

Control biológico de fitopatógenos en postcosecha mediante levaduras: Un enfoque sostenible para la protección de frutas y hortalizas. Revisión bibliográfica

2 de febrero de 2026

Paulo Germán García Murillo, <https://orcid.org/0000-0003-4086-0489>

Universidad Santo Tomas, Facultad de Ciencias Ambientales

Resumen

El control biológico mediante levaduras antagonistas representa una alternativa sostenible, eficaz y ambientalmente segura frente a los fungicidas químicos convencionales para la gestión de enfermedades postcosecha en frutas y hortalizas. Las pérdidas postcosecha por enfermedades fúngicas pueden alcanzar hasta el 50% de la producción global, generando importantes impactos económicos y comprometiendo la seguridad alimentaria (Hernandez-Montiel et al., 2021).

Esta revisión bibliográfica examina de manera integral los antecedentes históricos del control biológico con levaduras, los diversos mecanismos de acción que emplean estos microorganismos antagonistas, las sinergias obtenidas mediante su combinación con otras estrategias de manejo integrado, y las perspectivas futuras para su aplicación comercial. Se destacan especialmente los beneficios ambientales, la reducción de residuos químicos en alimentos y las ventajas para la seguridad alimentaria global.

Se hace especial hincapié en los beneficios ambientales, la reducción de residuos químicos en los alimentos y las ventajas para la seguridad alimentaria mundial. Las levaduras antagonistas actúan mediante múltiples mecanismos simultáneos: competencia por espacio y nutrientes esenciales, producción de compuestos antimicrobianos específicos, micoparasitismo directo, formación de biopelículas protectoras e inducción de resistencia sistémica en los tejidos del huésped. A pesar de su potencial demostrado y la disponibilidad de productos comerciales, persisten importantes desafíos en cuanto a la variabilidad de la eficacia en diferentes condiciones, los costos de producción y formulación, y la aceptación del mercado y del consumidor. Los recientes avances en tecnologías OMIC, mejoramiento genético y formulaciones innovadoras prometen superar estas limitaciones y ampliar la aplicación práctica de esta estrategia de biocontrol en los próximos años.

Palabras Claves: control biológico, levaduras antagonistas, fitopatógenos, postcosecha, mecanismos de acción, biopreservación, agricultura sostenible, seguridad alimentaria

Abstract

Biological control using antagonistic yeasts represents a sustainable, effective, and environmentally safe alternative to conventional chemical fungicides for managing postharvest diseases in fruits and vegetables. Postharvest losses due to fungal diseases can reach up to 50% of global production, generating significant economic impacts and compromising food security (Hernandez-Montiel et al., 2021). This bibliographic review comprehensively examines the historical background of biological control with yeasts, the diverse mechanisms of action employed by these antagonistic microorganisms, the synergies obtained through their combination with other integrated management strategies, and future perspectives for their commercial application.

Special emphasis is placed on environmental benefits, reduction of chemical residues in food, and advantages for global food security. Antagonistic yeasts act through multiple simultaneous mechanisms: competition for space and essential nutrients, production of specific antimicrobial compounds, direct mycoparasitism, formation of protective biofilms, and induction of systemic resistance in host tissues. Despite their demonstrated potential and available commercial products, important challenges remain regarding efficacy variability under different conditions, production and formulation costs, and market and consumer acceptance. Recent advances in OMIC technologies, genetic improvement, and innovative formulations promise to overcome these limitations and expand the practical application of this biocontrol strategy in the coming years.

Key words: biological control, antagonistic yeasts, phytopathogens, postharvest, modes of action, biopreservation, sustainable agriculture, food security

Introducción y contexto actual

La producción agrícola mundial enfrenta un desafío crítico en la etapa postcosecha, donde las pérdidas por enfermedades fúngicas representan una amenaza constante para la seguridad alimentaria global. Estudios recientes documentan que estas pérdidas pueden alcanzar hasta el 50% de la producción total en frutas y hortalizas, especialmente en regiones con infraestructura de almacenamiento limitada y condiciones climáticas adversas (Hernandez-Montiel et al., 2021). Esta situación se agrava por la creciente demanda alimentaria global y la necesidad de optimizar cada eslabón de la cadena de suministro.

Problemática actual

Durante décadas, el control de fitopatógenos postcosecha ha dependido casi exclusivamente del uso intensivo de fungicidas sintéticos. Aunque estos productos químicos han demostrado eficacia en la reducción de pérdidas, su aplicación generalizada ha generado consecuencias ambientales y sanitarias preocupantes. Los residuos tóxicos persisten en los alimentos, representando riesgos para la salud de los consumidores. Además, el uso repetido ha favorecido la aparición de cepas resistentes de patógenos, reduciendo progresivamente la efectividad de estos tratamientos (Wisniewski et al., 2007).

Alternativas sostenibles

En respuesta a estas limitaciones, la comunidad científica ha intensificado la búsqueda de alternativas sostenibles y ambientalmente seguras. Las levaduras antagonistas han emergido como una opción particularmente prometedora debido a su eficacia demostrada, su perfil de seguridad favorable y su compatibilidad con sistemas de producción orgánica. Estos microorganismos ofrecen un enfoque multifacético para el control de enfermedades, actuando a través de diversos mecanismos simultáneos que reducen la probabilidad de desarrollo de resistencia en los patógenos objetivo (Di Canito et al., 2021).

La transición hacia sistemas de control biológico responde también a demandas crecientes de los consumidores por alimentos más seguros y producidos mediante métodos respetuosos con el medio ambiente. Las regulaciones cada vez más estrictas sobre residuos de plaguicidas en alimentos, especialmente en mercados internacionales, impulsan a productores y empresas a adoptar tecnologías alternativas. En este contexto, las levaduras antagonistas representan no solo una herramienta técnica eficaz, sino también una respuesta estratégica a las tendencias del mercado y las expectativas sociales sobre producción alimentaria sostenible.

Antecedentes históricos de la investigación en control biológico con levaduras

Décadas de 1970-1980: Primeros estudios

Los fundamentos del control biológico postcosecha se establecieron durante los años 70 y 80, cuando investigadores pioneros comenzaron a explorar el potencial de microorganismos antagonistas. Inicialmente, los esfuerzos se concentraron en hongos filamentosos como *Trichoderma* spp. y bacterias del género *Bacillus*.

Estos primeros trabajos demostraron la viabilidad conceptual del biocontrol, aunque la eficacia variable y las dificultades de formulación limitaron su aplicación comercial inmediata (Wilson y Pusey, 1985).

