

Artículo de revisión bibliográfica

<https://doi.org/10.47460/minerva.v6i18.227>

Inteligencia artificial en el estudio de metales pesados en agricultura: Un estudio bibliométrico

Samuel Pacheco-Marchán
<https://orcid.org/0009-0003-2381-8606>
spachecom@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

Luis A. Bermejo
<https://orcid.org/0000-0001-5294-7034>
lbermejor@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

Cristhofer Villar-Cruz
<https://orcid.org/0009-0009-3325-8896>
180605191@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

Nicole Vergara-Alfaro
<https://orcid.org/0009-0005-7465-3957>
180364161@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

Alberto Ordinola-Zapata*
<https://orcid.org/0000-0002-9644-0531>
aordinolaz@untumbes.edu.pe
Universidad Nacional de Tumbes
Tumbes, Perú

*Autor de correspondencia: aordinolaz@untumbes.edu.pe

Recibido (19/07/2025), Aceptado (25/08/2025)

Resumen. Este estudio bibliométrico evaluó la producción científica sobre el uso de la inteligencia artificial (IA) en el estudio de metales pesados en la agricultura, con el objetivo de identificar vacíos y tendencias en las líneas de investigación. Se realizó una búsqueda en Scopus recuperando 127 registros; tras aplicar criterios de inclusión y exclusión, se eliminaron 58 registros y los 69 restantes se analizaron con *Bibliometrix* y *VOSviewer*. Se generaron gráficos de evolución temporal, producción por países, coocurrencia de palabras clave y análisis temático. Las publicaciones presentan una alta tasa de crecimiento anual (42,86%), con China e India como principales contribuyentes. El análisis reveló líneas emergentes en fertilización, biorremediación y monitoreo inteligente, así como vacíos en toxicología alimentaria, validación de insumos, capacitación rural con IA y uso de interfaces conversacionales como ChatGPT para una agricultura sostenible. Estos hallazgos constituyen una base estratégica para orientar futuras investigaciones interdisciplinarias en el campo agroambiental.

Palabras clave: inteligencia artificial, metales pesados, agricultura, análisis bibliométrico.

Artificial Intelligence in the Study of Heavy Metals in Agriculture: A Bibliometric Study

Abstract. This bibliometric study evaluated the scientific output on the use of artificial intelligence (AI) in the study of heavy metals in agriculture, aiming to identify research gaps and emerging trends. A search in Scopus retrieved 127 records; after applying inclusion and exclusion criteria, 58 were discarded and the remaining 69 were analyzed using *Bibliometrix* and *VOSviewer*. Graphs were generated to illustrate temporal evolution, country-level production, keyword co-occurrence, and thematic mapping. The publications show a high annual growth rate (42.86%), with China and India as leading contributors. The analysis revealed emerging research lines in fertilization, bioremediation, and intelligent monitoring, as well as gaps in food toxicology, input validation, rural training with AI, and the use of conversational interfaces such as ChatGPT for sustainable agriculture. These findings provide a strategic foundation to guide future interdisciplinary research in the agro-environmental field.

Keywords: artificial intelligence, heavy metals, agriculture, bibliometric analysis.



I. INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados en suelos agrícolas representa uno de los desafíos ambientales más críticos del siglo XXI, amenazando tanto la productividad agrícola como la seguridad alimentaria a nivel global. La presencia y acumulación de metales pesados y metaloides en suelos agrícolas, derivada de múltiples fuentes antropogénicas y naturales, afecta significativamente la fertilidad del suelo, la microbiota edáfica y, en última instancia, la salud humana [1]. Diversas investigaciones han precisado que metales pesados como cadmio, plomo, arsénico, mercurio y cromo alteran la fisiología vegetal, reduciendo el rendimiento de los cultivos y la calidad nutricional de los alimentos [2]. Esta problemática se ha vuelto crítica debido al crecimiento poblacional y a la intensificación agrícola, por lo que la investigación científica busca soluciones eficientes para el monitoreo, detección y remediación de estos contaminantes.

Ante esta problemática, la inteligencia artificial (IA) se ha constituido como una herramienta transformadora en el sector agrícola, mediante el cambio de sistemas tradicionales por sistemas de precisión [1]. Se ha observado que la integración de sensores avanzados, tecnologías de teledetección y modelos de aprendizaje automático (*machine learning*) y aprendizaje profundo (*deep learning*) ha permitido el desarrollo de sistemas inteligentes capaces de monitorear, predecir y optimizar diversos procesos productivos [3]. Eze *et al.* [1] mostraron cómo la unión de IA e Internet de las Cosas (IoT) en agricultura de precisión ha mejorado significativamente la clasificación de cultivos y la toma de decisiones basadas en datos.

