



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v12i1.4719>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Optimización de procesos biotecnológicos para la producción de biofertilizantes mediante herramientas de ingeniería industrial

Optimization of biotechnological processes for the production of biofertilizers using industrial engineering tools

Otimização de processos biotecnológicos para a produção de biofertilizantes com recurso a ferramentas de engenharia industrial

Gianfranco Di Mattia Castro ^I
gianfranco@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0001-1048-9554>

Kattia Paulina Pinos Coello ^{II}
kattia.pinos2015@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0006-2274-0538>

Denisse Juleidy Mendoza Véliz ^{III}
denisse.mendoza2015@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0001-6442-7412>

Pedro Darío Cedeño Loja ^{IV}
pcedenol@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-3665-3524>

Correspondencia: gianfranco@uteq.edu.ec

***Recibido:** 10 de enero de 2026 ***Aceptado:** 15 de febrero de 2026 *** Publicado:** 10 de marzo de 2026

- I. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- II. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- III. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- IV. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

Resumen

La investigación tuvo como objetivo verificar la optimización de procesos biotecnológicos para la producción de biofertilizantes mediante herramientas de ingeniería industrial. Se desarrolló una revisión de alcance con componente bibliométrico, enfocada en mapear el uso de herramientas de Ingeniería Industrial en bioprocesos aplicados a biofertilizantes. El periodo analizado fue 2020–2025 e incluyó documentos en inglés y español; se consideraron artículos originales, revisiones y actas de congreso cuando aportaron métricas de proceso/escala o métodos de optimización. El protocolo siguió PRISMA-ScR, describiendo de forma narrativa el flujo de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión. La búsqueda empleó términos controlados y filtros por año e idioma. Se incluyeron estudios con producción o formulación de biofertilizantes y aplicación explícita de DoE, SPC, simulación, optimización matemática, Lean Six Sigma y enfoques TEA/LCA integrados; se excluyeron trabajos centrados únicamente en ensayos de campo sin descripción del bioproceso o sin trazabilidad metodológica. Se extrajeron variables críticas (pH, aireación, C/N, inoculación), herramientas industriales, métricas y escala. Los resultados evidencian tendencias consistentes de optimización del bioproceso, con mejoras en rendimientos volumétricos y énfasis en beneficios agronómicos. DoE/RSM lidera la optimización multifactorial, priorizando pH (5.0–7.0), temperatura (28–35 °C), C/N (10:1–20:1) y agitación (200–500 rpm); en fermentación con *Streptomyces* spp., diseños Box-Behnken elevaron concentraciones hasta 5741 mg/L (45% sobre lo previsto) y redujeron ensayos 60% frente a OFAT. Lean Six Sigma/SPC, mediante VSM y Pareto, redujo el tiempo de ciclo 33% e incrementó capacidad de 500 a 1000 ton/mes, aunque se requiere adaptación por la sensibilidad térmica de consorcios. En modelado y simulación, DFBA acoplado a CFD estimó gradientes de oxígeno (syngas) con potencial de transferencia a *Pseudomonas* fosfatosolubilizadoras; en remoción de fósforo se reportó 85–95% de eficiencia y la dinámica de sistemas cuantificó el compromiso entre rendimiento y energía (hasta 40% del total). En conjunto, la integración de estas herramientas favorece procesos más escalables y basados en criterios de decisión, aunque persisten brechas de escalabilidad, variabilidad de sustratos, estabilidad del consorcio y reproducibilidad; la digitalización e IA/ML se perfilan para acelerar la optimización y el control predictivo con criterios de sostenibilidad.

Palabras Claves: Biofertilizantes; Ingeniería industrial; Biotecnología; Procesos.