2000-2010: Primeros productos comerciales

El desarrollo tecnológico permitió la introducción de los primeros productos comerciales basados en levaduras.

Aspire™, formulado con *Candida oleophila*, y Shemer™, basado en *Metschnikowia fructicola*, representaron hitos importantes en la comercialización del biocontrol postcosecha. Estos productos demostraron eficacia en condiciones controladas y obtuvieron aprobaciones regulatorias en diversos países, estableciendo precedentes importantes para el sector (An, 2016).

1

2

Años 1990: Enfoque en levaduras

A partir de la década de 1990, el interés científico se orientó progresivamente hacia las levaduras antagonistas, reconociendo ventajas distintivas: mayor facilidad de cultivo y formulación, mejor adaptación a condiciones de almacenamiento refrigerado, y menor riesgo de producción de metabolitos indeseables. Investigaciones sistemáticas identificaron especies prometedoras y comenzaron a elucidar sus mecanismos de acción fundamentales.

3

4

2010-actualidad: Expansión y optimización

Las últimas décadas han presenciado una expansión significativa en la investigación sobre levaduras antagonistas, incorporando enfoques moleculares, genómicos y biotecnológicos. Sin embargo, persisten retos en eficacia consistente y aceptación comercial generalizada. La variabilidad en el desempeño bajo diferentes condiciones de campo, los costos relativamente elevados comparados con fungicidas convencionales, y la necesidad de educación del mercado continúan limitando la adopción más amplia de estas tecnologías (Droby et al., 2009).

Diversidad y características de levaduras antagonistas

El universo de levaduras con propiedades antagonistas es notablemente diverso, abarcando múltiples géneros y especies con características distintivas que las hacen particularmente aptas para el control biológico postcosecha. Esta diversidad natural proporciona un rico repertorio de opciones para diferentes cultivos, patógenos y condiciones ambientales, permitiendo estrategias de biocontrol personalizadas y adaptadas a necesidades específicas.



Saccharomyces cerevisiae

Esta levadura, ampliamente conocida por sus aplicaciones en fermentación alimentaria, exhibe también notables propiedades antagonistas. Su estatus GRAS (Generally Recognized As Safe) facilita su aceptación regulatoria y comercial. *S. cerevisiae* actúa principalmente mediante competencia por nutrientes y producción de etanol y otros metabolitos inhibitorios, siendo particularmente efectiva contra patógenos como *Penicillium* spp. y *Rhizopus stolonifer* (Di Canito et al., 2021).



Candida oleophila

Base del producto comercial Aspire™, esta especie se caracteriza por su excelente capacidad de colonización de heridas en frutas y su resistencia a bajas temperaturas de almacenamiento. *C. oleophila* produce enzimas líticas que degradan las paredes celulares fúngicas y compite agresivamente por nutrientes, mostrando eficacia destacada contra *Botrytis cinerea* y *Penicillium expansum* en manzanas y cítricos (PMC, 2024).



Metschnikowia pulcherrima

Reconocida por su producción de pulcherrimina, un compuesto quelante de hierro que limita severamente el crecimiento de hongos patógenos. *M. pulcherrima* coloniza eficientemente superficies de frutas y muestra amplio espectro de acción contra múltiples patógenos. Su presencia natural en ecosistemas frutícolas facilita su integración en sistemas de producción convencionales y orgánicos (Di Canito et al., 2021).



Aureobasidium pullulans

Aunque técnicamente un hongo levaduriforme, *A. pullulans* se incluye frecuentemente en estudios de biocontrol con levaduras debido a sus características morfológicas y ecológicas similares. Destaca por su capacidad de formar biofilms robustos, su resistencia a condiciones de estrés extremo y su producción de enzimas hidrolíticas. Muestra eficacia particular en frutas de hueso y cítricos (PMC, 2024).

"La adaptabilidad excepcional de las levaduras antagonistas a condiciones postcosecha —incluyendo resistencia a estrés por frío, bajo contenido de humedad y limitación nutricional— las distingue como agentes de biocontrol superiores frente a otros microorganismos."

Estas levaduras comparten características fundamentales que explican su éxito como agentes de biocontrol: capacidad de crecimiento rápido en condiciones limitantes, estabilidad genética que asegura consistencia en el desempeño, y orígenes naturales en superficies de frutas, suelos y ambientes diversos que las predisponen a competir efectivamente con patógenos en ecosistemas postcosecha (Bastiaanse, 2013; Vero et al., 2013).

Mecanismos de acción principales de las levaduras antagonistas

La eficacia del control biológico con levaduras se fundamenta en la acción simultánea de múltiples mecanismos complementarios, creando un sistema de defensa multifacético que dificulta el establecimiento y desarrollo de patógenos. Esta multiplicidad de estrategias representa una ventaja significativa frente a fungicidas químicos de acción única, reduciendo dramáticamente la probabilidad de que los patógenos desarrollen resistencia.

01

Competencia por espacio y nutrientes

Mecanismo fundamental donde las levaduras colonizan rápidamente heridas y superficies de frutas, estableciendo poblaciones densas que físicamente excluyen a los patógenos de sitios potenciales de infección. Esta colonización preventiva consume nutrientes esenciales disponibles en exudados de heridas, particularmente azúcares simples, aminoácidos y vitaminas, limitando severamente los recursos disponibles para el desarrollo de hongos fitopatógenos (Zhang et al., 2025).

02

Producción de compuestos antimicrobianos

Las levaduras antagonistas sintetizan y secretan diversos compuestos con actividad antifúngica directa. Estos incluyen enzimas líticas (quitinasas, glucanasas) que degradan componentes estructurales de las paredes celulares fúngicas, toxinas *killer* que interfieren con procesos celulares vitales de hongos sensibles, y metabolitos volátiles (etanol, acetaldehído, ésteres) que inhiben la germinación de esporas y el crecimiento micelial (Leal Rodrigues et al., 2024).

03

Micoparasitismo directo

Algunas especies de levaduras exhiben comportamiento micoparasítico, atacando activamente estructuras de hongos patógenos. Este proceso involucra reconocimiento quimiotáctico, adhesión a hifas o esporas del patógeno, penetración de las estructuras fúngicas mediante acción enzimática, y consumo del contenido celular. Este mecanismo resulta particularmente efectivo contra patógenos de crecimiento lento (Grzegorzczak et al., 2016).

04

Formación de biofilms protectores

Ciertas levaduras desarrollan biofilms complejos sobre superficies de frutas, creando barreras físicas y químicas que impiden el acceso de patógenos a tejidos susceptibles. Estos biofilms constituyen comunidades microbianas estructuradas con características emergentes superiores a células individuales, incluyendo mayor resistencia a estrés y producción coordinada de metabolitos antimicrobianos (PMC, 2024).

