

Artículo de Revisión

**BIOPRODUCTOS AGRÍCOLAS: FUNDAMENTOS
PARA SU PRODUCCIÓN**

**AGRICULTURAL BIOPRODUCTS: FUNDAMENTALS
FOR THEIR PRODUCTION**

Gabriel Alejandro Iglesias Barreto^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-0086-2236>

Yosviel Reyes Delgado² <https://orcid.org/0000-0002-9344-2304>

Iván Leandro Rodríguez Rico² <https://orcid.org/0000-0003-1295-5368>

¹ Centro de Estudios de Postgrado de la Universidad de Jaén. Jaén, España.

² Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Noviembre 28, 2024; Revisado: Diciembre 16, 2024; Aceptado: Enero 15, 2025

RESUMEN

Introducción:

La acción beneficiosa de microorganismos y sus derivados metabólicos para las plantas y suelos está bien documentada representando una alternativa altamente eficaz al uso de fertilizantes y plaguicidas químicos.

Objetivo:

Examinar los fundamentos para la producción industrial de bioproductos agrícolas.

Materiales y Métodos:

Fueron abordadas investigaciones clásicas y actualizadas orientadas a las producciones fermentativas de suministros agrícolas y sus aplicaciones en campos de cultivo.

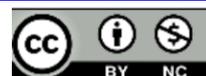
Resultados y Discusión:

Los productos obtenidos a base de microorganismos y metabolitos demuestran ser una opción altamente confiable para la gestión de una agricultura sostenible y la recuperación de los suelos. La investigación está principalmente orientada a la selección de nuevos microorganismos con una amplia acción sobre los cultivos y suelos, formulaciones más estables y con funciones multipropósitos (consorcios microbianos con acción fertilizante, plaguicida y/o estimulante en una única presentación), diseño de nuevos esquemas tecnológicos más específicos y la optimización de los medios de cultivo para el crecimiento celular a escalas superiores.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Gabriel A. Iglesias, Email: gaib0001@red.ujaen.es



Conclusiones:

Aunque las prestaciones de los bioproductos en la agricultura han sido demostradas, las proyecciones del mercado dictan que aún no desplazan a los agroquímicos convencionales fundamentalmente por su costo de fabricación y complejidad en cuanto a su utilización. En cambio, es primordial la investigación de los sistemas de células inmovilizadas y lotes alimentados como alternativas altamente productivas frente a técnicas tradicionales como la fermentación sumergida por lotes y en estado sólido.

Palabras clave: agricultura sostenible; biofertilizantes; bioplaguicidas; bioproductos; fermentación.

ABSTRACT

Introduction:

The beneficial action of microorganisms and their metabolic derivatives on plants and soils is well documented, representing a highly effective alternative to the use of chemical fertilizers and pesticides.

Objective:

To examine the foundations for the agricultural bioproducts industrial production.

Materials and Methods:

Classical and updated research aimed at fermentative productions of agricultural supplies and their applications in crop fields were addressed.

Results and Discussion:

Products obtained from microorganisms and metabolites prove to be a highly reliable option for the management of sustainable agriculture and soils recovery. Research is mainly focused on the selection of new microorganisms with a broad action on crops and soils, more stable formulations with multipurpose functions (microbial consortia with fertilizing, pesticide and/or stimulant action in a single presentation), design of new more specific technological schemes and optimization of culture media for cell growth at higher scales.

Conclusions:

Although the benefits of bioproducts in agriculture have been demonstrated, market projections dictate that they have not yet displaced conventional agrochemicals, mainly due to their manufacturing cost and complexity in terms of their use. Instead, research into immobilized cell systems and fed-batch systems is essential as highly productive alternatives to traditional techniques such as submerged batch and solid-state fermentation.

Keywords: sustainable agriculture; biofertilizers; biopesticides; bioproducts; fermentation.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desafío fundamental de la agricultura es lograr una producción sostenible que satisfaga la demanda de alimentos de una población mundial en constante crecimiento y que al mismo tiempo respete los recursos naturales y el medio

ambiente. Se estima que la población mundial alcanzará los 9 700 millones de personas para el año 2050. Para satisfacer la demanda de alimentos de esta población, la producción agrícola mundial tendrá que aumentar en un 60% según los datos aportados por las Naciones Unidas (Montoya-Rojas et al., 2024). Otros retos a los que se enfrenta la producción de alimentos son el cambio climático y la escasez creciente de los recursos naturales como el agua y suelos fértiles a causa de la contaminación. En este escenario la agricultura moderna prioriza el desarrollo de nuevas prácticas y sistemas productivos cuyas exigencias ya no deben ser únicamente saciar la creciente necesidad de alimentos seguros, sino producirlos con garantías medioambientales y económicamente factibles.

Los bioproductos agrícolas son elaboraciones derivadas de procesos biológicos o biotecnológicos que aprovechan las cualidades beneficiosas de los microorganismos o sus derivados metabólicos para minimizar el impacto ambiental y promover la sostenibilidad de los ciclos productivos en la agricultura. Estos recursos biológicos tienen el potencial de fomentar el crecimiento microbiano del suelo, mejorar la productividad de las plantas, inducir la inmunidad del huésped a las enfermedades y promover relaciones saludables entre el suelo, los microorganismos y las plantas sin interrumpir los procesos del ecosistema (Akanmu et al., 2023). Si bien las prácticas agrícolas orgánicas han tenido éxito en la mejora de la conservación de la biodiversidad, para que puedan satisfacer de manera sostenible las necesidades alimentarias mundiales, deben integrarse en las técnicas agrícolas convencionales en lugar de enfoques de gestión independientes como presentan Rehman et al. (2022) y Bhardwaj et al. (2022). Los problemas de seguridad y la necesidad de refinar los métodos de procesamiento de residuos orgánicos son consideraciones importantes. El empleo a gran escala de los bioproductos con aplicaciones agrícolas se considera estratégico para lograr una producción de alimentos segura y sostenible.