Las aplicaciones específicas de IA en el contexto de metales pesados en agricultura han mostrado un potencial extraordinario para abordar las limitaciones de los métodos convencionales de detección y remediación. Zhang *et al.* [2] demostraron que los algoritmos de aprendizaje automático para la identificación de fuentes de contaminación y predicción espacial de metales pesados en suelos lograron una precisión mayor al 85% en la clasificación de áreas contaminadas. Por su parte, Shi *et al.* [3] desarrollaron modelos predictivos basados en *machine learning* para optimizar procesos de fitorremediación, identificando las especies vegetales más eficientes para la extracción de contaminantes específicos bajo diferentes condiciones edafoclimáticas.

Las investigaciones muestran una importante diversificación en las aplicaciones de IA para la agricultura, que incluyen redes neuronales artificiales, visión computarizada, robótica, aprendizaje automático, Internet de las Cosas, redes neuronales convolucionales, aprendizaje profundo y algoritmos genéticos [4]; muchas de ellas aplicables a los problemas de contaminación por metales pesados en dicha actividad. Sin embargo, el rápido incremento de investigaciones en este campo ha generado un corpus científico fragmentado y heterogéneo, donde múltiples metodologías y aplicaciones dificultan la síntesis integral del conocimiento. Esta diversidad, aunque enriquecedora, plantea desafíos para identificar las tendencias de investigación.

Basado en la información anterior, este trabajo tuvo como objetivo evaluar, a nivel bibliométrico, la producción científica sobre el uso de la inteligencia artificial para estudiar los metales pesados en la agricultura, a fin de identificar vacíos y tendencias en las líneas que podrían servir para futuras investigaciones. Con dicho fin, se realizó este estudio bibliométrico en base a los datos recolectados de *Scopus*, una de las principales bases de datos científicas mundiales. De esta manera, este artículo se ha organizado en secciones: en la primera se detalla el problema acerca del uso de la inteligencia artificial en el estudio de la contaminación por metales pesados en la agricultura; en la segunda, se amplía la teoría; en la tercera, se detalla el método seguido —el cual empleó paquetes bibliométricos—; y, por último, se exponen los resultados y las conclusiones a las que se ha arribado.

II. DESARROLLO

La contaminación por metales pesados representa una amenaza para la salud ambiental y alimentaria a nivel global. La evidencia de tal problema se observa en China, el principal productor agrícola del mundo, donde se ha reportado que los suelos agrícolas superan los límites máximos permisibles para varios metales pesados, entre ellos: zinc (0,9%), cobre (2,1%), arsénico (2,7%), níquel (4,8%) y, especialmente, cadmio con un preocupante 7,0% [3]. Esta problemática afecta también a otras regiones productoras del Asia, donde la acumulación de metales pesados en suelos agrícolas pone en riesgo la seguridad alimentaria de millones de personas [5]. Ante esto, la inteligencia artificial (IA) emerge como una potencial herramienta que podría ayudar a mejorar el monitoreo, la predicción y la remediación de la contaminación por metales pesados en la agricultura.

En el campo agrícola, la IA se aplica mediante metodologías que van desde algoritmos básicos de clasificación y regresión hasta modelos avanzados como redes neuronales profundas y aprendizaje reforzado [6]. Estas técnicas permiten analizar grandes volúmenes de datos provenientes de sensores, imágenes satelitales y registros históricos, facilitando la detección de patrones de contaminación y la predicción de zonas de riesgo. Por ejemplo, el uso combinado de sensores IoT y aprendizaje automático ha demostrado ser eficaz para optimizar el uso de recursos y mejorar la resiliencia de los cultivos frente a condiciones adversas, incluyendo la presencia de contaminantes [1]. Además, enfoques como el aprendizaje supervisado y los árboles de decisión han sido utilizados para estimar concentraciones de metales en suelos a partir de variables climáticas, geológicas y socioeconómicas [7].

Diversos estudios han comenzado a explorar la aplicación específica de la IA en el análisis de metales pesados en contextos agrícolas. Shi *et al.* [3] desarrollaron modelos de aprendizaje automático para simular procesos de fitorremediación, evaluando la capacidad de ciertas especies vegetales para absorber y estabilizar metales tóxicos en suelos contaminados. Estos modelos permiten optimizar la selección de cultivos remediadores y predecir su eficiencia en función de las condiciones del terreno. Por otro lado, investigaciones como la de Neme [8] han empleado técnicas instrumentales como la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) para detectar metales en pesticidas, lo que abre la posibilidad de integrar IA en la validación automatizada de insumos agrícolas. Asimismo, el uso de algoritmos como los árboles extremadamente aleatorizados ha permitido generar mapas globales de contaminación, identificando zonas críticas con alta precisión [2]. Estas experiencias evidencian el potencial de la IA no solo para el diagnóstico, sino también para la toma de decisiones estratégicas en la gestión ambiental agrícola.

