

FORTALECIMIENTO EN LA BIOTECNOLOGÍA A TRAVÉS DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA: REVISIÓN SISTEMÁTICA SOBRE AVANCES, DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES PARA LA AMAZONIA COLOMBIANA

Ángel A. Audor-Delgado¹, Paula A. Sánchez-Orozco²,
Yois S. Pascuas-Rengifo³

¹ Estudiante de ingeniería de sistemas. Facultad de Ingeniería, Universidad de la Amazonia. Correo: an.audor@udla.edu.co. ORCID: 0009-0000-8452-4095

² Estudiante de ingeniería de sistemas. Facultad de Ingeniería, Universidad de la Amazonia. Correo: paulaa.sanchez@udla.edu.co. ORCID: 0009-0001-5794-2950

³ Ingeniera de sistemas, Magíster en ciencias de la información y las comunicaciones, Doctora en educación y cultura ambiental. Docente catedrática de la Facultad de ingeniería, Universidad de la Amazonia. Correo: y.pascuas@udla.edu.co. ORCID: 0000-0001-6241-3247

RESUMEN

La biotecnología en la región amazónica se enfrenta a numerosos retos relacionados con el uso sostenible de su rica biodiversidad. La integración de la inteligencia artificial generativa (IAG), se presenta como una herramienta que acelera considerablemente este proceso. Por ende, este estudio se basa en analizar las oportunidades y retos específicos que tiene la implementación de la biotecnología junto a la IAG en la Amazonía colombiana a partir de una revisión sistemática, utilizando el método PRISMA y empleando términos relevantes como inteligencia artificial y biotecnología. Dando así resultados que muestran problemas, como las limitaciones de la infraestructura técnica y comunicativa, la falta de un marco legal que garantice la conformidad ética de la investigación biológica y la necesidad de proteger los conocimientos tradicionales y ancestrales. Para alcanzar un desarrollo sostenible requiere un enfoque global que equilibre la innovación tecnológica con los aspectos éticos, sociales y ambientales.

Palabras clave: Inteligencia Artificial Generativa, Biotecnología, Biodiversidad, Sostenibilidad, Ingeniería de sistemas

Recibido: 29 de agosto de 2025. Aceptado: 11 de noviembre de 2025

Received: August 29, 2025. Accepted: November 11, 2025

STRENGTHENING BIOTECHNOLOGY THROUGH GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE: A SYSTEMATIC REVIEW ON ADVANCES, CHALLENGES, AND OPPORTUNITIES FOR THE COLOMBIAN AMAZON

ABSTRACT

Biotechnology in the Amazon region faces numerous challenges related to the sustainable use of its rich biodiversity. The integration of generative artificial intelligence (GAI) emerges as a tool that significantly accelerates this process. Therefore, this study focuses on analyzing the specific opportunities and challenges involved in implementing biotechnology together with GAI in the Colombian Amazon through a systematic

review, using the PRISMA method and relevant terms such as artificial intelligence and biotechnology. The results highlight issues such as limitations in technical and communication infrastructure, the absence of a legal framework to ensure the ethical compliance of biological research, and the need to protect traditional and ancestral knowledge. Achieving sustainable development requires a global approach that balances technological innovation with ethical, social, and environmental considerations.

Keywords: *Generative Artificial Intelligence, Biotechnology, Biodiversity, Sustainability, Systems Engineering*

Cómo citar este artículo: A. Audor, P. Sánchez, Y. Pascuas. "Fortalecimiento en la biotecnología a través de la inteligencia artificial generativa: revisión sistemática sobre avances, desafíos y oportunidades para la Amazonia Colombiana", Revista Politécnica, vol.21, no.42 pp.122-140, 2025. DOI:10.33571/rpolitec.v21n42a8

1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de inteligencia artificial (IA) están surgiendo como herramientas transformadoras en los campos científico y tecnológico, con un potencial significativo para impulsar la innovación y el desarrollo sostenible en zonas con una biodiversidad única, como la Amazonía colombiana. haciendo que, a la hora de llegar a suministrar avances significativos en las áreas como la bioprospección, la producción de bioproductos y la conservación de recursos naturales, la incorporación de estas tecnologías tiene la posibilidad de llegar a beneficiar la economía local y la protección de los ecosistemas [1].

Así pues, la Amazonia Colombiana, conocida por su excelente biodiversidad, es una fuente sin explotar de recursos genéticos y biológicos que aún no han sido plenamente explorados ni utilizados. Lo cual llega a ser un completo desafío a la hora de optimizar los procesos de investigación, diseño y producción biotecnológica, la integración de la IAG ha llegado a ser consolidada en otros campos biotecnológicos y pueda llegar a ofrecer soluciones innovadoras para superar dichos obstáculos [2].

Muchos estudios han demostrado que la IA, ya se utiliza para acelerar los descubrimientos en biomedicina, bioprocesos y el diseño de sistemas biológicos complejo [3]. Además, contamos con los ODS (Objetivos de desarrollo sostenible) las cuales ayudan a justificar su impacto social, sobre todo los ODS 9 industria, innovación e infraestructura, ODS 12 producción y consumo responsable y ODS 15 vida de ecosistemas terrestre que brinda la información sobre la necesidad de potenciar el desarrollo biotecnológico.

Por lo cual el objetivo de esta investigación es analizar cómo la generación de IA puede llegar a potenciar la biotecnología en la Amazonía, llegando así a identificar avances, desafíos y oportunidades, además de presentar una visión integrada que sirva de base para futuras investigaciones y políticas públicas que apoyen el desarrollo biotecnológico sostenible y ético acorde con las peculiaridades ecológicas y sociales de la Amazonía, destacando su potencial y limitaciones en el contexto amazónico y ofreciendo pasos accionables para permitir su uso responsable y eficiente [4].

llegando así a fomentar la colaboración entre actores científicos, gubernamentales y comunitarios para maximizar los beneficios y minimizar los riesgos [5]. Teniendo en cuenta esto se plantean las siguientes preguntas de investigación:

¿En qué medida la IAG puede contribuir al fortalecimiento de la biotecnología en la Amazonia colombiana, y como pueden abordarse los desafíos técnicos, éticos y regulatorios que condicionan su implementación?

¿Cómo ha sido aplicada la IAG en el campo de la biotecnología y qué oportunidades y desafíos representa su implementación en la Amazonia colombiana?

Una vez mencionadas las preguntas que direccionaran el contexto del manuscrito, este se estructura de la siguiente manera: en primer lugar, la sección de metodología se detalla la metodología PRISMA utilizando la revisión sistemática, luego se presentan los resultados dando énfasis y contexto sobre el análisis bibliométrico y áreas relevantes en donde se identifica dicha aplicación, en la discusión se analizan las implicaciones de los hallazgos obtenidos y finalmente se concluye con una síntesis sobre los principales aportes y perspectivas futuras con la base a la implementación de estas tecnologías.



2. MÉTODO

Una revisión sistemática de literatura es un método estricto y organizado que asiste en la recolección, análisis e interpretación de la evidencia existente sobre un asunto particular con el objetivo de dar respuesta a interrogantes de investigación que se han planteado de manera evidente [6].

Con base a esta premisa y con el fin de dar respuesta a las preguntas de investigación planteadas, se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura con base en el método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), el cual es ampliamente utilizado en la actualidad para realizar revisiones sistemáticas en diversos campos del conocimiento, incluyendo biotecnología, ciencias de la salud y tecnologías emergentes [7]. La metodología PRISMA ha llegado a mostrar su gran eficiencia en garantizar la calidad, reproducibilidad y transparencia de las revisiones sistemáticas, llegando así a establecer estándares reconocidos internacionalmente para el manejo y reporte de estudios científicos [8].

La razón de su elección es debido a su disposición para proporcionar estructuras sistemáticas que permitan ayudar a mitigar el riesgo en la selección de los estudios investigativos, asegurando la veracidad de las búsquedas científicas y facilitando la evaluación de la calidad de dichos estudios [9]. Además, esta metodología hace énfasis en varios criterios claros para la presentación de los resultados, permitiendo a otros investigadores llegar a evaluar la validez de los hallazgos y replicar el proceso de revisión cuando sea necesario [10]. Para ello, se consideran una serie de etapas sistemáticas que involucra: la identificación detallada de artículos escogidos a través de estrategias de búsqueda, la filtración inicial utilizando criterios de inclusión y exclusión, un cribado que involucra el análisis crítico de títulos y resúmenes con el fin de establecer la posible relevancia de cada estudio, la decisión de elegibilidad basada en una revisión exhaustiva del texto, y por último pero no menos importante la obtención sistemática de datos pertinentes en los estudios científicos y elegidos [11].