Las investigaciones recientes de Chojnacka (2015), Tarafdar (2022), (Sojka & Saeid, 2022) y (Bajić et al., 2023) señalan a los bioproductos agrícolas, incluidos los biopesticidas, bioestimulantes y biofertilizantes, como la alternativa más prometedora a los agroquímicos tradicionales. Los fertilizantes químicos se han utilizado ampliamente para cerrar la brecha entre la producción y el consumo, pero han causado daños a los ecosistemas naturales y a la salud humana. El uso extensivo de fertilizantes químicos en la agricultura ha provocado graves problemas ambientales, como la degradación del suelo, la contaminación del agua y la pérdida de biodiversidad. En cambio, el uso de los bioproductos no se limita a la producción orgánica, sino que también se está adoptando en los sistemas de producción de cultivos convencionales e integrados. La producción a gran escala de los bioproductos implica la selección de cepas microbianas eficientes, su cultivo en medios específicos y el acceso a sistemas tecnológicos para la fermentación, como la fermentación sumergida (Suthar et al., 2017). La transición de los productos obtenidos en el laboratorio hasta la aplicación de grandes volúmenes comercialmente representa un reto clave en el desarrollo biofertilizantes como indican Soumare et al. (2020). Ante esta problemática se han desarrollado procesos de fermentación de alta productividad para el cultivo de microorganismos industriales, incluidas bacterias del género *Bacillus* o bacilo, que pueden aplicarse a la producción de bioproductos (Shay et al., 1987; Kalsoom et al., 2020). El cultivo de las bacterias de interés para la preparación

de biofertilizantes se ha optimizado utilizando diferentes medios y técnicas, siendo la técnica de lotes alimentados y células inmovilizadas las más prometedoras para la producción a escala industrial indicado en trabajos de Oros et al. (2011) y Xia et al. (2021).

El objetivo de este trabajo es examinar los fundamentos para la producción industrial de bioproductos agrícolas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se centró en la búsqueda sistemática de información en la literatura científica especializada disponible. Se utilizaron las herramientas propias de la vigilancia tecnológica para el análisis de los enfoques actuales en cuanto a la aplicación y producción de bioproductos destinados a la agricultura. Los aspectos más importantes se sintetizaron, con el fin de definir el concepto y clasificación de los bioproductos agrícolas, las principales aplicaciones de estos, características y sistemas de producción industrial.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Definición y clasificación de bioproductos

El interés por los bioproductos agrícolas como una iniciativa sostenible para la actividad agrícola del siglo XXI ha ido en aumento y por tanto se dificulta encontrar una definición clara y uniforme para estos. Autores como Maitra & Maitra, (2020) definen a los bioproductos como compuestos de base biológica derivados de recursos sostenibles o biomasa. La energía, los productos químicos y los diversos materiales obtenidos a partir de tales recursos pueden clasificarse bajo el paraguas de los bioproductos que proporcionan una alternativa a los productos derivados de los combustibles fósiles. Una concepción similar a este concepto la expresa Gao et al. (2020) que entienden a los bioproductos como sustancias químicas y materiales industriales que se derivan de recursos biológicos renovables, excluidos los combustibles. Se pueden refinar a partir de diversas fuentes, como plantas, animales y microorganismos, y se utilizan en la producción de una amplia gama de bienes y materiales de consumo. Sojka & Saeid, (2022) presentan como derivados de fuentes biológicas, como plantas, microorganismos o animales para su utilización en diferentes industrias. En el contexto de la agricultura, los bioproductos desempeñan un papel importante en la nutrición de los cultivos y el control de plagas. Dentro de las múltiples aplicaciones de los bioproductos es fundamental las investigaciones perfiladas para su utilización en la agricultura por su impacto para la humanidad y la imperiosa necesidad de revertir la problemática medioambiental global.

Mehariya et al. (2020) y Gao et al. (2020) coinciden en que los bioproductos pueden clasificarse según el uso para el que están previsto o el material de partida del cual se parte para su producción. Según el uso, pueden considerarse bioestimulantes, biopesticidas, fertilizantes orgánicos y acondicionadores naturales del suelo. Dependiendo de su origen estos pueden provenir de plantas, animales, microorganismos o una combinación de estos. Por ejemplo, los bioestimulantes pueden incluir quitosano, quitina, compuestos húmicos, extractos de plantas y algas marinas, bacterias y hongos

beneficiosos, hidrolizados de proteínas y aminoácidos. Los bioplaguicidas pueden presentarse como formulaciones derivadas de microorganismos protectores incorporados listos para ser añadidos al suelo o directamente sobre las plantas, o formulaciones bioquímicas elaboradas a partir de sustancias naturales, como metabolitos secundarios o extractos de plantas. Mehariya et al. (2020) ofrecen una clasificación particularmente práctica. Divide los bioproductos en dos categorías según su origen: productos de base biológica y productos de base agrícola. Los productos de base biológica se derivan de recursos bióticos renovables, como plantas, animales y microorganismos. Los productos de base agrícola, por otro lado, se derivan específicamente de recursos agrícolas, como los residuos de cultivos y los residuos agroindustriales.

3.2. Producción

La industria biotecnológica está sujeta a una fuerte competencia, lo que obliga a las empresas a desarrollar procedimientos de escalado que les permitan llevar sus productos en desarrollo al mercado en el menor tiempo posible de una manera segura. Puede definirse el escalado de procesos industriales como la adecuación de los sistemas tecnológicos para la obtención de los productos funcionales a escala de laboratorio, pero en volúmenes industriales teniendo en cuenta las diferencias significativas que conlleva realizar la actividad de fabricación a gran escala sin alterar el resultado final. La biotecnología ofrece una amplia gama de técnicas que conducen a los bioformulados: desde la selección de cepas microbianas prometedoras, la caracterización de sus propiedades morfológicas, fisiológicas y bioquímicas, el ensayo de su actividad en condiciones de fermentación y del suelo y, finalmente, su formulación en productos comerciales (Kowalska et al., 2020; Vassilev et al., 2020). Particularmente la industria de bioprocesos presenta requisitos adicionales como el mantenimiento de las condiciones ambientales óptimas, la concentración de sustrato y biomasa, el mezclado, el estrés hidrodinámico, el control y regulación de la temperatura, la estabilidad de las células debido a la agitación mecánica, entre otras. El medio de cultivo para el crecimiento microbiano debe tener los nutrientes necesarios, que estén disponibles y con bajo costo. Para conseguir un escalado exitoso, hay que aplicar un conjunto de técnicas, metodologías, y procedimientos que permitan, transferir los datos de los modelos al prototipo. Sin embargo, la metodología o técnicas a utilizar debe comprometerse en cuanto a tiempo, coste y complejidad en concordancia con el trabajo de Pérez et al. (2020).

