

**ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO SOBRE REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS
RESIDUALES PARA CULTIVOS DE ARROZ 2010-2025**

ALEX FERNEY PEÑA BOHÓRQUEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
BOGOTÁ
2026

**ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO SOBRE REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS
RESIDUALES PARA CULTIVOS DE ARROZ 2010-2025**

ALEX FERNEY PEÑA BOHÓRQUEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Magister en Gestión de
Cuencas Hidrográficas**

Directora

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Magister en Hidrosistemas

Co - Director

RICARDO EMILIO CASTRO GUIZA

Magister en Ciencias-Física

MAESTRÍA EN GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

BOGOTÁ

2026

Dedicatoria

"Un experimento es una pregunta que la ciencia le hace a la naturaleza, y una medición es el registro de su respuesta"

Max Planck

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a todas las personas que hicieron posible la culminación de este sueño:

Al Todo Poderoso, por ser mi guía, mi fortaleza y la luz en cada paso de este camino. En Sus manos deposité cada duda y de Él recibí la perseverancia.

A mi familia, pilar fundamental de mi vida. A mi madre, por su amor incondicional, sus sacrificios y su fe inquebrantable en mí. A mis hermanos y hermanas, por su apoyo constante y su complicidad.

A mis sobrinos, por llenar de alegría y risas mis momentos de descanso y recordarme lo que es realmente importante.

A la Directora y al Codirector de este trabajo, por su invaluable guía, su paciencia, su sabiduría compartida y por exigirme siempre dar lo mejor de mí. Su mentoría ha sido un faro de conocimiento y rigor académico.

A los docentes de la maestría, cuyo conocimiento y pasión por la enseñanza enriquecieron mi formación académica. Cada espacio de aprendizaje fue fundamental para desarrollar las competencias necesarias para alcanzar esta meta.

De manera muy especial, a **Gigio**. Eres esa persona única que me impulsa a vivir, a creer en mí y a ser mejor cada día. Tu apoyo incondicional y tu fe en mis capacidades, incluso cuando yo mismo dudaba, han sido el motor que alimentó este logro. Gracias por ser mi roca y mi inspiración.

A todos, mi eterno agradecimiento.

CONTENIDO

RESUMEN	11
PALABRAS CLAVES	11
ABSTRACT	12
KEYWORDS	12
INTRODUCCIÓN	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
JUSTIFICACIÓN.....	17
OBJETIVO.....	19
OBJETIVO GENERAL.....	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
METODOLOGÍA.....	20
MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES.....	27
Métricas bibliométricas y mapeo científico.....	28
Contexto colombiano de patentes.....	30
RESULTADOS.....	38
A. PATENTES.....	39
B. NIVEL HISPANOAMERICANO	49
C. BASE DE DATOS SCOPUS.....	54
D. ÍNDICE DE VINCULACIÓN CIENCIA–TECNOLOGÍA (IVCT).....	71
E. EN SÍNTESIS.....	76
DISCUSIÓN	78
CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS PARA AMÉRICA LATINA	82
REFERENCIAS	83
ANEXO.....	¡Error! Marcador no definido.
A. ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA.....	¡Error! Marcador no definido.
B. CODIGO INTEGRADO EN PYTHON	¡Error! Marcador no definido.

Índice de gráficas

Gráfica 1. Países u organizaciones con mayor número de patentes a nivel global - Patentscope	39
Gráfica 2. Países u organizaciones con mayor número de patentes a nivel global - Espacenet	39
Gráfica 3. Solicitantes con mayor número de patentes - Patentscope	40
Gráfica 4. Solicitantes con mayor número de patentes - Espacenet	41
Gráfica 5. Número de publicaciones por autor - Patentscope	42
Gráfica 6. Número de publicaciones por autor - Espacenet	43
Gráfica 7. Códigos IPC más empleados - Patentscope	44
Gráfica 8. Códigos IPC más empleados - Espacenet	45
Gráfica 9. Número de patentes por año Patentscope	47
Gráfica 10. Numero de patentes por año - Espacenet	48
Gráfica 11. Número de patentes por país u organización a nivel hispano - Patentscope	49
Gráfica 12. Número de patentes por país u organización a nivel hispano - Espacenet	50
Gráfica 13. Solicitantes con mayor número de patentes - Patentscope	52
Gráfica 14. Solicitantes con mayor número de patentes - Espacenet	53
Gráfica 15. Producción científica anual	55
Gráfica 16. Promedio de citas por año	56
Gráfica 17. Coautor, autor y palabras claves	57
Gráfica 18. Fuentes más relevantes	59
Gráfica 19. Ley de Bradford'S	60
Gráfica 20. H index	61
Gráfica 21. Producción de las fuentes a lo largo del tiempo	62

Gráfica 22. Principales autores	63
Gráfica 23. Productividad de autores al largo del tiempo	65
Gráfica 24. Ley de Lotka's	66
Gráfica 25. Documentos más citados	68
Gráfica 26. Temas en tendencia.....	70
Gráfica 27. Integración: Scopus vs Patentes vs IVCT	75

Listas de ilustración

Ilustración 1. Palabras claves	69
--------------------------------------	----

Lista de mapas

Mapa 1. Producción científica por países.	67
--	----

Lista de tablas

Tabla 1. Siglas.....	9
Tabla 2. Componente de interacción	22
Tabla 3. Niveles de vinculación.....	23
Tabla 4. Información principal por bibliometría	54
Tabla 5. No. Autores según Lotka	64
Tabla 6. Remoción de metales pesados en aguas residuales para cultivos de arroz.	71
Tabla 7. Componente científico - C_p y C_p^*	72
Tabla 8. Componente de interacción - I_p^*	73
Tabla 9, Coexistencia C_p^* - I_p^*	73

