



Facultad de Veterinaria
Universidad Zaragoza



Trabajo Fin de

Autor/es

Director/es

Facultad de Veterinaria

Contenido

Resumen.....	2
Abstract	2
1. Introducción	3
2. Justificación y objetivos.....	5
3. Metodología	6
4. Levaduras: Características generales.....	6
5. Valor nutricional y propiedades de las proteínas de levadura	10
6. Producción y obtención de proteínas de levadura.....	12
7. Aplicación de las proteínas de levadura en la Industria Alimentaria	17
8. Aspectos Regulatorios y de Seguridad Alimentaria.....	20
9. Conclusiones.....	22
Conclusions	22
10. Valoración personal.....	24
11. Referencias	25

Resumen

Debido a la demanda mundial de proteínas y el impacto ambiental que se produce con la producción de proteínas de origen animal las levaduras resultan una alternativa prometedora. El objetivo de este trabajo fue realizar una revisión bibliográfica acerca del potencial de las levaduras como una nueva fuente de proteínas. Para ello se realizó una búsqueda bibliográfica de información científica, así como de legislación de aplicación. Las levaduras destacan por su facilidad de cultivo, rápido crecimiento y la facilidad de metabolizar múltiples sustratos. Además, presentan un gran valor nutricional, debido a su alto contenido en proteínas de buena calidad, un perfil de aminoácidos completo y compuestos bioactivos beneficiosos para la salud. Se describen los diversos procesos de producción y obtención de proteínas a partir de levaduras, así como su clasificación entre técnicas tradicionales y emergentes, valorando las diferentes posibilidades y considerando las mejores opciones. Su ámbito de aplicación es bastante amplio, siendo productos de interés en la industria agroalimentaria y en otras industrias. Se analizan los aspectos regulatorios y de seguridad alimentaria de aplicación a nuevas fuentes de proteínas como las levaduras. En conclusión, las levaduras son una opción innovadora como nueva fuente de proteínas y cuyo desarrollo e investigación seguirá en expansión por ser una fuente de interés nutricional y tecnológico.

Abstract

Due to the global demand for proteins and the environmental impact associated with the production of animal-derived proteins, yeasts represent a promising alternative. The aim of this work was to conduct a literature review on the potential of yeasts as a novel protein source. For this purpose, a comprehensive bibliographic search was carried out, including scientific literature and applicable legislation. Yeasts stand out for their ease of cultivation, rapid growth, and ability to metabolize a wide range of substrates. Moreover, they exhibit high nutritional value due to their elevated content of high-quality proteins, a complete amino acid profile, and health-promoting bioactive compounds. This review describes the various processes for the production and extraction of proteins from yeasts, classifying them into conventional and emerging techniques, and evaluating the different possibilities to identify the most suitable options. Their range of applications is broad, making yeast-derived proteins of interest to the agri-food sector and other industries. Regulatory and food safety aspects related to the use of novel protein sources such as yeasts are also discussed. In conclusion, yeasts represent an innovative option as a new protein source, whose development and research are expected to expand further due to their nutritional and technological potential.

1. Introducción

Actualmente, el crecimiento acelerado de la población a nivel mundial ha generado un aumento significativo en la demanda de alimentos, especialmente en los productos ricos en proteínas (Jach et al., 2022). Se estima que en los próximos 30 años la población mundial aumentará en aproximadamente 2 mil millones de personas, pasando de 7,7 mil millones en la actualidad a 9,7 mil millones en 2050, lo que supondrá un desafío adicional para la producción alimentaria (United Nations, 2019).

Ante este escenario, resulta fundamental desarrollar nuevas estrategias que permitan garantizar la seguridad alimentaria, adaptándose a los cambios sociodemográficos y minimizando el impacto ambiental asociado a la producción de proteínas de origen animal.

Según diversas estimaciones, la demanda global de proteínas aumentará entre un 30 y un 40% en los próximos años (Oliveira et al., 2022). Sin embargo, la producción de proteínas de origen animal presenta limitaciones notables, entre ellas, su impacto ambiental, la cantidad de recursos necesarios para su producción y los potenciales riesgos para la salud humana. Numerosos estudios han evidenciado una relación entre el consumo de carne roja o carne procesada con un mayor riesgo de padecer cáncer de colon, de recto, páncreas o de próstata, así como un incremento significativo en el riesgo de padecer muerte prematura por enfermedad cardiovascular o diabetes tipo 2 (Jach et al., 2022). Por estas razones, es necesario buscar fuentes alternativas de proteína que sean más sostenibles y saludables para la población mundial.

En los últimos años, la investigación en fuentes de proteínas alternativas ha cobrado relevancia, destacando aquellas de origen vegetal y microbiano, como opciones viables para reducir el uso de proteína animal (Oliveira et al., 2022). Mientras que las plantas constituyen una fuente nutricionalmente valiosa, su producción requiere grandes extensiones de tierra y elevados volúmenes de agua. Por otro lado, la obtención de proteína animal demanda largos periodos de producción y conlleva altos costos ambientales. Frente a esta problemática, el uso de microorganismos como fuente de proteína ha surgido como una alternativa prometedora, especialmente en el caso de las levaduras (Jach et al., 2022).

Las levaduras constituyen una de las fuentes proteicas emergentes más prometedoras debido a su alto contenido en proteínas, que puede representar entre un 40% y un 60% de su peso seco (Ma et al., 2023). Las levaduras se suelen obtener de cultivos celulares donde se usa como nutriente residuos de la industria alimentaria, de la silvicultura y de la agricultura.

Además, a nivel industrial las levaduras pueden obtenerse como subproductos de diversos procesos fermentativos, como la producción de cerveza y vino, lo que favorece su integración dentro de modelos de economía circular. Este enfoque permite aprovechar subproductos agroindustriales y reducir el desperdicio de recursos, promoviendo una producción alimentaria más eficiente y sostenible. Además, la obtención de proteínas a partir de levaduras no está limitada por factores agrícolas ni ambientales, lo que facilita su escalabilidad y viabilidad en diversas regiones del mundo.

Las proteínas de levadura tienen propiedades funcionales interesantes, como alta solubilidad y capacidad de retención de agua, lo que las hace adecuadas para diversas aplicaciones en la industria alimentaria. Estas proteínas pueden usarse directamente para consumo humano o someterse a procesos adicionales para su posterior uso en aplicaciones alimentarias (Ma et al., 2023). Además, las levaduras contienen un amplio perfil de aminoácidos esenciales, minerales, lípidos y vitaminas que las convierte en una prometedora alternativa de proteínas en la dieta tanto animal como humana.

Estudios recientes destacan que, si bien otros microorganismos como bacterias y hongos también pueden emplearse como fuentes proteicas, las levaduras presentan ventajas significativas. Entre ellas, su mayor tamaño celular facilita su separación y procesamiento, y su composición rica en aminoácidos esenciales, como lisina, triptófano, treonina, metionina y cisteína, entre otras ventajas las convierte en una opción de alto valor biológico (Gervasi et al., 2018).

2. Justificación y objetivos

El creciente desafío de garantizar una producción de alimentos sostenible en un mundo en expansión requiere la exploración de nuevas fuentes de proteínas que puedan sustituir, al menos parcialmente, a las de origen animal. Las levaduras ofrecen una solución viable, no solo por su alto contenido proteico y valor nutricional, sino también por su capacidad de integrarse en estrategias de economía circular. Al aprovechar subproductos industriales como materia prima para su producción, se puede reducir el impacto ambiental asociado a la generación de residuos, promoviendo un modelo de aprovechamiento más eficiente y sostenible.

El objetivo de esta revisión es analizar el potencial de las levaduras como fuente alternativa de proteínas para la industria alimentaria. Se abordarán sus propiedades nutricionales, los métodos de obtención más eficientes y su viabilidad dentro de un modelo de economía circular. Con ello, se pretende contribuir al conocimiento sobre nuevas estrategias para la producción de alimentos sostenibles y resilientes ante los desafíos del futuro.

3. Metodología

Para la realización de este trabajo de revisión bibliográfica se ha hecho una búsqueda exhaustiva sobre este tema con palabras claves tales como “proteínas de levadura”, “yeast”, “protein yeast”, “protein source”, “alternative protein”, “*Saccharomyces cerevisiae*” y “single-cell proteins” reduciendo el intervalo de años de publicación desde el año 2000 al 2025. Se han incluido también algunas obras anteriores a dicho periodo cuando se trata de libros considerados como referencias en el campo.

A partir de esta primera búsqueda, se realizó una lectura preliminar de los documentos recopilados, seleccionando aquellos que presentaban un mayor interés y relevancia para el objetivo del trabajo. Esta primera selección permitió profundizar posteriormente en aspectos específicos, accediendo a nuevas fuentes citadas en los propios artículos y ampliando así la cobertura temática en función de las necesidades del análisis.

Las fuentes bibliográficas consultadas incluyen:

- Google Scholar, motor de búsqueda especializado en literatura científico-académica, que permite acceder a artículos, revistas, tesis y otros documentos académicos.
- PubMed, base de datos bibliográfica desarrollada por el National Center for Biotechnology Information (NCBI), especializada en ciencias de la salud y biomédicas.
- ScienceDirect, plataforma de publicaciones científicas gestionada por Elsevier, que proporciona acceso a artículos y capítulos de libros en múltiples disciplinas, incluyendo salud, química, ingeniería o ciencias sociales.

Para la obtención de información legislativa, se han consultado las plataformas oficiales del Boletín Oficial del Estado (BOE) y EUR-Lex, esta última especializada en el derecho de la Unión Europea.