05

Inducción de resistencia sistémica

Mecanismo sofisticado donde las levaduras estimulan las defensas naturales del fruto hospedante, activando cascadas de señalización que resultan en expresión aumentada de genes relacionados con defensa. Esto incluye acumulación de fitoalexinas, proteínas relacionadas con patogénesis, enzimas antioxidantes y fortalecimiento de paredes celulares, confiriendo protección extendida contra múltiples patógenos incluso en sitios distantes del punto de aplicación (Zhang et al., 2025).

Competencia por hierro y otros micronutrientes

Entre los mecanismos de acción de las levaduras antagonistas, la competencia por micronutrientes esenciales, particularmente el hierro, merece atención especial debido a su potencia y especificidad. El hierro, aunque requerido en cantidades mínimas, resulta absolutamente esencial para procesos metabólicos fundamentales en todos los organismos, incluyendo respiración celular, síntesis de ADN y función de numerosas enzimas. Su limitada disponibilidad en ambientes aeróbicos a pH neutro lo convierte en un factor limitante crítico para el crecimiento microbiano.

1

Síntesis de sideróforos

Las levaduras antagonistas producen sideróforos, moléculas especializadas de bajo peso molecular con afinidad extremadamente alta por iones férricos. Estos compuestos quelan eficientemente el hierro disponible en el ambiente, formando complejos estables que solo pueden ser aprovechados por microorganismos que posean los sistemas de transporte específicos correspondientes.

2

Secuestro selectivo

Los sistemas de captación de sideróforos en levaduras antagonistas funcionan con alta especificidad y eficiencia, permitiéndoles monopolizar el hierro disponible. Los patógenos fúngicos, privados de este micronutriente esencial, experimentan severas limitaciones en su crecimiento y desarrollo, incluso cuando otros nutrientes se encuentran en abundancia.

3

Impacto en patógenos

La estrategia de secuestro de hierro resulta particularmente efectiva contra hongos patógenos de importancia económica como *Botrytis cinerea*, responsable de la podredumbre gris, y diversas especies de *Penicillium* que causan mohos en frutas cítricas y de pepita. Estos patógenos muestran alta sensibilidad a la privación de hierro durante etapas críticas de su ciclo de vida (Zhang et al., 2025).

Nota importante: La producción de sideróforos no se limita al hierro. Algunas levaduras antagonistas también compiten efectivamente por otros micronutrientes esenciales como zinc, manganeso y cobre, ampliando el espectro de su actividad antagonista y aumentando la presión selectiva sobre poblaciones de patógenos.

Producción de enzimas hidrolíticas y toxinas *killer*

Las levaduras antagonistas han evolucionado arsenales bioquímicos sofisticados que incluyen diversas enzimas hidrolíticas y toxinas proteicas con actividad antifúngica específica. Estos sistemas representan mecanismos de ataque directo contra estructuras y procesos vitales de hongos patógenos, complementando estrategias de competencia y exclusión.

Enzimas líticas

Las quitinasas, glucanasas y proteasas secretadas por levaduras antagonistas degradan selectivamente componentes estructurales de las paredes celulares fúngicas. La quitina y los β -glucanos constituyen elementos fundamentales que proporcionan integridad estructural a las células fúngicas. Su hidrólisis enzimática compromete la estabilidad celular, causando lisis osmótica y muerte del patógeno.

La producción de estas enzimas frecuentemente se regula en respuesta a la presencia de hongos patógenos, mediante sistemas de detección molecular que reconocen fragmentos de pared celular fúngica. Esta regulación permite una respuesta antagonista calibrada y eficiente en energía (Leal Rodrigues et al., 2024).

Toxinas *killer*

Las toxinas *killer* representan proteínas o glicoproteínas secretadas que exhiben actividad letal específica contra hongos sensibles, sin afectar a la levadura productora ni a tejidos vegetales del hospedante. Estas toxinas típicamente interfieren con funciones de membrana celular, creando canales iónicos o alterando gradientes electroquímicos esenciales.

El sistema *killer*-sensible presenta alta especificidad, determinada genéticamente tanto en la cepa productora como en el organismo objetivo. Esta especificidad permite el uso dirigido de cepas de levaduras con perfiles *killer* complementarios para ampliar el espectro de control, sin comprometer la seguridad alimentaria ni la viabilidad de microbiota benéfica (Grzegorzczak et al., 2017).

Ventajas del sistema dual

La combinación de enzimas líticas y toxinas *killer* proporciona un enfoque de ataque múltiple que maximiza la eficacia antagonista. Mientras las enzimas debilitan estructuras protectoras del patógeno, las toxinas pueden penetrar más efectivamente y ejercer su acción letal. Esta sinergia bioquímica explica parcialmente la superior eficacia de ciertas cepas de levaduras en condiciones de campo.

Biofilms y quorum sensing en levaduras

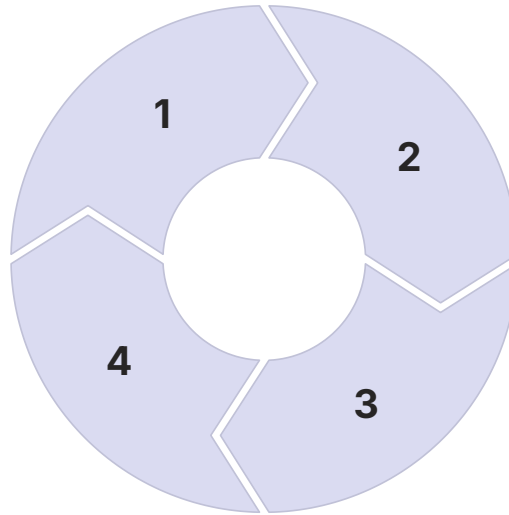
Los biofilms microbianos representan comunidades celulares estructuradas adheridas a superficies, embebidas en matrices de polisacáridos, proteínas y ADN extracelular que las células producen colectivamente. En el contexto del biocontrol postcosecha, la capacidad de levaduras antagonistas para formar biofilms robustos constituye un mecanismo de protección y persistencia de gran relevancia práctica.

Adhesión inicial

Las células de levadura se adhieren a superficies de frutas mediante interacciones físicas y químicas específicas, involucrando adhesinas de superficie celular que reconocen componentes de cutículas y ceras epicuticulares.

Maduración y estabilización

El biofilm maduro desarrolla arquitectura compleja con canales de distribución de nutrientes y gradientes químicos internos, alcanzando estabilidad estructural y funcional que persiste durante el almacenamiento postcosecha.