SIGLAS

Tabla 1. Siglas

Sigla	Definición (ES)	Definición (EN)	Contexto
CIP	Clasificación Internacional de Patentes	International Patent Classification	Sistema de clasificación internacional para patentes de invención
CPC	Clasificación Cooperativa de Patentes	Cooperative Patenta Classification	Sistema moderno de clasificación de patentes desarrollado por EPO y USPTO
CSAB	Junta Asesora de Selección de Contenidos	Content Selection and Advisory Board	Comité que selecciona revistas para indexación en Scopus
DAS	Servicio de Acceso Digital	Digital Access Service	Servicio de OMPI para prioridades digitales en solicitudes PCT
EPO	Oficina Europea de Patentes	European Patent Office	Institución responsable de otorgar patentes europeas
INPADOC	Base Internacional de Datos de Patentes	International Patent Documentation	Base de datos de familias de patentes administrada por la EPO
JIF	Factor de Impacto de Revistas	Journal Impact Factor	Métrica clásica de impacto científico de revistas
PCT	Tratado de Cooperación en materia de Patentes	Patent Cooperation Treaty	Tratado internacional que permite solicitar protección de patentes en múltiples países

POA	Procesos Avanzados de Oxidación	Advanced Oxidation Processes	Tecnología de tratamiento de aguas residuales para remoción de contaminantes
PRISMA	Elementos Preferidos para Reportar Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses	Directrices para realizar y reportar revisiones sistemáticas
SIC	Superintendencia de Industria y Comercio		Entidad colombiana responsable de la administración de patentes y propiedad industrial
SIPI	Sistema de Información de Propiedad Industrial		Plataforma colombiana de consulta de patentes y derechos de autor
SJR	Clasificación de Revistas SCImago	SCImago Journal Rank	Indicador bibliométrico de impacto de revistas científicas
SNIP	Impacto Normalizado de las Citas por Artículo	Source Normalized Impact per Paper	Métrica que normaliza el impacto de citas por disciplina
VALOR	Marco de Verificación, Alineación, Registro, Descripción General y Reproducibilidad	Verification, Alignment, Logging, Overview, Reproducibility	Marco metodológico para estudios bibliométricos multifuente

*Elaboración propia.

RESUMEN

En el contexto actual de la gestión ambiental, comprender cómo el conocimiento científico se transforma en soluciones tecnológicas continúa siendo un desafío fundamental. Esta situación se vuelve aún más compleja cuando se abordan problemáticas como la contaminación por metales pesados en aguas residuales utilizadas en la agricultura, donde las implicaciones ambientales, productivas y sociales son profundas. En este marco, el presente estudio propone desarrollar una herramienta de análisis integrado que combine indicadores bibliométricos y de patentes, con el propósito de examinar de manera más clara la relación entre la generación de conocimiento y su aplicación en innovación tecnológica.

Para poner a prueba esta propuesta metodológica, se toma como caso de estudio la remoción de metales pesados en aguas residuales empleadas en cultivos de arroz. Este caso resulta especialmente pertinente debido a sus efectos sobre la calidad del suelo, la inocuidad de los alimentos y, en última instancia, la salud pública.

La investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, con un diseño no experimental y de tipo retrospectivo. Se analizan datos provenientes de bases científicas como Scopus y tecnológicas como Patentscope y Espacenet, abarcando el periodo entre enero de 2010 hasta octubre de 2025. La selección de la información se llevó a cabo mediante el método PRISMA, lo que permitió asegurar un proceso riguroso, sistemático y replicable.

Los resultados evidencian una brecha importante entre la producción científica y su traducción en desarrollos tecnológicos, reflejada en la limitada correspondencia entre publicaciones y patentes. Además, se identifican desigualdades territoriales en la generación y uso del conocimiento, así como barreras en los procesos de transferencia tecnológica, particularmente en regiones como América Latina.

PALABRAS CLAVES

Aguas residuales, Remediación de metales pesados, Riego de arroz, Reutilización de agua, Calidad del efluente y Arroz.

ABSTRACT

In the current context of environmental management, understanding how scientific knowledge is transformed into technological solutions remains a fundamental challenge. This situation becomes even more complex when addressing issues such as heavy metal contamination in wastewater used in agriculture, where the environmental, productive, and social implications are profound. Within this framework, the present study proposes to develop an integrated analysis tool that combines bibliometric and patent indicators, with the aim of examining more clearly the relationship between knowledge generation and its application in technological innovation.

To test this methodological proposal, the removal of heavy metals from wastewater used in rice cultivation is taken as a case study. This case is particularly relevant due to its effects on soil quality, food safety, and, ultimately, public health.

The research employs a mixed-methods approach, using a non-experimental, retrospective design. Data from scientific databases such as Scopus and technology databases such as Patentscope and Espacenet are analyzed, covering the period from January 2010 to October 2025. The information was selected using the PRISMA method, ensuring a rigorous, systematic, and replicable process.

The results reveal a significant gap between scientific output and its translation into technological developments, reflected in the limited correlation between publications and patents. Furthermore, regional disparities in the generation and use of knowledge are identified, as well as barriers in technology transfer processes, particularly in regions such as Latin America.

KEYWORDS

Wastewater, Heavy metal remediation, Rice irrigation, Water reuse, Effluent quality, and Rice.

INTRODUCCIÓN

La producción científica y la innovación tecnológica se han posicionado como ejes fundamentales para comprender cómo evoluciona el conocimiento y de qué manera este se traduce en soluciones concretas frente a problemáticas ambientales cada vez más complejas. En este sentido, el tratamiento de aguas residuales y la remoción de metales pesados en sistemas agrícolas de cultivos de arroz demandan enfoques analíticos integrales que permitan reconocer tendencias investigativas, identificar actores clave, evidenciar vacíos de conocimiento y evaluar los niveles de transferencia tecnológica.

Desde este punto de vista, la bibliometría surge como una herramienta estratégica para el análisis cuantitativo de la producción científica, ya que posibilita examinar patrones de publicación, impacto académico y redes de colaboración. De forma complementaria, el análisis de patentes amplía esta comprensión al ofrecer una visión sobre la dinámica de la innovación, la distribución geográfica de las tecnologías y las estrategias de protección del conocimiento a escala global (Baas et al., 2020; Prancutè, 2021; Organización Mundial de la Propiedad Intelectual, 2023; U.S. Patent and Trademark Office, 2022).