4. Levaduras: Características generales

Las levaduras pueden definirse como unos hongos unicelulares que crecen mayoritariamente de forma asexual como células individuales en la fase vegetativa antes que por gemación o fisión (Kurtzman et al., 2011). Por otra parte, en función de su reproducción sexual se pueden clasificar como ascomicetos o basidiomicetos (Jach and Serefko, 2018). Las levaduras son microorganismos con una larga historia evolutiva, con evidencias que sugieren su presencia en la Tierra desde hace al menos 2 mil millones de años (Reed & Nagodawithana, 1991). A día de hoy, estas cifras son mucho más altas, ya que desde entonces se han descubierto nuevas especies y los avances en taxonomía han requerido el uso de nuevos criterios para mejorar el sistema de clasificación (Reed & Nagodawithana, 1991).

Desde un punto de vista fisiológico, las levaduras son microorganismos mayoritariamente facultativos anaerobios, con capacidad de alternar entre metabolismo fermentativo o respiratorio dependiendo de la disponibilidad de oxígeno. La capacidad o incapacidad de fermentar carbohidratos a etanol y dióxido de carbono es fundamental para las diferentes especies. Se sabe que *Saccharomyces* presenta una fermentación vigorosa, mientras que géneros como *Rhodotorula* y *Lipomyces* son estrictamente no fermentativos (Phale, 2018). La temperatura óptima de crecimiento oscila entre 20 y 30 °C, y suelen prosperar en medios con pH ácido, generalmente entre 3,5 y 4.

Entre las levaduras más comunes se encuentran especies del género *Saccharomyces*, especialmente *S. cerevisiae*, que destaca por su amplio uso en fermentaciones alimentarias y su aceptación como organismo modelo en biología molecular. Esta especie posee un genoma completamente secuenciado, está clasificada como GRAS (Generally Recognized As Safe) y es ampliamente empleada en la producción de biomasa, enzimas y metabolitos de interés (Jach et al., 2015).

Otras levaduras de interés biotecnológico incluyen especies de los géneros *Kluyveromyces*, *Pichia* y *Yarrowia*. En particular, las especies *K. lactis* y *K. marxianus* se han utilizado para la expresión de proteínas heterólogas, producción de β -galactosidasa (lactasa) y valorización de lactosa en suero lácteo, lo que las hace especialmente útiles en la industria láctea (Barrientos, 2003; Van Ooyen et al., 2006). Además, *K. marxianus* destaca por su termotolerancia y rápida tasa de crecimiento, lo que incrementa su interés. Este género tiene un buen potencial industrial para la producción de proteína unicelular, exopolisacáridos y productos químicos (Kurtzman et al., 2011).

El género *Pichia* incluye a la especie *P. pastoris* es ampliamente utilizada como sistema de expresión para la producción de proteínas recombinantes. Se han expresado más de 200 proteínas heterólogas en esta levadura, y su capacidad para utilizar metanol como fuente de carbono permite su uso en procesos a gran escala, incluso para la producción de proteína unicelular destinada a alimentación animal (Cregg et al., 2000).

La levadura oleaginosa *Yarrowia* destaca por su capacidad de metabolizar lípidos, ácidos grasos de cadena larga y otros compuestos hidrofóbicos, lo que la convierte en una plataforma idónea para la producción de biocombustibles, lípidos de alto valor añadido y enzimas lipolíticas (Fickers et al., 2005; Gellissen et al., 2005). Además, esta especie produce grandes niveles de enzimas lipolíticas de gran utilidad industrial. La levadura se ha caracterizado como fuente de proteína unicelular a partir de sustratos lipídicos, como petróleo e hidrocarburos (Cohen and Ratledge, 2010). Se pueden utilizar materias primas económicas y diversos residuos para la producción de biomasa, proteínas y/o concentrado de aminoácidos a partir de proteínas. Para la producción de biomasa y metabolitos, se han empleado sustratos convencionales como almidón, melaza, frutas y desechos vegetales, así como sustratos no convencionales, incluidos subproductos del petróleo, gas natural, etanol y metanol (Suman et al., 2015).

Las levaduras tienen múltiples aplicaciones en la industria alimentaria, agrícola y química, incluyendo la fermentación de alimentos y bebidas, la producción de piensos, biocombustibles y metabolitos de interés en medicina y biotecnología. Además, su capacidad para crecer en sustratos de desecho las convierte en una alternativa sostenible, contribuyendo a la valorización de residuos agroindustriales y a la reducción del impacto ambiental (Adedayo et al., 2011).

La producción de proteínas no se limita únicamente a las levaduras, otros microorganismos como bacterias y hongos filamentosos también son capaces de producirlas. La tasa de crecimiento de las bacterias suele ser rápida (20-30 minutos) a comparación de las levaduras (2-3 horas) y los hongos y algas (unas 16 horas) (Kuhad et al., 2009). Las bacterias tienen un alto contenido en proteínas, aunque presentan ciertas desventajas, como un alto contenido en ácidos nucleicos, lo que las hace inadecuadas para la alimentación humana. Recientes estudios afirman que el crecimiento de los hongos suele ser más lento que el de las levaduras y las bacterias. Además, los hongos filamentosos tienen un menor contenido en proteína y son deficientes en aminoácidos sulfurados, lo que reduce su digestibilidad en animales monogástricos. Por otro lado, los hongos son una entidad algo desconocida respecto a su seguridad nutricional y toxicológica. Comparado con las bacterias y los hongos, las levaduras presentan un menor

contenido de ácidos nucleicos, mejor tamaño y menor potencial tóxico además de una buena aceptación como fuente de proteína por parte de los consumidores (Kuhad et al., 2009). Su crecimiento es más rápido que el de las plantas o los animales y producen grandes cantidades de biomasa a partir de una cantidad relativamente pequeña de sustratos y en un periodo corto de tiempo (Adedayo et al., 2011).

En la industria alimentaria, las levaduras son fundamentales en la producción de pan, vino y cerveza, actuando como agentes fermentadores en la conversión de azúcares en alcohol y dióxido de carbono. Este proceso es clave para la textura, el sabor y las propiedades de estos alimentos (Reed & Nagodawithana, 1991). Su actividad está atribuida a muchos más alimentos en los que se da una fermentación, como son la sidra, sake, licores destilados, productos de panadería, quesos, embutidos, entre otros (Kurtzman et al., 2011).

Otros procesos industriales en los que las levaduras están involucradas incluyen la producción de etanol como biocombustible, proteína unicelular (SCP), piensos y forrajes, enzimas de uso industrial, entre otros. En algunos casos, también tienen importancia medicinal y nutricional, y pueden actuar como agentes de biocontrol, biorremediación e indicadores de calidad ambiental en agricultura (Kurtzman et al., 2011).

La biomasa de las levaduras, se utiliza ampliamente como fuente de componentes nutricionales, como la proteína unicelular (Ferreira et al., 2010). Esta biomasa de levaduras contiene grasas, carbohidratos, ácidos nucleicos, vitaminas y minerales. Es rica en ciertos aminoácidos esenciales, como la lisina y la metionina, que son limitantes en la mayoría de los alimentos vegetales y animales (Adedayo et al., 2011).

5. Valor nutricional y propiedades de las proteínas de levadura

La proteína es un macronutriente esencial en la dieta humana, indispensable para cubrir las necesidades fisiológicas relacionadas con el crecimiento, la reparación de tejidos y la regulación de procesos metabólicos. Las proteínas son los componentes estructurales y funcionales básicos de cada célula. Son esenciales para el desarrollo y los procesos metabólicos. Desde un punto de vista nutricional, las proteínas son fundamentales por su capacidad de aportar nitrógeno orgánico y aminoácidos esenciales que el organismo no puede sintetizar. Naturalmente, la fuente de proteínas y aminoácidos son materias primas o productos alimenticios. La biomasa proteica de levadura podría contener mayores cantidades de proteína que las obtenidas de las fuentes proteicas tradicionales, como plantas o animales (Jach et al., 2022). El extracto de levadura es rico en aminoácidos, péptidos, vitaminas, minerales, nucleótidos y otros nutrientes que se utilizan ampliamente como agentes aromatizantes de alimentos, aditivos alimentarios y suplementos nutricionales dietéticos (Tao et al., 2022).

El perfil de aminoácidos de la proteína de la levadura contiene altos valores de isoleucina, leucina, lisina, fenilalanina, treonina y valina. Se encuentran por encima de los valores requeridos por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)/Organización Mundial de la Salud (OMS) para la dieta humana. La proteína de levadura también contiene todos los aminoácidos esenciales en la cantidad requerida según la recomendación de la FAO (Millward, 2012). Por lo tanto, la biomasa de levadura proporciona una proteína de buena calidad con un equilibrio saludable de aminoácidos, siendo adecuada para el consumo humano y animal. El valor nutricional de la proteína microbiana está determinado por la composición de aminoácidos, principalmente ocho aminoácidos esenciales exógenos (isoleucina, leucina, lisina, fenilalanina, metionina, treonina, triptófano y valina) que no son sintetizados por los humanos y deben ser aportados a través de la dieta. Además, la biomasa proteica de levadura también es una buena fuente de macroelementos como calcio, fósforo y zinc, y micronutrientes como selenio y cromo. Esos elementos se encuentran en formas orgánicas biodisponibles en la biomasa (Jach and Serefko, 2018; Michalik et al., 2014; Øverland and Skrede, 2017).

Por otra parte, la proteína de levadura contiene buenas cantidades de vitaminas del complejo B, como es la vitamina B12 (Jach and Serefko, 2018). La biotina, el ácido fólico, la piridoxina, la riboflavina, la tiamina y la cianocobalamina, también están presentes y desempeñan importantes funciones catabólicas como coenzimas implicadas en el metabolismo de

carbohidratos, lípidos y proteínas. Por lo tanto, la biomasa proteica de levadura, con su alto contenido proteico y amplio espectro de aminoácidos, muestra beneficios nutricionales muy atractivos como suplemento nutricional para humanos (Adedayo et al., 2011; Jach and Serefko, 2018).