En este contexto, la IA no solo se presenta como una herramienta técnica, sino también como un catalizador de transformación en la cadena agroalimentaria. Su integración en procesos de monitoreo, análisis y remediación puede contribuir significativamente a mitigar los efectos de la contaminación por metales pesados, mejorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y proteger la salud pública. Además, el desarrollo de modelos generativos y plataformas conversacionales como ChatGPT abre nuevas posibilidades para la automatización de tareas, la capacitación de agricultores y la difusión de buenas prácticas. La consolidación de estas tecnologías, respaldada por evidencia científica, permite vislumbrar un futuro en el que la inteligencia artificial se convierta en un aliado estratégico para enfrentar los desafíos ambientales más urgentes del sector agrícola.

III. METODOLOGÍA

En este trabajo se usaron los registros documentarios obtenidos mediante una búsqueda bibliográfica en la base de datos *Scopus*, utilizando como cadena de consulta:

```
TITLE-ABS-KEY ( "heavy metals" OR "metal contamination" ) AND TITLE-ABS-KEY  
( "agriculture" OR "agronomy" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "artificial intelligence"  
OR "AI" OR "machine learning" OR "natural language processing" )
```

Se descargó un archivo en formato .csv (valores separados por comas) que contenía 127 registros. Este archivo fue importado en *OpenOffice Calc* versión 4.1.15 y posteriormente se verificó su pertinencia para ser incluido en el estudio, basado en los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

Criterios de inclusión:

1. Investigaciones que traten sobre la aplicación de la inteligencia artificial, en sus diversas variantes como aprendizaje automático, aprendizaje profundo y procesamiento natural del lenguaje, en la detección, remoción o remediación de metales pesados.
2. Investigaciones que explícitamente aborden la temática de los metales pesados en relación con la agricultura.

Criterios de exclusión:

1. Documentos que, a pesar de tratar sobre metales pesados en la agricultura, no incluyan tecnologías de inteligencia artificial.

2. Documentos en los que el término “AI” represente otros conceptos no relacionados con inteligencia artificial (por ejemplo, *irrigación asistida*).

La revisión de los registros se realizó de manera manual por dos de los investigadores para evitar sesgos en la selección. De esta manera, 58 registros fueron excluidos por no tratar sobre la aplicación de IA o por abordar temáticas no vinculadas con la agricultura, tales como salud humana o contaminación urbana. El archivo .csv con los 69 registros seleccionados constituyó el corpus analizado con el software *Bibliometrix* versión 5.0.0.

A partir de las palabras clave de los documentos, se generaron dos archivos de texto: el primero contenía 23 palabras clave normalizadas, y el segundo excluyó una palabra irrelevante (*article*). Con *Bibliometrix* se obtuvieron las características principales de los documentos, la evolución temporal de publicaciones, la producción científica por países y el mapa temático —en este último caso, se configuró la frecuencia mínima de clúster por cada 1000 documentos igual a 2.

El archivo .csv también fue importado en *VOSviewer*, donde se empleó un archivo de tesauro para estandarizar las mismas 23 palabras clave y eliminar la palabra *article*, como se hizo en el caso de *Bibliometrix*. Con *VOSviewer* se generó una red de co-ocurrencia basada en las palabras clave totales (tanto del autor como de la base de datos de indexación).

IV. RESULTADOS

Como se aprecia en la Figura 1, generada en *Bibliometrix*, el corpus analizado fue reducido, con un total de 69 publicaciones, lo cual indica que se trata de un área de investigación emergente. Este hecho se confirma al observar que el periodo cubierto es relativamente reciente, extendiéndose de 2019 a 2025, y en particular porque la tasa de crecimiento anual de publicaciones es muy alta (42,86%), un indicador típico de campos científicos con alto impacto global, como es el caso de la inteligencia artificial. Una tasa similar fue reportada por Espina-Romero *et al.* [9], al evaluar las tendencias de la IA en el sector industrial.

Se observó además que la mayoría de las publicaciones se han realizado en coautoría (5,78 autores por documento) y se encuentran dispersas en un número considerable de revistas (45), lo que evidencia que la temática se está abordando desde una perspectiva multidisciplinaria.

