleurotus ostreatus* (Novelo et al., 2024), péptidos antioxidantes derivados de *Trametes versicolor* con acción antimicrobiana (Michalak et al., 2023), fenoles asociados a enzimas antioxidantes producidos por *Trichoderma reesei* (Abdel-Aty et al., 2022), y las enzimas glutatión peroxidasa (GPx) y glutatión S-transferasa (GST) sintetizadas por *Lactobacillus plantarum*, que exhiben potencial terapéutico frente al estrés oxidativo (Al-Madboly et al., 2020).

3.3.4. Biorremediación y aplicaciones ambientales

En biorremediación y aplicaciones ambientales, catalasas y glutatión peroxidases microbianas han demostrado eficacia en la degradación de peróxidos y otros compuestos oxidantes en medios acuosos e industriales, gracias a su estabilidad frente a pH, temperatura y solventes orgánicos (Czyzewska & Trusek, 2018; Ağgez & Yüzügüllü Karakuş, 2022), los estudios revisados evidencian que la combinación de enzimas antioxidantes, péptidos microbianos y estrategias de ingeniería genética permite optimizar su estabilidad y actividad, para las aplicaciones de biotecnología ambiental; dada la versatilidad de estas biomoléculas microbianas las posiciona como herramientas estratégicas para procesos industriales sostenibles y de alto valor agregado (Wu et al., 2018; Chen et al., 2023; Ramadan et al., 2023).

A continuación, se puede observar un diagrama de las diferentes aplicaciones biotecnológicas de estas proteínas en distintos campos industriales (figura 6).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Aplicaciones biotecnológicas de estas proteínas en distintos campos industriales

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en la presente revisión permiten concluir que las bacterias y los hongos representan fuentes complementarias y altamente eficientes de proteínas con actividad antioxidante. En este contexto, el análisis comparativo de los treinta estudios revisados permitió establecer que tanto las bacterias como los hongos constituyen fuentes prometedoras de proteínas con actividad antioxidante, con un potencial biotecnológico amplio y diverso, las evidencias muestran que ambos grupos microbianos poseen mecanismos enzimáticos conservados principalmente catalasas, superóxido dismutasas (SOD) y glutatión peroxidasas (GPx), aunque con diferencias notables en su estabilidad, rendimiento y adaptabilidad funcional.

Las bacterias se destacan por producir proteínas altamente estables frente a variaciones de pH, temperatura y solventes orgánicos, lo que las hace particularmente útiles en procesos industriales, alimentarios y farmacéuticos; en especial, las catalasas bacterianas encapsuladas y las SOD recombinantes demostraron un desempeño sobresaliente bajo condiciones extremas, siendo reutilizables y efectivas en sistemas bioelectroquímicos o en la eliminación de peróxidos.

Por su parte, los hongos exhiben una mayor diversidad estructural y funcional de proteínas antioxidantes, con isoformas que se adaptan a diferentes tipos de estrés oxidativo; esta versatilidad permite aprovechar sus enzimas y péptidos antioxidantes en la formulación de alimentos funcionales, productos nutracéuticos y cosméticos naturales, así como en procesos de fermentación sostenible a partir de residuos agroindustriales, su capacidad de producir simultáneamente compuestos con actividad antioxidante, antimicrobiana y protectora del ADN refuerza su potencial multifuncional.

La revisión sistemática evidencia que las proteínas bacterianas ofrecen ventajas en estabilidad y eficiencia catalítica, mientras que las proteínas fúngicas aportan diversidad bioquímica y aplicaciones más amplias en sistemas biológicos complejos, ambas constituyen una base sólida para el desarrollo

de bioproductos naturales con aplicaciones en los sectores alimentario, farmacéutico, ambiental y cosmético; asimismo, resalta la importancia de la ingeniería genética, la optimización de condiciones de cultivo y la combinación de sistemas microbianos mixtos como estrategias efectivas para potenciar la producción y eficacia de estas biomoléculas, estas herramientas biotecnológicas pueden contribuir significativamente a la transición hacia procesos industriales sostenibles y a la reducción del uso de antioxidantes sintéticos con potenciales efectos adversos.