Las proteínas de levadura poseen varias propiedades bioactivas que pueden beneficiar la salud y ser utilizadas en aplicaciones industriales. Se ha demostrado que *Saccharomyces cerevisiae* ejerce efectos beneficiosos debido a su rico contenido en vitaminas (especialmente del complejo B) y minerales, así como a su papel en la producción de proteínas microbianas, β -glucanos y mananos (Jach et al., 2015).

En lo referente a la capacidad antioxidante, cabe destacar el glutatión, un tripéptido formado por tres aminoácidos: glutamato, cisteína y glicina, que se conoce como uno de los antioxidantes más importantes. El glutatión reducido (GSH) puede actuar directamente como antioxidante para proteger las células contra radicales libres y prooxidantes, y como cofactor para enzimas antioxidantes y de desintoxicación como las glutatión peroxidasas, las glutatión S-transferasas y las glioxalidasas (Averill-Bates, 2023).

6. Producción y obtención de proteínas de levadura

Las levaduras poseen habilidades fermentativas que pueden dar lugar a la síntesis de enzimas, biocombustibles, vitaminas, pigmentos, proteínas, entre otros bioproductos con valor añadido (Copetti, 2019; Lemes et al., 2023). A pesar de este potencial, el proceso de fermentación presenta como inconveniente un bajo rendimiento debido al efecto barrera de la pared celular (Alves et al., 2021; Dimopoulos et al., 2021a; Morioka et al., 2019). Para aumentar el rendimiento de extracción de bioproductos, es necesaria la desintegración celular que permita liberar las sustancias intracelulares, aplicando métodos mecánicos, químicos, físicos o combinaciones sinérgicas de estos (Alves et al., 2021; Marson et al., 2020; Vélez-Erazo et al., 2021). Estas técnicas, sin embargo, pueden causar la pérdida de viabilidad celular debido a la ruptura de la pared por exposición a condiciones críticas (Čolnik et al., 2016). Además, la disrupción celular libera todos los componentes intracelulares al medio, lo que complica los procesos de purificación y aumenta los costes (Panesar et al., 2007).

Para evitar estos inconvenientes, la permeabilización celular se propone como una alternativa viable para la obtención de bioproductos. En esta técnica, la estructura de la membrana se modifica mediante agentes externos (químicos o físicos) que forman poros, favoreciendo la difusión de compuestos sin comprometer la integridad estructural ni la actividad enzimática celular (Trawczyńska, 2020; Trawczyńska et al., 2015). En la tabla 1 se recogen algunos de los métodos de extracción más significativos.

Tabla 1. Clasificación de los diferentes métodos de extracción.

Método	Clasificación	Objetivo	Referencia
Homogeneización a alta presión	Mecánico (disrupción celular)	Suspensión celular forzada a través de válvula a alta presión para romper la pared celular	(Nemer et al., 2021)
Ultrasonidos	Mecánico (disrupción celular)	Ondas mecánicas de alta frecuencia inducen cavitación y ruptura celular	(Koubaa et al., 2020)
Molienda en molino de perlas	Mecánico (disrupción celular)	Fuerzas de cizallamiento por colisión con perlas generan disrupción celular	(Koubaa et al., 2020)
Pulsos eléctricos de alto voltaje	Eléctrico (Permeabilización)	Electroporación inducida por campo eléctrico permite liberación de compuestos intracelulares	(Marín-Sánchez et al., 2024a)
Extracción asistida por microondas	Eléctrico (disrupción celular)	Microondas inducen rotación dipolar y migración iónica para liberar compuestos intracelulares	(Chan et al., 2011)

Choque osmótico	Físico (disrupción celular)	Alta presión osmótica genera turgencia y lisis celular (en fase experimental)	(de Carvalho et al., 2017)
Líquidos iónicos	Químico (Permeabilización)	Incrementan permeabilidad de membrana para obtener compuestos específicos	(Elgharbawy et al., 2020; Perna et al., 2020)
Solventes orgánicos	Químico (Permeabilización)	Cloroformo, tolueno y etanol inducen permeabilización en especies como <i>K. lactis</i>	(Flores et al., 1994)
Autólisis (lisis celular)	Enzimático (disrupción celular)	Enzimas endógenas provocan disrupción celular	(Jacob et al., 2019a)
Enzimas exógenas (lisis enzimática)	Enzimático (disrupción celular)	Uso sinérgico de proteasas, lipasas, celulasas y otras para la lisis celular	(Marson et al., 2019)

Fuente: Elaboración propia

Una forma común de clasificar los métodos de extracción es en función de si implican o no ruptura celular. Los métodos con disrupción pueden dividirse en mecánicos (como homogeneización a alta presión, ultrasonidos o molienda en molino de bolas) y no mecánicos (eléctricos, físicos, químicos y enzimáticos) (Gautério et al., 2023).

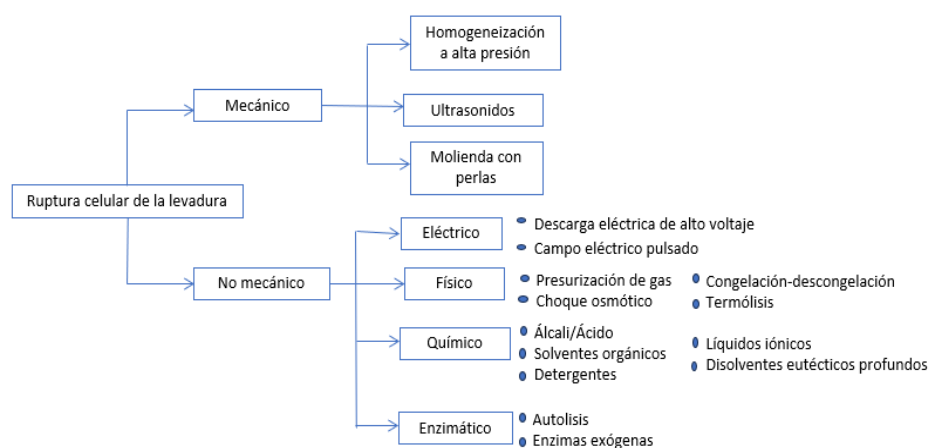


Figura 1. Clasificación de los diferentes métodos de extracción. Elaboración propia a partir de Gautério et al., 2023.

6.1. Métodos tradicionales para la extracción de proteínas

Entre los métodos tradicionales, destacan la homogeneización a alta presión y la lisis enzimática.

La homogeneización a alta presión es un método mecánico de ruptura celular. En este proceso, una suspensión celular se fuerza a pasar a través de una válvula estrecha a alta presión, provocando la rotura de la pared celular debido a las fuerzas de cizallamiento generadas (Clarke

et al., 2010; Nemer et al., 2021). La eficacia del proceso depende de la presión, la temperatura y el número de pases por la válvula (Dimopoulos et al., 2020; Drévillon et al., 2018).

En cuanto a la lisis enzimática es un método que no destruye la integridad celular, ya que ataca a macrocompuestos como proteínas, lípidos o glucanos (Gautério et al., 2023). Se puede llevar a cabo mediante enzimas exógenas (Marson et al., 2019), como proteasas, lipasas, glucanasas, glucosidasas, mananasas, quitinasas y celulasas, que actúan sinérgicamente sobre la pared celular. Esta técnica presenta ventajas como condiciones operativas (temperatura y pH) menos severas, la especificidad enzimática que permite una disrupción celular selectiva (Gomes et al., 2020) y la posibilidad de integrarse con otros métodos mecánicos o no mecánicos. Sin embargo, su aplicación a escala industrial se ve limitada por el alto coste de las enzimas (Gautério et al., 2023).

6.2. Técnicas emergentes para la extracción de proteínas

Entre las técnicas emergentes para la extracción de proteínas se incluyen la aplicación de pulsos eléctricos de alto voltaje (PEF), ultrasonidos y la extracción asistida por microondas.

Los pulsos eléctricos de alto voltaje constituyen un método innovador en el procesamiento de alimentos, con aplicaciones para prolongar la vida útil, mejorar la transferencia de masa y modificar estructuras de los productos (Marín-Sánchez et al., 2024a). Su mecanismo se basa en la electroporación, es decir, un aumento controlado de la permeabilidad de la membrana plasmática inducido por un campo eléctrico, lo que permite la liberación de compuestos intracelulares (Golberg et al., 2016; Martínez et al., 2020). Los parámetros clave que afectan al proceso incluyen la intensidad del campo, el tiempo de tratamiento, la energía específica y la temperatura. Entre sus ventajas se encuentran su carácter no destructivo, la eficiencia energética, la alta selectividad y su escalabilidad. Como limitaciones, destaca la inversión inicial del equipo y la dependencia de la composición del medio (Martínez et al., 2020).

En comparación, el uso de ultrasonidos es menos frecuente en la industria alimentaria en lo que respecta a la extracción de proteínas. Esta técnica emplea ondas mecánicas de alta frecuencia que generan cavitación, un fenómeno que se inicia con la formación de burbujas de vapor que, al implosionar, producen ondas de choque capaces de romper la pared celular (Koubaa et al., 2020). Su eficacia depende de la composición y rigidez de la pared celular (Nemer et al., 2021), así como de variables como la concentración celular, intensidad acústica, duración del tratamiento y temperatura (Liu et al., 2021; Zhang et al., 2014).

La extracción asistida por microondas, por su parte, se considera actualmente una técnica eficiente y de creciente uso en procesos de extracción sólido-líquido debido a su eficiencia, bajo coste y rapidez. Se basa en la rotación dipolar inducida por microondas y la migración iónica, que favorecen la penetración del disolvente en la matriz celular, alterando la pared y liberando compuestos intracelulares, incluidas proteínas (Li et al., 2010). Factores que afectan a su eficacia incluyen la temperatura, duración, tipo de disolvente, relación disolvente-alimento, potencia de microondas y agitación (Chan et al., 2011; Pan et al., 2003). Esta técnica ofrece ventajas como mayor velocidad de extracción, menor consumo de disolvente y mejores rendimientos, lo que contribuye a reducir costes (Proestos and Komaitis, 2008).