Proliferación celular

Las células adheridas inician división y crecimiento, formando microcolonias que gradualmente se expanden y fusionan, cubriendo progresivamente la superficie disponible.

Producción de matriz

Las levaduras en biofilm secretan polisacáridos extracelulares y otras macromoléculas que forman una matriz tridimensional, consolidando la estructura del biofilm y proporcionando protección contra estrés ambiental.

Los biofilms de levaduras antagonistas ejercen control de patógenos mediante múltiples vías: bloqueo físico del acceso de esporas de hongos a sitios de infección, mantenimiento de altas concentraciones locales de metabolitos antimicrobianos dentro de la matriz del biofilm, y creación de microambientes desfavorables para el establecimiento de patógenos. Estudios recientes demuestran que células en biofilm exhiben resistencia aumentada a estrés por desecación, temperatura y agentes antimicrobianos comparadas con células planctónicas (PMC, 2024).

Quorum sensing y coordinación social: Las levaduras en biofilm emplean sistemas de comunicación celular conocidos como quorum sensing, donde moléculas señaladoras difusibles coordinan comportamientos colectivos. Estos sistemas regulan la expresión de genes relacionados con formación de biofilm, producción de enzimas extracelulares y adaptación metabólica al ambiente postcosecha, optimizando la respuesta de la comunidad microbiana a condiciones cambiantes.

Inducción de resistencia sistémica en el hospedante

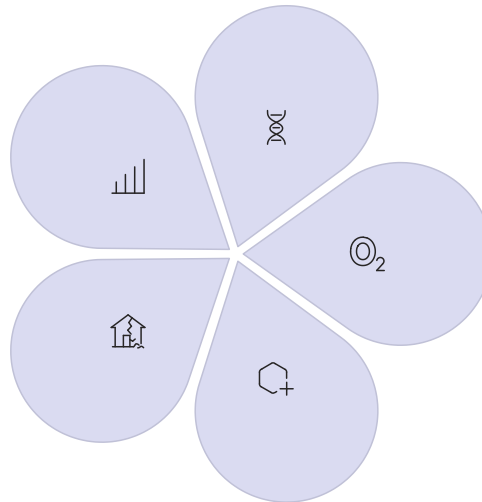
Uno de los mecanismos más sofisticados y menos comprendidos del biocontrol con levaduras involucra la capacidad de estos microorganismos de activar las defensas naturales de los tejidos vegetales del hospedante. Este fenómeno, conocido como resistencia sistémica inducida (ISR, por sus siglas en inglés), amplifica significativamente el efecto protector de las levaduras más allá de su presencia física directa.

Reconocimiento molecular

Los tejidos de frutas reconocen componentes de superficie celular de levaduras (PAMPs, patrones moleculares asociados a microorganismos) a través de receptores específicos, iniciando cascadas de señalización celular.

Fortalecimiento estructural

Deposición aumentada de lignina, calosa y otros polímeros en paredes celulares crea barreras más resistentes a la penetración de patógenos y limita la expansión de infecciones establecidas.



Activación génica

Las vías de señalización activan factores de transcripción que modulan la expresión de centenares de genes relacionados con defensa, metabolismo secundario y remodelación de paredes celulares.

Síntesis de fitoalexinas

Los tejidos inducidos producen fitoalexinas, metabolitos secundarios con actividad antimicrobiana de amplio espectro que inhiben el crecimiento de diversos patógenos fúngicos y bacterianos.

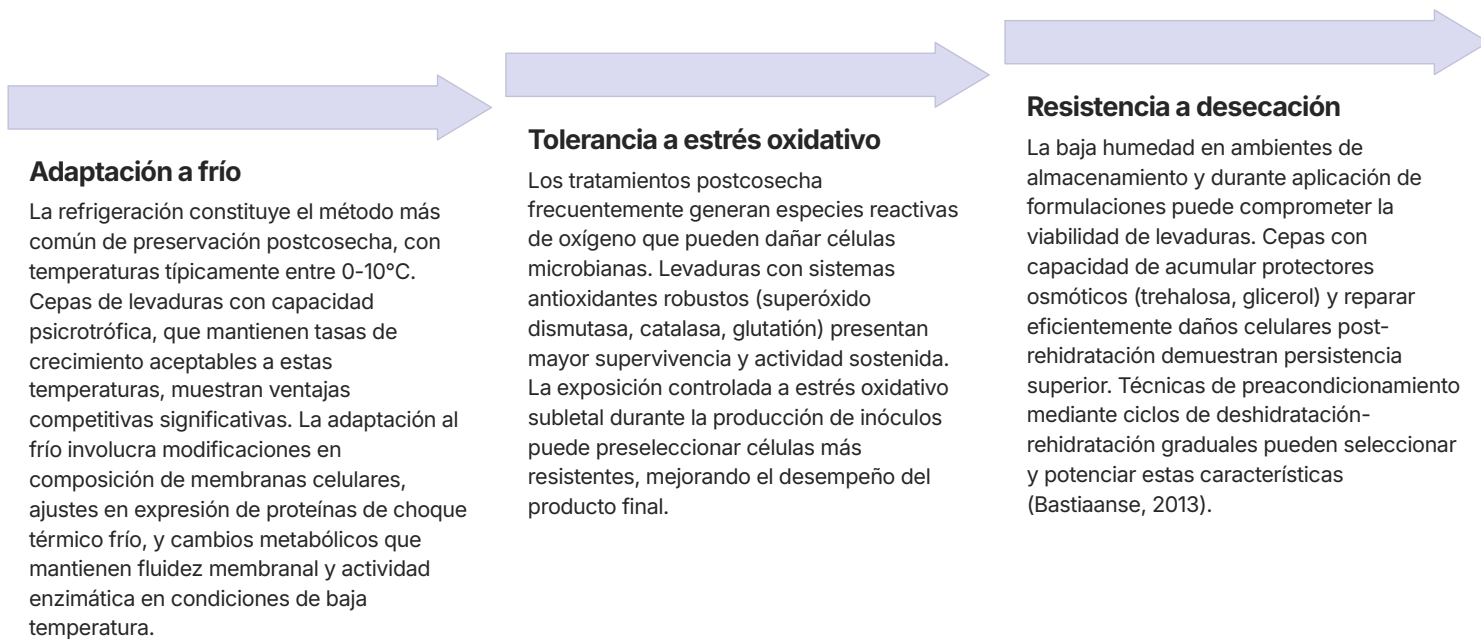
Enzimas de defensa

Aumenta la producción de enzimas antioxidantes (peroxidasas, catalasas), proteínas relacionadas con patogénesis (PR proteins) y enzimas involucradas en modificación de paredes celulares para reforzar barreras físicas.