El incremento sostenido de publicaciones a partir de 2018 y su acentuación desde 2022 parecen correlacionarse con algunos hitos relevantes en la historia reciente de la inteligencia artificial. Entre ellos, el incremento de técnicas basadas en aprendizaje automático (*machine learning*) aplicadas a la agricultura, registrado entre 2015 y 2018, incluyendo el aprendizaje profundo (*deep learning*), las redes neuronales convolucionales (*Convolutional Neural Network, CNN*) y las redes neuronales recurrentes (*Recurrent Neural Network, RNN*) [6]. Asimismo, el lanzamiento en noviembre de 2022 del agente de inteligencia artificial generativa *ChatGPT* contribuyó significativamente a la popularización de la IA en múltiples dominios del conocimiento [10].

A partir de los datos obtenidos en la revisión, se observó que los países con mayor producción científica relacionada con la aplicación de la inteligencia artificial al estudio de los metales pesados en agricultura son China (243 participaciones en publicaciones), India (61) y Estados Unidos (15), tal como se muestra en la Figura 2. Este predominio puede explicarse por el hecho de que estos tres países se encuentran entre las seis naciones con mayor producción científica a nivel mundial [11].

La diferencia en volumen entre China e India frente a Estados Unidos se atribuye, en parte, a que la actividad agrícola constituye un sector económico fundamental en ambos países, los cuales ocupan los dos primeros lugares en la producción mundial de arroz. Sin embargo, los suelos utilizados para el cultivo de este cereal presentan altos niveles de contaminación por cadmio [5], lo que, sumado a su alto desarrollo en inteligencia artificial, ha impulsado una significativa producción científica en esta temática. Por su parte, Estados Unidos, aunque es una potencia agrícola en cultivos como el maíz y la soya, presenta campos con menor impacto por metales pesados [12], lo que justificaría su menor interés en investigar este problema específico.

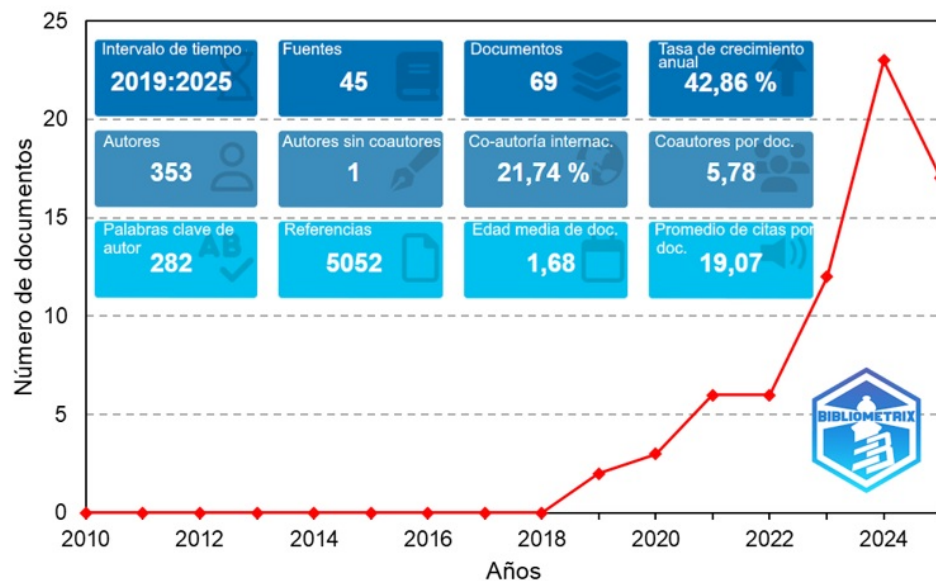


Fig. 1. Características de los documentos y evolución de su número en el tiempo.

Por otro lado, resulta alentador que en regiones en vías de desarrollo también se hayan reportado estudios que emplean la inteligencia artificial para abordar la problemática de los metales pesados en la agricultura. En particular, en Latinoamérica, Perú destaca como el país con mayor producción científica en esta temática, lo cual se explica por su relevancia en la exportación de productos agrícolas —como los arándanos— [13], así como por la creciente preocupación nacional por la contaminación de suelos agrícolas por metales pesados [14].

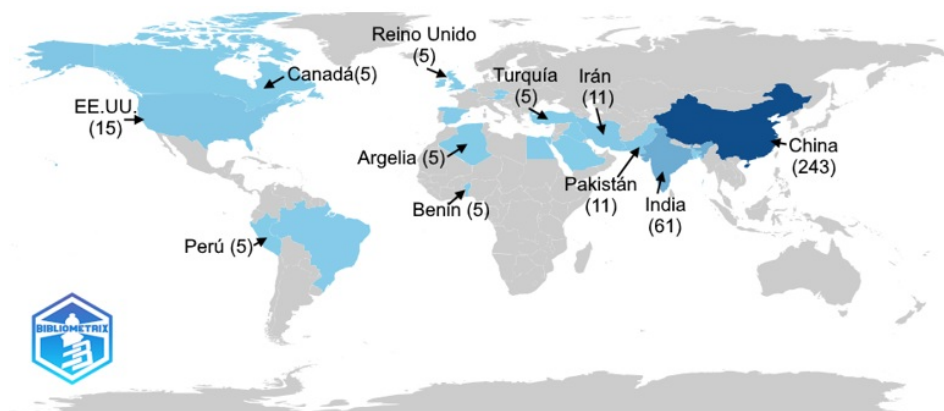


Fig. 2. Producción científica a nivel mundial.