2.1 Fuentes de investigación

Las búsquedas bibliográficas se realizaron en diversas bases de datos; no obstante, dos de ellas fueron seleccionadas como fuentes primarias para recopilar la información esencial requerida para esta investigación. La primera base de datos fue *Scopus*, la cual es operada por *Elsevier* y se considera una de las plataformas más grandes y reconocidas en las búsquedas de información. Esta base de datos puede llegar a incluir artículos de revistas científicas, libros y conferencias, abarcando una gran diversidad de áreas del conocimiento como ciencias, tecnología, medicina y artes. Además de esto ofrece herramientas para analizar investigaciones, colaborar entre autores y encontrar publicaciones relevantes.

La segunda base de datos utilizada para la búsqueda fue *ScienceDirect*, también administrada por la editorial Elsevier. Esta base de datos ofrece millones de artículos y capítulos de libros en texto completo, principalmente en las áreas de tecnología, ciencias, medicina e ingeniería.

2.2 Estrategia de búsqueda

Inicialmente se realizó una búsqueda con las palabras claves del tema a trabajar, las cuales dan referencia al tema de interés con los artículos seleccionados en el área de Biotecnología articulada con la IAG. Se relaciona, la ecuación de búsqueda empleada en las bases de datos *Scopus*:

(Generative Artificial Intelligence OR “Creative artificial intelligence” OR “Generative Models” OR “systems engineering” OR “engineering processes”) AND (“Biothechnology” OR “Biological Engineering” OR “Biomolecular Technology” OR “Genetic modification”)

2.3 Criterios de inclusión y exclusión

Teniendo en cuenta que se requiere analizar estudios actualizados se opta por incluir publicaciones del periodo 2023-2025 los cuales se encuentran en la ventana de tiempo de los últimos cinco años.

En la Tabla 1 se presentan los criterios de inclusión y exclusión empleados en el proceso de revisión sistemática. Estos parámetros garantizan la selección adecuada de investigaciones en función del periodo de publicación, la base de datos utilizada y el idioma del artículo, entre otros aspectos.

Tabla 1

Criterios aplicados

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Período de publicación	
Publicaciones realizadas entre 2023 y 2025.	Publicaciones reportadas antes de 2023.
Bases de datos	
<i>ScienceDirect</i> <i>Scopus</i> <i>Scopus</i>	Diferentes a <i>Scopus</i> y <i>ScienceDirect</i> .
Idioma	
Las investigaciones están escritas en inglés y español.	Artículos escritos en idiomas diferentes al inglés o español.
Tipo de publicación	
Son artículos publicados en revistas indexadas.	Actas de conferencia, libros o capítulos de libro.
Metodología	
Estudios que se centran en la aplicación de IAG en biotecnología	Investigaciones diferentes al objeto de estudio establecido
Enfoque	
Estudios sobre Biotecnología a través de la IAG	Estudios que no se centran en la aplicación de IAG en biotecnología

Fuente: *Elaboración propia*

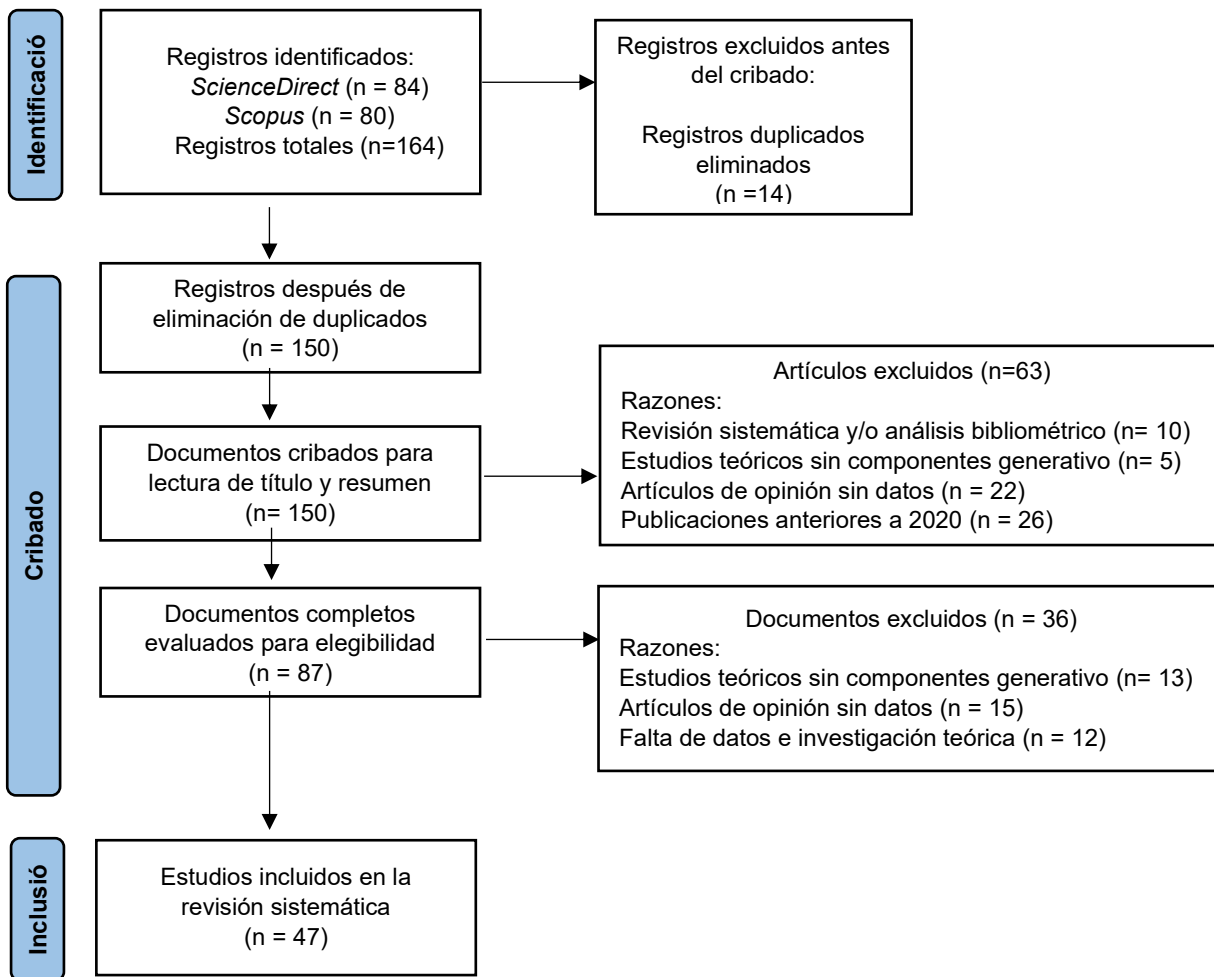
2.4 Recogida y análisis de datos

Se realizó la búsqueda en las bases de datos científicas *Scopus* y *ScienceDirect*, teniendo en cuenta los criterios de inclusión y exclusión (Tabla 1), como punto de partida se abarcan los artículos de revistas indexadas publicados entre 2023 y 2025, acreditando así la inclusión de artículos actuales y de gran calidad. La búsqueda se delimitó a investigaciones asociadas al área temática de Biotecnología a través de la IAG, escritas tanto en español como en inglés y con acceso abierto para asegurar la obtención del contenido total de las publicaciones. De esta manera, se identificaron un total de 164 registros iniciales.

Según los resultados de búsqueda en diversas bases de datos, este tema es muy popular actualmente y genera numerosos artículos. Debido a la gran cantidad de información, se buscaron artículos de acceso abierto publicados entre 2023 y 2025 sobre la aplicación de tecnologías de bioingeniería e inteligencia artificial. Por lo tanto, se seleccionaron 164 artículos. Tras eliminar los artículos duplicados, quedaron 47. El diagrama de la Figura 1 muestra los pasos del proceso de selección, se detallan gráficamente las etapas del proceso de selección llevado a cabo.