La producción de bioproductos agrícolas a base de microorganismos está muy extendida en sistemas de fermentación industriales en estado líquido y sólido. Los procesos de fermentación sumergida y fermentación en estado sólido son las rutas principales para la obtención de biomasa microbiana o esporas, que posteriormente se convierten en productos comerciales.

La fermentación industrial consiste en el proceso biotecnológico mediante el cual los microorganismos transforman metabólicamente los sustratos incorporados al medio de cultivo en productos de interés comercial. Se realiza en instalaciones industriales a gran escala utilizando medios de cultivo específicos afines con la nutrición del microorganismo. La optimización de este proceso (Figura 1) constituye una de las

actividades fundamentales para la inserción de los formulados biológicos en el mercado de productos agrícolas. Los agricultores suelen operar con márgenes de beneficio reducidos y precios poco flexibles de los productos agrícolas. Por este motivo, minimizar los costos de fabricación mediante la optimización multivariable de los parámetros de fabricación y en todas las etapas es un factor decisivo para el éxito comercial de un nuevo bioproducto. En este contexto el principio ecológico debe aportar valor económico y no solo valor social.

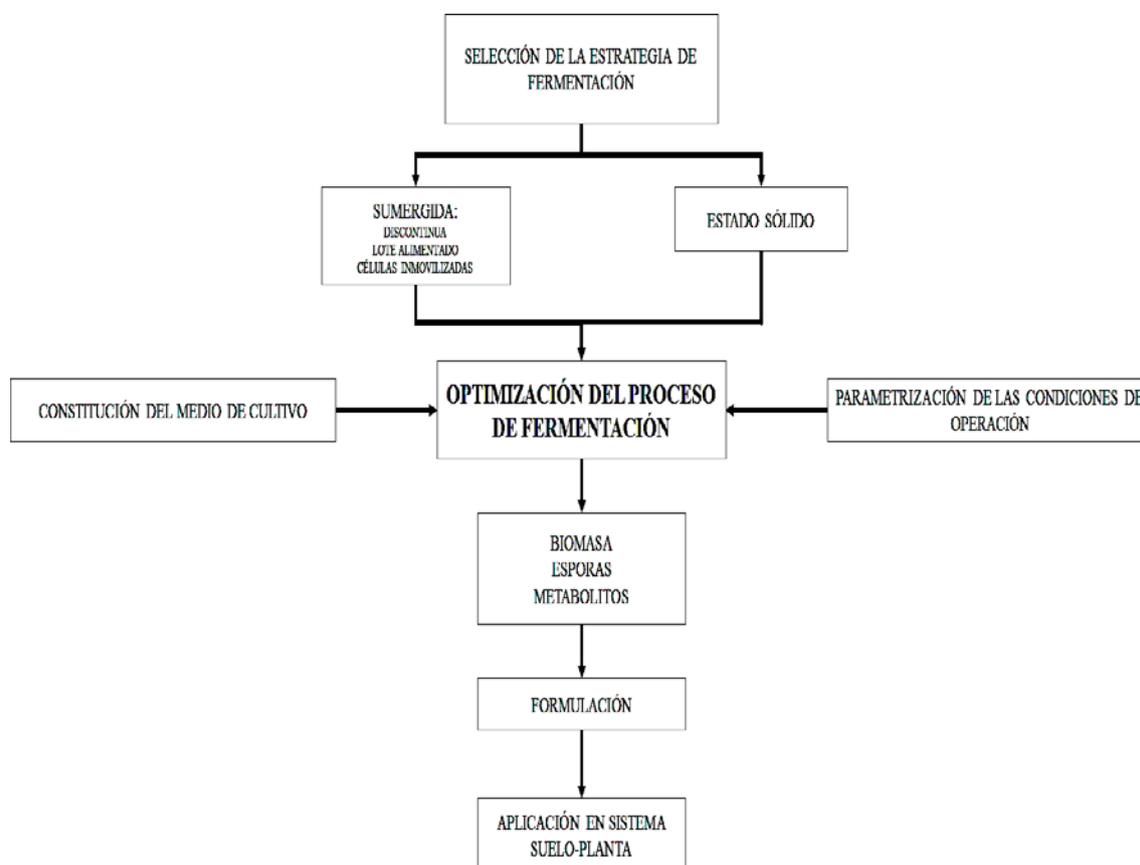


Figura 1. Esquema general de producción de bioformulados mediante fermentación sumergida y en estado sólido

Para satisfacer los requerimientos de calidad Jiang et al. (2020) sugieren controlar estrictamente parámetros de la operación como: temperatura, pH, presión, agitación y aireación si procede. En la actualidad se investigan técnicas novedosas para llevar a cabo la fermentación maximizando la productividad de la misma (Suthar et al., 2017). En el proceso de fermentación sumergida, los microorganismos inoculados experimentan un crecimiento homogéneo en el biorreactor cargado con el medio de cultivo líquido, generando un aumento de la biomasa celular y la expresión de metabolitos. Al final del proceso de fermentación, la biomasa microbiana, las esporas y/o los productos metabólicos pueden utilizarse para formular un producto comercial (Vassilev et al., 2020). La literatura da múltiples ejemplos de bioproductos en estado líquido y sólido beneficiosos para las plantas a los que también se le añaden compuestos estabilizantes y conservantes que aportan seguridad para el almacenamiento y aplicación final de estos productos sin sacrificar la vitalidad de los microorganismos de interés o la actividad de los metabolitos y esporas, como en el trabajo de (Yafetto, 2022).