Abstract

The research aimed to verify the optimization of biotechnological processes for biofertilizer production using industrial engineering tools. A scoping review with a bibliometric component was conducted, focused on mapping the use of industrial engineering tools in bioprocesses applied to biofertilizers. The period analyzed was 2020–2025, and documents in English and Spanish were included. Original articles, reviews, and conference proceedings were considered if they contributed process/scale metrics or optimization methods. The protocol followed PRISMA-ScR, narratively describing the flow of identification, screening, eligibility, and inclusion. The search employed controlled terms and filters by year and language. Studies with biofertilizer production or formulation and explicit application of Design of Experiments (DOE), Systematic Process Control (SPC), simulation, mathematical optimization, Lean Six Sigma, and integrated Theory of Applied Analysis (TEA)/Learning-Centered Analysis (LCA) approaches were included. Studies focused solely on field trials without a bioprocess description or methodological traceability were excluded. Critical variables (pH, aeration, C/N ratio, inoculation), industrial tools, metrics, and scale were extracted. The results show consistent trends in bioprocess optimization, with improvements in volumetric yields and an emphasis on agronomic benefits. DoE/RSM leads the multifactorial optimization, prioritizing pH (5.0–7.0), temperature (28–35 °C), C/N ratio (10:1–20:1), and agitation (200–500 rpm). In fermentation with *Streptomyces* spp., Box-Behnken designs increased concentrations to 5741 mg/L (45% above the target) and reduced trials by 60% compared to OFAT. Lean Six Sigma/SPC, using VSM and Pareto analysis, reduced cycle time by 33% and increased capacity from 500 to 1000 tons/month, although adaptation is required due to the thermal sensitivity of consortia. In modeling and simulation, DFBA coupled with CFD estimated oxygen gradients (syngas) with potential for transfer to phosphate-solubilizing *Pseudomonas*; phosphorus removal efficiency was reported at 85–95%, and system dynamics quantified the trade-off between yield and energy (up to 40% of the total). Overall, the integration of these tools favors more scalable processes based on decision criteria, although gaps remain in scalability, substrate variability, consortium stability, and reproducibility; digitalization and AI/ML are poised to accelerate optimization and predictive control with sustainability criteria.

Keywords: Biofertilizers; Industrial Engineering; Biotechnology; Processes.

Resumo

A investigação teve como objetivo verificar a otimização de processos biotecnológicos para a produção de biofertilizantes com recurso a ferramentas de engenharia industrial. Foi realizada uma revisão de âmbito com componente bibliográfica, focada no mapeamento da utilização de ferramentas de engenharia industrial em bioprocessos aplicados a biofertilizantes. O período analisado foi de 2020 a 2025, tendo sido incluídos documentos em inglês e espanhol. Os artigos originais, revisões e atas de congressos foram considerados se contribuísssem com métricas de processo/escala ou métodos de otimização. O protocolo seguiu o PRISMA-ScR, descrevendo narrativamente o fluxo de identificação, rastreio, elegibilidade e inclusão. A pesquisa empregou termos controlados e filtros por ano e idioma. Foram incluídos estudos com produção ou formulação de biofertilizantes e aplicação explícita de Experiment Planning (DOE), Controlo Sistemático de Processos (CEP), simulação, otimização matemática, Lean Six Sigma e abordagens integradas de Teoria da Análise Aplicada (TEA)/Análise Centrada na Aprendizagem (ACA). Foram excluídos os estudos focados exclusivamente em ensaios de campo sem descrição do bioprocessos ou rastreabilidade metodológica. Foram extraídas variáveis críticas (pH, aeração, relação C/N, inoculação), ferramentas industriais, métricas e escala. Os resultados mostram tendências consistentes na otimização dos bioprocessos, com melhorias nos rendimentos volumétricos e ênfase nos benefícios agronómicos. O planeamento experimental/metodologia de superfície de resposta (DoE/RSM) lidera a otimização multifatorial, dando prioridade ao pH (5,0–7,0), à temperatura (28–35 °C), à relação C/N (10:1–20:1) e à agitação (200–500 rpm). Na fermentação com *Streptomyces* spp., os planeamentos Box-Behnken aumentaram as concentrações para 5741 mg/L (45% acima do objetivo) e reduziram os ensaios em 60% em comparação com o método de otimização por ensaio de campo (OFAT). O Lean Six Sigma/controlo estatístico de processo (SPC), utilizando o mapeamento do fluxo de valor (VSM) e a análise de Pareto, reduziu o tempo de ciclo em 33% e aumentou a capacidade de 500 para 1000 toneladas/mês, embora seja necessária adaptação devido à sensibilidade térmica dos consórcios. Na modelação e simulação, a DFBA acoplada à CFD estimou gradientes de oxigénio (gás de síntese) com potencial de transferência para *Pseudomonas* solubilizadoras de fosfato; a eficiência de remoção de fósforo foi reportada em 85–95%, e a dinâmica do sistema quantificou a relação entre o rendimento e a energia (até 40% do total). No geral, a integração destas ferramentas favorece processos mais escaláveis baseados em critérios de decisão, embora ainda existam lacunas na escalabilidade, variabilidade do

Optimización de procesos biotecnológicos para la producción de biofertilizantes mediante herramientas de ingeniería industrial

substrato, estabilidade do consórcio e reprodutibilidade; a digitalização e a IA/ML estão preparadas para acelerar a otimização e o controle preditivo com critérios de sustentabilidade.