En base a esta panorámica mundial, se infiere que los países con los cuales los grupos de investigación deberían establecer vínculos de cooperación internacional son China, India y, en menor medida, Estados Unidos. Estos países concentran una alta producción científica en el campo de la inteligencia artificial aplicada a la agricultura y al estudio de los metales pesados, lo que los convierte en socios estratégicos para el fortalecimiento de capacidades investigativas.

Paralelamente, se observa que las regiones más afectadas por la contaminación de suelos agrícolas con metales pesados —Latinoamérica, Asia y África— presentan un desarrollo tecnológico limitado en inteligencia artificial. Esta brecha sugiere la necesidad de fomentar colaboraciones orientadas a la transferencia de conocimiento, el desarrollo de soluciones adaptadas a las condiciones locales y la inclusión en redes científicas internacionales. La asociación entre países con alta capacidad tecnológica y regiones con alto riesgo ambiental permitiría avanzar hacia una gestión más equitativa y eficiente de los riesgos asociados a la presencia de metales pesados en la agricultura, promoviendo además soluciones interdisciplinarias que integren inteligencia artificial, análisis instrumental y estrategias de restauración ambiental.

La Figura 3 muestra la transición temporal de las palabras clave empleadas en los estudios sobre inteligencia artificial aplicada al análisis de metales pesados en agricultura. Los términos en azul oscuro, tales como *agricultura*, *suelo agrícola*, *inteligencia artificial*, *metal pesado*, *robots agrícolas*, *aprendizaje profundo* y *bioacumulación*, representan los aspectos más consolidados de la temática, los cuales fueron estudiados principalmente entre 2022 y 2023. Estas investigaciones se centraron en el uso de algoritmos supervisados —como los árboles de decisión y los bosques aleatorios— para modelar la presencia y acumulación de contaminantes en suelos agrícolas.

El empleo de tecnologías tradicionales de inteligencia artificial, como los algoritmos supervisados, concuerda con lo señalado por Kamilaris y Prenafeta-Boldú [6], quienes reportaron un auge en el uso de técnicas de aprendizaje automático aplicadas a la agricultura entre los años 2015 y 2018.

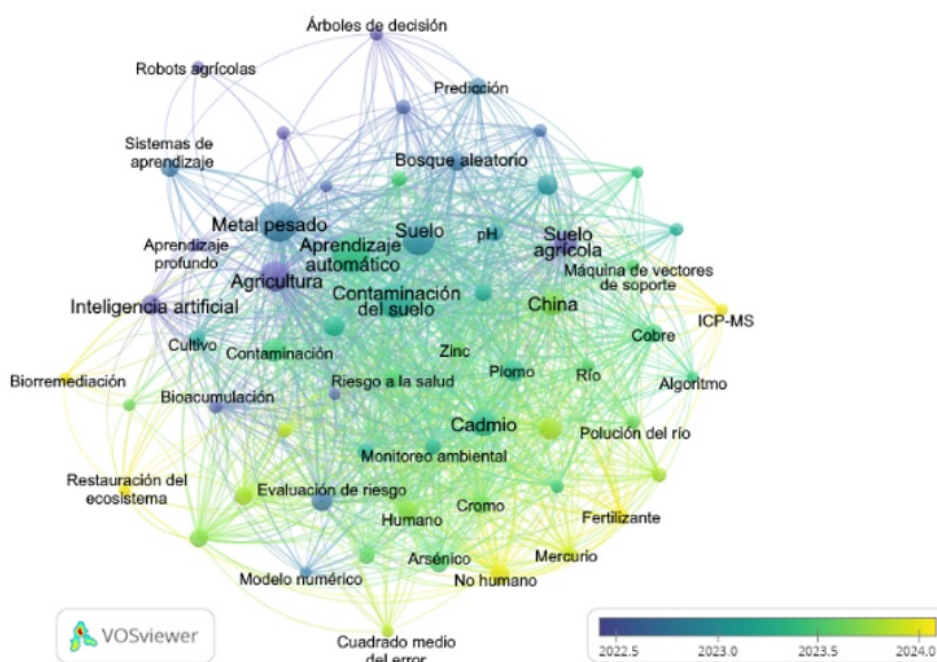


Fig. 3. Redes de palabras clave en el tiempo.