Figura 1

Diagrama de flujo



Fuente: Elaboración propia

Para analizar los artículos seleccionados, se realizó una plantilla en una hoja de cálculo *Excel*. La cual permitió sistematizar la extracción de datos clave, como autores, año de publicación, país, objetivo, tipo de investigación y aplicaciones específicas en el contexto del tema. De manera complementaria, el análisis se apoyó en la herramienta *Rayyan* para eliminar los artículos duplicados. *Bibliometrix* para realizar el análisis bibliométrico, haciendo énfasis en las métricas de productividad científica y visualización de tendencias temáticas.

2.5 Herramientas IAG utilizadas

Las herramientas que fueron empleadas en la investigación cumplieron con diferentes funciones según las necesidades. Empezando con *Claude*, utilizada para generar ideas relacionadas con palabras claves y facilitar las búsquedas de artículos necesarios. Por su parte *DeepL* fue primordial para el proceso de traducción de los artículos encontrados y para varios textos en inglés, logrando así comprender el contenido con mayor precisión. Por último, *Research Rabbit* se implementó como una herramienta de apoyo metodológico para la sistematización y compartición de la literatura relevante entre el equipo investigador.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de investigación científica

Después de haber seleccionado los artículos indicados para el análisis del trabajo, se logró recopilar 47 artículos para el análisis, mostrando una distribución temporal que demuestra el interés académico en la

convergencia entre la IAG y la biotecnología, dichos artículos se pueden observar en la Tabla 2, ordenados según el año de publicación.

Tabla 2

Artículos escogidos para el análisis

N	Título	Año	Noción central
1	<i>AI-Driven De Novo Design and Molecular Modeling for Discovery of Small-Molecule Compounds as Potential Drug Candidates Targeting SARS-CoV-2 Main Protease [20]</i>	2023	Modelos generativos de <i>deep learning</i> y modelado molecular para diseñar fármacos capaces de inhibir la proteasa principal de SARS-CoV-2, demostrando el potencial de la IA para el descubrimiento acelerado de antivirales frente a COVID-19.
2	<i>Artificial intelligence-driven systems engineering for next-generation plant-derived biopharmaceuticals [1]</i>	2023	Integración de IA, aprendizaje automático (ML) y aprendizaje profundo (DL) en la producción de biofármacos derivados de plantas. Describe cómo la IA optimiza el diseño, estabilidad y producción de proteínas recombinantes, superando limitaciones del sistema vegetal.
3	<i>Closed-loop optimization of nanoparticle synthesis enabled by robotics and machine learning [4]</i>	2023	Robótica e IA aceleran y mejoran la síntesis de nanopartículas.
4	<i>Evidence-based clinical engineering: Health information technology adverse events identification and classification with natural language processing [33]</i>	2023	Proyecto para crear un marco basado en técnicas de procesamiento de lenguaje natural e IA para identificar y clasificar eventos adversos relacionados con tecnologías de información en salud.
5	<i>FG-BERT: a generalized and self-supervised functional group-based molecular representation learning framework for properties prediction [31]</i>	2023	Modelo auto supervisado de aprendizaje para representar moléculas basándose en grupos funcionales, que logra alta precisión en la predicción de propiedades moleculares útiles para diseño de fármacos y materiales.
6	<i>A Deep Learning MI for Detecting Fake Medical Images to Mitigate Financial Insurance Fraud [28]</i>	2024	Modelo de aprendizaje profundo que evalúa imágenes médicas falsas generadas con técnicas de difusión estable para detectar fraudes en seguros médicos.
7	<i>A Novel Method for 3D Lung Tumor Reconstruction Using Generative Models [12]</i>	2024	Método para la reconstrucción 3D de tumores pulmonares utilizando modelos generativos. El enfoque combina tomografías computarizadas 2D con redes generativas profundas, para mejorar el diagnóstico y la planificación del tratamiento en oncología pulmonar.
8	<i>A systematic literature survey on skin disease detection and classification using machine learning and deep learning [49]</i>	2024	Revisión sistemática sobre detección y clasificación de enfermedades de la piel mediante ML y DL. Analiza modelos, <i>datasets</i> , métricas y desafíos como el ruido en imágenes, ofreciendo un consolidado útil para investigadores.

9	<i>Artificial intelligence based diagnosis of sulcus: assessment of videostroboscopy via deep learning [3]</i>	2024	Desarrollo y validación de modelos basados en redes neuronales convolucionales (CNN) para clasificar videostroboscopias de pacientes con sulcus (una condición de las cuerdas vocales), lesiones benignas y sujetos sanos. El modelo mostró alta precisión y superó a expertos otorrinolaringólogos en clasificación.
10	<i>Convergence of CRISPR and artificial intelligence: A paradigm shift in biotechnology [42]</i>	2024	Sinergia entre la tecnología de edición genética CRISPR y la IA. Aplicaciones en diagnóstico de enfermedades y descubrimiento de fármacos, además de desafíos éticos y regulatorios emergentes para uso responsable.
11	<i>Convolutional neural networks can identify brain interactions involved in decoding spatial auditory attention [22]</i>	2024	Desarrollo de un modelo de red neuronal convolucional para analizar interacciones cerebrales en tareas de atención auditiva espacial usando EEG reconstruido por fuente. El modelo identificó interacciones clave entre regiones parietales, centrales y frontales, logrando alta precisión para decodificar la atención espacial con aplicaciones potenciales en ayudas auditivas inteligentes y comprensión de los mecanismos neuronales de la atención.
12	<i>De novo protein design—From new structures to programmable functions [5]</i>	2024	Diseño de proteínas de <i>novo</i> combinando técnicas de IA con métodos basados en física. Describe cómo los avances actuales permiten construir proteínas con nuevas estructuras y funciones programables, integrando principios de ingeniería como modularidad y controlabilidad, abriendo fronteras para el diseño personalizado y funcionalidad sintética en biotecnología y medicina.
13	<i>Deconstructing synthetic biology across scales: a conceptual approach for training synthetic biologists [15]</i>	2024	Marco conceptual para formar biólogos sintéticos que integra conceptos multidisciplinarios a escala molecular, circuitos, células, comunidades biológicas y sociedad, incluyendo ética y sostenibilidad.
14	<i>Deep Learning Techniques for Hand Vein Biometrics: A Comprehensive Review [11]</i>	2024	Revisión de técnicas de <i>deep learning</i> para identificar personas mediante las venas de la mano
15	<i>Deep transfer learning technique to detect white blood cell classification in regular clinical practice using histopathological images [7]</i>	2024	Propuesta y evaluación de un sistema robusto para clasificación automática de tipos de leucocitos (eosinófilos, linfocitos, monocitos y neutrófilos) basado en <i>transfer learning</i> con seis modelos preentrenados (VGG16, ResNet50, AlexNet, MobileNet, GoogLeNet, EfficientNetBO). Utiliza un <i>dataset</i> de 12,500 imágenes y reporta hasta 100% de precisión en linfocitos y monocitos. Este trabajo apoya la automatización para mejorar el diagnóstico hematológico clínico.
16	<i>Enhancing biomechanical machine learning with limited data: generating realistic synthetic posture data using generative artificial intelligence [25]</i>	2024	Generación de datos sintéticos realistas de postura espinal 3D usando un <i>variational autoencoder</i> (VAE) para superar limitaciones de datos en biomecánica. Evaluación de la calidad de los datos sintéticos por expertos, clasificadores ML y mapeo paramétrico estadístico. Incorporación de datos sintéticos en modelos <i>autoencoders</i> para mejorar representación de características y reducción de errores de reconstrucción, con potencial para mejorar modelos ML en análisis biomecánico clínico y deportivo.
17	<i>Feature engineering to identify plant diseases using image processing and artificial intelligence: A review [16]</i>	2024	Técnicas de ingeniería para la identificación automática de enfermedades en plantas.