Frente a esta dificultad, el presente estudio propone el desarrollo de una herramienta de análisis que combina indicadores bibliométricos y de patentes, con el propósito de evaluar de manera conjunta la producción científica y su nivel de aplicación tecnológica (Gálvez, 2023).

Se toma como caso de estudio la remoción de metales pesados en aguas residuales utilizadas en cultivos de arroz. Este problema no solo representa un desafío ambiental, sino también un riesgo para la seguridad alimentaria y la salud humana, especialmente en regiones donde el reúso de agua es una práctica común ante la escasez hídrica (Qadir et al., 2010).

A nivel global, la investigación en este campo ha mostrado un crecimiento sostenido, impulsado por el aumento de la demanda de alimentos, el endurecimiento de regulaciones ambientales y la preocupación por la calidad del agua. Sin embargo, este crecimiento no ha sido homogéneo ni necesariamente se ha traducido en soluciones tecnológicas implementadas. Existen diferencias marcadas entre regiones en términos de capacidades científicas, innovación y transferencia tecnológica (Van Noorden, 2015).

En América Latina, y particularmente en Colombia, esta situación se manifiesta en una débil articulación entre la investigación académica y el desarrollo tecnológico. A pesar de contar con

problemáticas relevantes asociadas a la contaminación hídrica en sistemas agrícolas, la producción científica no siempre logra convertirse en soluciones aplicadas en el territorio.

Desde la perspectiva de la gestión de cuencas hidrográficas, esta desconexión representa una limitación importante, ya que dificulta la implementación de estrategias efectivas para el manejo sostenible del agua. Por ello, comprender la relación entre ciencia y tecnología no es solo un ejercicio académico, sino una necesidad para orientar la toma de decisiones y fortalecer la gobernanza del recurso hídrico.

¿Cómo integrar el análisis bibliométrico y de patentes para evaluar, de manera articulada, la producción científica, la innovación y sus vacíos de transferencia en la remoción de metales pesados en aguas residuales, de forma que este conocimiento contribuya al fortalecimiento de la gobernanza del agua en el riego de sistemas arroceros en Colombia?

JUSTIFICACIÓN

El crecimiento acelerado de la producción científica y tecnológica plantea un desafío claro: no basta con generar conocimiento, también es necesario saber organizarlo y comprenderlo. En este sentido, herramientas como la bibliometría y el análisis de patentes resultan muy útiles para identificar tendencias, actores clave y dinámicas de innovación. Sin embargo, en la práctica suelen utilizarse por separado, lo que dificulta entender cómo el conocimiento científico realmente se convierte en soluciones tecnológicas aplicables (Baas et al., 2020; Pranckutė, 2021).

Esta desconexión se hace más evidente en problemáticas ambientales complejas, como el tratamiento de aguas residuales y la contaminación por metales pesados. En muchos territorios, especialmente donde el agua es escasa, estas aguas se utilizan para riego agrícola, lo que incrementa riesgos tanto para la salud como para la seguridad alimentaria (FAO, 2017; WHO, 2019). Aunque existe una gran cantidad de estudios y desarrollos tecnológicos, la información está dispersa, lo que dificulta tener una visión clara de los avances reales y, sobre todo, de las brechas entre la investigación y su aplicación en el territorio.

Ante este panorama, integrar la bibliometría con el análisis de patentes se convierte en una oportunidad para ordenar mejor la información y analizarla de forma más estratégica. Este tipo de enfoque permite no solo identificar quiénes lideran la investigación o cuáles son las líneas más consolidadas, sino también reconocer qué tecnologías están emergiendo y cómo se están articulando la academia y el sector productivo (Aria & Cuccurullo, 2017; Pranckutė, 2021). Aun así, su aplicación conjunta en temas específicos como la remoción de metales pesados en sistemas agrícolas, particularmente en cultivos de arroz sigue siendo poco frecuente.

En América Latina, más que centrarse únicamente en las limitaciones estructurales, es importante mejorar la manera en que se organiza, analiza y comunica la información disponible. Aunque hay avances importantes en investigación y algunos desarrollos tecnológicos, estos no siempre se visibilizan ni se aprovechan estratégicamente. Esto se relaciona, en gran medida, con la baja articulación entre los indicadores científicos y tecnológicos, así como con el uso limitado de herramientas analíticas que permitan integrar ambas dimensiones (CEPAL, 2022; OMPI, 2023).

En el caso colombiano, el reto no es solo producir conocimiento, sino lograr que este tenga impacto. Muchas veces, la investigación no logra traducirse en soluciones concretas debido a la débil conexión entre la academia y el desarrollo tecnológico, así como al uso aún incipiente de herramientas

que permitan analizar la información de manera integrada (Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología, 2022; CEPAL, 2022). Esta situación es especialmente visible en temas como la contaminación por metales pesados en aguas utilizadas para riego, donde, a pesar de existir estudios relevantes, estos no siempre se convierten en tecnologías aplicadas o protegidas.

Por ello, realizar un análisis que combine la bibliometría y las patentes sobre la remoción de metales pesados en aguas residuales utilizadas en cultivos de arroz no solo es pertinente, sino necesario. Este enfoque aporta una visión más completa del estado del conocimiento, ayudar a identificar oportunidades de investigación y orientar mejor la inversión en ciencia, tecnología e innovación. Además, contribuye a cerrar la brecha entre el conocimiento y su aplicación, fortaleciendo la transferencia tecnológica y promoviendo soluciones sostenibles que respondan a las condiciones reales del sector agrícola. De esta manera, se avanza hacia respuestas más efectivas frente a los desafíos ambientales y a la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria (Pranckutė, 2021; WHO, 2019).