Por otra parte, los círculos en tonos verdes que incluyeron términos como *cadmio*, *plomo*, *cobre*, *zinc*, *contaminación del suelo*, *China*, *pH*, *río* y *máquina de vectores de soporte*, reflejan la incorporación de nuevas técnicas de inteligencia artificial para el estudio de xenobióticos con alta incidencia en la salud humana (cadmio y plomo), así como de otros elementos que, sin ser xenobióticos, pueden generar efectos adversos cuando se presentan en concentraciones elevadas (cobre y zinc).

La prevalencia del término *China* indica que las investigaciones en ese país se intensificaron entre inicios y mediados de 2023, centrándose en aspectos fisicoquímicos del agua —como el pH— utilizada en los cultivos, la cual proviene en gran parte de fuentes fluviales.

Por último, los círculos en tonos amarillos con términos como *fertilizante*, *mercurio*, *biorremediación* e *ICP-MS* representan líneas emergentes orientadas a la restauración ambiental y al control de la contaminación por metales pesados originada por fertilizantes. En particular, se destaca la contaminación por mercurio y el uso de análisis instrumental avanzado (ICP-MS). Las tendencias actuales apuntan al uso de la inteligencia artificial para optimizar la aplicación de fertilizantes [4, 15], reduciendo la incorporación de metales pesados presentes en ellos, y al fortalecimiento de técnicas instrumentales como la espectrometría de masas por plasma, que pasa de ser una herramienta meramente analítica a un sistema automatizado y predictivo, como lo señala Neme [8].

El análisis realizado evidencia una tendencia hacia estudios centrados en la prevención de la contaminación y en la aplicación de técnicas de biorremediación, así como en el uso de la inteligencia artificial como complemento de las metodologías tradicionales para la evaluación de metales pesados. Estas líneas de investigación, por su carácter innovador, pueden orientar a futuros investigadores interesados

en esta temática. Se recomienda abordar el tema desde una perspectiva interdisciplinaria que combine el monitoreo instrumental de alta precisión con algoritmos de aprendizaje automático, integrando variables edáficas, productivas y toxicológicas. Esta convergencia permitirá avanzar hacia una agricultura más segura, sostenible y tecnológicamente fortalecida, en la que la detección de metales pesados sea más eficiente, predictiva y preventiva.

El mapa temático mostrado en la Figura 4 revela que los temas motores presentan una convergencia entre metodologías avanzadas —como el aprendizaje profundo— y aplicaciones prácticas en cultivo y fertilización. Esta tendencia coincide con lo reportado por Gupta y Kumar [16], quienes demostraron que el aprendizaje profundo permite optimizar la fertilización y detectar contaminantes como el plomo en suelos agrícolas.

Entre los temas básicos se encuentran aquellos que constituyen los pilares del campo de estudio, tales como *química*, *inteligencia artificial*, *metal pesado* y *contaminación del suelo*. En los temas nicho figuran técnicas como *distribución espacial* y *análisis de componentes principales*, las cuales, según Eze *et al.* [1], son esenciales para mapear zonas de riesgo y optimizar la biorremediación. Finalmente, entre los temas emergentes o en declive se ubican *agricultura de precisión*, *estrés abiótico*, *residuos agrícolas* y *robots agrícolas*.

Estos últimos se explican porque una agricultura de precisión requiere del monitoreo constante de los parámetros del suelo, el cual se logra mediante sensores integrados a sistemas del Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial, posibilitando el control de metales pesados y la toma de decisiones en tiempo real. Asimismo, se observa una orientación hacia la biorremediación basada en residuos agrícolas, en concordancia con la tendencia actual hacia una economía circular que otorga valor a los desechos como insumos útiles para la restauración ambiental.