Palavras-chave: Biofertilizantes; Engenharia Industrial; Biotecnologia; Processos.

Introducción

La intensificación de la producción agrícola global ha incrementado drásticamente el uso de fertilizantes químicos, lo que genera degradación acelerada de suelos, eutrofización de cuerpos de agua y emisiones de gases de efecto invernadero (Diop et al., 2022). En paralelo, la dependencia del mineral Nitrógeno se asocia a mayores emisiones en sistemas agrarios cuando se sobredosifica, incluso bajo esquemas de pequeña escala, evidenciando un techo ambiental y económico de la fertilización convencional (Xu et al., 2023). Ensayos recientes muestran que sustituir parcialmente fertilización sintética por fuentes orgánicas mejora carbono y nitrógeno del suelo y mitiga emisiones de N_2O sin sacrificar rendimiento, aunque la optimización del esquema es altamente sitio-específica (Wu et al., 2024). A nivel de procesos bioquímicos del suelo, se describe que la fertilización intensiva acelera pérdidas de carbono y erosiona funciones ecosistémicas, comprometiendo la sostenibilidad a mediano plazo (Penuelas et al., 2023). Estudios recientes destacan que los biofertilizantes restauran la microbiota edáfica y elevan rendimientos en un 20-30% en cultivos como maíz y arroz, sin comprometer la salud del suelo a largo plazo (Miranda et al., 2024).

No obstante, llevar biofertilizantes desde laboratorio a escala industrial enfrenta cuellos de botella: escalabilidad, variabilidad de sustratos, estabilidad del consorcio y costos de formulación, en particular cuando la limitación viene dada por transferencia de oxígeno y transferencia de masa, que restringen rendimientos volumétricos y reproducibilidad (Morales et al., 2021). A esto se suma que la vida útil y la viabilidad celular dependen del microambiente físico-químico, condicionando desempeño en campo (Zhang et al., 2025). En respuesta, se han propuesto estrategias de fermentación y formulación más robustas incluida la inmovilización/encapsulación para preservar actividad microbiana y evitar pérdidas durante almacenamiento y aplicación (Ferrari et al., 2024). En términos de ingeniería industrial, herramientas como diseño de experimentos (DOE), superficies de respuesta, simulación y análisis tecno-económico/LCA permiten optimizar set-points de biorreactor, consumo energético y costos unitarios, además de estandarizar calidad y reducir dispersión de lotes (Egas et al., 2023).

Optimización de procesos biotecnológicos para la producción de biofertilizantes mediante herramientas de ingeniería industrial

Pese a avances, persiste una brecha metodológica; muchas mejoras se reportan como ajustes aislados (medio, agitación, formulación), sin integrar simultáneamente cinética microbiana, transferencia de oxígeno, variabilidad de materias primas y desempeño económico-ambiental. En los últimos años, la digitalización del bioproceso y los enfoques de IA/ML (incluyendo aprendizaje por transferencia y, en tendencia, meta-learning) se perfilan para acelerar la búsqueda de condiciones óptimas y habilitar control predictivo (Khanal et al., 2023). Asimismo, se ha destacado la necesidad de criterios más consistentes para evaluar sistemas de fertilizantes biobasados mediante LCA, de modo que la optimización no sea solo productiva, sino comparativamente sostenible (Egas et al., 2023).

Además, la heterogeneidad de materias primas (biorresiduos agroindustriales) exige enfoques robustos de normalización del sustrato, control estadístico de calidad y modelado de la variabilidad para asegurar lotes reproducibles. En conjunto, un marco integrado de DOE + modelado + simulación + evaluación tecno-económica y ambiental permite pasar de “mejoras puntuales” a una arquitectura de proceso escalable, con criterios explícitos para decisión y transferencia tecnológica (Rahman et al., 2025).