18	<i>GeneAI 3.0: powerful, novel, generalized hybrid and ensemble deep learning frameworks for miRNA species classification of stationary patterns from nucleotides [38]</i>	2024	GeneAI 3.0 es un marco híbrido y generalizado que combina aprendizaje profundo (CNN) y aprendizaje de máquina ensamblado para la clasificación robusta de especies de microARN (Humanos, Gorilas, Ratonos). Utiliza características convencionales y modernas (entropía, dimensión fractal, etc.) extraídas de patrones de nucleótidos, con 38 modelos clasificados y evaluados mediante inteligencia artificial explicable (XAI) y pruebas estadísticas. Supera a métodos previos en precisión y robustez para diagnóstico biomolecular.
19	<i>Generative AI and process systems engineering: The next frontier [37]</i>	2024	Revisan el impacto creciente de modelos de inteligencia artificial generativa (GenAI) en ingeniería de sistemas de proceso (PSE). Exploran aplicaciones desde diseño, optimización, integración hasta monitoreo, detallando ventajas, retos técnicos y el potencial de GenAI para transformar metodologías clásicas, con considerable impacto en eficiencia e innovación en PSE.
20	<i>Generative AI in healthcare: an implementation science informed translational path on application, integration and governance [46]</i>	2024	Revisión que aborda la integración responsable de GenAI en sistemas de salud. Presenta modelos teóricos y estrategias de implementación basados en ciencia de la implementación para superar barreras, gestionar riesgos y maximizar beneficios. Destaca aplicaciones en diagnóstico, administración, medicina personalizada y educación médica, con énfasis en ética, privacidad y la necesidad de evaluación continua para mejorar resultados clínicos.
21	<i>Generative artificial intelligence for de novo protein design [39]</i>	2024	IA genera nuevas proteínas con funciones específicas y diseños innovadores.
22	<i>Genetic modification optimization technique: A neural network multi-objective energy management approach [17]</i>	2024	Optimización genética basada en redes neuronales.
23	<i>Human–Robot Interaction through Dynamic Movement Recognition for Agricultural Environments [51]</i>	2024	Agricultura con reconocimiento de movimientos dinámicos mediante aprendizaje automático, robots autónomos para mejorar colaboración y seguridad en entornos agrícolas.
24	<i>Machine Learning and Deep Learning in Synthetic Biology: Key Architectures, Applications, and Challenges [19]</i>	2024	Impacto del aprendizaje automático y profundo en biología sintética. Explica el ciclo de diseño, construcción, prueba y aprendizaje (DBTL) en biología sintética y cómo IA acelera este proceso optimizando diseño de genes, proteínas y vías metabólicas.
25	<i>Machine learning in process systems engineering: Challenges and opportunities [45]</i>	2024	Perspectiva sobre el impacto potencial del aprendizaje automático (ML) en la ingeniería de sistemas de procesos (PSE). Describe desafíos metodológicos y oportunidades en diseño molecular, análisis de datos, optimización y control, destacando la relevancia de la integración de ML en diversas aplicaciones industriales para mejorar la eficiencia y descubrimiento.
26	<i>The whack-a-mole governance challenge for AI-enabled synthetic biology: literature review and emerging frameworks [47]</i>	2024	Desafío de gobernanza para la biología sintética habilitada por IA, destacando riesgos duales, seguridad biológica y bioética. Propone sistemas de alerta temprana y discusión sobre equilibrio entre innovación y seguridad.

27	<i>AI-driven multi-omics integration for multi-scale predictive modeling of genotype-environment-phenotype relationships [14]</i>	2025	IA integra datos genéticos y ambientales para predecir características y enfermedades
28	<i>An intelligent optimized object detection system for disabled people using advanced deep learning models with optimization algorithm [48]</i>	2025	Sistema de detección de objetos optimizado para personas con discapacidad visual que combina aprendizaje profundo (YOLOv7, MobileNetV3, TCN) con optimización <i>Sparrow Search</i> . Mejora la navegación segura con precisión del 99.57%, mediante filtrado Gaussiano para eliminar ruido y extracción eficiente de características para clasificación en tiempo real. Incluye mejora en procesamiento de imágenes para asistencia palmar táctil y navegación personalizada <i>indoor</i> .
29	<i>Application of generative adversarial networks in the restoration of blurred optical coherence tomography images caused by optical media opacity in eyes [29]</i>	2025	Redes generativas antagónicas (GANs) para restaurar imágenes borrosas causadas por opacidad en medios ópticos del ojo en tomografía de coherencia óptica. El método mejora notablemente la calidad de imagen y podría ser una herramienta clave para diagnósticos oftalmológicos más precisos.
30	<i>Artificial intelligence and communication technologies in academia: faculty perceptions and the adoption of generative AI [50]</i>	2025	Analiza percepciones, actitudes y adopción de GenAI entre profesores universitarios en ciencias sociales y humanidades usando modelos TAM y SCT. La confianza, utilidad percibida y refuerzo social influyen significativamente en la intención de uso. El estudio destaca retos y beneficios de integrar GenAI en educación superior, con énfasis en políticas para mejorar aprendizaje y adaptarse a una fuerza laboral con IA.
31	<i>Artificial Intelligence empowered evolution in medicine food homology: Innovations, challenges, and future prospects [9]</i>	2025	Plantea transformación de la industria de la medicina alimentaria integrando modelos de datos para mejorar cultivo, procesamiento, evaluación de calidad, análisis composicional y trazabilidad. Aborda desafíos como la variabilidad química y la gestión de calidad.
32	<i>Artificial intelligence strategies based on random forests for detection of AI-generated content in public health [32]</i>	2025	Propuesta y evaluación de un modelo <i>Random Forest</i> para detectar contenido generado por IA en textos relacionados con salud pública. Se entrenó con textos humanos y generados por IA, logrando una precisión aceptable. El modelo puede contribuir a mejorar la integridad informativa y combatir la desinformación en salud pública y políticas relacionadas.
33	<i>Artificial intelligence-driven neurotransmitter modeling: An integrative framework for personalized neuropsychiatric care [43]</i>	2025	Marco integrativo que usa IA para modelar neurotransmisores y personalizar tratamientos neuropsiquiátricos
34	<i>Artificial-intelligence-driven Innovations in Mechanistic Computational Modeling and Digital Twins for Biomedical Applications [8]</i>	2025	Combinación de grandes datos ómicos con modelos mecánicos detallados facilita la simulación y predicción de sistemas biológicos complejos, impulsando avances en farmacología, descubrimiento de fármacos y medicina personalizada.