3.3. Optimización de los medios de cultivo

Una estrategia atractiva para la gestión de procesos de producción de bioproductos beneficiosos para suelos y cultivos es utilizar medios optimizados. Estos medios están diseñados para proporcionar a los microorganismos los nutrientes que necesitan para crecer y producir los compuestos deseados. Los medios optimizados pueden utilizarse para aumentar la producción de una amplia gama de compuestos bioactivos, incluyendo sideróforos, ácido indolacético y compuestos antimicrobianos, incluidos los antibióticos. Por ejemplo, manipulando los componentes del medio limitante del crecimiento, se puede gestionar fácilmente la producción de ácidos orgánicos o antibióticos. De acuerdo con Mendes et al. (2017); Lu et al. (2020); Vassileva et al. (2021) este enfoque es muy útil, en particular en procesos biotecnológicos dirigidos a la producción de líquidos beneficiosos para las plantas ricos en ácidos orgánicos, fitohormonas, sustancias volátiles y antifúngicas, entre otras. Optimizar la composición del medio es esencial para lograr una alta producción de biomasa y metabolitos por parte de los agentes biológicos durante la fermentación industrial. Quintana (2022) defiende que el empleo de medios sintéticos bien conocidos suele utilizarse para estudiar microorganismos del suelo, pero no siempre son óptimos para la producción de biomasa y metabolitos. Wang et al. (2020) han sugerido que los medios utilizados para la selección de microorganismos a escala de laboratorio no son siempre adecuados para la acumulación de biomasa y la producción de metabolitos específicos en volúmenes mayores, particularmente por su encarecimiento económico.

Cada uno de los componentes del medio afecta a la actividad de crecimiento, esporulación y producción de metabolitos. Benrebah et al. (2007) señalan que otros medios de cultivo basados en residuos agroindustriales están experimentando su incorporación a los sistemas para la producción industrial de bioproductos frente a medios de cultivos de grado reactivo más comunes como la glucosa, la sacarosa, la lactosa y otros azúcares simples que son fácilmente asimilables por los microorganismos. El suero de queso, los brotes de malta y las melazas se incluyeron en la composición de los medios y mostraron una gran idoneidad en condiciones de producción a gran escala, con ventajas adicionales de protección celular demostradas en la fase de formulación final (Estrella et al., 2004). Vassilev et al. (2017) demostraron que el glicerol es un sustrato potencial debido a su abundancia como producto secundario de la producción de biodiésel y a sus propiedades de protección celular.

Un parámetro importante para desarrollar medios nutritivos eficientes es la relación entre el carbono y el nitrógeno (Delgado-Arroyo et al. 2019). Para aumentar el contenido de nitrógeno en estos medios alternativos Behle & Jackson, (2014) utilizaron harina de semillas de algodón y harina de soja dando lugar a una mayor producción de biomasa de *Metarhizium brunneum* con una mayor producción simultánea de esporas. El desarrollo de nuevos medios que aporten las necesidades de carbono y nitrógeno exigidos para la fermentación con fuentes más baratas y abundantes sin extender el tiempo de operación disminuirá el costo de producción de los bioproductos siendo este el factor limitante para su comercialización y aceptación por productores agrícolas. El fosfato es otro macrocomponente de los medios de fermentación que afecta a la biomasa y a la producción de metabolitos de interés (Silvestrini et al., 2023).

La fermentación por lotes alimentados es una herramienta eficiente para alcanzar una

biomasa suficientemente alta o una alta concentración de metabolitos fitoestimulantes y biofertilizantes bacterianos (Mutturi et al., 2016). La operación de fermentación por lotes alimentados implica la alimentación intermitente de sustrato u oxígeno disuelto para las reacciones aeróbicas asegurando que durante cada ciclo de reacción la tasa de consumo se maximice garantizando que no haya saturación ni inhibición del sustrato (Rico & Blázquez, 2010).

En comparación con el método de cultivo por lotes, que es el sistema dominante a nivel mundial, actualmente el método de cultivo por lotes alimentados desarrollado ha evidenciado aproximadamente 20 veces más recuentos de células viables del microorganismo al final de la fermentación o lo que puede interpretarse como que un ciclo de lote alimentado es igual a 20 lotes individuales en estudios realizados por Desk (2016).

Srivastava (2015) investigó los parámetros operativos y la aplicación de una estrategia de alimentación por lotes, observando un aumento de la concentración celular de *Azotobacter chroococcum* de 1,54 UFC/mL a 4,21 UFC/mL con una reducción del consumo energético para la operación. Los principios de fermentación por lotes alimentados también se aplicaron con éxito en el cultivo de *Bacillus thuringiensis* basado en medios sintéticos mejorando la concentración celular al menos en un 50% (Chen et al., 2003).

3.4. Procesos basados en células inmovilizadas

Un sistema de células inmovilizadas está formado por tres componentes: las células, la matriz o soporte donde se inmovilizan las células y la solución que ocupa el resto de la matriz. Los métodos de inmovilización son diferentes, pero se basan principalmente en la adsorción en portadores sólidos y la macro o microencapsulación en geles. Los sistemas inmovilizados se utilizan ampliamente en diversos procesos biotecnológicos, pero aún son limitados para productos con aplicaciones agrícolas, abriendo perspectivas para el desarrollo de este campo de investigación (López, 2020; García, 2021). En particular, las tecnologías de células inmovilizadas se utilizan para estudiar los cambios de comportamiento en las células de microorganismos con aplicaciones agrícolas, ya que el estado inmovilizado es el estado normal de los microorganismos en el suelo.