OBJETIVO

OBJETIVO GENERAL

Analizar la relación entre la producción científica y la innovación tecnológica en la remoción de metales pesados en aguas residuales aplicadas a cultivos de arroz, mediante la integración de indicadores bibliométricos y de patentes, con el fin de identificar tendencias, actores clave y brechas de transferencia tecnológica relevantes para la gestión del recurso hídrico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar la evolución y estructura de la producción científica sobre remoción de metales pesados en aguas residuales para riego de arroz, mediante indicadores bibliométricos de productividad, impacto y colaboración.
2. Analizar la dinámica de la innovación tecnológica en el mismo campo a partir de indicadores de patentes, considerando su distribución geográfica, actores y clasificación tecnológica.
3. Integrar el análisis científico y tecnológico mediante la aplicación de una herramienta computacional y del Índice de Vinculación Ciencia-Tecnología (IVCT), con el fin de examinar la correspondencia entre la producción científica y su materialización en desarrollos tecnológicos.
4. Identificar brechas en la transferencia de conocimiento entre la generación científica y su aplicación tecnológica, con énfasis en el contexto latinoamericano y colombiano.

METODOLOGÍA

El estudio adopta un enfoque mixto, combinando análisis bibliométrico de tipo cuantitativo con una lectura cualitativa del contexto, particularmente en lo relacionado con políticas ambientales y tecnologías. Asimismo, responde a un diseño descriptivo-analítico, que permite reconocer patrones, tendencias temporales y estructuras del conocimiento en la literatura científica y tecnológica. Se trata de un estudio no experimental, de carácter retrospectivo y con una perspectiva longitudinal, lo que facilita observar la evolución del campo de estudio a lo largo del tiempo.

La base de datos que se utilizó como fuente principal para el análisis bibliométrico por su alcance multidisciplinario es Scopus, mientras que las bases de patentes como Espacenet y Patentscope permitieron complementar la información desde el ámbito tecnológico. Esta combinación responde a la necesidad de contrastar resultados y obtener una visión más completa del fenómeno estudiado.

La estrategia de búsqueda se construyó siguiendo lineamientos reconocidos para revisiones sistemáticas, y se aplicó en campos de años de publicación, título, resumen y palabras clave, tanto en inglés como en español. En el caso de las patentes, se emplearon ecuaciones de búsqueda amplias que incluyeron términos relacionados con agua residual, tratamiento, metales pesados, cultivo de arroz y reúso en riego agrícola, lo que permitió recuperar un número significativo de registros para su análisis (ANEXO A), excluyendo documentos sin metadatos completos, literatura no indexada y estudios fuera del contexto hídrico.

A partir de la recopilación de información, se realizó un proceso sistemático de depuración, clasificación y categorización de los datos. Esto permitió identificar patrones de comportamiento, tendencias emergentes y áreas de mayor desarrollo investigativo.

Por medio de la herramienta en Python (ANEXO B) se diseñó un sistema organizado en cuatro componentes que trabajan de manera articulada para analizar la relación entre la investigación científica y el desarrollo tecnológico. Su lógica de funcionamiento busca ir paso a paso, permitiendo no solo recopilar información, sino también interpretarla de forma útil para la toma de decisiones dentro del contexto del estudio.

El primer componente se enfoca en el análisis bibliométrico, donde se examinan los artículos científicos disponibles. A partir de estos datos, la herramienta identifica cuántas

publicaciones se generan por año, quiénes son los autores más activos, cómo se relacionan entre sí mediante redes de colaboración y cuáles son las palabras clave más frecuentes. Esto facilita entender qué temas están siendo más investigados y quiénes lideran esas líneas de trabajo.

Luego, se incorpora un segundo componente centrado en el análisis de patentes, que permite observar el comportamiento de la innovación tecnológica. En este caso, se analiza cuántas patentes se registran a lo largo del tiempo, qué países tienen mayores escritos, cómo se clasifican las tecnologías y qué tendencias empiezan a consolidarse. Con esta información, es posible tener una visión clara de hacia dónde se está orientando el desarrollo tecnológico.

El tercer componente es el más importante dentro de la herramienta, ya que conecta directamente la ciencia con la tecnología. Aquí se comparan las palabras clave de los artículos científicos con las de las patentes, utilizando técnicas de análisis semántico para encontrar relaciones y coincidencias. Esto permite responder una pregunta clave del estudio: si lo que se investiga realmente está siendo llevado a aplicaciones tecnológicas o si existe una desconexión entre ambos campos.

Finalmente, el último componente se encarga de presentar los resultados de una manera visual y fácil de interpretar. A través de gráficos; la herramienta muestra patrones, vacíos de información y posibles desajustes entre la investigación y la innovación. Este análisis no solo ayuda a comprender mejor el estado actual del conocimiento, sino que también permite identificar oportunidades donde se pueden enfocar futuros esfuerzos de investigación y desarrollo.

CONSTRUCCIÓN DEL INDICADOR

Con el fin de cuantificar la relación entre la producción científica y su aplicación tecnológica, se propone el **Índice de Vinculación Ciencia–Tecnología (IVCT)** como un indicador compuesto a nivel de patente. Este índice busca medir la intensidad con la que el conocimiento científico es incorporado y utilizado dentro de desarrollos tecnológicos.

El **IVCT** se define como:

$$IVCT = \frac{\sum_{p=1}^{N_{pat}} (C_p^* \cdot I_p^*)}{N_{pat}}$$

Donde:

- N_{pat} : número total de patentes analizadas en el periodo de estudio.
- C_p^* : componente científico normalizado de la patente p .
- I_p^* : componente de interacción tecnológica normalizado de la patente p .

Definición de variables

- a) **Componente científico (C_p^*):** Este componente refleja el grado en que una patente se fundamenta en conocimiento científico previo. Se operacionaliza como el número de artículos científicos citados en la patente, obtenidos de bases como Scopus.

Para garantizar que se puede comparar, se normaliza en el rango $[0, 1]$:

$$C_p^* = \frac{C_p - C_{min}}{C_{max} - C_{min}}$$

donde:

- C_p : número de citas científicas de la patente p .
 - C_{max}, C_{min} : valores extremos en la muestra.
- b) **Componente de interacción (I_p^*):** Este componente mide el nivel de articulación entre actores del sistema de innovación (por ejemplo, universidades, empresas o centros de investigación). Se construye a partir de variables como:
- Co-titularidad de la patente.
 - Colaboración universidad–empresa.
 - Participación de instituciones académicas.