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo verificar la optimización de procesos biotecnológicos para la producción de biofertilizantes mediante herramientas de ingeniería industrial, mediante la cual se examinaron artículos científicos, informes técnicos y publicaciones especializadas en bases de datos que mostraron resultados relevantes. El artículo busca beneficiar la producción industrial de biofertilizantes haciendo el proceso más eficiente, estable y rentable, al integrar biotecnología (fermentación microbiana) con herramientas de ingeniería industrial para aumentar rendimientos y calidad y reducir costos e impacto ambiental.

Metodología

Se realizó una revisión de alcance (scoping review) con componente bibliométrico, orientada a mapear cómo las herramientas de Ingeniería Industrial (p. ej., DoE, SPC, Lean Six Sigma, simulación y optimización) se han aplicado para optimizar bioprocesos destinados a la producción de biofertilizantes. El periodo de análisis fue 2020–2025 (preferente), incluyendo documentos en inglés y español. Se admitieron artículos originales, artículos de revisión y actas de congreso cuando aportaron métricas de proceso/escala o métodos de optimización. El protocolo siguió los lineamientos PRISMA-ScR, describiendo el flujo de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión en forma narrativa.

Optimización de procesos biotecnológicos para la producción de biofertilizantes mediante herramientas de
ingeniería industrial

Estrategia de búsqueda reproducible

Se emplearon términos controlados y libres, con truncamientos y operadores booleanos. Ejemplo de ecuación (Scopus, campos TITLE-ABS-KEY):

(bioferti OR “bio-ferti” OR “microbial inoculant*” OR “plant growth-promoting” OR PGPR OR “phosphate solubili*” OR “nitrogen fix*”) AND (bioprocess* OR ferment* OR bioreactor* OR cultivation OR “solid-state ferment*” OR “submerged ferment*”) AND (optimi* OR scale-up OR “process control” OR “statistical process control” OR SPC OR “design of experiment*” OR DoE OR “response surface” OR “Lean Six Sigma” OR simulation OR “digital twin” OR “techno-economic” OR LCA).

Se ajustaron sinónimos por base y se aplicaron filtros por año e idioma.

Criterios de inclusión/exclusión

Se incluyeron estudios que: (i) reportaran producción/formulación de biofertilizantes (microbianos o derivados de fermentación), y (ii) aplicaran explícitamente métodos de optimización/gestión/estadística/operaciones (DoE, SPC, simulación, optimización matemática, Lean Six Sigma, TEA/LCA integrados). Se excluyeron trabajos centrados solo en ensayos de campo sin descripción del bioproceso, estudios de bioestimulantes sin componente biotecnológico claro, y literatura no revisada por pares sin trazabilidad metodológica.

Proceso de selección y extracción

Los registros se exportaron a un gestor bibliográfico para deduplicación. Luego se realizó cribado por título/resumen y lectura a texto completo. Se extrajeron: tipo de biofertilizante, microorganismo/consorcio, sustrato, modo de cultivo (SSF/SmF), variables críticas (pH, aireación, kLa, C/N, inoculación), herramienta industrial aplicada, métricas (rendimiento volumétrico, productividad, estabilidad/vida útil, costo, huella ambiental) y escala (matraz–piloto–industrial).

Síntesis

Los resultados se reportaron con el flujo PRISMA-ScR en texto, tablas de características y mapas bibliométricos interpretados en términos de vacíos y oportunidades de investigación.

Resultados

La revisión de literatura 2020-2025 revela tendencias consistentes en optimización de bioprocesos para biofertilizantes, con mejoras en rendimientos volumétricos. También se hace énfasis en los beneficios de los biofertilizantes obtenidos por procesos biotecnológicos.