La aplicación de células inmovilizadas asegura una mayor presencia de células por unidad de volumen y esta promueve la efectividad de los procesos de fermentación continua, el medio gana en estabilidad y actividad metabólica. Además de que facilita las operaciones posteriores para la purificación y extracción de compuestos de interés al estar separados de los microorganismos y el soporte del medio líquido (Fukui & Tanaka, 1982; Vassilev y Vassileva, 1992). Para la formulación de biofertilizantes es sumamente útil en cuanto a la liberación lenta de las células en los sistemas suelo-planta y la posibilidad de combinar diferentes tipos de bioproductos en una misma formulación (Malusá et al., 2012).

Otra posibilidad de aplicación más amplia de las tecnologías de células inmovilizadas en la producción de bioestimulantes es la producción de hormonas vegetales (auxinas, citoquininas, etileno, giberelinas y ácido abscísico) por microorganismos seleccionados para su posterior aplicación en sistemas suelo-planta (Shi et al., 2017). En este enfoque, el ácido giberélico, que promueve el crecimiento de las células vegetales, es un ejemplo

excelente, ya que su producción en procesos de fermentación continua y por lotes repetidos por la *Gibberella fujikoro* inmovilizada se documentó hace más de 30 años, cuando se descubrió que el alginato de sodio formaba microesferas estables y firmes con una productividad entre dos y tres veces mayor de las células fúngicas atrapadas en su interior en comparación con su forma libre (Kumar & Lonsane, 1988).

Otra hormona vegetal que se ha explotado su producción en microorganismos inmovilizados es el ácido indol-3-acético (IAA); el cual está implicado en muchas actividades de las plantas, como el agrandamiento celular, la división celular y la diferenciación de tejidos, y determina el comportamiento de las plantas en diferentes condiciones ambientales (Teale et al., 2006).

Celloto et al. (2012) encontraron que las células de *Klebsiella oxytoca* producen IAA después de la inmovilización por adsorción en soportes inorgánicos utilizando la metodología sol-gel y el almacenamiento durante varios períodos de tiempo.

La producción de IAA también se registró en fermentación por lotes repetidos de células de *B. thuringiensis* atrapadas en k-carragenano. Además, durante el proceso de fermentación, se llevó a cabo la solubilización de fosfatos insolubles convirtiendo al IAA y el fosfato soluble en el líquido de fermentación como un material promotor del crecimiento vegetal (Vassilev et al., 2007).

La posibilidad de producir líquidos ricos en metabolitos beneficiosos para las plantas libres de células incide en la reducción de costos del proceso de producción y garantizando que el producto final no estará sujeto a los inconvenientes relacionados con la supervivencia de los microorganismos especialmente en el almacenamiento y aplicación en suelos.

La inmovilización de células puede definirse en biotecnología como la técnica que consiste en contener físicamente la localización y presencia de microorganismos, células animales o vegetales en un biorreactor para su utilización en procesos continuos. El empleo de células inmovilizadas permite la realización de reacciones múltiples y consecutivas en un mismo equipo.

3.5. Fermentación en estado sólido

La fermentación en estado sólido (SSF) es un proceso basado en sustratos en forma sólida y llevado a cabo en ausencia de agua libre como define Pandey (2003). Este modo de fermentación atrae la atención de muchos científicos porque es un proceso que ocurre de forma natural en los suelos. El mismo contiene un alto potencial económico, que puede replicarse fácilmente en condiciones de laboratorio, artesanales e industriales para producir diversos productos de derivados biológicos, incluidos biofertilizantes, al tiempo que se reciclan materiales agroindustriales residuales (Soccol et al., 2017). Existen dos tipos de SSF en función del modo de aplicación de los productos finales. En el primer caso, los productos completos de los SSF pueden aplicarse directamente introduciendo la materia orgánica degradada por los microorganismos. El segundo caso se destaca por la separación de los productos metabólicos liberados durante el proceso de la matriz sólida sobre la que ocurre la fermentación (Vassilev et al., 2006).

En general, la SSF ofrece un mayor número de esporas y una mayor viabilidad y eficacia de las esporas en comparación con el proceso sumergido líquido (Aguilar, 2018). La introducción de productos de desecho agroindustriales como constituyentes

del medio garantiza unas condiciones microambientales similares a las de los suelos.

Los factores más importantes que influyen en el comportamiento de los microorganismos son el volumen de inóculo, la humedad, la temperatura, el pH, la adición de nutrientes, la aireación y el tamaño de las partículas de sustrato sólido (relación superficie/volumen) (Rico & Blázquez, 2010). Mendes et al., (2014) definen que la optimización del medio también podría mejorar la productividad global o determinar la necesidad de sustancias adicionales capaces de modificar la actividad metabólica hacia la cantidad deseada del producto final. Lacey (2017) cultivó normalmente hongos biocontroladores como *C. roseum*, *M. brunneum* y *Beauveria bassiana* en granos de cereales como arroz, cebada, centeno, trigo, sorgo o maíz sin ningún componente adicional del medio.

La SSF ofrece una interacción única entre el aire, los sólidos y el microorganismo, lo que facilita la producción de metabolitos microbianos y la formación de esporas. Sin embargo, para lograr un crecimiento microbiano suficiente, la producción de esporas y una elevada actividad metabólica, es necesario optimizar los parámetros del proceso antes de implementarlo como una tecnología factible para la obtención de productos comercializables.

3.6. Selección del sistema para la producción industrial

La selección del método para la fermentación puede determinarse experimentalmente, ya que la biomasa microbiana y las esporas de microorganismos beneficiosos para las plantas pueden producirse mediante fermentaciones tanto sumergidas como en estado sólido. La fermentación sumergida en régimen de lote único o lote alimentado es el método más eficaz y ampliamente aceptado para la producción de biomasa, esporas y metabolitos a escala industrial. En cambio, la fermentación en estado sólido está bien implementada para procesos artesanales o de bajo tonelaje dirigidos a productos y microorganismos específicos más afines con esta técnica. Rico & Blázquez, (2010) promueven los procesos de fermentación sumergida, la agitación y la tasa de transferencia de oxígeno como los factores decisivos tanto a la producción de metabolitos como al crecimiento microbiano. La agitación está definida como fundamental para lograr una transferencia eficiente de calor y masa, la homogeneización de los componentes del medio y un nivel de oxígeno disuelto para evitar la biosíntesis de metabolitos no deseados (Tang & Zhong, 2003).