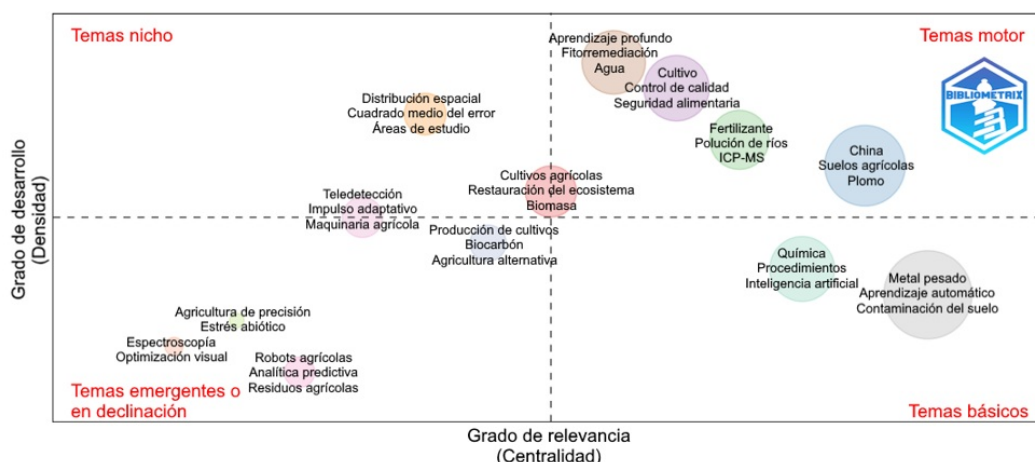


Fig. 4. Mapa temático donde se destaca la evolución de la investigación en el tema, las tendencias actuales y posibles líneas futuras.

El mapa temático evidencia una estructura en transición, donde los temas motores articulan metodologías avanzadas como el aprendizaje profundo con aplicaciones agronómicas concretas. Los temas básicos consolidan el marco conceptual relacionado con la inteligencia artificial y uno de sus principales enfoques, el aprendizaje automático; mientras que los nichos aportan herramientas analíticas clave para la caracterización espacial de la contaminación, como la teledetección y las técnicas estadísticas aplicadas.

Los temas emergentes, orientados a la restauración ambiental, la agricultura de precisión y la economía circular, reflejan una evolución hacia enfoques más sostenibles. Este panorama evidencia una tendencia por la cual la inteligencia artificial está dejando de ser una herramienta auxiliar para convertirse en un eje estratégico dentro de la gestión predictiva y preventiva de suelos agrícolas contaminados.

Finalmente, la revisión bibliométrica permitió identificar nuevas líneas de investigación centradas en la optimización de la fertilización, la biorremediación y el monitoreo inteligente de suelos contaminados. Estos hallazgos muestran que la integración de herramientas de inteligencia artificial con técnicas analíticas avanzadas puede fomentar una agricultura más segura, sostenible y tecnológicamente for-

talecida, contribuyendo a la mitigación y prevención de la presencia de metales pesados en sistemas agrícolas.

El análisis bibliométrico también reveló vacíos significativos en la aplicación de la inteligencia artificial al estudio de metales pesados en agricultura. A pesar de los avances en los modelos de predicción y fitorremediación [3], se observa una limitada integración de la inteligencia artificial en la evaluación toxicológica de los alimentos agrícolas, en la verificación automatizada de insumos y en el diseño de sistemas de alerta temprana.

Asimismo, existe poca investigación sobre el impacto de las interfaces conversacionales —como ChatGPT— en los procesos de capacitación rural y gestión ambiental, aunque, según Siche y Siche [15], estas herramientas poseen un alto potencial para dichos fines. Estos vacíos abren la posibilidad de proponer investigaciones interdisciplinarias orientadas a explorar el uso de la inteligencia artificial en el estudio de los metales pesados en la agricultura, así como su impacto en la salud pública, el cuidado ambiental y la sostenibilidad de los cultivos.

CONCLUSIONES

A partir de los datos obtenidos en el estudio se evidenció que la investigación sobre inteligencia artificial aplicada al estudio de metales pesados en la agricultura se encuentra en expansión, impulsada por la creciente preocupación mundial por prevenir o mitigar la contaminación de los suelos agrícolas. Desde el punto de vista temático, se identificó una tendencia hacia el uso de algoritmos de aprendizaje profundo, la automatización instrumental y las estrategias de biorremediación, que proporcionan herramientas cada vez más potentes para mejorar las capacidades de diagnóstico y restauración ambiental.

Las líneas de investigación emergentes incluyen el empleo de técnicas multivariadas, sensores inteligentes y modelos basados en economía circular aplicados a la gestión agrícola. Sin embargo, aún persisten vacíos en la integración de variables productivas, toxicológicas y espaciales, así como en la adaptación de los modelos a contextos locales y específicos.

Asimismo, se identificaron oportunidades en el desarrollo de prácticas de fertilización optimizada, monitoreo inteligente y programas de capacitación rural mediados por interfaces conversacionales. Estas líneas representan un campo fértil para la investigación interdisciplinaria, que busca fortalecer la sostenibilidad agrícola mediante el uso ético, eficiente y estratégico de la inteligencia artificial.