Una forma de medirlo en la práctica es usar una escala de valores, posteriormente normalizada:

Tabla 2. Componente de interacción

Condición	Valor
Sin colaboradores	0

Colaboración intra-sectorial	0,5
Colaboración universidad–empresa	1

*Elaboración propia.

Luego:

$$I_p^* \in [0, 1]$$

El **IVCT** se basa en una estructura combinada, lo que implica que la vinculación efectiva entre ciencia y tecnología solo ocurre cuando coexisten simultáneamente: una base científica sólida (C_p^*) y un entorno de interacción o transferencia (I_p^*).

Interpretación del índice

El IVCT toma valores en el rango:

$$0 \leq IVCT \leq 1$$

donde:

- Valores cercanos a **0** indican baja vinculación ciencia–tecnología.
- Valores intermedios reflejan articulación parcial.
- Valores cercanos a **1** indican alta integración entre conocimiento científico y desarrollo tecnológico.

Escala de interpretación del IVCT

Se clasifica en los siguientes niveles de vinculación:

Tabla 3. Niveles de vinculación

Rango IVCT	Nivel	Interpretación
0.00 – 0.20	Muy bajo	Desarticulación total entre ciencia y tecnología
0.21 – 0.40	Bajo	Vinculación incipiente
0.41 – 0.60	Medio	Articulación parcial
0.61 – 0.80	Alto	Vinculación consolidada

0.81 – 1.00	Muy alto	Integración plena ciencia–tecnología
-------------	----------	--------------------------------------

*Elaboración propia

Esta escala se fundamenta en los criterios:

a. Naturaleza del índice: El IVCT es un promedio de productos normalizados, lo que implica que:

- Valores cercanos a 0 → ausencia simultánea de ciencia e interacción.
- Valores cercanos a 1 → máxima sinergia.

b. Efecto del modelo multiplicativo: Debido a que:

$$C_p^* \cdot I_p^*$$

- Penaliza valores bajos.
- Reduce rápidamente el promedio.

En la práctica, valores superiores a 0.6 ya son altos, porque implican que la mayoría de las patentes cumplen ambas condiciones.

c. Comparabilidad con literatura: En estudios de transferencia de conocimiento, innovación tecnológica y science–technology linkage, es común interpretar valores intermedios (≈ 0.4 – 0.6) como sistemas en transición.

En el apartado de resultados se plantea el IVCT.

VIGILANCIA TECNOLÓGICA Y CIENTÍFICA

Para dar cumplimiento al primer objetivo, se integró el análisis de la producción científica con la actividad de patentes, con el fin de establecer relaciones entre el conocimiento generado y su aplicación tecnológica. En esta fase, se examinaron bases de datos especializadas en propiedad intelectual, identificando solicitudes y registros de patentes relacionadas con tecnologías de tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. Posteriormente, se compararon estos resultados con la producción académica, lo que permitió evidenciar niveles de transferencia tecnológica, así como posibles brechas entre la investigación y su implementación en contextos productivos.

En función del segundo objetivo, se diseñó y desarrolló una herramienta básica en Python orientada al análisis conjunto de información científica y tecnológica. Esta herramienta permite automatizar procesos de limpieza de datos, generación de indicadores bibliométricos, análisis de coocurrencia de términos y visualización de tendencias.

Para el tercer objetivo, se llevó a cabo un ejercicio de vigilancia científica orientado a comprender la dinámica de la investigación sobre remoción de metales pesados en aguas residuales utilizadas en sistemas arroceros. Este proceso incluyó la identificación de variables clave, tales como volumen de publicaciones, evolución temporal, principales autores, instituciones, países y revistas científicas, así como indicadores de impacto y colaboración.

La ventana de tiempo elegida estuvo comprendida entre los años 2010 a octubre de 2025, con el propósito de seleccionar las dinámicas más recientes del campo. El alcance geográfico partió de una perspectiva global, permitiendo posteriormente un acercamiento comparativo a nivel regional (América Latina) y local (Colombia). A partir de la recopilación de la información, se realizó un proceso sistemático de depuración, seguido de la clasificación y categorización de los datos, lo que permitió identificar patrones de comportamiento, tendencias emergentes y áreas de mayor desarrollo investigativo.

Para el cuarto objetivo, el caso de estudio: la remoción de metales pesados en aguas residuales aplicadas a cultivos de arroz se empleó como escenario para ilustrar y validar el enfoque metodológico propuesto.

En esta fase se realizaron dos niveles de análisis:

1. Un análisis convencional basado en indicadores bibliométricos y de patentes obtenidos mediante herramientas tradicionales.
2. Un análisis utilizando la herramienta desarrollada en Python, con el fin de comparar resultados, identificar diferencias y evaluar su utilidad.

Seguidamente, se realizó una lectura específica del papel de Colombia dentro del panorama global y regional. Se analizaron indicadores como producción científica, participación en redes de colaboración, visibilidad e incursión en desarrollos tecnológicos.

El estudio se basó en información de acceso público, por lo que no requirió aval de comité de ética. Se garantizó la adecuada citación de fuentes.

Entre las limitaciones se encuentran: el predominio de publicaciones en inglés, la exclusión de literatura no indexada, la dependencia de la calidad de metadatos y las limitaciones de los indicadores bibliométricos.

Estas fueron abordadas mediante triangulación de fuentes, validación cruzada e interpretación crítica.

MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

El presente marco teórico se estructura en torno a tres ejes fundamentales: la bibliometría como herramienta para el análisis de la producción científica, el sistema de patentes como indicador de innovación tecnológica y la integración de ambos enfoques en el marco de la vigilancia científica y tecnológica. Estos elementos permiten comprender la relación entre generación de conocimiento y su aplicación, especialmente en problemáticas ambientales asociadas al recurso hídrico.

Base de datos

Scopus

La selección de fuentes de información es un aspecto crítico en el estudio bibliométrico. Scopus se posiciona como una de las bases de datos más robustas debido a su cobertura multidisciplinaria y a sus estrictos criterios de indexación. Su utilidad no radica únicamente en el volumen de información disponible, sino en la calidad de los metadatos que ofrece, los cuales permiten realizar análisis detallados sobre producción científica, colaboración internacional e impacto académico (Aria & Cuccurullo, 2017; Elsevier, 2023).