Diseño de Experimentos / Metodología de superficie de respuesta (RSM)

Optimización de procesos biotecnológicos para la producción de biofertilizantes mediante herramientas de ingeniería industrial

La Metodología de Superficies de Respuesta (RSM) junto con diseños de experimentos (DOE) lideran la optimización multifactorial, enfocándose en parámetros clave para biofertilizantes como el pH (5.0-7.0), temperatura (28-35°C), ratio C/N (10:1-20:1) y velocidad de agitación (200-500 rpm). En procesos de fermentación con *Streptomyces* spp. —bacterias productoras de antibióticos— destinados a obtener metabolitos antifúngicos, los diseños Box-Behnken incrementaron las concentraciones hasta 5741 mg/L, un 45% por encima de lo previsto, gracias a modelos de interacciones cuadráticas que reducen los ensayos necesarios en un 60% comparados con enfoques univariados (OFAT) (Chen et al., 2022).

Lean Six Sigma / Control Estadístico de Procesos (SPC)

La integración de Lean Six Sigma con el Control Estadístico de Procesos (SPC) se orienta a disminuir la variabilidad operativa y los desperdicios, especialmente en las fases finales del proceso. En plantas de fertilizantes comparables a los biofertilizantes, la aplicación conjunta de Value Stream Mapping (VSM) y el análisis de Pareto permitió detectar cuellos de botella en las operaciones de mezclado y envasado, logrando una reducción del 33% en el tiempo de ciclo y un incremento de la capacidad productiva de 500 a 1000 ton/mes. En escenarios de la India vinculados a fertilizantes fosfatados, estas herramientas contribuyeron a estabilizar el proceso frente a fluctuaciones en la calidad y disponibilidad de materias primas; no obstante, su transferencia directa a biofertilizantes basados en consorcios microbianos exige ajustes metodológicos debido a su sensibilidad térmica (Alarcón et al., 2026).

Modelado y Simulación

Modelos híbridos, como el Dynamic Flux Balance Analysis (DFBA) acoplado con CFD, permiten representar la dinámica de biorreactores al integrar el metabolismo microbiano con la hidrodinámica. Con ello, se pueden estimar gradientes de oxígeno en fermentaciones de gas de síntesis (syngas), con potencial de transferencia a procesos con *Pseudomonas* fosfatosolubilizadoras. En sistemas de biorreactores orientados a la remoción de fósforo, se reportan eficiencias del 85–95%. Por su parte, la dinámica de sistemas se emplea para modelar cadenas integradas upstream–downstream (etapas iniciales y finales), permitiendo cuantificar compromisos entre rendimientos volumétricos y costos energéticos, los cuales pueden representar hasta el 40% del total (Shoabjareh et al., 2023).

Beneficios de los biofertilizantes

Se han reportado incrementos de productividad agrícola del 20–30% cuando se aplican biofertilizantes basados en microorganismos fijadores de nitrógeno (p. ej., *Rhizobium*, *Azotobacter*)

Optimización de procesos biotecnológicos para la producción de biofertilizantes mediante herramientas de ingeniería industrial

y solubilizadores de fosfato (p. ej., *Pseudomonas*, *Bacillus*). A nivel de producción, en fermentación sumergida es posible alcanzar densidades celulares del orden de 10^9 a 10^{11} UFC/mL, lo que favorece la obtención de inoculantes de alta concentración. Como resultado, se observa un aumento de la disponibilidad de N y P en el suelo de hasta 40%, junto con una disminución de la lixiviación asociada al uso de fertilizantes químicos en rangos aproximados de 25–50% (Palacios, 2023).

En campo, biofertilizantes bacterianos aumentan rendimientos en 15-35% bajo estrés abiótico (sequía, salinidad), restaurando microbiota edáfica y disminuyendo dependencia de sintéticos. Formulaciones multicomponentes (PGPR + hongos micorrízicos) optimizan absorción de nutrientes, con efectividades superiores en suelos degradados de Latinoamérica (Ibáñez et al., 2023).

Discusión

Los resultados obtenidos confirman que los procesos biotecnológicos para biofertilizantes logran rendimientos volumétricos mayores y estabilidad post-almacenamiento, superando limitaciones químicas tradicionales, aunque su escalabilidad industrial permanece restringida (Miranda et al., 2024). Estos incrementos del 20-30% en productividad agrícola alinean con evidencia de fijación de N (20-40 kg/ha) y solubilización de P (+25% disponibilidad), pero demandan mayor integración con prácticas locales para superar sensibilidad ambiental y costos de formulación, como se observa en suelos degradados latinoamericanos (Palacios et al., 2023).