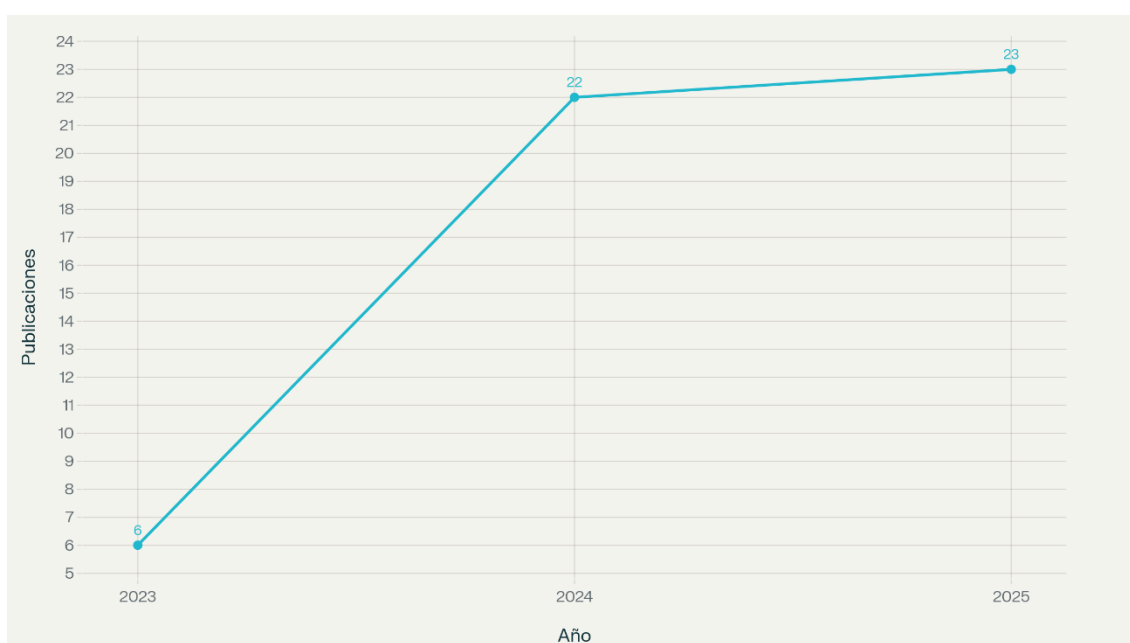


35	<i>Based on computer simulation and experimental verification: mining and characterizing novel antimicrobial peptides from soil microbiome [41]</i>	2025	Identificación de péptidos antimicrobianos (AMPs) en datos de metagenómica de suelos con alta precisión (92.7%). Se validaron péptidos candidatos (P4) mediante acoplamiento molecular y simulaciones dinámicas, demostrando actividad antimicrobiana contra bacterias patógenas, con potencial para aplicaciones en seguridad alimentaria.
36	<i>Bridging biomedicine and technology: the impact of AI & GenAI in life sciences and agribusiness [30]</i>	2025	Revisión que aborda el impacto combinado de la IA y la IAG en ciencias de la vida y agronegocios. Se discuten aplicaciones de IA en biomedicina, agricultura y biotecnología, destacando la integración de datos genómicos, avances en diseño de biomoléculas y mejora en procesos agrícolas para sostenibilidad y productividad.
37	<i>Cell factory design with advanced metabolic modelling empowered by artificial intelligence [18]</i>	2025	Diseño de fábricas celulares utilizando modelado metabólico avanzado potenciado por IA. Se analizan modelos híbridos mecánicos y de aprendizaje automático para mejorar diseño y optimización de células productoras, destacando avances en biotecnología sintética para producción eficiente y adaptable de biomoléculas.
38	<i>Deep learning and computer vision in plant disease detection: a comprehensive review of techniques, models, and trends in precision agricultura [10]</i>	2025	Detección de enfermedades en plantas usando visión por computadora y aprendizaje profundo en agricultura de precisión. Analiza más de 278 artículos y destaca la efectividad de técnicas de imagen (RGB, multispectral e hiperespectral) y modelos DL (CNN, transformers, redes generativas). Discute retos y recomendaciones para integración práctica en entornos agrícolas, con enfoque en mejora de productividad, precisión y respuesta temprana ante enfermedades del cultivo.
39	<i>Exploring the neuromagnetic signatures of cognitive decline from mild cognitive impairment to Alzheimer's disease dementia [6]</i>	2025	Uso de magnetoencefalografía (MEG) y resonancia magnética (MRI) para predecir el deterioro cognitivo y progresión de deterioro cognitivo leve a demencia tipo Alzheimer. Se encontró que la potencia espectral en MEG y el volumen hipocampal predicen de forma complementaria la progresión, sugiriendo que los biomarcadores no invasivos de actividad cerebral pueden mejorar la identificación precoz y seguimiento de la enfermedad de Alzheimer.
40	<i>Generative Artificial Intelligence in Pathology and Medicine: A Deeper Dive [26]</i>	2025	Impacto de la IAG en patología y medicina, incluyendo generación de reportes diagnósticos, imágenes sintéticas para entrenamiento, educación y personalización de tratamientos. Se discuten avances, herramientas, limitaciones, y consideraciones éticas y de privacidad en la implementación clínica de GenAI.
41	<i>Industrial Agent AI and generative modeling in complex systems [2]</i>	2025	Integración de IA y modelos generativos en la optimización y control de sistemas industriales complejos. El enfoque híbrido combina modelos mecanicistas y aprendizaje automático para superar limitaciones en sistemas no lineales.
42	<i>Multiscale process systems engineering for electrochemically mediated CO2 capture: A mini-review [34]</i>	2025	Avances en captación de CO2 electroquímicamente (EMCC) desde la perspectiva de ingeniería de sistemas de procesos a múltiples escalas. Aborda modelos termodinámicos, diseño molecular y estructural, optimización de proceso, con desafíos y oportunidades para mejorar eficiencia energética.

43	<i>Phage engineering using synthetic biology and artificial intelligence to enhance phage applications in food industry [21]</i>	2025	Revisión del uso de bacteriófagos para tratar infecciones resistentes a múltiples antibióticos en unidades de cuidados intensivos
44	<i>Real-time respiratory motion forecasting with online learning of recurrent neural networks for accurate targeting in externally guided radiotherapy [27]</i>	2025	Algoritmos eficientes para redes neuronales recurrentes (RNN) para predecir en tiempo real el movimiento respiratorio durante radioterapia pulmonar. Algoritmos como UORO, SnAp-1 y DNI mostraron métricas más bajas de error y tiempos de inferencia reducidos, mejorando la precisión de la irradiación y seguridad del tratamiento.
45	<i>Responsible AI in biotechnology: balancing discovery, innovation and biosecurity risks [24]</i>	2025	Riesgos bioéticos y de seguridad en la biotecnología. Desafíos y oportunidades en el diseño y desarrollo de proteínas por IA.
46	<i>Synthetic biology and artificial intelligence in crop improvement [23]</i>	2025	Predicción estructural de proteínas con IA para obtener cultivos más eficientes, resilientes y nutritivos.
47	<i>The role of artificial intelligence in the diagnosis of diabetic retinopathy through retinal lesion features: a narrative review [40]</i>	2025	Avances en el uso de IA para diagnóstico automático de retinopatía diabética (DR) mediante análisis de lesiones retinianas. Evalúa modelos de IA para segmentación y clasificación, <i>datasets</i> públicos/privados, métricas de evaluación y retos en la implementación clínica, además de presentar un repositorio abierto para facilitar la investigación colaborativa. El objetivo es apoyar diagnósticos tempranos y mejorar resultados clínicos.

Fuente: *Elaboración propia*

Esta producción científica muestra un crecimiento exponencial, teniendo un conteo de 6 publicaciones en el año 2023, 22 en el año 2024 y 23 registrados en el año 2025, dejando en evidencia la relevancia emergente de esta área en la investigación, como se muestra en la Figura 1.



observar nodos principales como *artificial intelligence*, *machine learning*, *Synthetic biology* y *predictive modeling*.

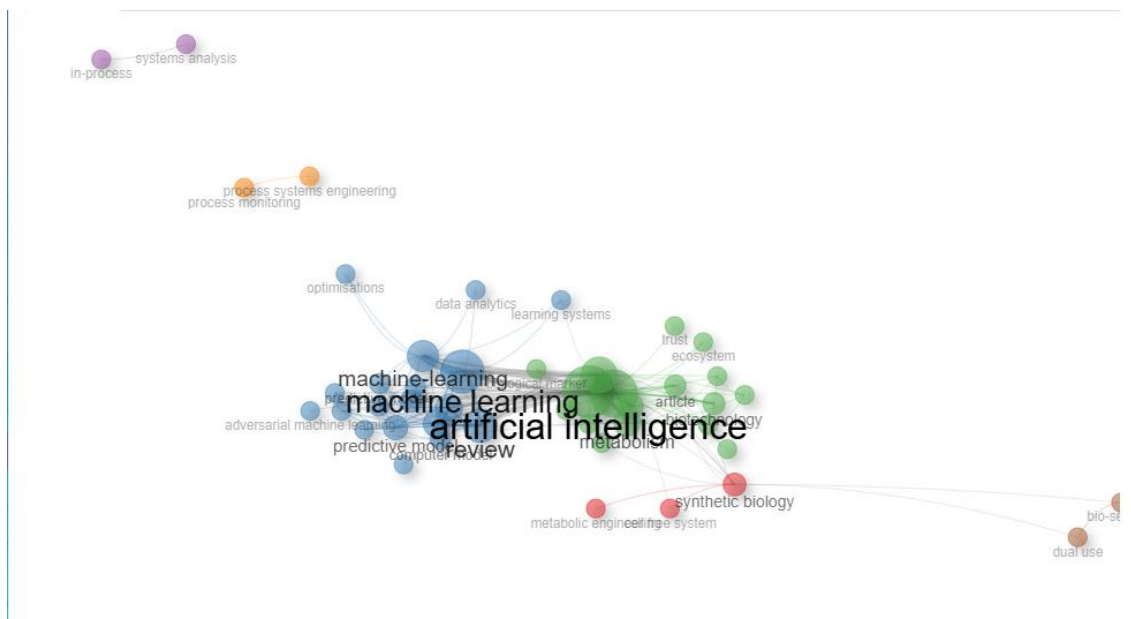


Figura 4 Red de co-ocurrencia de palabras claves

Estos resultados bibliométricos no solo indican que los investigadores están cada vez más interesados en la unión de la IAG y la biotecnología, sino que también identifican nuevas áreas temáticas con un alto potencial de aplicación [14]. Una de ellas es el diseño de moléculas biológicas mediante inteligencia artificial, como se puede reflejar en el artículo de [15] en donde aprovecha estas aplicaciones para la formación de biología sintética. Gracias a un análisis de los artículos elegidos, se ha llegado a descubrir que la IA cada vez más ocupa un papel fundamental en la evolución de procesos como el diseño de proteínas, además de otras áreas y aplicaciones en dicho campo [16].