La resistencia inducida presenta características notables que la distinguen de otros mecanismos de biocontrol: es de naturaleza sistémica, protegiéndose tejidos distantes del sitio de aplicación de la levadura; exhibe cierta memoria inmunológica, persistiendo incluso después de que las poblaciones de levaduras hayan disminuido; y confiere protección de amplio espectro contra múltiples patógenos, no solo aquellos contra los cuales la levadura muestra actividad antagonista directa. Investigaciones recientes empleando técnicas transcriptómicas y metabolómicas han revelado la complejidad de las redes regulatorias involucradas, identificando genes y metabolitos clave en la respuesta de defensa inducida por levaduras (Zhang et al., 2025).

Estrés abiótico y preadaptación para mejorar eficacia

La eficacia práctica de levaduras antagonistas en condiciones comerciales de postcosecha depende críticamente de su capacidad para sobrevivir y mantener actividad bajo condiciones ambientales frecuentemente adversas. El almacenamiento refrigerado, la baja humedad relativa, las variaciones de temperatura durante transporte y distribución, y la limitada disponibilidad de nutrientes en superficies de frutas tratadas representan desafíos significativos para estos agentes de biocontrol.



Adaptación a frío

La refrigeración constituye el método más común de preservación postcosecha, con temperaturas típicamente entre 0-10°C. Cepas de levaduras con capacidad psicrotrófica, que mantienen tasas de crecimiento aceptables a estas temperaturas, muestran ventajas competitivas significativas. La adaptación al frío involucra modificaciones en composición de membranas celulares, ajustes en expresión de proteínas de choque térmico frío, y cambios metabólicos que mantienen fluidez membranaral y actividad enzimática en condiciones de baja temperatura.

Tolerancia a estrés oxidativo

Los tratamientos postcosecha frecuentemente generan especies reactivas de oxígeno que pueden dañar células microbianas. Levaduras con sistemas antioxidantes robustos (superóxido dismutasa, catalasa, glutatión) presentan mayor supervivencia y actividad sostenida. La exposición controlada a estrés oxidativo subletal durante la producción de inóculos puede preseleccionar células más resistentes, mejorando el desempeño del producto final.

Resistencia a desecación

La baja humedad en ambientes de almacenamiento y durante aplicación de formulaciones puede comprometer la viabilidad de levaduras. Cepas con capacidad de acumular protectores osmóticos (trehalosa, glicerol) y reparar eficientemente daños celulares post-rehidratación demuestran persistencia superior. Técnicas de preacondicionamiento mediante ciclos de deshidratación-rehidratación graduales pueden seleccionar y potenciar estas características (Bastiaanse, 2013).

Estrategias de formulación

El desarrollo de formulaciones apropiadas resulta crucial para proteger levaduras durante almacenamiento y aplicación, maximizando su eficacia en campo. Las formulaciones pueden incluir:

- Crioprotectores que preservan viabilidad durante congelación y liofilización
- Matrices de encapsulación que liberan gradualmente células y las protegen de estrés ambiental
- Aditivos nutricionales que facilitan rápida recuperación y colonización tras aplicación
- Agentes humectantes y adherentes que optimizan cobertura y adhesión a superficies de frutas

Preadaptación controlada

La exposición de cultivos de levadura a condiciones de estrés subletal controlado durante la producción comercial puede inducir respuestas de aclimatación que mejoran significativamente el desempeño posterior. Esta preadaptación puede dirigirse específicamente a condiciones anticipadas en la aplicación objetivo, creando inóculos "endurecidos" con tolerancia optimizada.

Combinación con otras medidas de control

El control biológico con levaduras alcanza su máximo potencial cuando se integra estratégicamente con otras medidas de manejo postcosecha, creando sistemas de control integrado que capitalizan sinergias entre diferentes enfoques. Esta integración responde a la realidad práctica de que ninguna medida individual proporciona control absoluto bajo todas las condiciones, y que las combinaciones bien diseñadas frecuentemente superan la suma de efectos individuales.

Tratamientos físicos

Atmósferas controladas y modificadas: La reducción de oxígeno y/o elevación de CO₂ en ambientes de almacenamiento inhibe directamente el crecimiento de patógenos aeróbicos mientras que muchas levaduras antagonistas toleran estas condiciones. La combinación resulta aditiva o sinérgica, reduciendo poblaciones de patógenos mientras las levaduras mantienen colonización protectora.



Refrigeración optimizada: El manejo cuidadoso de temperaturas y su integración con aplicación de levaduras psicrótróficas maximiza la eficacia del biocontrol. Pre-enfriamiento rápido seguido de aplicación de levaduras y mantenimiento de cadena de frío continua representa la mejor práctica integrada.

Radiación UV-C: Tratamientos breves con luz ultravioleta germicida reducen cargas de patógenos en superficies y, en dosis apropiadas, pueden inducir resistencia sistémica en tejidos de frutas, complementando la acción de levaduras sin comprometer significativamente su viabilidad si la aplicación se secuencia apropiadamente (Zhang et al., 2025).

Compuestos químicos en dosis reducidas



La integración de levaduras antagonistas permite reducir dramáticamente las dosis de fungicidas sintéticos, frecuentemente a 25-50% de las tasas convencionales, manteniendo eficacia de control equivalente. Esta reducción minimiza residuos en alimentos, costos de tratamiento e impacto ambiental, mientras que ralentiza el desarrollo de resistencia a fungicidas en poblaciones de patógenos. Los fungicidas deben seleccionarse cuidadosamente para compatibilidad con levaduras, priorizando aquellos con modos de acción sistémicos que afectan mínimamente microorganismos de superficie (PMC, 2024).

Consortios microbianos



La aplicación simultánea o secuencial de múltiples especies de levaduras con características complementarias, o combinaciones de levaduras con bacterias antagonistas seleccionadas, puede ampliar el espectro de control y aumentar la robustez del biocontrol frente a variabilidad ambiental. Los consorcios bien diseñados exhiben funcionalidad emergente superior a la de componentes individuales, aunque requieren validación cuidadosa para asegurar compatibilidad y ausencia de antagonismo entre miembros del consorcio (Hernandez-Montiel et al., 2021).

- **Principios de integración exitosa:** La combinación de medidas debe fundamentarse en comprensión de mecanismos de acción, compatibilidad entre componentes, y secuenciación temporal apropiada. Evaluaciones bajo condiciones realistas de campo son esenciales para validar sinergias anticipadas y optimizar protocolos de aplicación integrada.