La fermentación en estado sólido, realizada en un sustrato sólido con un bajo contenido de humedad, ofrece una serie de ventajas, como el uso de sustratos económicamente atractivos y un menor consumo de agua y energía, pero con estrictas exigencias para la separación del bioproducto del material sólido en caso de ser requerido; es por esto que se prefiere en la aplicación conjunta de un producto integrado por los metabolitos, la biomasa microbiana y el sólido empleado. Es importante saber que, basándose en los requisitos de actividad del agua, los hongos y las levaduras suelen aceptarse como los microorganismos más adecuados para la fermentación en estado sólido. Los hongos y las levaduras tienen menores requisitos de actividad del agua (a_w), normalmente en torno a 0,5-0,6 a_w , mientras que las bacterias demanda 0,8-0,9 a_w . La elección del modo de fermentación es de gran importancia, ya que determinará la calidad y la cantidad de la biomasa celular útil y de los metabolitos que promueven el crecimiento y

la salud de las plantas.

Al seleccionar el modo de fermentación de la producción de microorganismos se debe evaluar, además, de manera general, la actividad microbiana global, la naturaleza del sustrato, la cinética de la reacción, la generación de biomasa, esporas y metabolitos de interés según De Melo et al. (2020). Toda esta información debe sintetizarse en un sistema capaz de producir bioproductos comerciales más ecológicos, respetuosos con el medio ambiente, estables, fáciles de mantener en diferentes condiciones de almacenamiento y fáciles de aplicar.

4. CONCLUSIONES

1. Los productos obtenidos a base de microorganismos y metabolitos demuestran ser una opción altamente confiable para la gestión de una agricultura sostenible y la recuperación de los suelos por su actividad nutritiva, fertilizante y de protección.
2. La tendencia en cuanto a innovación y desarrollo de bioproductos agrícolas está principalmente enfocada en la selección de nuevos microorganismos con una amplia acción sobre los cultivos y suelos, formulaciones más estables y con funciones multipropósitos (consorcios microbianos con acción fertilizante, plaguicida y/o estimulante en una única presentación), diseño de nuevos esquemas tecnológicos de alta eficiencia y la optimización de los medios de cultivo para el crecimiento celular a escalas superiores.
3. El aprovechamiento de los residuos agroindustriales y la biomasa bacteriana o vegetal constituyen opciones atractivas frente a los medios de cultivo sintéticos convencionales; los cuales no son factibles a escala comercial.

REFERENCIAS

- Aguilar, C. (2018). Production of a biological contrujaglbagol agent: Effect of a drying process of solid-state fermentation on viability of *Trichoderma* spores. *International Journal of Green Technology*, 4(1), 1–6. <https://doi.org/10.30634/2414-2077.2018.04.1>
- Akanmu, A. O., Olowe, O. M., Phiri, A. T., Nirere, D., Odebode, A. J., Karemera Umuhoza, N. J., Asemoloye, M. D., & Babalola, O. O. (2023). Bioresources in organic farming: Implications for sustainable agricultural systems. *Horticulturae*, 9(6), 1–16. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9060659>
- Bajić, B., Vučurović, D., Vasić, Đ., Jevtić-Mučibabić, R., & Dodić, S. (2023). Biotechnological production of sustainable microbial proteins from agro-industrial residues and by-products. *Foods*, 12(1), 2–21. <https://doi.org/10.3390/foods12010107>
- Behle, R. W., & Jackson, M. A. (2014). Effect of fermentation media on the production, efficacy, and storage stability of *Metarhizium brunneum* microsclerotia formulated as a prototype granule. *Journal of Economic Entomology*, 107(2), 582–590. <https://doi.org/10.1603/EC13426>
- Benrebah, F., Prevost, D., Yezza, A., & Tyagi, R. (2007). Agro-industrial waste materials and wastewater sludge for rhizobial inoculant production: A review.
-

- Bioresource Technology*, 98(18), 3535–3546.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.066>
- Bhardwaj, N., Kaur, M., & Kaur, J. (2022). Role of biostimulants in agriculture. *Springer Nature Singapore*, 239–262. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7080-0_10
- Celloto, V. R., Oliveira, A. J. B., Gonçalves, J. E., Watanabe, C. S. F., Matioli, G., & Gonçalves, R. A. C. (2012). Biosynthesis of indole-3-acetic acid by new *Klebsiella oxytoca* free and immobilized cells on inorganic matrices. *The Scientific World Journal*, 12(1), 1–7. <https://doi.org/10.1100/2012/495970>
- Chen, S., Hong, J.-Y., & Wu, W.-T. (2003). Fed-batch culture of *Bacillus thuringiensis* based on motile intensity. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 30(12), 677–681. <https://doi.org/10.1007/s10295-003-0098-1>
- Chojnacka, K. (2015). Innovative bio-products for agriculture. *Open Chemistry*, 13(1), 932–937. <https://doi.org/10.1515/chem-2015-0111>
- De Melo, G., De Carvalho, D., Junqueira, A., Karp, S., & Soccol, C. R. (2020). A review of selection criteria for starter culture development in the food fermentation industry. *Food Reviews International*, 36(2), 135–167. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1630636>
- Delgado-Arroyo, M. del M., Mendoza, K. L., González, M. I., Tadeo Lluch, J. L., & Martín, J. V. (2019). Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas de sustratos. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(4), 965–977. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.04.15>
- Desk, B. (2016). IIT Innovation Series: Boosting biofertilizer productivity. *BioVoiceNews*, <https://biovoicenews.com/iit-innovation-series-boosting-biofertilizer-productivity/>
- Estrella, M. J., Pieckenstain, F. L., Marina, M., Díaz, L. E., & Ruiz, O. A. (2004). Cheese whey: An alternative growth and protective medium for *Rhizobium loti* cells. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 31(3), 122–126. <https://doi.org/10.1007/s10295-004-0124-y>
- Fukui, S., & Tanaka, A. (1982). Immobilized microbial cells. *Annual Review of Microbiology*, 36(1), 145–172. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.36.100182.001045>
- Gao, S., Song, W., & Guo, M. (2020). The integral role of bioproducts in the growing bioeconomy. *Industrial Biotechnology*, 16(1), 13–25. <https://doi.org/10.1089/ind.2019.0033>
- García, M. C. (2021). Inmovilización de levaduras por atrapamiento para la fermentación de mostos. *Tesis presentada en opción al título de Licenciatura en Bioquímica, Universidad de la República, Uruguay.*, <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/30638/1/uy24-20218.pdf>
- Jiang, J., Zu, Y., Li, X., Meng, Q., & Long, X. (2020). Recent progress towards industrial rhamnolipids fermentation: Process optimization and foam control. *Bioresource Technology*, 298, 122394. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122394>
-