3.2 Aplicación de diseño de biomoléculas y proteínas

Con el análisis de los artículos seleccionados se hallaron que los descubrimientos muestran que la IAG ha llegado a transformar nuevamente el diseño de proteínas logrando así la formación de estructuras con funciones específicas programables según [17]. Las herramientas de aprendizaje profundo han llegado a acelerar considerablemente los procesos de descubrimiento minimizando el periodo de diseño de varios años a pocas semanas, como por ejemplo las redes generativas son aplicaciones o herramientas que se han comenzado a utilizar en simulaciones estructurales biomoleculares [17].

3.3 Ingeniería metabólica y biología sintética

En las investigaciones examinadas se evidencia también la utilización de la IA en el diseño de fábricas celulares a través de un modelo metabólico sofisticado [18]. Esta aplicación hace entender el gran avance cualitativo que tiene para optimizar rutas metabólicas desafiantes, logrando así la predicción y modificación de vías biosintéticas con un gran porcentaje de exactitud. En [19] se enfatiza de que los algoritmos de aprendizaje pueden analizar grandes cantidades de datos con el objetivo de identificar estrategias y aumentar la producción de metabolitos de interés. Llegando así a que la unión entre la biotecnología, biología sintética y la IAG haya mostrado con total éxito la reprogramación de microorganismos para la producción de compuestos de gran valor agregado [20].

La ingeniería de fagos mediante el uso de la biología sintética e IA ha permitido darle usos en la industria de alimentos. Según [21] ofreciendo posibilidades para la creación de bioconservantes naturales basados en microorganismos de la Amazonia. Dicha aplicación abre grandes posibilidades para la conservación de alimentos tropicales y de productos originarios de la biodiversidad amazónica [22].

3.4 Descubrimiento acelerado de compuestos bioactivos

En los artículos analizados como el de [23] y [24] también se mencionan combinaciones de IAG con métodos de bioprospección que podría impulsar notablemente el hallazgo de nuevos compuestos bioactivos en la biodiversidad de la amazonia. Los modelos de aprendizaje automático poseen la capacidad de anticipar

propiedades farmacológicas de los metabolitos secundarios mucho antes de su creación o separación, maximizando así los recursos de investigación [25].

Dicha aplicación de la IA fomenta un paradigma revolucionario para la región Amazónica, que indica que menos del 1% de las especies vegetales han llegado a ser estudiadas completamente desde el punto farmacológico [26]. Los algoritmos de aprendizaje profundo pueden llegar a procesar grandes cantidades de datos moleculares acelerando gradualmente los procesos de identificación prometedoras [27].

3.5 Bioseguridad y IA responsable

En el estudio [28] se resalta la importancia que tiene equilibrar el descubrimiento, la innovación y los riesgos de bioseguridad en la aplicación de IA responsable en la biotecnología. Ya que, para la Amazonia, esto implicaría desarrollar marcos regulatorios que ayuden a proteger la biodiversidad mientras que permitan la innovación biotecnológica [29]. Los peligros de bioseguridad que representa esta implementación pueden llegar a incluir la posibilidad de crear organismos modificados con características desconocidas, la liberación accidental de estos agentes biológicos en ecosistemas frágiles, y el uso errático de tecnologías, podrían tener usos tanto beneficiosas como perjudiciales [30]. Estos riesgos se pueden llegar a ampliar debido a la alta conectividad ecológica de la región amazónica, donde una alteración en un área puede tener efectos en todo el ecosistema.

3.6 Capacidad técnica y formación especializada

Resulta imperativo desarrollar competencias técnicas especializadas en la convergencia de la IA y la Biotecnología. Según las partes interesadas, la aplicación exitosa de la IA en biotecnología requiere que los profesionales posean un profundo conocimiento de las ciencias de la vida y de técnicas computacionales avanzadas, como el aprendizaje automático, el procesamiento de datos y el modelado predictivo [19].

El desarrollo de investigadores profesionales representa un gran desafío en la región amazónica, la cual aporta conexiones limitadas con programas de posgrado especializados y centros de investigación internacionales [31]. Por ende, dicho análisis muestra que la capacitación debe ser multidisciplinaria y abarcar no solo aspectos técnicos, sino también parámetros éticos y regulatorios, que son realmente importantes para la región amazónica.

El análisis sistemático de los artículos seleccionados y la síntesis investigativa demuestran que la IAG posee un potencial significativo y estratégico para el fortalecimiento de la biotecnología en la región amazónica. Este potencial se evidencia en aplicaciones interesantes, agrupadas en cinco áreas principales: descubrimiento de compuestos bioactivos, optimización de bioprocesos, monitoreo ecosistémico, mejoramiento de cultivos y producción de biomateriales [32].

Sin embargo, la implementación de dichas aplicaciones requiere abordar desafíos significativos en la infraestructura tecnológica para que puedan llegar a ser de manera exitosa como se plantea en [33], marcos regulatorios, protección del conocimiento tradicional y desarrollo de capacidades técnicas especializadas son retos y desafíos que las investigaciones tienen para llegar a implementar de manera satisfactoria la IA en la biotecnología.

Esto hace que las demostraciones científicas sugieran que un enfoque gradual y colaborativo priorice la sostenibilidad y la equidad, logrando maximizar los beneficios de la IAG mientras se mitigan los riesgos asociados con su implementación en el contexto amazónico [34].

4. DISCUSIÓN

Los datos analizados muestran que la IAG ha pasado de ser una herramienta experimental por convertirse en un catalizador del cambio en numerosos ámbitos de la biotecnología, lo que confirma las conclusiones de [35] y [36] las cuales hace énfasis sobre las tendencias emergentes de la IA en el campo de la biotecnología. No obstante, la concentración geográfica de la investigación en los países industrializados pone de manifiesto una brecha considerable que la Amazonía colombiana podría aprovechar como oportunidad para diferenciarse y asumir un liderazgo regional.

El análisis de los resultados muestra que la IAG no solo acelera los procesos biológicos existentes, sino que también redefine por completo los modelos de exploración e innovación en este campo [37]. El aumento exponencial del número de artículos científicos entre 2023 y 2025 indica un punto de inflexión tecnológico, en el que la combinación de la IA y la biotecnología alcanza su madurez práctica [38]. Esta tendencia responde directamente a las preguntas de investigación y muestra que la IAG puede contribuir de manera significativa



a reforzar la biotecnología en la Amazonia, pero su implementación exitosa depende decisivamente de la resolución de problemas multidimensionales que van más allá del ámbito tecnológico [39].

Según un análisis comparativo con evaluaciones limitadas que fueron realizadas en el pasado sobre dicho campo en el desarrollo, los estudios anteriores se centraban en casos de aplicación aislados de la IA en el ámbito de la biotecnología como así lo hizo ver [40], mientras que los documentos actuales proponen un enfoque más integrado y sistemático. Lo planteado en [37] y [41] enfatizan que la IAG puede resultar una nueva frontera en la ingeniería de procesos concordando con los resultados de dicho estudio, sin embargo, este último también amplía dicha perspectiva al contexto Amazónico y aclara las posibilidades específicas que no se han tenido en cuenta. Por ejemplo, la combinación de *CRISPR* e IA que mencionan [42] podría suponer un cambio de modelo y ser de especial importancia para la conservación y el uso sostenible de los recursos genéticos en la Amazonia.

Dichos resultados del análisis indican que la biotecnología en la región amazónica se encuentra en un punto de inflexión histórico. Ya que la IAG ofrece herramientas sin referencias para investigar y aprovechar la biodiversidad de la región, pero también plantea retos éticos y normativos que requieren un marco conceptual innovador [43]. Las opiniones de [24] y [44], sobre la IA responsable en el ámbito de la biotecnología son especialmente pertinentes, ya que la región amazónica necesita coordinar la innovación tecnológica con la protección de los conocimientos tradicionales, además, en [45] se menciona la prioridad de enfoques de gobernanza culturalmente sensible y adaptable para la implementación de dichas tecnologías.