Se concluye que el aprovechamiento racional de las proteínas antioxidantes microbianas, respaldado por investigaciones comparativas y estandarización metodológica, representa una oportunidad estratégica para fortalecer la innovación biotecnológica y el desarrollo sostenible, tanto a nivel nacional como global.

5. Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis padres por su amor, paciencia y palabras de aliento, espero que siempre sepan que todo mi esfuerzo es por y para ellos; a mis amigas por acompañarme en los momentos de cansancio y celebrar conmigo cada pequeño logro, a mi pareja por brindarme su apoyo incondicional, y agradezco especialmente a mi compañera Lizeth Geraldine Muñoz, con quien compartí toda mi carrera y quien siempre estuvo ahí para apoyarme en cada paso, cada bajón y nuevo reto que se nos presentó en el camino, al final sí podíamos con esto.

También doy gracias a mis profesores por sus enseñanzas y por inspirarme a seguir aprendiendo cada día. Agradezco al profesor Jonathan por acompañarme y guiarme en este proceso tan importante, agradezco su paciencia y su comprensión, sé que fue un largo camino y espero que sepa que valoro y aprecio cada momento de su tiempo, muchas gracias.

You never walk alone - BTS.

6. Conflicto de intereses

El autor declara que no existen conflictos de interés en relación con la realización de este estudio.

Referencias

1. Abdel-Aty, A. M., Barakat, A. Z., Bassuiny, R. I., & Mohamed, S. A. (2022). Improved production of antioxidant-phenolic compounds and certain fungal phenolic-associated enzymes under solid-state fermentation of chia seeds with *Trichoderma reesei*: Response surface methodology-based optimization. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(5), 3488–3500. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01447-6>
2. Ağgez, C., & Yüzügüllü Karakuş, Y. O. (2022). Production, purification and characterization of catalase from *Aspergillus fumigatus*. *Open Access Journal of Microbiology & Biotechnology*, 7(4). <https://www.medwinpublishers.com/OAJMB/production-purification-and-characterization-of-catalase-from-aspergillus-fumigatus.pdf>
3. Al-doori, A. A. Y., Hasan, S. W., Yaseen, I. A. M. Y. A. M., Darwish, S. A. H., Alabbasi, A. M. A., & Dheeb, B. I. (2025). Detection of the antioxidant activity of fungi- and bacteria-derived secondary metabolites. *International Journal of Applied Biochemistry and Molecular Biology*, 2(2), 142-161. <https://doi.org/10.21608/ijabmb.2025.411351>
4. Al-Madboly, L. A., Ali, S. M., Fakharany, E. M. E., Ragab, A. E., Khedr, E. G., & Elokely, K. M. (2020). Stress-Based Production, and Characterization of Glutathione Peroxidase and Glutathione S-

Transferase Enzymes From *Lactobacillus plantarum*. *Frontiers In Bioengineering And Biotechnology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00078>