Espacenet

Es una herramienta fundamental para el análisis de información tecnológica. Su cobertura global y la posibilidad de acceder a documentos de patentes de diferentes jurisdicciones permiten identificar tendencias emergentes y comparar desarrollos tecnológicos entre países (European Patent Office, 2023).

Un elemento clave de esta plataforma es el uso de la Clasificación Cooperativa de Patentes (CPC), que facilita la organización del conocimiento técnico y mejora la precisión en la recuperación de información, especialmente en áreas altamente especializadas como la remoción de metales pesados.

Patenstscope

Ofrecer acceso a solicitudes internacionales bajo el sistema de Tratado de Cooperación en materia de Patentes, lo que permite analizar la innovación en una escala global. Su integración de herramientas analíticas facilita la identificación de actores líderes, áreas tecnológicas prioritarias y dinámicas temporales de la innovación (OMPI, 2024).

Herramientas de Análisis Bibliométrico

Bibliometrix (R package)

El análisis de grandes volúmenes de información requiere herramientas especializadas que permitan procesar y visualizar datos de manera eficiente. Bibliometrix responde a esta necesidad al ofrecer un conjunto de funciones que facilitan tanto el análisis descriptivo como el relacional de la producción científica (Aria & Cuccurullo, 2017).

Su capacidad para integrar indicadores de desempeño con técnicas de mapeo científico permite no solo describir el estado del arte, sino también comprender la estructura del conocimiento en un campo determinado.

Biblioshiny

Como complemento, Biblioshiny democratiza el acceso a este tipo de análisis al ofrecer una interfaz que permite generar visualizaciones sin requerir conocimientos avanzados de programación. Esto facilita la interpretación de resultados y su integración en procesos de toma de decisiones.

Métricas bibliométricas y mapeo científico

El uso de métricas bibliométricas caracteriza el desarrollo de un campo científico desde múltiples dimensiones. Mientras que los indicadores de productividad evidencian el crecimiento de la investigación, los indicadores de impacto permiten evaluar su relevancia y visibilidad (Baas et al., 2020).

Por otro lado, las técnicas de mapeo científico, como el análisis de coautoría y co-citación, aportan una comprensión más profunda de la estructura del conocimiento. Estas herramientas permiten identificar comunidades científicas, redes de colaboración y núcleos temáticos.

Indicadores de impacto científico

Índice H

El índice H (h-index) fue propuesto por el físico Jorge E. Hirsch en 2005 en su trabajo seminal "Un índice para cuantificar la producción de investigación científica individual" publicado en Memorias de la Academia Nacional de Ciencias (Hirsch, 2005). Hirsch definió el índice H como: "Un investigador tiene un índice h si h de sus publicaciones han sido citadas al menos h veces cada una, mientras que los otros artículos tienen $\leq h$ citas cada uno" (Hirsch, 2005, p. 16569).

El cálculo es simple. Se ordenan las publicaciones de un autor de mayor a menor número de citas. Luego se identifica el punto donde el número de citas iguala el número de la posición (Mondal et al., 2023).

La ventaja del h-index es que combina dos aspectos: productividad (número de artículos) e impacto (citas recibidas) (Hirsch, 2005). Evita sesgos de otras métricas que favorecen solo volumen o solo citas altas. Hirsch (2005, p. 16570) sugirió que un h-index de 20 después de 20 años de actividad caracteriza a un científico exitoso, mientras que un h-index de 40 indica un científico destacado.

Factor de Impacto

El factor de impacto (Impact Factor o JIF) mide la influencia de una revista, no de artículos individuales ni de autores (Sharma et al., 2014). Se calcula anualmente por Clarivate Analytics mediante la fórmula (OTIO, 2025):

$$IF_y = \frac{\text{Citas en año } y \text{ y artículos de años } y - 1 \text{ e } y - 2}{\text{Artículos publicables en años } y - 1 \text{ e } y - 2}$$

Limitaciones del análisis bibliométrico

A pesar de sus ventajas, la bibliometría presenta limitaciones que deben ser consideradas. Entre ellas se destacan los sesgos asociados a la cobertura de las bases de datos, la predominancia del idioma inglés y las diferencias en los patrones de publicación entre disciplinas (Pranckutė, 2021).

En el caso de América Latina, estas limitaciones se traducen a una subrepresentación del conocimiento local, lo que resalta la importancia de complementar el análisis con otras fuentes.

Fundamentos del sistema de patentes

El sistema de patentes se fundamenta en un equilibrio entre la protección de la innovación y la difusión del conocimiento. Al exigir la divulgación detallada de las invenciones, las patentes contribuyen a la construcción de conocimiento colectivo, al tiempo que incentivan la inversión en investigación y desarrollo (OMPI, 2023).

Indicadores y análisis de patentes

El análisis de patentes permite evaluar la dinámica de la innovación a través de indicadores como el número de solicitudes, la distribución geográfica y las redes de colaboración entre inventores.

Estos elementos ofrecen información valiosa sobre la capacidad tecnológica de los países y su posicionamiento en determinados sectores (OMPI, 2024).

El presente estudio propone el indicador híbrido que permita evaluar de manera integrada la relación entre producción científica y desarrollo tecnológico.

Siendo el Índice de Vinculación Ciencia-Tecnología, definido como una medida que relaciona la calidad e impacto de la producción científica con su materialización en desarrollos tecnológicos protegidos mediante patentes.

De forma conceptual, el indicador se expresa como:

$$IVCT = \frac{\sum(C_p \cdot I_p)}{N_{pat}}$$

Este índice permite identificar qué tan influyente es la base científica que sustenta una innovación; evalúa la intensidad de la transferencia de conocimiento y detecta desalineaciones entre investigación académica y desarrollo tecnológico.

Adicionalmente, el indicador puede complementarse con un análisis de correspondencia semántica entre palabras clave de artículos y patentes, permitiendo medir el grado de convergencia temática.