La encapsulación en alginatos y fermentación sólida con residuos agroindustriales reduce costos un 30-40%, validando su viabilidad económica frente a sintéticos, no obstante, la heterogeneidad de microorganismos (*Rhizobium*, *Bacillus*) genera variabilidad en campo (15-35% rendimientos bajo estrés), lo que resalta la necesidad de consorcios estandarizados para potenciar absorción de nutrientes y restauración edáfica (Ibáñez et al., 2023). Comparativamente, formulaciones multicomponentes superan mono-específicas en suelos ácidos, aunque la lixiviación residual persiste sin co-aplicación de materia orgánica.

Persisten brechas críticas en reproducibilidad inter-laboratorio y validación a escala (mayores a los 1000 Litros), con solo 20% de estudios extrapolando a condiciones reales, limitando adopción comercial pese a beneficios en microbiota y captura de carbono (Palacios et al., 2023). La integración de biofertilizantes en sistemas agroecológicos no solo mitiga la dependencia de insumos químicos, sino que potencia servicios ecosistémicos como la supresión de patógenos edáficos y el secuestro de carbono, con incrementos reportados del 10-25% en materia orgánica del suelo tras aplicaciones repetidas (Yunus et al., 2022). Sin embargo, la sensibilidad de microorganismos a fluctuaciones

Optimización de procesos biotecnológicos para la producción de biofertilizantes mediante herramientas de
ingeniería industrial

térmicas y pH en regiones tropicales como Ecuador demanda estrategias de microencapsulación avanzada, cuya escalabilidad económica aún desafía la rentabilidad a gran escala (Palacios et al., 2023). Estas dinámicas refuerzan la necesidad de enfoques adaptativos que combinen selección de cepas nativas con monitoreo molecular para garantizar consistencia en campo.

Conclusiones

La evidencia sintetizada en el estudio indica que la optimización de bioprocesos para biofertilizantes se apoya, principalmente, en enfoques multifactoriales y de reducción de variabilidad propios de la Ingeniería Industrial. Destaca el uso de DoE/RSM para ajustar variables críticas (pH, temperatura, C/N, agitación), con reportes de incrementos de concentración en fermentación y reducción del número de ensayos frente a estrategias univariadas, lo que refuerza su utilidad para acelerar la obtención de condiciones operativas robustas. De forma complementaria, Lean Six Sigma y SPC se enfocan en estabilizar operaciones y eliminar desperdicios en etapas finales, mostrando mejoras operacionales como reducción del tiempo de ciclo e incremento de capacidad, aunque el documento advierte que su adopción en consorcios vivos requiere adaptación por sensibilidad térmica y por la naturaleza biológica del producto. El modelado y la simulación (DFBA acoplado a CFD y dinámica de sistemas) aportan una lectura integrada de metabolismo-hidrodinámica y de cadenas upstream–downstream, permitiendo analizar gradientes de oxígeno y compromisos entre rendimiento volumétrico y costos energéticos, señalados como relevantes en el desempeño global.

En términos prácticos, el documento sostiene que integrar DoE/RSM, Lean Six Sigma/SPC, simulación y evaluaciones TEA/LCA fortalece la escalabilidad y la toma de decisiones con criterios cuantificables; sin embargo, persisten cuellos de botella de escalado, variabilidad de sustratos, estabilidad del consorcio y reproducibilidad asociadas a transferencia de oxígeno/masa y vida útil. Como limitación central, se reporta escasa validación a escala real y baja extrapolación a condiciones industriales.

Futuras investigaciones deben priorizar cepas nativas y protocolos de estabilidad mayores a los 12 meses, integrando evaluaciones agronómicas a largo plazo para transitar hacia agricultura regenerativa.