5. Álvarez, C., Restrepo, S., & Cárdenas, M. (2019). Isolation and characterization of soil bacteria with potential antioxidant enzyme activity from Colombian ecosystems. *Journal of Applied Microbiology*, 126(3), 834–845. <https://doi.org/10.1111/jam.14125>
6. Arslan, N. P., Azad, F., Orak, T., Budak-Savas, A., Ortucu, S., Dawar, P., Baltaci, M. O., Ozkan, H., Esim, N., & Taskin, M. (2025). A review on bacteria-derived antioxidant metabolites: their production, purification, characterization, potential applications, and limitations. *Archives Of Pharmacal Research*. <https://doi.org/10.1007/s12272-025-01541-5>
7. Chen, K., Ma, C., Cheng, X., Wang, Y., Guo, K., Wu, R., & Zhu, Z. (2023). Construction of *Cupriavidus necator* displayed with superoxide dismutases for enhanced growth in bioelectrochemical systems. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00655-2>
8. Choubey, S., Varughese, L. R., Kumar, V., Beniwal, V., & Verma, R. (2021). Microbial enzymes and their potential in the treatment of oxidative stress: A review. *Critical Reviews in Microbiology*, 47(2), 190–207. <https://doi.org/10.1080/1040841X.2020.1848272>
9. Colla, L. M., Reinehr, C. O., Manfredini, P. G., Cavanhi, V. A. F., & Costa, J. A. V. (2023). Simultaneous production of proteases and antioxidant biopeptides by solid-state fermentation. *Sustainable Food Technology*, 1(6), 874–885. <https://doi.org/10.1039/D3FB00077J>
10. Cubas-Gaona, L. L., de Francisco, P., Martín-González, A., & Gutiérrez, J. C. (2020). *Tetrahymena* glutathione peroxidase family: A comparative analysis of these antioxidant enzymes and differential gene expression to metals and oxidizing agents. *Microorganisms*, 8(7), 1008. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8071008>
11. Czyzewska, K., & Trusek, A. (2018). Encapsulated catalase from *Serratia* genus for H₂O₂ decomposition in food applications. *Polish Journal of Chemical Technology*, 20(4), 39–43. <https://doi.org/10.2478/pjct-2018-0052>
12. Dong, X., Wang, W., Li, S., Han, H., Lv, P., & Yang, C. (2021). Thermoacidophilic *Alicyclobacillus* superoxide dismutase: Good candidate as additives in food and medicine. *Frontiers in Microbiology*, 12, 577001. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.577001>
13. Fadlillah, H. N., Nuraida, L., Sitanggang, A. B., & Palupi, N. S. (2025). Antioxidant peptides produced by *Pediococcus acidilactici* YKP4 and *Lactocaseibacillus rhamnosus* BD2 in fermented soymilk made from germinated soybeans. *International Journal of Food Science and Technology*, 60(1), vvae002. <https://doi.org/10.1093/ijfood/vvae002>
14. Fan, J., Mo, X., Zhang, H., Xu, L., Yin, J., & Wan, F. (2024). Identification of the organic peroxide scavenging system of *Yersinia pseudotuberculosis* and its regulation by OxyR. *Applied and Environmental Microbiology*, 90(10), e01468–24. <https://doi.org/10.1128/aem.01468-24>
15. Fataliyeva, A., Cankilic, M. Y., & Sariozlu, N. Y. (2024). Investigation of antioxidant, antimicrobial, and enzymatic properties of thermophilic cyanobacteria extracts. *BioTechnology*, 105(4), 311–323. <https://doi.org/10.5114/bta.2024.145253>
16. Gutiérrez-Román, A., Santa Cruz-Carpio, C., Velarde-Vilchez, M., & Nolasco-Cárdenas, O. (2025). Actividad de enzimas antioxidantes de la pulpa madura e inmadura de *Vasconcellea candidans* (A. Gray) A. DC 1864 (Caricaceae). *Agronomía Mesoamericana*. <https://doi.org/10.15517/4m2rxg37>
17. Hu, A., Chen, X., Luo, S., Zou, Q., Xie, J., He, D., ... & Cheng, G. (2021). *Rhizobium leguminosarum* glutathione peroxidase is essential for oxidative stress resistance and efficient nodulation. *Frontiers in Microbiology*, 12, 627562. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.627562>
18. Klinsoda, J., Vötterl, J., Zebeli, Q., & Metzler-Zebeli, B. U. (2019). Lactic Acid Treatment of Cereals and Dietary Phytase Modified Fecal Microbiome Composition Without Affecting Expression of Virulence Factor Genes in Growing Pigs. *Frontiers In Microbiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02345>