- Kalsoom, M., Rehman, F., Shafique, T., Junaid, S., Khalid, N., Adnan, M., Zafar, I., Tariq, M., Raza, A., & Zahra, A. M. (2020). Biological importance of microbes in agriculture, food and pharmaceutical industry: A review. *Innovare Journal of Life Sciences*, 8(6), 01–04. <https://doi.org/10.22159/ijls.2020.v8i6.39845>
- Kowalska, J., Tyburski, J., Matysiak, K., Tylkowski, B., & Malusá, E. (2020). Field exploitation of multiple functions of beneficial microorganisms for plant nutrition and protection: Real possibility or just a hope? *Frontiers in Microbiology*, 11, 01–09. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2020.01904>
- Kumar, P. K. R., & Lonsane, B. K. (1988). Immobilized growing cells of *Gibberella fujikuroi* P-3 for production of gibberellic acid and pigment in batch and semi-continuous cultures. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 28(6), 537–542. <https://doi.org/10.1007/BF00250408>
- Lacey, L. A. (2017). Microbial control of insect and mite pests: From theory to practice. *Elsevier: Academic Press*, 47–56. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803527-6.00004-4>
- López, G. (2020). Fermentación de poda de olivo con microorganismos inmovilizados para la obtención de bioetanol. *Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico, Universidad de Cádiz, España.*, <https://rodin.uca.es/handle/10498/23316>
- Lu, K., Jin, Q., Lin, Y., Lu, W., Li, S., Zhou, C., Jin, J., Jiang, Q., Ling, L., & Xiao, M. (2020). Cell-free fermentation broth of *Bacillus velezensis* strain S3-1 improves Pak Choi nutritional quality and changes the bacterial community structure of the rhizosphere soil. *Frontiers in Microbiology*, 11(2043), 01–14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.02043>
- Maitra, S., & Maitra, K. (2020). Chemistry of bioproducts. In *Practices and Perspectives in Sustainable Bioenergy. Green Energy and Technology*, 233–267. https://doi.org/10.1007/978-81-322-3965-9_11
- Malusá, E., Sas-Paszt, L., & Ciesielska, J. (2012). Technologies for beneficial microorganisms inocula used as biofertilizers. *The Scientific World Journal*, e491206. <https://doi.org/10.1100/2012/491206>
- Mehariya, S., Iovine, A., Casella, P., Musmarra, D., Chianese, S., Marino, T., Figoli, A., Sharma, N., & Molino, A. (2020). Bio-based and agriculture resources for production of bioproducts. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes.*, 263–282. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816778-6.00012-6>
- Mendes, G. O., Zafra, D. L., Vassilev, N. B., Silva, I. R., Ribeiro, J. I., & Costa, M. D. (2014). Biochar enhances *Aspergillus niger* rock phosphate solubilization by increasing organic acid production and alleviating fluoride toxicity. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(10), 3081–3085. <https://doi.org/10.1128/AEM.00241-14>
- Mendes, G. O., Galvez, A., Vassileva, M., & Vassilev, N. (2017). Fermentation liquid containing microbially solubilized P significantly improved plant growth and P uptake in both soil and soilless experiments. *Applied Soil Ecology*, 117, 208–211. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.05.008>
- Montoya-Rojas, G., Garcés-Ordoñez, O., & López-Navarro, J. (2024). Tendencias y desafíos en la producción alimentaria y sus implicaciones para el sistema global. *Wani*, 81, 01–22. <https://doi.org/10.5377/wani.v1i81.18767>
-