Debido a que la infraestructura computacional y conectividad representan barreras tangibles, pero los desafíos más complejos residen en la dimensión humana y regulatoria [46]. Es por eso por lo que se enfatiza la necesidad de marcos regulatorios que evolucionen al ritmo de la innovación tecnológica, como sugiere [47] y [48] en su análisis de gobernanza para la IA en biología sintética, por lo cual se requiere repensar los modelos tradicionales de regulación biotecnológica [49]. Hablando ya en el ámbito amazónico, esto hace que se fomenten marcos que no solo ayuden a proteger la bioseguridad, sino que también garanticen la igualdad en la distribución de beneficios y el respeto por la soberanía de las comunidades indígenas sobre sus recursos genéticos y conocimientos ancestrales [50]. Por ende, la ingeniería de sistemas persiste en que la implementación exitosa de la IAG en la biotecnología necesita de enfoques que permitan reconocer las interconexiones entre componentes técnicos, económicos, sociales y culturales [51]. Debido a que resultan insuficientes para abordar la complejidad de este desafío, requiriendo así de enfoques adaptativos que puedan potenciar el aprendizaje y la experiencia acumulada.

Además, la investigación realizada en países industrializados brinda la oportunidad para que la Amazonia colombiana pueda llegar a posicionarse como líder en el campo de la biotecnología sostenible. Esta tendencia biotecnológica puede llegar a permitir que varias regiones con alta biodiversidad, pero menor desarrollo tecnológico salte hacia el desarrollo científico - tecnológico. Un hallazgo crucial que se debe destacar en los resultados de la investigación son los vacíos críticos identificados en el conocimiento actual, en la aplicación de IAG en contextos de alta biodiversidad como la Amazonia, debido a los desafíos que se pueden dar a la hora de implementarlos en ecosistemas frágiles y comunidades indígenas. Esto se da debido a la falta de marcos metodológicos para evaluar el impacto ético y cultural, además de la ausencia de gobernanza que añadan conocimientos tradicionales con innovación tecnológica avanzada.

De esta manera, y teniendo como referencia las preguntas de investigación, el análisis revela que los desafíos técnicos pueden llegar a ser importantes pero son menos complejos que los éticos y regulatorios, principalmente en el contexto amazónico debido al conocimiento ancestral y la soberanía indígena, además de esto aunque ya se han establecido aplicaciones en cinco áreas de la biotecnología, aún resulta un desafío crítico en la implementación responsables de estas tecnologías en regiones de alta biodiversidad.

5. CONCLUSIONES

La revisión sistemática evidencia que la biotecnología está experimentando una transformación paradigmática, impulsada por la integración disruptiva de la biotecnología, ya que la IAG no es solo otra herramienta más: está revolucionando completamente cómo se descubren nuevos medicamentos, el desarrollo de procesos biológicos y el diseño de soluciones para los desafíos ambientales. Lo que más sorprende fue ver cómo entre 2023 y 2025 la investigación científica literalmente explotó, demostrando que estas tecnologías finalmente están listas para transformar regiones como la Amazonía colombiana.

La evidencia obtenida sugiere resultados alentadores: mientras el mundo desarrollado se enfoca en laboratorios cerrados, se tiene la biodiversidad más rica del planeta como laboratorio natural. La combinación de tecnologías como *CRISPR* con algoritmos inteligentes está abriendo puertas. Se puede crear microorganismos que produzcan materiales sostenibles, desarrollar sistemas que detecten enfermedades

tropicales antes de que se propaguen, y aprovechar plantas amazónicas de manera que respeten tanto la ciencia como los saberes ancestrales.

El principal aporte disruptivo de esta investigación radica en la evidencia de un nuevo paradigma: una biotecnología simbiótica que prioriza la colaboración con la naturaleza, superando el enfoque tradicional de lucha o dominio. La IAG no es solo una herramienta para hacer biotecnología más eficiente; es una oportunidad para reinventar completamente cómo se piensa la relación entre tecnología, naturaleza y sociedad. Convertir a la Amazonía colombiana en el ejemplo mundial de cómo la biotecnología del siglo XXI puede ser poderosa, sostenible y justa al mismo tiempo.

De este modo, este estudio sirve no solo para orientar a futuras investigaciones sino también para el desarrollo de capacidades técnicas, buscando así un uso responsable y eficiente de la IA en la biotecnología amazónica, que respete tanto el avance tecnológico como el conocimiento y la protección ambiental.

6. REFERENCIAS

- [1] S. Parthiban, T. Vijeesh, T. Gayathri, B. Shanmugaraj, A. Sharma, and R. Sathishkumar, "Artificial intelligence-driven systems engineering for next-generation plant-derived biopharmaceuticals," 2023, *Frontiers Media SA*. doi:10.3389/fpls.2023.1252166.
- [2] M. R. Boskabadi *et al.*, "Industrial Agentic AI and generative modeling in complex systems," Jun. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi:10.1016/j.coche.2025.101150.
- [3] Ö. T. Kavak, Ş. Gündüz, C. Vural, and N. Enver, "Artificial intelligence based diagnosis of sulcus: assesment of videostroboscopy via deep learning," *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, Nov. 2024. doi: 10.1007/s00405-024-08801-y.
- [4] J. Park, Y. M. Kim, S. Hong, B. Han, K. T. Nam, and Y. Jung, "Closed-loop optimization of nanoparticle synthesis enabled by robotics and machine learning," Mar. 01, 2023, *Cell Press*. doi: 10.1016/j.matt.2023.01.018.
- [5] T. Kortemme, "De novo protein design—From new structures to programmable functions," Feb. 01, 2024, *Elsevier B.V*. doi: 10.1016/j.cell.2023.12.028.
- [6] S. Gaubert *et al.*, "Exploring the neuromagnetic signatures of cognitive decline from mild cognitive impairment to Alzheimer's disease dementia," *EBioMedicine*, vol. 114, p. 105659, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.ebiom.2025.105659.
- [7] K. A. Davamani, M. Jawahar, L. J. Anbarasi, V. Ravi, A. Al Mazroa, and C. R. R. Robin, "Deep transfer learning technique to detect white blood cell classification in regular clinical practice using histopathological images," *Multimed Tools Appl*, Mar. 2024, doi: 10.1007/s11042-024-19133-8.
- [8] B. L. Puniya, "Artificial-intelligence-driven Innovations in Mechanistic Computational Modeling and Digital Twins for Biomedical Applications," 2025, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jmb.2025.169181.
- [9] L. Zhang, B. Liao, D. Liu, Q. Jiang, and Q. Sun, "Artificial Intelligence empowered evolution in medicine food homology: Innovations, challenges, and future prospects," Jul. 01, 2025, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.fbio.2025.106928.
- [10] A. Upadhyay *et al.*, "Deep learning and computer vision in plant disease detection: a comprehensive review of techniques, models, and trends in precision agriculture," *Artif Intell Rev*, vol. 58, no. 3, Mar. 2025, doi: 10.1007/s10462-024-11100-x.
- [11] M. Hemis, H. Kheddar, S. Bourouis, and N. Saleem, "Deep learning techniques for hand vein biometrics: A comprehensive review," *Information Fusion*, vol. 114, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.inffus.2024.102716.
- [12] H. Najafi, K. Savoji, M. Mirzaeibonehkhater, S. V. Moravvej, R. Alizadehsani, and S. Pedrammehr, "A Novel Method for 3D Lung Tumor Reconstruction Using Generative Models," *Diagnostics*, vol. 14, no. 22, Nov. 2024, doi: 10.3390/diagnostics14222604.