REFERENCIAS

- [1] V. H. U. Eze *et al.*, "Integrating iot sensors and machine learning for sustainable precision agroecology: enhancing crop resilience and resource efficiency through data-driven strategies, challenges, and future prospects," *Discover Agriculture*, vol. 3, no. 1, p. 83, May 2025.
- [2] H. Zhang, Y. Liu, Y. Wang, Y. Li, and Y. Chen, "Machine learning-based source identification and spatial prediction of heavy metals in soil in a rapid urbanization area, eastern china," *Journal of Cleaner Production*, vol. 273, p. 122858, Nov 2020.
- [3] L. Shi *et al.*, "Modeling phytoremediation of heavy metal contaminated soils through machine learning," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 441, p. 129904, Jan 2023.
- [4] R. Cavalcante and R. D. De Souza, "Artificial intelligence in agriculture: Benefits, challenges, and trends," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 13, p. 7405, Jun 2023.
- [5] Y. Gao, Z. Duan, L. Zhang, D. Sun, and X. Li, "The status and research progress of cadmium pollution in rice- (*oryza sativa* L.) and wheat- (*triticum aestivum* L.) cropping systems in china: a critical review," *Toxics*, vol. 10, no. 12, p. 794, Dec 2022.
- [6] A. Kamilaris and F. X. Prenafeta-Boldú, "Deep learning in agriculture: A survey," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 147, pp. 70–90, Apr 2018.

- [7] Q.-Q. Peng *et al.*, "Bridging the gap: Limitations of machine learning in real-world prediction of heavy metal accumulation in rice in hunan province," *Agronomy*, vol. 15, no. 6, p. 1478, Jun 2025.
- [8] S. Neme, "Detección de metales pesados en pesticidas por icp-ms," Tesis de Químico, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2025.
- [9] L. Espina-Romero *et al.*, "Which industrial sectors are affected by artificial intelligence? a bibliometric analysis of trends and perspectives," *Sustainability*, vol. 15, no. 16, p. 12176, Aug 2023.
- [10] C. Krupitzer, "Generative artificial intelligence in the agri-food value chain: overview, potential, and research challenges," *Frontiers in Food Science and Technology*, vol. 4, p. 1473357, Sep 2024.
- [11] E. A. Oliveira *et al.*, "Global scientific production in the pre-covid-19 era: An analysis of 53 countries for 22 years," *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 94, no. suppl 3, p. e20201428, Dec 2022.
- [12] K. Chinnannan, P. Somagattu, H. Yammanuru, U. K. Reddy, and P. Nimmakayala, "Health risk assessment of heavy metals in soil and vegetables from major agricultural sites of ohio and west virginia," *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 57, p. 103108, Apr 2024.
- [13] J. A. Ramírez, D. L. Mendoza, and E. J. Asnate, "Competitividad de la industria agroexportadora del arándano en el Perú, 2015–2019," *Revista Alfa*, vol. 8, no. 22, pp. 256–272, Jan 2024.
- [14] M. Mamani *et al.*, "Contenido de metales pesados en los peces en el Perú: una revisión sistémica," *Revista de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Recursos Naturales*, vol. 12, no. 1, pp. 131–141, Apr 2025.
- [15] R. Siche and N. Siche, "El modelo de lenguaje basado en inteligencia artificial sensible – chatgpt: Análisis bibliométrico y posibles usos en la agricultura y pecuaria," *Scientia Agropecuaria*, vol. 14, no. 1, pp. 111–116, Mar 2023.
- [16] G. Gupta and S. Kumar, "Applications of ai in precision agriculture," *Discover Agriculture*, vol. 3, no. 1, p. 61, Apr 2025.

AUTORES



Ing. Químico Samuel Pacheco Marchán. Maestro en Ingeniería Ambiental y Doctorando en Ciencias Ambientales. Profesor en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Tumbes (UNTUMBES). Investiga problemas ambientales por metales pesados en el río Tumbes.



Dr. Luis Bermejo Requena. Ingeniero Agrónomo, Maestro en Ciencias con mención en Desarrollo Rural y Doctor en Ciencias Agrarias. Profesor Principal, investiga en Ciencias Agrarias. Creador de la Línea de Investigación en Servicios Ecosistémicos de la UNTUMBES..



Ing. Cristhofer Villar Cruz. Ingeniero Industrial Pesquero, Maestrante en Ciencias con mención en Gestión Ambiental. Con experiencia en laboratorio, colabora en investigaciones en microbiología, biología molecular y procesos pesqueros en la UNTUMBES.



Ing. Nicole Vergara-Alfaro. Ingeniera Industrial Pesquera, con estudios de Maestría en Ciencias con mención en Gestión Ambiental. Actualmente, me desempeño en la ejecución de proyectos de investigación en la Universidad Nacional de Tumbes.



Dr. Alberto Ordinola Zapata. Ingeniero Pesquero, Maestro en Acuicultura y Gestión Ambiental y Doctor en Ciencias Ambientales. Profesor Investigador. Dirige el Grupo de Investigación de Biodiversidad Acuática Tropical de la UNTUMBES.