- Mutturi, S., Sahai, V., Sharma, S., & Bisaria, V. S. (2016). Strategies for high-density cultivation of bio-inoculants in submerged culture with special reference to Pseudomonads. *Springer India*, 181–196. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2647-5_10
- Oros, D., Pavleaia, M., Šantek, B., & Novak, S. (2011). Cultivation of the bacterium *Azotobacter chroococcum* for preparation of biofertilizers. *African Journal of Biotechnology*, 10(16), 3104–3111. <https://doi.org/10.5897/AJB10.1086>
- Pandey, A. (2003). Solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13(2), 81–84. [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(02\)00121-3](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(02)00121-3)
- Pérez, M. C., Oramas, J., Sotolongo, E., Valdivia, J., Román, Y., Beovides, Y., & Simó, J. (2020). Escalado de la producción de un biofertilizante a base de *Pseudomonas fluorescens*. *Bioteconología Vegetal*, 20(4), 298–312. <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/680>
- Quintana, L. (2022). Evaluación de la producción de ácido indolacético en *Bacillus subtilis* utilizando modelos metabólicos a escala genómica y algoritmos de optimización multiobjetivo. *Tesis presentada en opción al Grado Científico de Máster en Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, México.*, <http://ilitia.cua.uam.mx:8080/jspui/handle/123456789/1124>
- Rehman, I. U., Islam, T., Wani, A. H., Rashid, I., Sheergojri, I. A., Bandh, M. M., & Rehman, S. (2022). Biofertilizers: The role in sustainable agriculture. In *Sustainable Agriculture: Technical Progressions and Transitions*, 25–38. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83066-3_2
- Rico, I., & Blázquez, G. (2010). Escalado de reactores químicos y biológicos. *Editorial Técnica Avicam, Universidad de Granada.*, 51–126.
- Shay, L. K., Hunt, H. R., & Wegner, G. H. (1987). High-productivity fermentation process for cultivating industrial microorganisms. *Journal of Industrial Microbiology*, 2(2), 79–85. <https://doi.org/10.1007/BF01569506>
- Shi, T.-Q., Peng, H., Zeng, S.-Y., Ji, R.-Y., Shi, K., Huang, H., & Ji, X.-J. (2017). Microbial production of plant hormones: Opportunities and challenges. *Bioengineered*, 8(2), 124–128. <https://doi.org/10.1080/21655979.2016.1212138>
- Silvestrini, G. R., da Rosa, E. J., Corrêa, H. C., Dal Magro, T., Silvestre, W. P., Pauletti, G. F., & Conte, E. D. (2023). Potential use of phosphate-solubilizing bacteria in soybean culture. *AgriEngineering*, 5(3), 1544–1554. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166468>
- Soccol, C. R., Costa, E. S. F. da, Letti, L. A. J., Karp, S. G., Woiciechowski, A. L., & Vandenberghe, L. P. de S. (2017). Recent developments and innovations in solid state fermentation. *Biotechnology Research and Innovation*, 1(1), 52–71. <https://doi.org/10.1016/j.biori.2017.01.002>
- Sojka, M., & Saeid, A. (2022). Bio-based products for agriculture. In *Smart Agrochemicals for Sustainable Agriculture.*, 279–310. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817036-6.00001-7>
- Soumare, A., Boubekri, K., Lyamlouli, K., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Kouisni, L. (2020). From isolation of phosphate solubilizing microbes to their formulation and use as biofertilizers: Status and needs. *Frontiers in Bioengineering and*
-

- Biotechnology*, 7(425), 1–14.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2019.00425>
- Srivastava, A. (2015). Rapid callus induction and culturing of *Allium sativum* using different phyto-hormonal combinations. *Journal of Biotechnology & Biomaterials*, 5(6), 3087–3089. <https://doi.org/10.4172/2155-952X.C1.044>
- Suthar, H., Hingurao, K., Vaghashiya, J., & Parmar, J. (2017). Fermentation: A process for biofertilizer production. In *Microorganisms for Green Revolution. Volume 1: Microbes for Sustainable Crop Production.*, 229–252. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6241-4_12
- Tang, Y.-J., & Zhong, J.-J. (2003). Role of oxygen supply in submerged fermentation of *Ganoderma lucidum* for production of *Ganoderma* polysaccharide and ganoderic acid. *Enzyme and Microbial Technology*, 32(3), 478–484. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(02\)00338-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(02)00338-1)
- Tarafdar, J. C. (2022). Biostimulants for sustainable crop production. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, 299–313. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85579-2.00004-6>
- Teale, W. D., Paponov, I. A., & Palme, K. (2006). Auxin in action: Signalling, transport and the control of plant growth and development. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 7(11), 847–859. <https://doi.org/10.1038/nrm2020>
- Vassilev, N., & Vassileva, M. (1992). Production of organic acids by immobilized filamentous fungi. *Mycological Research*, 96(7), 563–570. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)80981-7](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)80981-7)
- Vassilev, N., Medina, A., Azcon, R., & Vassileva, M. (2006). Microbial solubilization of rock phosphate on media containing agro-industrial wastes and effect of the resulting products on plant growth and P uptake. *Plant and Soil*, 287(1), 77–84. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9054-y>
- Vassilev, N., Nikolaeva, I., & Vassileva, M. (2007). Indole-3-acetic acid production by gel-entrapped *Bacillus thuringiensis* in the presence of rock phosphate ore. *Chemical Engineering Communications*, 194(4), 441–445. <https://doi.org/10.1080/00986440600983486>
- Vassilev, N., Eichler-Löbermann, B., Flor-Peregrin, E., Martos, V., Reyes, A., & Vassileva, M. (2017). Production of a potential liquid plant bio-stimulant by immobilized *Piriformospora indica* in repeated-batch fermentation process. *AMB Express*, 7(1), 106–124. <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0408-z>
- Vassilev, N., Vassileva, M., Martos, V., Garcia del Moral, L. F., Kowalska, J., Tylkowski, B., & Malusá, E. (2020). Formulation of microbial inoculants by encapsulation in natural polysaccharides: Focus on beneficial properties of carrier additives and derivatives. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1–9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.00270>
- Vassileva, M., Malusà, E., Sas-Paszt, L., Trzcinski, P., Galvez, A., Flor-Peregrin, E., Shilev, S., Canfora, L., Mocali, S., & Vassilev, N. (2021). Fermentation strategies to improve soil bio-inoculant production and quality. *Microorganisms*, 9(6), 1254. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9061254>
- Wang, G., Haringa, C., Noorman, H., Chu, J., & Zhuang, Y. (2020). Developing a computational framework to advance bioprocess scale-up. *Trends in*
-

- Biotechnology*, 38(8), 846–856. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.01.009>
- Xia, J., Wang, G., Fan, M., Chen, M., Wang, Z., & Zhuang, Y. (2021). Understanding the scale-up of fermentation processes from the viewpoint of the flow field in bioreactors and the physiological response of strains. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 30, 178–184. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.12.004>
- Yafetto, L. (2022). Application of solid-state fermentation by microbial biotechnology for bioprocessing of agro-industrial wastes from 1970 to 2020: A review and bibliometric analysis. *Heliyon*, 8(3), 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09173>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Gabriel Alejandro Iglesias Barreto. Análisis formal, conceptualización, metodología, redacción-primer redacción.
 - Ing. Yosviel Reyes Delgado. Redacción - revisión y edición.
 - Dr.C. Iván Leandro Rodríguez Rico. Supervisión, redacción-revisión, edición.
-