19. Koleva, Z., Abrashev, R., Angelova, M., Stoyancheva, G., Spassova, B., Yovchevska, L., & Krumova, E. (2024). A novel extracellular catalase produced by the Antarctic filamentous fungus *Penicillium rubens* III11-2. *Fermentation*, 10(1), 58. <https://doi.org/10.3390/fermentation10010058>
20. Lin, Z., Ku, S., Lim, T., Park, S. Y., Park, M. S., Ji, G. E., & Hwang, K. T. (2021). Antioxidant and anti-inflammatory properties of recombinant *Bifidobacterium bifidum* BGN4 expressing antioxidant enzymes. *Microorganisms*, 9(3), 595. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030595>
21. Liu, Z., Ren, Z., Zhang, J., Chuang, C., Kandaswamy, E., Zhou, T., & Zuo, L. (2018). Role of ROS and Nutritional Antioxidants in Human Diseases. *Frontiers In Physiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00477>
22. Martins, D., McKay, G., Sampathkumar, G., Khakimova, M., English, A. M., & Nguyen, D. (2018). Superoxide dismutase activity confers (p)ppGpp-mediated antibiotic tolerance to stationary-phase *Pseudomonas aeruginosa*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(39), 9797–9802. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804525115>
23. Mena, Y. C., Ramírez, L. S., & Arango, Á. M. (2021). Actividad antibacteriana y antioxidante del hongo *Phanerochaete* spp. *Información Tecnológica*, 32(1), 69-78. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000100069>
24. Michalak, K., Winiarczyk, S., Adaszek, Ł., Kosikowska, U., Andrzejczuk, S., Garbacz, K., ... & Pietras-Ozga, D. (2023). Antioxidant and antimicrobial properties of an extract rich in proteins obtained from *Trametes versicolor*. *Journal of Veterinary Research*, 67(2), 209–217. <https://doi.org/10.2478/jvetres-2023-0036>
25. Mirzadi Gohari, A., Mehrabi, R., Kilaru, S., Schuster, M., Steinberg, G., de Wit, P. P., & Kema, G. H. (2024). Functional characterization of extracellular and intracellular catalase-peroxidases involved in virulence of the fungal wheat pathogen *Zymoseptoria tritici*. *Molecular Plant Pathology*, 25(10), e70009. <https://doi.org/10.1111/mpp.70009>
26. Najmuldeen, H., Alghamdi, R., Alghofaili, F., & Yesilkaya, H. (2019). Functional assessment of microbial superoxide dismutase isozymes suggests a differential role for each isozyme. *Free Radical Biology and Medicine*, 134, 215–228. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2019.01.018>
27. Novelo, M. L., Segura, A. A., Góngora-Huicochea, C., & Catzim-Navarrete, P. R. (2024). Actividad antioxidante de la ergotioneína de los hongos comestibles. *AvaCient*, 4(2), 134–145. <https://doi.org/10.69823/avacient.v4n2a17>
28. Orduz, S., Gutiérrez, J. L., & Hoyos, R. (2020). Native fungi from Andean soils with potential biotechnological applications: Antioxidant and enzyme activities. *Mycological Progress*, 19(2), 211–223. <https://doi.org/10.1007/s11557-020-01565-7>
29. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). Actualización de la guía para la presentación de informes de revisiones sistemáticas: desarrollo de la declaración PRISMA 2020. *Revista de Epidemiología Clínica*, 134, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2021.02.003>
30. Patel, A., Shah, N., & Parmar, V. (2023). *Microbial antioxidants: Sources, mechanisms, and potential applications*. *Journal of Applied Microbiology*, 134(5), 1–15. <https://doi.org/10.1093/jam/mxad012>
31. Picazo, B., Flores-Gallegos, A. C., Iliina, A., Rodríguez-Jasso, R. M., & Aguilar, C. N. (2019). Production of an enzymatic extract from *Aspergillus oryzae* DIA-MF to improve the fructooligosaccharides profile of aguamiel. *Frontiers in Nutrition*, 6, 15. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00015>
32. Ramadan, A. M., Shehata, R. M., El-Sheikh, H. H., Ameen, F., Stephenson, S. L., Zidan, S. A., & Al-Bedak, O. A. (2023). Exploitation of sugarcane bagasse and environmentally sustainable production, purification, characterization, and application of lovastatin by *Aspergillus terreus* AUMC 15760 under solid-state conditions. *Molecules*, 28(10), 4048. <https://doi.org/10.3390/molecules28104048>
33. Ramírez-Castrillón, M., López, D., & Valencia, C. (2021). Antioxidant potential of microbial isolates from tropical environments in Colombia. *Biotechnology Reports*, 31, e00672.