Además de los métodos de ruptura celular, existen múltiples factores que influyen en la eficiencia, el rendimiento y la calidad de las proteínas extraídas de levaduras. Uno de los más determinantes es la optimización del cultivo. La relación carbono: nitrógeno (C:N) debe mantenerse entre 6:1 y 10:1 para favorecer la biosíntesis de proteínas frente a la acumulación de lípidos o carbohidratos (Hu et al., 2015). Además, fuentes nitrogenadas fácilmente asimilables, como el sulfato de amonio, junto con suplementos como extracto de levadura o determinadas sales, permiten incrementar tanto la densidad celular como el porcentaje proteico (Jach et al., 2022). Herramientas de diseño experimental permiten afinar variables como agitación, aireación y concentración de nutrientes para maximizar el rendimiento proteico celular. A ello se suma el impacto de las condiciones de fermentación, especialmente el pH, la temperatura y la fuente de carbono. Aunque el rango óptimo de crecimiento suele situarse entre pH 4–6 y 28–30 °C, ajustes controlados de estos parámetros pueden alterar significativamente el contenido proteico intracelular (Balakumar and Arasaratnam, 2012). Según el tipo de carbono utilizado y la duración del cultivo, se ha observado que el contenido proteico puede oscilar entre el 26% en condiciones subóptimas y superar el 60% del peso seco bajo condiciones ideales (Jach et al., 2022). El empleo de sustratos como melazas, residuos agrícolas o aguas residuales con alto contenido en carbono permite, al combinarse con un control adecuado del proceso, alcanzar concentraciones de proteína entre el 45% y el 55% (Jalasutram et al., 2013).

La calidad de las proteínas obtenidas también depende del método aplicado. Técnicas como la autólisis inducen la fragmentación de proteínas en péptidos y aminoácidos libres, lo cual puede ser útil para aplicaciones nutricionales, pero limita su funcionalidad tecnológica (Tanguler and Erten, 2008). En cambio, métodos no térmicos como la sonicación o ciertas formas de ruptura mecánica en frío permiten preservar la conformación nativa de las proteínas, evitando la desnaturalización o hidrólisis excesiva (Tao et al., 2022). Asimismo, condiciones extremas de pH

o temperatura pueden oxidar o destruir aminoácidos esenciales como la lisina, comprometiendo el perfil nutricional. Por ello, se valoran estrategias que conserven un perfil de aminoácidos completo y balanceado, especialmente cuando se busca un producto de alto valor biológico.

Una vez liberadas, las proteínas deben someterse a procesos de purificación para aumentar su concentración y reducir contaminantes. Inicialmente, la biomasa insoluble se separa por centrifugación o filtración, y las proteínas solubles se concentran mediante ultrafiltración con membranas de corte molecular, lo que permite eliminar compuestos de bajo peso molecular, como ácidos nucleicos. También se emplea la precipitación isoeléctrica o el uso de agentes precipitantes como el sulfato de amonio o el etanol, seguido de etapas de redisolución, diálisis o secado por atomización. Estas operaciones permiten obtener aislados proteicos de mayor estabilidad, pureza y funcionalidad (Ganeva et al., 2020).

Es importante destacar que la ruptura celular también afecta a la liberación de otros compuestos bioactivos. Por ejemplo, mediante PEF es posible liberar selectivamente metabolitos de bajo peso molecular, como aminoácidos libres y glutatión, en las primeras etapas del tratamiento, sin que se liberen todavía las macromoléculas proteicas, cuya extracción requiere tiempos de incubación más prolongados (Marín-Sánchez et al., 2024b). En cambio, técnicas agresivas como la ruptura mecánica convencional extraen simultáneamente proteínas y otros solutos, lo que puede dificultar su separación posterior (Ganeva et al., 2020).

7. Aplicación de las proteínas de levadura en la Industria Alimentaria

En la actualidad, una de las aplicaciones más destacadas de las proteínas de levadura es su uso como suplementos proteicos. La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) ha aprobado el uso de proteínas procedentes de *Yarrowia lipolytica* en productos dirigidos a personas mayores de tres años, reconociendo su perfil nutricional favorable y su seguridad alimentaria (Jach and Malm, 2022). Estas proteínas, además de ser sostenibles y económicamente competitivas frente a las proteínas de origen vegetal o animal, presentan una baja alergenicidad (Dimopoulos et al., 2021b). Su alto contenido en aminoácidos esenciales como lisina y metionina —limitantes en la mayoría de alimentos vegetales y animales— las convierte en un sustituto nutricional atractivo. Estas proteínas pueden incorporarse como aditivos en dietas humanas, reemplazando fuentes más costosas como la soja o el pescado (Uchakalwar and Chandak, 2014). Asimismo, resultan adecuadas para personas con intolerancia a la lactosa o alergias a la soja, y son perfectamente compatibles con dietas vegetarianas (Jach and Malm, 2022). Su aplicación se ha extendido a productos horneados, galletas, snacks y formulaciones especiales, así como a productos cárnicos, donde actúan como ingredientes funcionales que mejoran el sabor gracias a su alto contenido en ácido glutámico y favorecen la retención de agua y la estabilidad del color (Pancrazio et al., 2016).

En términos sensoriales, la biomasa de levadura fermentada se utiliza como potenciador de sabor, aportando notas umami, frescas, cárnicas y similares al queso. Los extractos de levadura contienen proteínas, péptidos, aminoácidos y nucleótidos naturales, los cuales actúan como compuestos de sabor no volátiles en productos bajos en sodio (Paulino et al., 2021; Vidal et al., 2020). En comparación con los aromatizantes convencionales, la biomasa de levadura ofrece ventajas relevantes en la mejora del perfil sensorial de los alimentos, permitiendo, por ejemplo, eliminar el olor a pescado en productos cárnicos o suavizar el sabor de determinadas formulaciones (Ma et al., 2023). Sus componentes se utilizan ampliamente en snacks cárnicos, salsas y condimentos como agentes saborizantes (Jacob et al., 2019b).

En la industria vitivinícola, el extracto proteico de levadura ha sido propuesto como agente clarificante alternativo. La clarificación es una etapa clave del proceso de vinificación, ya que contribuye a suavizar la astringencia, mejorar la textura en boca y estabilizar la coloración mediante la reducción de compuestos fenólicos (Gaspar et al., 2019). diversos estudios han confirmado que las proteínas de levadura pueden interactuar eficazmente con estos compuestos, facilitando su precipitación (Francisco et al., 2021; Rigou et al., 2021).

Otra aplicación destacada es su uso como material de soporte en procesos de microencapsulación. Esta tecnología se emplea para proteger compuestos sensibles —como aceites con alto contenido en ácidos grasos poliinsaturados— frente a la oxidación, incrementando su estabilidad y permitiendo su uso controlado en alimentos funcionales (Sultana et al., 2021). Investigaciones recientes han demostrado que la biomasa de levadura cervecera gastada, rica en proteínas, péptidos y restos celulares, puede ser empleada como matriz encapsulante eficaz para compuestos lipídicos (Marson et al., 2020; Vélez-Erazo et al., 2021).

En el ámbito de los productos cárnicos, las proteínas de levadura ofrecen funcionalidades tecnológicas clave. Estos alimentos requieren capacidades específicas de emulsificación, gelificación y retención de agua, que pueden ser mejoradas mediante la adición de células de levadura cervecera (Bertolo et al., 2019). Estas células pueden actuar como extensores cárnicos en productos como hamburguesas, salchichas o mortadelas, mejorando su textura, cohesión y estabilidad, además de reducir las pérdidas de cocción y los costes de producción (Pancrazio et al., 2016). Tradicionalmente, la proteína de soja texturizada ha sido el principal extensor en la elaboración de hamburguesas, pero se ha demostrado que las formulaciones basadas en proteínas de levadura pueden alcanzar niveles de calidad comparables en términos de contenido de humedad, grasa, proteínas, cenizas y carbohidratos. Además, presentan una menor probabilidad de inducir reacciones alérgicas, lo que las convierte en una opción más segura y adecuada para un espectro más amplio de consumidores (Bertolo et al., 2022).

7.1. Otras aplicaciones de las proteínas de levadura

Además de sus aplicaciones en la industria alimentaria, las proteínas y extractos derivados de levadura presentan un gran potencial en otros sectores industriales. Uno de los más relevantes es la alimentación animal. Desde hace décadas, el extracto de levadura se ha utilizado como fuente de nutrientes en dietas para animales, especialmente como aditivo en piensos para aves de corral (Bill Kaelle et al., 2022). La industria ganadera se enfrenta actualmente a múltiples desafíos, como la necesidad de acelerar el crecimiento de los animales, el aumento de la morbilidad y la aparición de bacterias resistentes a los antibióticos, que han limitado la eficacia de los promotores de crecimiento convencionales (Andrews et al., 2011).

Los extractos de levadura han demostrado ser alternativas prometedoras a los antibióticos como promotores del crecimiento animal, gracias a su capacidad para modular la microbiota intestinal y mejorar la inmunidad (Huff et al., 2011, 2010). En un estudio, la suplementación diaria de

extracto de levadura en la dieta de pavos mejoró parámetros como la tasa de crecimiento y la respuesta inmune (Huff et al., 2010). Además, el extracto de levadura representa una fuente no convencional de proteínas para la alimentación animal (Andrews et al., 2011). En cerdos, su inclusión en la dieta ha mostrado mejoras en la digestibilidad de aminoácidos y en la energía metabolizable, lo que refuerza su potencial como ingrediente proteico sustitutivo en piensos, especialmente para especies como aves de corral y ganado porcino (Wu et al., 2018).