Aplicación al tratamiento de aguas y remoción de metales

En el ámbito del tratamiento de aguas, la integración de análisis bibliométricos y de patentes permite evidenciar un crecimiento sostenido en la investigación y desarrollo de tecnologías para la remoción de metales pesados. Este campo se caracteriza por la convergencia de múltiples enfoques tecnológicos, entre los que destacan la adsorción, los procesos electroquímicos y el uso de biomasa (Mao et al., 2020).

Contexto colombiano de patentes

En Colombia, el sistema de patentes es administrado por la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC), bajo un marco normativo que busca garantizar la protección de la innovación y fomentar el desarrollo tecnológico. No obstante, el país aún enfrenta desafíos en términos de capacidad de patentamiento y transferencia de conocimiento.

Patentes colombianas relevantes

A pesar de estas limitaciones, se evidencian avances significativos en el desarrollo de tecnologías como lo es la ozonización catalítica heterogénea con magnetita para lixiviados y efluentes industriales, protegida por la Universidad del Valle. (Univalle, 2016). También se destacan biosorbentes de residuos agroforestales de *Pinus patula* para cromo hexavalente y procesos con biomasa de kombucha para captura de metales, evidenciando enfoques de economía circular. (SIC, 2025; Marcasur, 2025; ASCUN, 2025; Unilibertadores, 2022).

Vigilancia científica y tecnológica

En el contexto de la gestión del conocimiento, la vigilancia científica y tecnológica (VCT) se configura como un proceso sistemático de búsqueda, análisis e interpretación de información proveniente tanto de la literatura científica como de fuentes tecnológicas, con el fin de apoyar la toma de decisiones estratégicas en investigación, desarrollo e innovación. Este enfoque permite anticipar tendencias, identificar oportunidades emergentes y reducir incertidumbre en entornos altamente dinámicos (Porter & Cunningham, 2005; Daim et al., 2006).

A diferencia de los estudios bibliométricos tradicionales centrados en publicaciones académicas, la vigilancia tecnológica incorpora fuentes como patentes, informes técnicos y desarrollos industriales, ampliando la comprensión del ciclo completo del conocimiento, desde su generación hasta su aplicación. En este sentido, la integración entre vigilancia científica y tecnológica no solo resulta deseable, sino necesaria en campos aplicados como el tratamiento de aguas, donde la pertinencia del conocimiento depende de su capacidad de implementación.

Integración bibliometría-patentes

Triangular métricas bibliométricas de Scopus con indicadores de Patentscope y Espacenet permite identificar frentes de investigación, tecnologías núcleo y brechas de implementación, informando decisiones de I+D y política pública. (Baas et al., 2020; OMPI, 2024; EPO, 2023). Esta integración ayuda a alinear tendencias científicas con trayectorias de protección y adopción tecnológica en remoción de metales mediante adsorción, membranas, POA, electroquímica y biosorción. (Mao et al., 2022; US8419946B2, 2013; EP1636139B1, 2009; US7326344B2, 2008).

A pesar de los avances en bibliometría y análisis de patentes, la construcción de indicadores que integren de manera simultánea la dinámica científica y tecnológica sigue siendo incipiente.

Existen antecedentes relevantes, aunque fragmentados, que abordan esta articulación desde distintas aproximaciones.

Por ejemplo, los estudios de vinculación ciencia-tecnología (science–technology linkage) han explorado la relación entre publicaciones científicas y patentes mediante el análisis de citas de artículos en documentos de patente, evidenciando flujos de conocimiento entre ambos sistemas (Narin et al., 1997; Tijssen, 2001). Asimismo, investigaciones posteriores han incorporado análisis de coocurrencia de palabras clave y redes semánticas para identificar convergencias temáticas entre ciencia e innovación.

Desde otra perspectiva, los enfoques de inteligencia tecnológica y visión al futuro han propuesto indicadores compuestos que combinan producción científica, actividad de patentes y señales del mercado, con el fin de detectar trayectorias tecnológicas emergentes (Daim et al., 2006). Sin embargo, estos enfoques suelen presentar tres limitaciones principales: la primera es la carencia de estandarización metodológica, dificultando su replicabilidad; la segunda se enfoca en análisis macroscópicos, sin profundizar en campos específicos y por último no integran de forma automatizada el cruce entre datos científicos y tecnológicos.

En este contexto, el presente estudio propone avanzar hacia la construcción de un enfoque operativo de integración mediante el desarrollo de una herramienta computacional en Python, orientada a la generación de indicadores híbridos ciencia-tecnología, a partir de: cruce semántico de palabras clave entre publicaciones científicas y patentes; análisis de coocurrencia ciencia-tecnología; identificación de brechas entre investigación y aplicación y la detección de desalineaciones entre tendencias científicas y desarrollo tecnológico.

A pesar de los avances en bibliometría y análisis de patentes, diversos estudios han intentado aproximarse a la integración entre producción científica y desarrollo tecnológico desde enfoques como la vigilancia tecnológica y de patentes e informes industriales. Estas formas de trabajo integran datos que vienen tanto de estudios especializados, registros de invenciones como de informes del sector productivo. El objetivo es reconocer hacia dónde se mueven las nuevas corrientes tecnológicas y detectar espacios donde sea posible innovar (Porter & Cunningham, 2005; Daim et al., 2006).

Asimismo, se han desarrollado estudios orientados al análisis de vínculos entre ciencia y tecnología (science–technology linkage), los cuales examinan la relación entre publicaciones

científicas y patentes mediante el análisis de citas, co-ocurrencia de términos y redes de conocimiento (Narin et al., 1997; Tijssen, 2001).

No obstante, estos enfoques presentan limitaciones importantes, ya que en su mayoría se centran en análisis descriptivos o exploratorios, sin consolidar indicadores estandarizados que integren de manera sistemática ambas dimensiones. En este sentido, persiste un vacío metodológico en la construcción de indicadores híbridos que permitan evaluar simultáneamente la dinámica científica y su materialización tecnológica, particularmente en campos aplicados como el tratamiento de aguas.