Casos de éxito y aplicaciones comerciales

A pesar de los desafíos para la adopción comercial generalizada, diversos productos basados en levaduras antagonistas han alcanzado el mercado y demostrado eficacia en condiciones prácticas de producción y distribución. Estos casos de éxito proporcionan lecciones valiosas sobre factores críticos para comercialización exitosa y áreas que requieren mejora continua.



Shemer™ (*Metschnikowia fructicola*)

Registrado para control de enfermedades postcosecha en frutas cítricas y frutas de hueso, Shemer™ ha demostrado eficacia consistente contra podredumbre verde y azul causadas por *Penicillium digitatum* y *P. italicum* en cítricos. La levadura *M. fructicola* actúa principalmente mediante producción de pulcherrimina y competencia por nutrientes. Estudios de campo documentan reducción de pérdidas de 60-75% en condiciones óptimas de aplicación, con mejor desempeño cuando se aplica inmediatamente tras cosecha en líneas de empaque comerciales (An, 2016).



Candifruit™ (*Candida sake*)

Desarrollado y comercializado principalmente en España, Candifruit™ se utiliza para control de podredumbre en manzanas y uvas durante almacenamiento. *C. sake* exhibe excelente capacidad de colonización de heridas y resistencia a bajas temperaturas, características esenciales para aplicaciones en frutas de clima templado almacenadas en refrigeración prolongada. La eficacia se optimiza mediante aplicación en combinación con buenas prácticas de manejo postcosecha, incluyendo pre-enfriamiento rápido y control de humedad relativa (An, 2016).



Aspire™ (*Candida oleophila*)

Uno de los primeros productos comerciales de biocontrol postcosecha basados en levaduras, Aspire™ obtuvo registro para uso en frutas de pepita y cítricos en Estados Unidos y otros países. Su desarrollo estableció precedentes regulatorios importantes y demostró la viabilidad técnica de producción, formulación y distribución comercial de levaduras antagonistas. Aunque enfrenta desafíos de competencia con fungicidas químicos menos costosos, mantiene nicho en mercados orgánicos y de alta calidad.

60%

25%

15%

Reducción de pérdidas postcosecha

Eficacia promedio documentada en ensayos comerciales con productos basados en levaduras bajo condiciones óptimas de aplicación

Costo adicional estimado

Incremento en costos de tratamiento comparado con fungicidas convencionales, principal barrera para adopción más amplia

Cuota de mercado actual

Estimación de penetración de productos de biocontrol con levaduras en mercado global de tratamientos postcosecha

Las limitaciones actuales que restringen la adopción más amplia incluyen: variabilidad en eficacia bajo diferentes condiciones ambientales y de cultivo, particularmente cuando la presión de enfermedad es muy alta; costos de producción y aplicación superiores a fungicidas sintéticos convencionales, aunque esta diferencia se reduce al considerar beneficios de mercado por producción orgánica o residuos minimizados; necesidades de infraestructura de cadena de frío para productos vivos que requieren refrigeración; y limitaciones en vida útil de formulaciones, especialmente para productos líquidos. La superación de estos retos mediante innovación en formulación, mejora genética de cepas y optimización de protocolos de aplicación constituye prioridad para investigación aplicada en el sector.

Investigación reciente destacada

La literatura científica de los últimos cinco años refleja intensificación notable en la investigación sobre control biológico postcosecha con levaduras, incorporando enfoques moleculares, genómicos y biotecnológicos que están ampliando significativamente nuestra comprensión de mecanismos y mejorando el diseño de estrategias de aplicación.

Manejo de pudrición blanda en tomate



García Murillo (2023) realizó una evaluación exhaustiva de alternativas de manejo para pudrición blanda en tomate, enfermedad que causa pérdidas significativas en postcosecha de esta hortaliza. El estudio comparó diversas especies de levaduras antagonistas, identificando cepas de *Candida* y *Rhodotorula* con eficacia superior contra patógenos bacterianos y fúngicos asociados con esta enfermedad. Los resultados demuestran que la selección apropiada de cepa según el patógeno predominante y las condiciones específicas de almacenamiento resulta crucial para optimizar el control. Este trabajo proporciona recomendaciones prácticas para productores de tomate sobre protocolos de aplicación, dosis y momentos óptimos de tratamiento (García Murillo, 2023).

Metodologías de investigación en biocontrol



Bermúdez Rubio et al. (2021) contribuyeron significativamente a la calidad metodológica de investigaciones en biocontrol al proporcionar guías detalladas para el análisis de resultados, elaboración de conclusiones y formulación de recomendaciones en trabajos de investigación. Este marco metodológico resulta particularmente valioso en el contexto de estudios de biocontrol, donde la variabilidad inherente de sistemas biológicos y la multiplicidad de factores interactuantes requieren análisis estadísticos rigurosos y conclusiones cuidadosamente matizadas. Las recomendaciones enfatizan la importancia de reportar no solo eficacia promedio sino también variabilidad y factores que modulan el desempeño, información esencial para traducción práctica de resultados de investigación (Bermúdez Rubio et al., 2021).

Mejora genética y selección de cepas



Estudios recientes emplean técnicas genómicas y transcriptómicas para identificar genes clave en actividad antagonista, facilitando selección racional de cepas superiores y desarrollo de marcadores moleculares para cribado de alta capacidad. Aproximaciones de evolución dirigida y mutagénesis están siendo exploradas para mejorar características específicas como tolerancia a estrés o producción de metabolitos antimicrobianos, aunque consideraciones regulatorias sobre organismos modificados genéticamente complican la aplicación práctica de estas tecnologías en muchas jurisdicciones.

Formulación y estabilización



Innovaciones en tecnologías de formulación están abordando limitaciones de vida útil y estabilidad. Aproximaciones de encapsulación, liofilización optimizada, y desarrollo de formulaciones de liberación controlada prometen extender vida útil de productos y mejorar consistencia de desempeño. Investigaciones sobre combinaciones de protectores criogénicos y matrices de soporte están identificando formulaciones que mantienen viabilidad superior al 80% después de 12-24 meses de almacenamiento refrigerado.

Perspectivas futuras y retos

El futuro del control biológico postcosecha con levaduras se configura en la intersección de avances científicos, demandas de mercado y marcos regulatorios evolutivos. Múltiples tendencias convergentes sugieren expansión significativa de estas tecnologías en las próximas décadas, aunque retos sustanciales persisten y requieren atención sostenida de investigadores, industria y reguladores.