En el campo de la biotecnología, los extractos de levadura se valoran por su riqueza en aminoácidos, vitaminas, nucleósidos, polipéptidos y minerales, que los convierte en componentes ideales de medios de cultivo para fermentaciones microbianas, tanto en contextos de laboratorio como a escala industrial (Huynh et al., 2020). En particular, los polipéptidos presentes en el extracto de levadura tienen efectos directos sobre el crecimiento y metabolismo de hongos (Proust et al., 2019). Asimismo, péptidos y aminoácidos de estos extractos actúan como factores de crecimiento esenciales para bacterias ácido lácticas, promoviendo hasta el 60 % de la biomasa celular (Kevvai et al., 2014; Smith et al., 1975).

En la industria cosmética, el extracto de levadura constituye un ingrediente consolidado por sus propiedades bioactivas. La cosmética es un sector altamente rentable, pero con desafíos relacionados con la eficacia y seguridad de los ingredientes empleados. Las sustancias presentes en los extractos de levadura, como aminoácidos, polisacáridos, polipéptidos y proteínas, han demostrado efectos beneficiosos como hidratación de la piel, estimulación de la renovación celular, acción antienvjecimiento y aceleración de la cicatrización (Bentley et al., 1990; Kim and Yun, 2006). Estos compuestos suelen combinarse con vitaminas, antioxidantes y agentes humectantes en formulaciones cosméticas para potenciar sus efectos (Draelos et al., 2013).

Por último, en el ámbito médico, el extracto de levadura también ha mostrado aplicaciones relevantes debido a su alto contenido nutricional, propiedades bioactivas y capacidad para modular la microbiota intestinal. Diversas formulaciones terapéuticas con efectos antiinflamatorios y antibacterianos incluyen extracto de levadura como ingrediente funcional (Pillemer et al., 1955; Vetvicka and Vetvickova, 2010). Se han desarrollado productos para tratar enfermedades cutáneas como el prurito. En un estudio comparativo, una formulación basada en extracto de levadura resultó más eficaz que un tratamiento convencional, mostrando mejores resultados en el alivio de los síntomas (Dhurat et al., 2021). Esta acción se atribuye a la presencia de flavonoides, dextranos, aminoácidos y vitaminas, capaces de bloquear diversos receptores de histamina (Zhang et al., 2020).

8. Aspectos Regulatorios y de Seguridad Alimentaria

El uso de proteínas de levadura en la industria alimentaria está regulado principalmente por el Reglamento (UE) 2015/2283 relativo a los nuevos alimentos, así como por otras normativas complementarias sobre seguridad alimentaria, etiquetado, complementos y piensos. En general, las proteínas de levadura pueden clasificarse como “nuevo alimento” (*novel food*) si no se han consumido en cantidades significativas en la Unión Europea antes del 15 de mayo de 1997. Esta condición está recogida en el artículo 3 del Reglamento (UE) 2015/ 2283..

Dentro de esta categoría se incluyen ingredientes como biomasa de levaduras, extractos proteicos purificados o proteínas recombinantes obtenidas mediante levaduras modificadas genéticamente. Para su comercialización, estos productos deben superar una evaluación de seguridad por parte de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) y ser autorizados mediante inclusión en la Lista de la Unión de nuevos alimentos, establecida en el Reglamento de Ejecución (UE) 2017/2470.

Un ejemplo representativo es la biomasa inactivada de la levadura no convencional *Yarrowia lipolytica*, cuya seguridad fue evaluada por la EFSA en 2019. El dictamen concluyó que dicha biomasa era segura como complemento alimenticio hasta una dosis de 3 g/día en niños de 3 a 9 años y hasta 6 g/día a partir de los 10 años (EFSA, 2019). Fue autorizada oficialmente como nuevo alimento mediante el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/760.

La EFSA también ha evaluado variantes enriquecidas de *Y. lipolytica*, como biomasa con selenio o cromo, destinadas a complementos. Tras analizar su seguridad, biodisponibilidad y riesgo de sobredosificación, se establecieron límites estrictos de ingesta diaria por grupo de edad, junto con advertencias obligatorias en el etiquetado (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), 2020). El nombre designado debe reflejar claramente su naturaleza, por ejemplo: “levadura con selenio (*Yarrowia lipolytica*)”.

Asimismo, se han autorizado extractos de levadura ricos en β -glucanos (principalmente de *Saccharomyces cerevisiae*) para uso en alimentos funcionales y suplementos inmunológicos. Las autorizaciones determinan cantidades máximas por categoría de alimento, como barritas, cereales, yogures o bebidas (EFSA, 2011).

En el ámbito de los complementos alimenticios, derivados tradicionales como la levadura de cerveza inactivada no requieren autorización. Sin embargo, otros ingredientes novedosos deben respetar las condiciones de uso fijadas por la legislación, incluyendo dosis máximas,

denominaciones obligatorias y advertencias (por ejemplo, edad mínima o no consumir junto con otros productos con el mismo ingrediente).

En alimentación animal, las proteínas de levadura se utilizan como materia prima en piensos conforme al Reglamento (CE) 767/2009. Levaduras como *S. cerevisiae* o *Candida utilis* se emplean tradicionalmente como fuentes proteicas sin requerir autorización previa. Si se pretende usarlas con funciones zootécnicas o tecnológicas (como probióticos), deben ser autorizadas como aditivos bajo el Reglamento (CE) 1831/2003.

Además, los extractos de levadura pueden utilizarse en cosmética, biotecnología y medicina, sujetos a normativas sectoriales específicas. Su aplicación como medio de cultivo en fermentaciones microbianas también está bien establecida y considerada segura.

Por último, el uso de tecnologías emergentes como los Pulsos Eléctricos de Alto Voltaje (PEF) en la obtención de proteínas no implica automáticamente una reclasificación del producto como nuevo alimento. Sin embargo, si el proceso altera significativamente la composición, estructura o biodisponibilidad del alimento, puede requerirse una evaluación adicional bajo el marco del Reglamento (UE) 2015/2283.

En conclusión, el estatus legal de las proteínas de levadura en la UE depende del historial de consumo, el método de producción y el uso previsto. Las empresas deben comprobar si su ingrediente requiere autorización y cumplir estrictamente las condiciones de uso, etiquetado y seguridad establecidas por la legislación vigente.

9. Conclusiones

- La proteína procedente de levaduras es actualmente una de las mejores alternativas para complementar o sustituir las proteínas de origen animal, gracias a su alto valor biológico y riqueza en aminoácidos esenciales.
- El periodo de crecimiento de las levaduras es relativamente corto y su cultivo no requiere de grandes dimensiones, lo que la convierte en una producción eficiente y escalable.
- La productividad de este tipo de proteína es elevada y los costes de producción son bajos, lo que, junto con la posibilidad de utilizar subproductos industriales, contribuye a una producción más sostenible y alineada con los principios de economía circular.
- Las aplicaciones de las proteínas de levaduras incluyen la industria alimentaria y otros campos como la alimentación animal, la cosmética, la medicina, etc.
- El uso de proteínas de levadura está regulado por el Reglamento (UE) 2015/2283 sobre nuevos alimentos, que exige evaluación y autorización previa por parte de la EFSA si no hay historial de consumo significativo antes de 1997, garantizando así su seguridad y legalidad en el mercado europeo.
- Se espera un crecimiento significativo en la investigación y el desarrollo de proteínas de levaduras, con un alto potencial para mitigar el déficit de proteínas a nivel global.

Conclusions

- Yeast-derived protein is currently one of the most promising alternatives to complement or replace animal-based proteins, due to its high biological value and richness in essential amino acids.
- Yeasts exhibit a relatively short growth cycle and can be cultivated in limited space, making their production efficient and scalable.
- This type of protein offers high productivity and low production costs. Furthermore, the possibility of using industrial by-products contributes to a more sustainable process aligned with circular economy principles.
- Applications of yeast proteins include the food industry as well as other sectors such as animal feed, cosmetics, and medicine.

- The use of yeast proteins is regulated under Regulation (EU) 2015/2283 on novel foods, which requires prior evaluation and authorization by EFSA if there is no significant history of consumption before 1997, thereby ensuring their safety and legal compliance within the European market.
- A significant increase in research and development of yeast proteins is expected, given their high potential to help mitigate the global protein deficit.

10. Valoración personal

A nivel personal, realizar este Trabajo de Fin de Grado me ha permitido aprender de un tema con gran relevancia actualmente que desconocía, adentrándome en un campo bastante innovador con importantes implicaciones para la sostenibilidad alimentaria. Al tratarse de una revisión bibliográfica, me ha ayudado a desenvolverme en el ámbito de búsqueda sistemática de información científica e ir evolucionando en él a medida que realizaba el trabajo. Sin duda, las levaduras como nueva fuente de proteína resultan un tema bastante interesante el cuál abre múltiples posibilidades en el campo de la nutrición y la alimentación sostenible y que, además, puede dar mucho juego en un futuro para contribuir a mitigar problemas como la deficiencia proteica a nivel global.