- [13] X. Xiao *et al.*, “Deep Learning-Based Medical Ultrasound Image and Video Segmentation Methods: Overview, Frontiers, and Challenges,” *Sensors*, vol. 25, no. 8, Apr. 2025, doi: 10.3390/s25082361.
- [14] Y. Wu and L. Xie, “AI-driven multi-omics integration for multi-scale predictive modeling of genotype-environment-phenotype relationships,” *Comput Struct Biotechnol J*, vol. 27, pp. 265–277, 2025, doi: 10.1016/j.csbj.2024.12.030.
- [15] A. S. Karim *et al.*, “Deconstructing synthetic biology across scales: a conceptual approach for training synthetic biologists,” *Nat Commun*, vol. 15, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-49626-x.
- [16] S. M. Javidan, A. Banakar, K. Rahnama, K. A. Vakilian, and Y. Ampatzidis, “Feature engineering to identify plant diseases using image processing and artificial intelligence: A comprehensive review,” *Smart Agricultural Technology*, vol. 8, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100480.
- [17] M. AlShafeey and O. Rashdan, “Genetic modification optimization technique: A neural network multi-objective energy management approach,” *Energy and AI*, vol. 18, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egyai.2024.100417.
- [18] H. Lu, L. Xiao, W. Liao, X. Yan, and J. Nielsen, “Cell factory design with advanced metabolic modelling empowered by artificial intelligence,” *Metab Eng*, vol. 85, pp. 61–72, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ymben.2024.07.003.
- [19] M. K. Goshisht, “Machine Learning and Deep Learning in Synthetic Biology: Key Architectures, Applications, and Challenges,” Mar. 05, 2024, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acsomega.3c05913.
- [20] A. M. Andrianov, M. A. Shulda, K. V. Furs, A. M. Yushkevich, and A. V. Tuzikov, “AI-Driven De Novo Design and Molecular Modeling for Discovery of Small-Molecule Compounds as Potential Drug Candidates Targeting SARS-CoV-2 Main Protease,” *Int J Mol Sci*, vol. 24, no. 9, May 2023, doi: 10.3390/ijms24098083.
- [21] X. Yuan, L. Fan, H. Jin, Q. Wu, and Y. Ding, “Phage engineering using synthetic biology and artificial intelligence to enhance phage applications in food industry,” Apr. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.cofs.2025.101274.
- [22] K. Mahjoory, A. Bahmer, and M. J. Henry, “Convolutional neural networks can identify brain interactions involved in decoding spatial auditory attention,” *PLoS Comput Biol*, vol. 20, no. 8, Aug. 2024, doi: 10.1371/journal.pcbi.1012376.
- [23] D. Zhang, F. Xu, F. Wang, L. Le, and L. Pu, “Synthetic biology and artificial intelligence in crop improvement,” Feb. 10, 2025, *Cell Press*. doi: 10.1016/j.xplc.2024.101220.
- [24] N. E. Wheeler, “Responsible AI in biotechnology: balancing discovery, innovation and biosecurity risks,” 2025, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/fbioe.2025.1537471.
- [25] C. Dindorf *et al.*, “Enhancing biomechanical machine learning with limited data: generating realistic synthetic posture data using generative artificial intelligence,” *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/fbioe.2024.1350135.
- [26] H. H. Rashidi *et al.*, “Generative Artificial Intelligence in Pathology and Medicine: A Deeper Dive,” Apr. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.modpat.2024.100687.
- [27] M. Pohl, M. Uesaka, H. Takahashi, K. Demachi, and R. B. Chhatkuli, “Real-time respiratory motion forecasting with online learning of recurrent neural networks for accurate targeting in externally guided radiotherapy,” *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 269, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.cmpb.2025.108828.
- [28] M. A. Arshed, S. Mumtaz, Ștefan C. Gherghina, N. Urooj, S. Ahmed, and C. Dewi, “A Deep Learning Model for Detecting Fake Medical Images to Mitigate Financial Insurance Fraud,” *Computation*, vol. 12, no. 9, p. 173, Aug. 2024, doi: 10.3390/computation12090173.

- [29] Z. Wang *et al.*, “Application of generative adversarial networks in the restoration of blurred optical coherence tomography images caused by optical media opacity in eyes,” *BMJ Open Ophthalmol*, vol. 10, no. 1, May 2025, doi: 10.1136/bmjophth-2024-001987.
- [30] N. B. da Cunha, F. C. Fernandes, A. Gil-Ley, O. L. Franco, N. Timakondur, and F. F. Costa, “Bridging biomedicine and technology: the impact of AI & GenAI in life sciences and agribusiness,” *Gene*, p. 149623, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.gene.2025.149623.
- [31] B. Li, M. Lin, T. Chen, and L. Wang, “FG-BERT: a generalized and self-supervised functional group-based molecular representation learning framework for properties prediction,” *Brief Bioinform*, vol. 24, no. 6, Nov. 2023, doi: 10.1093/bib/bbad398.
- [32] I. V. Pantic and S. Mugosa, “Artificial intelligence strategies based on random forests for detection of AI-generated content in public health,” *Public Health*, vol. 242, pp. 382–387, May 2025, doi: 10.1016/j.puhe.2025.03.029.
- [33] A. Luschi, P. Nesi, and E. Iadanza, “Evidence-based clinical engineering: Health information technology adverse events identification and classification with natural language processing,” *Heliyon*, vol. 9, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e21723.
- [34] Y. Hu, L. Sun, and T. Zhou, “Multiscale process systems engineering for electrochemically mediated CO₂ capture: A mini-review,” *Chem Eng Sci*, vol. 307, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.ces.2025.121340.
- [35] A. Holzinger, K. Keiblinger, P. Holub, K. Zatloukal, and H. Müller, “AI for life: Trends in artificial intelligence for biotechnology,” *N Biotechnol*, vol. 74, pp. 16–24, May 2023, doi: 10.1016/j.nbt.2023.02.001.
- [36] F. Taheri and K. Rahbar, “Improving breast cancer classification in fine-grain ultrasound images through feature discrimination and a transfer learning approach,” *Biomed Signal Process Control*, vol. 106, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.bspc.2025.107690.
- [37] B. Decardi-Nelson, A. S. Alshehri, A. Ajagekar, and F. You, “Generative AI and process systems engineering: The next frontier,” *Comput Chem Eng*, vol. 187, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.compchemeng.2024.108723.
- [38] J. Singh *et al.*, “GeneAI 3.0: powerful, novel, generalized hybrid and ensemble deep learning frameworks for miRNA species classification of stationary patterns from nucleotides,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-56786-9.
- [39] A. Winnifrith, C. Outeiral, and B. L. Hie, “Generative artificial intelligence for de novo protein design,” Jun. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.sbi.2024.102794.
- [40] M. Mateen *et al.*, “The role of artificial intelligence in the diagnosis of diabetic retinopathy through retinal lesion features: a narrative review,” *Quant Imaging Med Surg*, vol. 15, no. 5, pp. 4816–4846, May 2025, doi: 10.21037/qims-24-1791.
- [41] C. Xu, A. Han, Y. Tian, and S. Sun, “Based on computer simulation and experimental verification: mining and characterizing novel antimicrobial peptides from soil microbiome,” *Food Chem*, vol. 467, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.foodchem.2024.142275.
- [42] M. Dara, M. Dianatpour, N. Azarpira, and N. Omidifar, “Convergence of CRISPR and artificial intelligence: A paradigm shift in biotechnology,” Sep. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.humgen.2024.201297.
- [43] J. B. Hamzyan Olia, A. Raman, C. Y. Hsu, A. Alkhayat, and A. Nourazarian, “A comprehensive review of neurotransmitter modulation via artificial intelligence: A new frontier in personalized neurobiochemistry,” May 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.compbio.2025.109984.
- [44] S. J. Lee and D. M. Kim, “Cell-free synthetic biology: Navigating the new frontiers of biomanufacturing and biological engineering,” Mar. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.coisb.2023.100488.

- [45] P. Daoutidis *et al.*, "Machine learning in process systems engineering: Challenges and opportunities," *Comput Chem Eng*, vol. 181, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.compchemeng.2023.108523.
- [46] S. Reddy, "Generative AI in healthcare: an implementation science informed translational path on application, integration and governance," *Implementation Science*, vol. 19, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1186/s13012-024-01357-9.
- [47] T. A. Undheim, "The whack-a-mole governance challenge for AI-enabled synthetic biology: literature review and emerging frameworks," 2024, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/fbioe.2024.1359768.
- [48] M. Obayya, F. N. Al-Wesabi, M. Alshammeri, and H. G. Iskandar, "An intelligent optimized object detection system for disabled people using advanced deep learning models with optimization algorithm," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-00608-z.
- [49] R. Yadav and A. Bhat, "A systematic literature survey on skin disease detection and classification using machine learning and deep learning," *Multimed Tools Appl*, vol. 83, no. 32, pp. 78093–78124, Sep. 2024, doi: 10.1007/s11042-024-18119-w.
- [50] A. Shata and K. Hartley, "Artificial intelligence and communication technologies in academia: faculty perceptions and the adoption of generative AI," *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, vol. 22, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1186/s41239-025-00511-7.
- [51] V. Moysiadis *et al.*, "Human–Robot Interaction through Dynamic Movement Recognition for Agricultural Environments," *AgriEngineering*, vol. 6, no. 3, pp. 2494–2512, Aug. 2024, doi: 10.3390/agriengineering6030146.
- [52] Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>