1

Nivel fundamental: Ciencia básica

Integración de tecnologías OMIC (genómica, transcriptómica, proteómica, metabolómica) está revolucionando nuestra comprensión de mecanismos antagonistas y respuestas de levaduras a estrés ambiental. Estas plataformas permiten identificación de genes y vías metabólicas críticas, facilitando diseño racional de cepas mejoradas y predicción de desempeño bajo condiciones variables (Hernandez-Montiel et al., 2021).

2

Desarrollo tecnológico

Formulaciones de próxima generación incorporarán sistemas de liberación controlada, protección mejorada contra estrés, y posiblemente combinaciones de múltiples cepas o especies en consorcios sinérgicos optimizados. Tecnologías de producción a escala industrial más eficientes reducirán costos y mejorarán consistencia de productos comerciales.

3

Aplicación práctica

Desarrollo de protocolos de aplicación optimizados, adaptados a cultivos específicos y sistemas de manejo particular, maximizará eficacia y retorno de inversión. Sistemas de soporte de decisión basados en datos ambientales y de riesgo de enfermedad guiarán momento y metodología de aplicación para resultados óptimos.

4

Adopción comercial

Expansión en mercados orgánicos y de productos premium, donde consumidores valoran y pagan sobreprecio por atributos de sostenibilidad y seguridad. Regulaciones progresivamente restrictivas sobre residuos de plaguicidas ampliarán mercados potenciales para alternativas biológicas.

5

Impacto sistémico

Contribución a transformación de sistemas alimentarios hacia mayor sostenibilidad, resiliencia y seguridad. Reducción de dependencia en insumos químicos sintéticos y sus impactos ambientales asociados.

Retos científicos y técnicos

- Mejorar consistencia y predictibilidad de eficacia bajo condiciones variables de campo
- Extender espectro de actividad para cubrir más cultivos y patógenos
- Desarrollar formulaciones con vida útil extendida y facilidad de aplicación comparable a fungicidas convencionales
- Reducir costos de producción para competitividad económica

Retos regulatorios y sociales

- Armonizar regulaciones internacionales para facilitar comercio de productos de biocontrol
- Educar a productores y consumidores sobre beneficios y limitaciones realistas
- Desarrollar estándares de calidad y métodos de evaluación específicos para productos vivos
- Abordar percepciones y preocupaciones sobre microorganismos en alimentos

Impacto ambiental y beneficios para la salud

Los beneficios ambientales y de salud pública del control biológico con levaduras trascienden la simple sustitución de fungicidas químicos, representando una contribución significativa a múltiples objetivos de sostenibilidad y bienestar humano. La evaluación integral de estos impactos requiere considerar todo el ciclo de vida de los sistemas de producción y sus externalidades.

Reducción de residuos tóxicos

El uso de levaduras antagonistas elimina o reduce dramáticamente los residuos de fungicidas sintéticos en alimentos. Análisis comparativos demuestran que frutas y hortalizas tratadas con levaduras contienen niveles de residuos de plaguicidas significativamente inferiores a los umbrales regulatorios, frecuentemente por debajo de límites de detección analítica. Esta reducción beneficia directamente a consumidores, particularmente poblaciones vulnerables como niños y mujeres embarazadas que presentan mayor sensibilidad a exposiciones químicas. La minimización de residuos también facilita acceso a mercados internacionales con estándares estrictos, generando beneficios económicos para productores.

Protección de ecosistemas acuáticos y terrestres

Los fungicidas convencionales frecuentemente contaminan aguas superficiales y subterráneas mediante escorrentía y lixiviación, afectando organismos acuáticos no objetivo y potencialmente acumulándose en cadenas alimentarias. Las levaduras, como organismos naturalmente presentes en ecosistemas, no generan esta contaminación persistente. Su aplicación no contribuye a eutrofización, toxicidad acuática ni alteración de comunidades microbianas del suelo, preservando funciones ecosistémicas esenciales y biodiversidad.

Seguridad ocupacional mejorada

Trabajadores agrícolas y de emparadoras enfrentan exposición ocupacional significativa a plaguicidas, asociada con diversos efectos adversos en salud incluyendo irritación dérmica y respiratoria, neurotoxicidad y riesgos carcinogénicos a largo plazo. La sustitución de fungicidas sintéticos por levaduras elimina esencialmente estos riesgos, mejorando condiciones de trabajo y reduciendo costos asociados con equipamiento de protección personal, monitoreo de exposición y atención médica de efectos adversos. Estudios demuestran que trabajadores prefieren manipular productos de biocontrol y reportan mayor satisfacción y percepción de seguridad en el trabajo.

90%

Reducción de residuos químicos

Disminución promedio de residuos de fungicidas en frutas tratadas con levaduras comparadas con tratamientos convencionales

Cero

Toxicidad acuática

Impacto de levaduras en organismos acuáticos, contrastando con efectos significativos de fungicidas sintéticos en ecosistemas acuáticos

50%

Reducción de exposición ocupacional

Disminución estimada en exposición de trabajadores a sustancias tóxicas mediante sustitución de fungicidas por biocontrol

"La adopción de control biológico con levaduras representa un paso fundamental hacia sistemas alimentarios que nutren a las personas mientras protegen el planeta, alineándose con principios de agricultura sostenible y salud pública que reconocen la interconexión entre bienestar humano, salud animal y integridad ambiental."

Conclusiones

Esta revisión bibliográfica exhaustiva sobre el control biológico de fitopatógenos en postcosecha mediante levaduras antagonistas permite establecer conclusiones significativas sobre el estado actual, potencial y limitaciones de esta tecnología prometedora para la gestión sostenible de enfermedades en frutas y hortalizas.

1 Eficacia demostrada y mecanismos multifacéticos

Las levaduras antagonistas constituyen herramientas eficaces para el control de importantes patógenos postcosecha, actuando mediante múltiples mecanismos simultáneos que incluyen competencia por espacio y nutrientes, producción de compuestos antimicrobianos, micoparasitismo, formación de biofilms protectores e inducción de resistencia sistémica en tejidos del hospedante. Esta multiplicidad de mecanismos reduce significativamente la probabilidad de desarrollo de resistencia en patógenos, representando una ventaja fundamental frente a fungicidas de acción única. La literatura revisada documenta consistentemente reducciones de 50-75% en pérdidas postcosecha bajo condiciones optimizadas de aplicación en diversos cultivos.