<https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00672>

34. Rocha, M. C., de Godoy, K. F., Bannitz-Fernandes, R., Fabri, J. H. M., Barbosa, M. M. F., de Castro, P. A., Almeida, F., Goldman, G. H., da Cunha, A. F., Netto, L. E. S., & Malavazi, I. (2018). Analyses of the three 1-Cys peroxiredoxins from *Aspergillus fumigatus* reveal that cytosolic Prx1 is central to H₂O₂ metabolism and virulence. *Scientific Reports*, 8, 12314. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30108-2>
35. Sa-Ard, P., Sarnthima, R., Khammuang, S., & Kanchanarach, W. (2015). Antioxidant, antibacterial and DNA protective activities of protein extracts from *Ganoderma lucidum*. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5), 2966–2973. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1343-5>
36. Salazar, A. C., Orcid, & De Tesis, D. (2025, 24 marzo). *Efecto antimicrobiano in vitro de extracto antociánico de cáscara de uva contra bacterias fitopatógenas*. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/11654>
37. Sharma, P., & Singh, R. (2021). *Microbial-derived bioactive compounds as novel antioxidants: A review on therapeutic and industrial applications*. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41(7), 1005–1022. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1866598>
38. Uddin, M. M. P., Islam, M. S., Haque, S., Akther, L., & Pervin, R. (2021). Free radical scavenging, enzyme inhibitory and anti-*Staphylococcus aureus* properties of the fruiting bodies of *Ganoderma lucidum*, Lingzhi mushroom. *Pharmacology & Pharmacy*, 12(3), 73-84. <https://doi.org/10.4236/pp.2021.123007>
39. Vázquez-Ovando, A., Mejía-Reyes, J. D., García-Cabrera, K. E., & Velázquez-Ovalle, G. (2022). Capacidad antioxidante: conceptos, métodos de cuantificación y su aplicación en la caracterización de frutos tropicales y productos derivados. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 9(1), 9-33. <https://doi.org/10.23850/24220582.4023>
40. Wu, J., Fan, X., Liu, J., Luo, Q., Xu, J., & Chen, X. (2018). Promoter engineering of cascade biocatalysis for α-ketoglutaric acid production by co-expressing L-glutamate oxidase and catalase. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(11), 4755–4764. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8967-1>
41. Yao, D., Xu, L., & Wang, C. (2021). Diversity of the microbial community and antioxidant activity during fermentation of red raspberry enzymes. *Food Science & Nutrition*, 9(1), 99–110. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1961>
42. Yingqi, X., Xuechen, L., Yong, S., & Huanmin, L. (2023). A comparative study on the applied enzymatic properties of catalase produced by *Aspergillus niger* 1102 and *Streptococcus hemolyticus* 2107. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, G. Microbiology*, 15(1), 209–215. <https://doi.org/10.21608/eajbsg.2023.303860>
43. Zhang, Y., Li, X., & Wang, H. (2022). *Enzymatic and non-enzymatic microbial antioxidants: Current knowledge and future perspectives*. *Frontiers in Microbiology*, 13, 897654. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.897654>