11. Referencias

- Adedayo, M.R., Ajiboye, E.A., Akintunde, J.K., Odaibo, A., 2011. Single Cell Proteins: As Nutritional Enhancer. *Advances in Applied Science Research* 2, 396–409.
- Alves, E.M., de Souza, J.F., de Oliva Neto, P., 2021. Advances in yeast autolysis technology - a faster and safer new bioprocess. *Brazilian Journal of Food Technology* 24, e2020249. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.24920>
- Andrews, S.R., Sahu, N.P., Pal, A.K., Mukherjee, S.C., Kumar, S., 2011. Yeast extract, brewer's yeast and spirulina in diets for *Labeo rohita* fingerlings affect haemato-immunological responses and survival following *Aeromonas hydrophila* challenge. *Res Vet Sci* 91, 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2010.08.009>
- Averill-Bates, D.A., 2023. The antioxidant glutathione. *Vitam Horm* 121, 109–141. <https://doi.org/10.1016/BS.VH.2022.09.002>
- Balakumar, S., Arasaratnam, V., 2012. Osmo-, thermo- and ethanol- tolerances of *Saccharomyces cerevisiae* S1. *Brazilian Journal of Microbiology* 43, 157–166. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822012000100017>
- Barrientos, A., 2003. Yeast models of human mitochondrial diseases. *IUBMB Life* 55, 83–95. <https://doi.org/10.1002/TBMB.718540876>
- Bentley, J.P., Hunt, T.K., Weiss, J.B., Taylor, C.M., Hanson, A.N., Davies, G.H., Halliday, B.J., 1990. Peptides From Live Yeast Cell Derivative Stimulate Wound Healing. *Archives of Surgery* 125, 641–646. <https://doi.org/10.1001/ARCHSURG.1990.01410170089019>
- Bertolo, A.P., Biz, A.P., Kempka, A.P., Rigo, E., Cavalheiro, D., 2019. Yeast (*Saccharomyces cerevisiae*): evaluation of cellular disruption processes, chemical composition, functional properties and digestibility. *J Food Sci Technol* 56, 3697–3706. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-03833-3>
- Bertolo, A.P., Kempka, A.P., Rigo, E., Sehn, G.A.R., Cavalheiro, D., 2022. Incorporation of natural and mechanically ruptured brewing yeast cells in beef burger to replace textured soy protein. *J Food Sci Technol* 59, 935–943. <https://doi.org/10.1007/S13197-021-05095-4/METRICS>
- Bill Kaelle, G.C., Menezes Souza, C.M., Bastos, T.S., Vasconcellos, R.S., Oliveira, S.G. de, Félix, A.P., 2022. Diet digestibility and palatability and intestinal fermentative products in dogs fed yeast extract. *Ital J Anim Sci* 21, 802–810. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2022.2054733;SUBPAGE:STRING:FULL>

- Chan, C.H., Yusoff, R., Ngoh, G.C., Kung, F.W.L., 2011. Microwave-assisted extractions of active ingredients from plants. *J Chromatogr A* 1218, 6213–6225. <https://doi.org/10.1016/J.CHROMA.2011.07.040>
- Clarke, A., Prescott, T., Khan, A., Olabi, A.G., 2010. Causes of breakage and disruption in a homogeniser. *Appl Energy* 87, 3680–3690. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2010.05.007>
- Cohen, Z., Ratledge, C., 2010. *Single Cell Oils : Microbial and Algal Oils*. Urbana, IL: Academic Press and AOCS Press. Second Edition. <https://doi.org/10.4324/9781003040101>
- Čolnik, M., Primožič, M., Knez, Ž., Leitgeb, M., 2016. Use of non-conventional cell disruption method for extraction of proteins from black yeasts. *Front Bioeng Biotechnol* 4, 194980. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2016.00033/BIBTEX>
- Copetti, M.V., 2019. Fungi as industrial producers of food ingredients. *Curr Opin Food Sci* 25, 52–56. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2019.02.006>
- Cregg, J.M., Cereghino, J.L., Shi, J., Higgins, D.R., 2000. Recombinant protein expression in *Pichia pastoris*. *Molecular Biotechnology* 2000 16:1 16, 23–52. <https://doi.org/10.1385/MB:16:1:23>
- de Carvalho, J.C., Medeiros, A.B.P., Letti, L.A.J., Kirnev, P.C.S., Soccol, C.R., 2017. Cell Disruption and Isolation of Intracellular Products. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Production, Isolation and Purification of Industrial Products* 807–822. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63662-1.00035-X>
- Dhurat, R., Sharma, A., Surve, R., McCoy, J., Kovacevic, M., Goren, A., Tan, Y., Zou, Y., Goldust, M., Situm, M., Stanimirovic, A., 2021. Novel yeast extract is superior to colloidal oatmeal in providing rapid itch relief. *J Cosmet Dermatol* 20, 207–209. <https://doi.org/10.1111/jocd.13436>
- Dimopoulos, G., Katsimichas, A., Tsimogiannis, D., Oreopoulou, V., Taoukis, P., 2021a. Cell permeabilization processes for improved encapsulation of oregano essential oil in yeast cells. *J Food Eng* 294, 110408. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2020.110408>
- Dimopoulos, G., Limnaios, A., Aerakis, E., Andreou, V., Taoukis, P., 2021b. Effect of high pressure on the proteolytic activity and autolysis of yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 74, 102865. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2021.102865>
- Dimopoulos, G., Tsantes, M., Taoukis, P., 2020. Effect of high pressure homogenization on the production of yeast extract via autolysis and beta-glucan recovery. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 62, 102340. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2020.102340>

- Draelos, Z., Dahl, A., Yatskayer, M., Chen, N., Krol, Y., Oresajo, C., 2013. Dyspigmentation, skin physiology, and a novel approach to skin lightening. *J Cosmet Dermatol* 12, 247–253. <https://doi.org/10.1111/JOCD.12066>
- Dré villon, L., Koubaa, M., Vorobiev, E., 2018. Lipid extraction from *Yarrowia lipolytica* biomass using high-pressure homogenization. *Biomass Bioenergy* 115, 143–150. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2018.04.014>
- EFSA NDA Panel (2020). Insights on Novel Foods Risk Assessment. Presentation at the 108th Plenary Meeting of the EFSA NDA Panel, 24–26 November 2020. European Food Safety Authority. Available at: <https://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/event/2020/108th-plenary-meeting-nda-panel-open-observers-presentation.pdf> (Accessed: 20/04/2025).
- EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens) (2019). Scientific opinion on the safety of *Yarrowia lipolytica* yeast biomass as a novel food. *EFSA Journal*, 17(6), 5594. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2019.5594>
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2011). Scientific Opinion on the safety of ‘yeast beta-glucans’ as a novel food ingredient. *EFSA Journal*, 9(4), 2137. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2137>
- Elgharbawy, A.A.M., Hayyan, M., Hayyan, A., Basirun, W.J., Salleh, H.M., Mirghani, M.E.S., 2020. A grand avenue to integrate deep eutectic solvents into biomass processing. *Biomass Bioenergy* 137, 105550. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105550>
- Ferreira, I.M.P.L.V.O., Pinho, O., Vieira, E., Távarela, J.G., 2010. Brewer’s *Saccharomyces* yeast biomass: characteristics and potential applications. *Trends Food Sci Technol* 21, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.10.008>
- Fickers, P., Benetti, P.H., Waché, Y., Marty, A., Mauersberger, S., Smit, M.S., Nicaud, J.M., 2005. Hydrophobic substrate utilisation by the yeast *Yarrowia lipolytica*, and its potential applications. *FEMS Yeast Res* 5, 527–543. <https://doi.org/10.1016/J.FEMSYR.2004.09.004>
- Flores, M. V., Voget, C.E., Ertola, R.J.J., 1994. Permeabilization of yeast cells (*Kluyveromyces lactis*) with organic solvents. *Enzyme Microb Technol* 16, 340–346. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(94\)90177-5](https://doi.org/10.1016/0141-0229(94)90177-5)
- Francisco, T., Pérez-Gregorio, R., Soares, S., Mateus, N., Centeno, F., de Fátima Teixeira, M., de Freitas, V., 2021. Understanding the molecular interactions between a yeast protein extract and phenolic compounds. *Food Research International* 143. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110261>
- Ganeva, V., Angelova, B., Galutzov, B., Goltsev, V., Zhiponova, M., 2020. Extraction of Proteins and Other Intracellular Bioactive Compounds From Baker’s Yeasts by Pulsed Electric Field

- Treatment. Front Bioeng Biotechnol 8, 552335. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2020.552335/BIBTEX>
- Gaspar, L.M., Machado, A., Coutinho, R., Sousa, S., Santos, R., Xavier, A., Figueiredo, M., Teixeira, M. de F., Centeno, F., Simões, J., 2019. Development of Potential Yeast Protein Extracts for Red Wine Clarification and Stabilization. Front Microbiol 10, 478115. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2019.02310/BIBTEX>
- Gautério, G.V., da Silva, R.M., Karraz, F.C., Coelho, M.A.Z., Ribeiro, B.D., Lemes, A.C., 2023. Cell disruption and permeabilization methods for obtaining yeast bioproducts. Cleaner Chemical Engineering 6, 100112. <https://doi.org/10.1016/J.CLCE.2023.100112>
- Gellissen, G., Kunze, G., Gaillardin, C., Cregg, J.M., Berardi, E., Veenhuis, M., Van Der Klei, I., 2005. New yeast expression platforms based on methylotrophic Hansenula polymorpha and Pichia pastoris and on dimorphic Arxula adeninivorans and Yarrowia lipolytica - a comparison. FEMS Yeast Res 5, 1079–1096. <https://doi.org/10.1016/J.FEMSYR.2005.06.004>
- Reed, G. & Nagodawithana, T.W. (1991). *Yeast Technology*. Dordrecht: Springer. Segunda edición.
- Gervasi, T., Pellizzeri, V., Calabrese, G., Di Bella, G., Cicero, N., Dugo, G., 2018. Production of single cell protein (SCP) from food and agricultural waste by using Saccharomyces cerevisiae. Nat Prod Res 32, 648–653. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1332617>
- Golberg, A., Sack, M., Teissie, J., Pataro, G., Pliquett, U., Saulis, G., Stefan, T., Miklavcic, D., Vorobiev, E., Frey, W., 2016. Energy-efficient biomass processing with pulsed electric fields for bioeconomy and sustainable development. Biotechnology for Biofuels 2016 9:1 9, 1–22. <https://doi.org/10.1186/S13068-016-0508-Z>
- Gomes, T.A., Zanette, C.M., Spier, M.R., 2020. An overview of cell disruption methods for intracellular biomolecules recovery. Prep Biochem Biotechnol 50, 635–654. <https://doi.org/10.1080/10826068.2020.1728696>
- Hu, Z., Que, Y., Gao, Y., Yin, Y., Zhao, Y., 2015. Using Black Liquor from the Soda Pulping Process for Protein Production by Candida utilis. Bioresources 10, 3908–3921.
- Huff, G.R., Dutta, V., Huff, W.E., Rath, N.C., 2011. Effects of dietary yeast extract on turkey stress response and heterophil oxidative burst activity. Br Poult Sci 52, 446–455. <https://doi.org/10.1080/00071668.2011.600753>;WEBSITE:WEBSITE:TFOPB;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:CBPS20;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION
- Huff, G.R., Huff, W.E., Farnell, M.B., Rath, N.C., Solis de los Santos, F., Donoghue, A.M., 2010. Bacterial clearance, heterophil function, and hematological parameters of transport-