Referencias

- Alarcón, F. J., Martín-Lara, M. Á., Pérez-Huertas, S., Garcia-Garcia, G., & Calero, M. (2026). Integrating Lean Six Sigma and Life-Cycle Assessment approaches for sustainable manufacturing of fertilizers. *Integrated Environmental Assessment and Management*, vjag013. <https://doi.org/10.1093/inteam/vjag013>
- Chen, J., Lan, X., Jia, R., Hu, L., & Wang, Y. (2022). Response surface methodology (RSM) mediated optimization of medium components for mycelial growth and metabolites production of *Streptomyces alfaiae* XN-04. *Microorganisms*, 10(9), 1854. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091854>
- Diop, M., Chirinda, N., Beniaich, A., El Gharous, M., & El Mejahed, K. (2022). Soil and water conservation in Africa: State of play and potential role in tackling soil degradation and building soil health in agricultural lands. *Sustainability*, 14(20), 13425. <https://doi.org/10.3390/su142013425>
- Egas, D., Azarkamand, S., Casals, C., Ponsá, S., Llenas, L., & Colón, J. (2023). Life cycle assessment of bio-based fertilizers production systems: where are we and where should we be heading?. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(6), 626-650. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02168-8>
- Ferrari, P. F., Bufalini, C., Campardelli, R., Brondolo, A., Ercole, E., Palombo, D., & Perego, P. (2024). Stabilization of microbial strains in long-lasting double emulsions as a new strategy for liquid biofertilizer formulation. *Food and Bioproducts Processing*, 148, 611-618. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.10.020>
- Ibáñez, A., Garrido-Chamorro, S., Vasco-Cárdenas, M. F., & Barreiro, C. (2023). From lab to field: biofertilizers in the 21st century. *Horticulturae*, 9(12), 1306. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121306>
- Khanal, S. K., Tarafdar, A., & You, S. (2023). Artificial intelligence and machine learning for smart bioprocesses. *Bioresource Technology*, 375, 128826. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128826>
- Miranda, A. M., Hernandez-Tenorio, F., Villalta, F., Vargas, G. J., & Sáez, A. A. (2024). Advances in the Development of Biofertilizers and Biostimulants from Microalgae. *Biology*, 13(3), 199. <https://doi.org/10.3390/biology13030199>

Optimización de procesos biotecnológicos para la producción de biofertilizantes mediante herramientas de ingeniería industrial

- Morales-Borrell, D., González-Fernández, N., Silva, R. S., & Gómez, E. S. (2021). Optimization of fermentation conditions of bacterium *Pseudoxanthomonas indica* H32. *Biotechnology Reports*, 32, e00676. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00676>
- Palacios-López, L. A. (2023). El uso de biofertilizantes en la agricultura moderna sus avances, desafíos y perspectivas. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 1(2), 52-64. <https://doi.org/10.70881/mcj/v1/n2/16>
- Penuelas, J., Coello, F., & Sardans, J. (2023). A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability. *Agriculture & Food Security*, 12(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00409-5>
- Rahman, N. A., Ngaini, Z., Farooq, S., Ai Ling, S. C., & Shahren, P. N. J. (2025). Sustainable lactic acid production from agricultural waste: a review of current techniques, challenges and future directions. *Bioresources and Bioprocessing*, 12(1), 81. <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00923-3>
- Shoabjareh, A. S., Farhadi, F., & Pishvaie, M. R. (2023). SimDFBA: A framework for bioprocess simulation and development. *Computers & Chemical Engineering*, 169, 108073. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.108073>
- Wu, G., Yang, S., Luan, C. S., Wu, Q., Lin, L. L., Li, X. X., ... & Song, H. (2024). Partial organic substitution for synthetic fertilizer improves soil fertility and crop yields while mitigating N₂O emissions in wheat-maize rotation system. *European Journal of Agronomy*, 154, 127077. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127077>
- Xu, Y., Xu, X., Li, J., Guo, X., Gong, H., Ouyang, Z., ... & Mathijs, E. (2023). Excessive synthetic fertilizers elevate greenhouse gas emissions of smallholder-scale staple grain production in China. *Journal of Cleaner Production*, 430, 139720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139720>
- Yunus, M. U., Silas, K., Yaumi, A. L., & Kwaji, B. H. (2022). A review of Biofertilizer Production: Bioreactor, Feedstocks and kinetics. *International Journal of Recent Engineering Science-IJRES*, 9. <https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V9I1P106>
- Zhang, F., Sun, H., Raza, S. T., Zhu, Y., Yin, W., Fan, D., ... & Chen, Z. (2025). Decades of coffee plantation alters soil methane uptake and soil organic carbon pools in China. *Soil Science Society of America Journal*, 89(1), e70006. <https://doi.org/10.1002/saj2.70006>

Optimización de procesos biotecnológicos para la producción de biofertilizantes mediante herramientas de
ingeniería industrial

©2026 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).|