2 Diversidad y adaptabilidad como fortalezas clave

La amplia diversidad de especies y cepas de levaduras con propiedades antagonistas proporciona un rico repertorio para selección y adaptación a cultivos, patógenos y condiciones específicas. Especies como *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida oleophila*, *Metschnikowia pulcherrima* y *Aureobasidium pullulans* exhiben características complementarias que permiten estrategias de biocontrol personalizadas. La adaptabilidad inherente de levaduras a condiciones de estrés abiótico (frío, desecación, limitación nutricional) características de ambientes postcosecha explica su aptitud superior como agentes de biocontrol en este contexto específico.

3 Sinergias con manejo integrado amplían aplicabilidad

La combinación estratégica de levaduras antagonistas con otras medidas de control físico, químico y biológico genera sinergias que frecuentemente superan efectos aditivos de componentes individuales. La integración con atmósferas controladas, tratamientos térmicos moderados, radiación UV-C y fungicidas sintéticos en dosis reducidas permite optimizar eficacia mientras se minimizan costos e impactos adversos. Esta flexibilidad de integración posiciona las levaduras como componentes versátiles de sistemas de manejo integrado de enfermedades postcosecha.

4 Beneficios ambientales y de salud pública sustanciales

La sustitución de fungicidas sintéticos por levaduras antagonistas genera beneficios ambientales significativos: reducción drástica de residuos tóxicos en alimentos, protección de ecosistemas acuáticos y terrestres, y mejora en seguridad ocupacional de trabajadores agrícolas. Estos beneficios trascienden aspectos puramente técnicos de control de enfermedades, contribuyendo a objetivos más amplios de sostenibilidad agrícola y salud pública. El perfil favorable de seguridad de levaduras facilita su aceptación en sistemas de producción orgánica y por consumidores crecientemente preocupados por residuos de plaguicidas en alimentos.

5 Retos persistentes requieren innovación continua

A pesar del potencial demostrado, la adopción comercial de biocontrol con levaduras enfrenta limitaciones significativas: variabilidad en eficacia bajo condiciones diversas de campo, costos superiores a fungicidas convencionales, necesidades de infraestructura de cadena de frío, y vida útil limitada de formulaciones. La superación de estos retos mediante innovación en mejora genética de cepas, desarrollo de formulaciones estabilizadas, optimización de protocolos de aplicación y educación de mercado constituye requisito esencial para expansión del sector. La integración de tecnologías OMIC, biotecnología avanzada y sistemas de soporte de decisión promete abordar estas limitaciones y potenciar la aplicación práctica.

En síntesis, el control biológico postcosecha con levaduras antagonistas representa una tecnología madura científicamente pero aún en desarrollo comercial, con potencial significativo para contribuir a transformación de sistemas alimentarios hacia mayor sostenibilidad, seguridad y resiliencia. Su éxito futuro dependerá de esfuerzos coordinados de investigación, innovación industrial, políticas de apoyo y educación de usuarios para superar barreras actuales y capitalizar plenamente sus ventajas distintivas.

Referencias bibliográficas

- An, B.** (2016). Development of biocontrol products for postharvest diseases of fruit: The importance of elucidating the mechanisms of action of yeast antagonists. *Postharvest Biology and Technology*. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2016.05.007
- Bastiaanse, H.** (2013). Growth characteristics and biocontrol ability of *Candida oleophila* and other yeast species against *Penicillium expansum* on deciduous fruit. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 34(2), 176-186.
- Bermúdez Rubio, D., Cuenca Rivera, P. E., García Murillo, P. G., Gutiérrez Gómez, G., & Portela Ramírez, A. J.** (2021). Sugerencias para escribir análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones en tesis y trabajos de grado. *CITAS*, 7(1). <https://doi.org/10.15332/24224529.6608>
- Di Canito, A., Allegra, S., Todaro, A., Cardullo, N., Pellicano, T. M., & Alibrandi, P.** (2021). The Role of Yeasts as Biocontrol Agents for Pathogenic Fungi on Postharvest Fruits. *Foods*, 10(7), 1650. <https://doi.org/10.3390/foods10071650>
- Droby, S., Wisniewski, M., Macarasin, D., & Wilson, C.** (2009). Twenty years of postharvest biocontrol research: Is it time for a new paradigm? *Postharvest Biology and Technology*, 52(2), 137-145.
- García Murillo, P. G.** (2023). Alternativas de manejo de la pudrición blanda del tomate mediante el uso de levaduras. *CITAS*, 9(1). <https://doi.org/10.15332/24224529.7395>
- Grzegorzczak, M., Żarowska, B., Restuccia, C., & Cirvilleri, G.** (2016). Postharvest biocontrol ability of killer yeasts against *Monilinia fructigena* and *Monilinia fructicola* on stone fruit. *Food Microbiology*, 61, 93-101.
- Grzegorzczak, M., Żarowska, B., Restuccia, C., & Cirvilleri, G.** (2017). The biocontrol activity of yeast strains against *Penicillium expansum* is correlated with their production of killer toxins. *International Journal of Food Microbiology*, 258, 35-42.
- Hernandez-Montiel, L. G., Gutiérrez-Perez, E. D., Murillo-Amador, B., Vero, S., Chiquito-Contreras, R. G., & Rincon-Enriquez, G.** (2021). A Sustainable Alternative for Postharvest Disease Management and Phytopathogens Biocontrol in Fruit: Antagonistic Yeasts. *Plants*, 10(12), 2641. <https://doi.org/10.3390/plants10122641>
- Leal Rodrigues, M., Gomes, L. C., & Mergulhão, F. J.** (2024). The role of enzymatic activity in yeast biocontrol of postharvest diseases: Recent advances and future perspectives. *Journal of Fungi*, 10(3), 189.
- PMC (PubMed Central).** (2024). Biocontrol mechanisms of antagonistic yeasts against postharvest pathogens. *Multiple sources from PubMed Central database*. National Center for Biotechnology Information.
- Vero, S., Garmendia, G., González, M. B., Bentancur, O., & Wisniewski, M.** (2013). Evaluation of yeasts obtained from Antarctic soil samples as biocontrol agents for the management of postharvest diseases of apple. *FEMS Yeast Research*, 13(2), 189-199.
- Wilson, C. L., & Pusey, P. L.** (1985). Potential for biological control of postharvest plant diseases. *Plant Disease*, 69(5), 375-378.
- Wisniewski, M., Droby, S., Norelli, J., Liu, J., & Schena, L.** (2007). Alternative management technologies for postharvest disease control: The journey from simplicity to complexity. *Postharvest Biology and Technology*, 43(1), 1-8.
- Zhang, H., Wang, L., Dong, Y., Jiang, S., & Zheng, X.** (2025). Mechanisms of action of antagonistic yeasts in the biocontrol of postharvest diseases: Recent molecular insights. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(2), 312-328.
-