- stressed turkey poultts supplemented with dietary yeast extract. *Poult Sci* 89, 447–456. <https://doi.org/10.3382/PS.2009-00328>
- Huynh, D., Kaschabek, S.R., Schlömann, M., 2020. Effect of inoculum history, growth substrates and yeast extract addition on inhibition of *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* by NaCl. *Res Microbiol* 171, 252–259. <https://doi.org/10.1016/J.RESMIC.2020.08.004>
- Jach, M., Serefko, A., Sajnaga, E., Kozak, E., Poleszak, E., Malm, A., Chandan Prasad, by, 2015. DIETARY SUPPLEMENTS BASED ON THE YEAST BIOMASS. *Curr Top Nutraceutical Res* 13, 83–88.
- Jach, M.E., Malm, A., 2022. *Yarrowia lipolytica* as an Alternative and Valuable Source of Nutritional and Bioactive Compounds for Humans. *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 2300 27, 2300. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27072300>
- Jach, M.E., Serefko, A., 2018. Nutritional Yeast Biomass: Characterization and Application. *Diet, Microbiome and Health* 237–270. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811440-7.00009-0>
- Jach, M.E., Serefko, A., Ziaja, M., Kieliszek, M., 2022. Yeast Protein as an Easily Accessible Food Source. *Metabolites* 12. <https://doi.org/10.3390/METABO12010063>
- Jacob, F.F., Hutzler, M., Methner, F.J., 2019a. Comparison of various industrially applicable disruption methods to produce yeast extract using spent yeast from top-fermenting beer production: influence on amino acid and protein content. *European Food Research and Technology* 245, 95–109. <https://doi.org/10.1007/S00217-018-3143-Z/METRICS>
- Jacob, F.F., Striegel, L., Rychlik, M., Hutzler, M., Methner, F.J., 2019b. Yeast extract production using spent yeast from beer manufacture: influence of industrially applicable disruption methods on selected substance groups with biotechnological relevance. *European Food Research and Technology* 245, 1169–1182. <https://doi.org/10.1007/S00217-019-03237-9/METRICS>
- Jalasutram, V., Kataram, S., Gandu, B., Anupoju, G.R., 2013. Single cell protein production from digested and undigested poultry litter by *Candida utilis*: Optimization of process parameters using response surface methodology. *Clean Technol Environ Policy* 15, 265–273. <https://doi.org/10.1007/S10098-012-0504-3/METRICS>
- Kevvai, K., Kütt, M.L., Nisamedtinov, I., Paalme, T., 2014. Utilization of ¹⁵N-labelled yeast hydrolysate in *Lactococcus lactis* IL1403 culture indicates co-consumption of peptide-bound and free amino acids with simultaneous efflux of free amino acids. *Antonie van Leeuwenhoek, International Journal of General and Molecular Microbiology* 105, 511–522. <https://doi.org/10.1007/S10482-013-0103-2/METRICS>

- Kim, K.S., Yun, H.S., 2006. Production of soluble β -glucan from the cell wall of *Saccharomyces cerevisiae*. *Enzyme Microb Technol* 39, 496–500. <https://doi.org/10.1016/J.ENZMICTEC.2005.12.020>
- Koubaa, M., Imatoukene, N., Drévillon, L., Vorobiev, E., 2020. Current insights in yeast cell disruption technologies for oil recovery: A review. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 150, 107868. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2020.107868>
- Kuhad, R.C., Sing, A., Tripathi, K., Saxenta, R., Eriksson, E.L., 2009. Microorganisms as an Alternative Source of Protein. *Nutrition Reviews*, 55(3), 65–75 | <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1997.tb01599.x>.
- Kurtzman, C.P., Fell, J.W., Boekhout, T., 2011. *The Yeasts: A Taxonomic Study*. Amsterdam: Elsevier. Fifth Edition. Accessed (5/5/2025).
- Lemes, A.C., Molon, F. de O., Fagundes, A. da S., Egea, M.B., Luccio, M. Di, Kalil, S.J., 2023. Membrane Technology as a Strategy for Improving β -Galactosidase Concentration Processes: The Influence of the pH, Membrane Molecular Weight, Pressure, and Ionic Strength in the Process. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 1626 13, 1626. <https://doi.org/10.3390/APP13031626>
- Li, J., Zu, Y.G., Fu, Y.J., Yang, Y.C., Li, S.M., Li, Z.N., Wink, M., 2010. Optimization of microwave-assisted extraction of triterpene saponins from defatted residue of yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge.) kernel and evaluation of its antioxidant activity. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 11, 637–643. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2010.06.004>
- Liu, M., Liu, W.J., Zhang, W.J., Yao, J., Mo, X., 2021. Ultrasound-assisted extraction of boulardii yeast cell wall polysaccharides: Characterization and its biological functions on early-weaned lambs. *Food Sci Nutr* 9, 3617–3630. <https://doi.org/10.1002/FSN3.2318>
- Ma, J., Sun, Y., Meng, D., Zhou, Z., Zhang, Y., Yang, R., 2023. Yeast proteins: The novel and sustainable alternative protein in food applications. *Trends Food Sci Technol* 135, 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.04.003>
- Marín-Sánchez, J., Berzosa, A., Álvarez, I., Sánchez-Gimeno, C., Raso, J., 2024a. Pulsed Electric Fields Effects on Proteins: Extraction, Structural Modification, and Enhancing Enzymatic Activity. <https://home.liebertpub.com/bioe>. <https://doi.org/10.1089/BIOE.2024.0023>
- Marín-Sánchez, J., Berzosa, A., Álvarez, I., Sánchez-Gimeno, C., Raso, J., 2024b. Selective extraction of biomolecules from *Saccharomyces cerevisiae* assisted by high-pressure homogenization, pulsed electric fields, and heat treatment: Exploring the effect of endogenous enzymes. *LWT* 207, 116614. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2024.116614>

- Marson, G.V., de Castro, R.J.S., Belleville, M.P., Hubinger, M.D., 2020. Spent brewer's yeast as a source of high added value molecules: a systematic review on its characteristics, processing and potential applications. *World J Microbiol Biotechnol* 36. <https://doi.org/10.1007/S11274-020-02866-7>
- Marson, G.V., Machado, M.T. da C., de Castro, R.J.S., Hubinger, M.D., 2019. Sequential hydrolysis of spent brewer's yeast improved its physico-chemical characteristics and antioxidant properties: A strategy to transform waste into added-value biomolecules. *Process Biochemistry* 84, 91–102. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2019.06.018>
- Martínez, J.M., Delso, C., Álvarez, I., Raso, J., 2020. Pulsed electric field-assisted extraction of valuable compounds from microorganisms. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 19, 530–552. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12512>
- Michalik, B., Biel, W., Lubowicki, R., Jacyno, E., 2014. Chemical composition and biological value of proteins of the yeast *Yarrowia lipolytica* growing on industrial glycerol. *Can J Anim Sci* 94, 99–104. <https://doi.org/10.4141/CJAS2013-052/ASSET/IMAGES/CJAS2013-052TAB8.GIF>
- Millward, D.J., 2012. Amino acid scoring patterns for protein quality assessment. *British Journal of Nutrition* 108, S31–S43. <https://doi.org/10.1017/S0007114512002462>
- Morioka, L.R.I., Viana, C.D.S., Alves, É. de P., Paião, F.G., Takihara, A.M., Kakuno, A.S.S., Suguimoto, H.H., 2019. Concentrated beta-galactosidase and cell permeabilization from *Saccharomyces fragilis* IZ 275 for beta-galactosidase activity in the hydrolysis of lactose. *Food Science and Technology* 39, 524–530. <https://doi.org/10.1590/FST.06017>
- Nemer, G., Louka, N., Vorobiev, E., Salameh, D., Nicaud, J.M., Maroun, R.G., Koubaa, M., 2021. Mechanical Cell Disruption Technologies for the Extraction of Dyes and Pigments from Microorganisms: A Review. *Fermentation* 2021, Vol. 7, Page 36 7, 36. <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION7010036>
- Oliveira, A.S., Ferreira, C., Pereira, J.O., Pintado, M.E., Carvalho, A.P., 2022. Valorisation of protein-rich extracts from spent brewer's yeast (*Saccharomyces cerevisiae*): an overview. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2022 15:2 15, 1771–1793. <https://doi.org/10.1007/S13399-022-02636-5>
- Øverland, M., Skrede, A., 2017. Yeast derived from lignocellulosic biomass as a sustainable feed resource for use in aquaculture. *J Sci Food Agric* 97, 733–742. <https://doi.org/10.1002/JSFA.8007>
- Pan, X., Niu, G., Liu, H., 2003. Microwave-assisted extraction of tea polyphenols and tea caffeine from green tea leaves. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 42, 129–133. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(02\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(02)00037-5)

- Pancrazio, G., Cunha, S.C., de Pinho, P.G., Loureiro, M., Meireles, S., Ferreira, I.M.P.L.V.O., Pinho, O., 2016. Spent brewer's yeast extract as an ingredient in cooked hams. *Meat Sci* 121, 382–389. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2016.07.009>
- Panesar, P.S., Panesar, R., Singh, R.S., Bera, M.B., 2007. Permeabilization of Yeast Cells with Organic Solvents for β -galactosidase Activity. *Res J Microbiol* 2, 34–41. <https://doi.org/10.3923/JM.2007.34.41>
- Paulino, B.N., Sales, A., Felipe, L. de O., Pastore, G.M., Molina, G., Bicas, J.L., 2021. Biotechnological production of non-volatile flavor compounds. *Curr Opin Food Sci* 41, 26–35. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2021.02.003>
- Perna, F.M., Vitale, P., Capriati, V., 2020. Deep eutectic solvents and their applications as green solvents. *Curr Opin Green Sustain Chem* 21, 27–33. <https://doi.org/10.1016/J.COFGSC.2019.09.004>
- Phale, S., 2018. Yeast: Characteristics and Economic Significance. *J Bioprocess Biotech* 8. <https://doi.org/10.4172/2155-9821.1000337>
- Pillemer, L., Schoenberg, M.D., Blum, L., Wurz, L., 1955. Properdin system and immunity: II. Interaction of the properdin system with polysaccharides. *Science* (1979) 122, 545–549. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.122.3169.545/ASSET/B2105BCB-95ED-4183-9723-42642179B6D9/ASSETS/SCIENCE.122.3169.545.FP.PNG>
- Proestos, C., Komaitis, M., 2008. Application of microwave-assisted extraction to the fast extraction of plant phenolic compounds. *LWT* 41, 652–659. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2007.04.013>
- Proust, L., Sourabié, A., Pedersen, M., Besançon, I., Haudebourg, E., Monnet, V., Juillard, V., 2019. Insights into the complexity of yeast extract peptides and their utilization by streptococcus thermophilus. *Front Microbiol* 10, 451397. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2019.00906/BIBTEX>
- REGLAMENTO DE EJECUCIÓN (UE) 2017/ 2470 DE LA COMISIÓN - de 20 de diciembre de 2017 - por el que se establece la lista de la Unión de nuevos alimentos, de conformidad con el Reglamento (UE) 2015/ 2283 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo a los nuevos alimentos, 2017. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 351, 30 de diciembre de 2017.
- REGLAMENTO DE EJECUCIÓN (UE) 2019/760 DE LA COMISIÓN - de 13 de mayo de 2019 - por el que se autoriza la comercialización de biomasa de levadura de *Yarrowia lipolytica* como nuevo alimento con arreglo al Reglamento (UE) 2015/2283 del Parlamento Europeo y del Consejo y se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2017/2470 de la Comisión, 2019. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 125, 14 mayo de 2019.

REGLAMENTO (UE) 2015/2283 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO - de 25 de noviembre de 2015 - relativo a los nuevos alimentos, por el que se modifica el Reglamento (UE) nº 1169/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo y se derogan el Reglamento (CE) nº 258/97 del Parlamento Europeo y del Consejo y el Reglamento (CE) nº 1852/2001 de la Comisión, 2015. Diario Oficial de la Unión Europea, L 231, 6 de septiembre de 2019.

REGLAMENTO (CE) No 767/2009 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 13 de julio de 2009 sobre la comercialización y la utilización de los piensos, por el que se modifica el Reglamento (CE) no 1831/2003 y se derogan las Directivas 79/373/CEE del Consejo, 80/511/CEE de la Comisión, 82/471/CEE del Consejo, 83/228/CEE del Consejo, 93/74/CEE del Consejo, 93/113/CE del Consejo y 96/25/CE del Consejo y la Decisión 2004/217/CE de la Comisión, 2009. Diario Oficial de la Unión Europea, L 229, 1 de septiembre de 2009.

REGLAMENTO (CE) No 1831/2003 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 22 de septiembre de 2003 sobre los aditivos en la alimentación animal, 2003. Diario Oficial de la Unión Europea, L 268, 18 de octubre de 2003.

Rigou, P., Mekoue, J., Sieczkowski, N., Doco, T., Vernhet, A., 2021. Impact of industrial yeast derivative products on the modification of wine aroma compounds and sensorial profile. A review. *Food Chem* 358, 129760. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.129760>

Smith, J.S., Hillier, A.J., Lees, G.J., Jago, G.R., 1975. The nature of the stimulation of the growth of *Streptococcus lactis* by yeast extract. *Journal of Dairy Research* 42, 123–138. <https://doi.org/10.1017/S0022029900015156>

Sultana, A., Takashige, S., Maki, Y., Fermin, A., Adachi, S., Yoshii, H., 2021. Oxidative stability of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid in krill oil microencapsulated by spray drying. *Food Hydrocolloids for Health* 1, 100031. <https://doi.org/10.1016/J.FHFH.2021.100031>

Suman, G., Nupur, M., Anuradha, S., Pradeep, B., 2015. Review Article Single Cell Protein Production: A Review. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci* 4, 251–262.

Tanguler, H., Erten, H., 2008. Utilisation of spent brewer's yeast for yeast extract production by autolysis: The effect of temperature. *Food and Bioproducts Processing* 86, 317–321. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2007.10.015>

Tao, Z., Yuan, H., Liu, M., Liu, Q., Zhang, S., Liu, H., Jiang, Y., Huang, D., Wang, T., 2022. Yeast Extract: Characteristics, Production, Applications and Future Perspectives. *J Microbiol Biotechnol* 33, 151. <https://doi.org/10.4014/JMB.2207.07057>

- Trawczyńska, I., 2020. Use of the chemical permeabilization process in yeast cells: production of high-activity whole cell biocatalysts. *BioTechnologia* 101, 239–252. <https://doi.org/10.5114/BTA.2020.97882>
- Trawczyńska, I., Wójcik, M., Trawczy, I., Ojcik, M.W., 2015. Optimization of permeabilization process of yeast cells for catalase activity using response surface methodology. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 29, 72–77. <https://doi.org/10.1080/13102818.2014.934986>
- Uchakalwar, P.R., Chandak, A.M., 2014. Production of Single Cell Protein from Fruits waste by using *Saccharomyces cerevisiae*. *Int J Adv Biotechnol Res* 5, 770–776.
- United Nations, 2019. Growing at a slower pace, world population is expected to reach 9.7 billion in 2050 and could peak at nearly 11 billion around 2100 | UN DESA | United Nations Department of Economic and Social Affairs [WWW Document]. URL <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2019.html> (accessed 2.25.25).
- Van Ooyen, A.J.J., Dekker, P., Huang, M., Olsthoorn, M.M.A., Jacobs, D.I., Colussi, P.A., Taron, C.H., 2006. Heterologous protein production in the yeast *Kluyveromyces lactis*. *FEMS Yeast Res* 6, 381–392. <https://doi.org/10.1111/J.1567-1364.2006.00049.X>
- Vélez-Erazo, E.M., Saturno, R.P., Marson, G.V., Hubinger, M.D., 2021. Spent brewer's yeast proteins and cell debris as innovative emulsifiers and carrier materials for edible oil microencapsulation. *Food Research International* 140. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109853>
- Vetvicka, V., Vetvickova, J., 2010. ,3-Glucan: Silver Bullet or Hot Air? *Open Glycosci* 3, 1–6.
- Vidal, V.A.S., Santana, J.B., Paglarini, C.S., da Silva, M.A.A.P., Freitas, M.Q., Esmerino, E.A., Cruz, A.G., Pollonio, M.A.R., 2020. Adding lysine and yeast extract improves sensory properties of low sodium salted meat. *Meat Sci* 159, 107911. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2019.107911>
- Virginio Agostoni, C., Bresson, J.-L., Fairweather-Tait, S., Flynn, A., Golly, I., Korhonen, H., Lagioui, P., Løvik, M., Marchelli, R., Martin, A., Moseley, B., Neuhäuser-Berthold, M., Przyrembel, H., Salminen, S., Sanz, Y., Strain, S., Strobel, S., Tetens, I., Tomé, D., van Loveren, H., Verhagen, H., Engel, K.-H., Heinonen, M., Pöting, A., Van Loveren, H., member Wolfgang Gelbmann, staff, 2011. Scientific Opinion on the safety of 'yeast beta-glucans' as a Novel Food ingredient, EFSA Journal. Wiley-Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2011.2137;WEBSITE:WEBSITE:EFSA;SUBPAGE:STRING:FRA MEDPDF;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>

- Wu, Y., Pan, L., Tian, Q., Piao, X., 2018. Comparative digestibility of energy and ileal amino acids in yeast extract and spray-dried porcine plasma fed to pigs. *Arch Anim Nutr* 72, 76–84. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2017.1413827>;CTYPE:STRING:JOURNAL
- Zhang, L., Jin, Y., Xie, Y., Wu, X., Wu, T., 2014. Releasing polysaccharide and protein from yeast cells by ultrasound: Selectivity and effects of processing parameters. *Ultrason Sonochem* 21, 576–581. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2013.10.016>
- Zhang, Y., Tan, Y., Zou, Y., Bulat, V., Lugovic Mihic, L., Kovacevic, M., Lotti, T., Verner, I., Stanimirovic, A., Situm, M., Goldust, M., Liu, W., Vojvodic, A., Goren, A., 2020. Yeast extract demonstrates rapid itch relief in chronic pruritus. *J Cosmet Dermatol* 19, 2131–2134. <https://doi.org/10.1111/JOCD.13265>