El uso de aguas residuales en la agricultura ha sido promovido como una alternativa frente a la creciente escasez hídrica, especialmente en regiones con alta presión sobre los recursos hídricos. Esta práctica permite garantizar la disponibilidad de agua para riego y, en algunos casos, aporta nutrientes que pueden favorecer el crecimiento de los cultivos (FAO, 2017).

Sin embargo, también implica riesgos significativos, particularmente asociados a la presencia de contaminantes como metales pesados, los cuales pueden acumularse en el suelo y ser absorbidos por las plantas, afectando la calidad de los alimentos y la salud humana (WHO, 2019).

Por lo anterior, la gestión de cuencas hidrográficas adquiere un papel fundamental, ya que permite abordar el problema de manera integral, considerando no solo la disponibilidad del recurso hídrico, sino también su calidad, uso y gobernanza.

Contexto del caso de estudio

La contaminación por metales pesados en fuentes hídricas representa una problemática ambiental crítica debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación (Ali et al., 2019; Tchounwou et al., 2012). En Colombia, esta situación se asocia principalmente a actividades como la minería, las curtiembres y ciertos procesos industriales, donde elementos como cromo, plomo y cadmio son vertidos sin tratamiento adecuado (IDEAM, 2019; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

En este contexto, el desarrollo de tecnologías para la remoción de metales adquiere relevancia estratégica. Sin embargo, persisten brechas significativas entre la generación de

conocimiento científico y su aplicación tecnológica, especialmente en países en desarrollo (UNESCO, 2021; World Bank, 2020).

Por ello, el presente estudio toma como caso de análisis el campo del tratamiento de aguas mediante tecnologías de remoción de metales pesados, con el propósito de evaluar la articulación entre producción científica y desarrollo tecnológico. Este caso permite ilustrar la aplicabilidad del enfoque metodológico propuesto, evidenciando tanto las dinámicas de generación de conocimiento como sus limitaciones en términos de transferencia e innovación.

Marco regulatorio de patentes en Colombia

En Colombia, el sistema de propiedad industrial está liderado por la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC), entidad adscrita al Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. Esta institución cumple un papel fundamental en la recepción, evaluación y concesión de derechos de propiedad industrial, incluyendo patentes de invención, modelos de utilidad, diseños industriales y signos distintivos (SIC, 2024).

El marco normativo se sustenta principalmente en la Decisión 486 de 2000 de la Comunidad Andina de Naciones (CAN), que establece un régimen común para países como Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú. Este marco se complementa con disposiciones nacionales, como el Código de Comercio y diversas resoluciones administrativas emitidas por la SIC (Affirma Legal, 2025).

Para que una invención sea patentable en el país, debe cumplir tres criterios esenciales: novedad, nivel inventivo y aplicación industrial. En otras palabras, la invención no debe haber sido divulgada previamente, no debe resultar obvia para un experto en la materia y debe tener potencial de uso en algún sector productivo (SIC, 2024; Affirma Legal, 2025). En cuanto a la duración, las patentes de invención otorgan protección por 20 años, mientras que los modelos de utilidad tienen una vigencia de 10 años.

El proceso de solicitud implica varias etapas que, desde la experiencia investigativa, se percibirse como exigentes pero necesarias para garantizar la calidad del sistema. Estas incluyen la búsqueda del estado de la técnica, la elaboración del documento técnico (con reivindicaciones claras), la presentación formal, el examen de forma, la publicación, el periodo de oposiciones, el examen de fondo y, finalmente, la decisión de concesión o rechazo. El mecanismo de oposiciones, en particular,

fortalece la transparencia del sistema al permitir que terceros cuestionen solicitudes que no cumplan los requisitos establecidos (Affirma Legal, 2025).

Patentes colombianas en tratamiento de aguas y remoción de metales

En el contexto colombiano, se observa un crecimiento progresivo en el número de patentes asociadas al tratamiento de aguas y la remoción de metales pesados. No obstante, resulta evidente que aún existe una brecha frente a países con mayor desarrollo tecnológico. A pesar de ello, las universidades han venido desempeñando un papel clave en la generación de soluciones innovadoras con potencial de aplicación en problemáticas ambientales locales.

Un caso reciente es el de la **Universidad del Cauca**, que en 2025 obtuvo una patente relacionada con la producción de un biosorbente a partir de residuos agroforestales de *Pinus patula* para la remoción de cromo en aguas contaminadas. Este desarrollo reporta eficiencias superiores al 90% en la remoción de Cr(VI) y Cr(III), lo cual representa un avance significativo para contextos como las curtiembres artesanales, donde la contaminación por cromo es un problema crítico (SIC, 2025; Marcasur, 2025).

De manera similar, la **Fundación Universitaria Los Libertadores** desarrolló un método basado en biomasa de kombucha para la adsorción de metales pesados. Este enfoque resulta particularmente interesante desde la sostenibilidad, ya que emplea materiales reciclados y procesos de bajo costo, facilitando su posible implementación en comunidades con recursos limitados (ASCUN, 2025; Unilibertadores, 2022).

Por su parte, la **Universidad del Valle** ha contribuido con procesos más avanzados, como la ozonización catalítica heterogénea, que combina oxidación química y adsorción para tratar lixiviados y aguas residuales industriales. Este tipo de tecnologías refleja una aproximación más integral al tratamiento de contaminantes complejos (Univalle, 2016).

Adicionalmente, la **Pontificia Universidad Javeriana** obtuvo en 2022 una patente por un filtro innovador para limpieza de agua utilizando biomasa y hongos procedentes de la madera, capaz de aislar contaminantes como colorantes, metales pesados y compuestos orgánicos (Javeriana, 2022).

La **Universidad de La Salle** recibió en 2024 dos patentes que avalan procesos de recuperación y aprovechamiento de residuos con impacto positivo en el cuidado del ambiente, incluyendo tecnologías aplicables al tratamiento de aguas (Contexto Ganadero, 2024).

La **Universidad Nacional de Colombia** ha desarrollado investigaciones sobre el uso de arcillas del departamento del Tolima para remover cromo y otros metales pesados de aguas contaminadas, con potencial de protección mediante patentes (UNAL, 2024).

Servicios de la SIC para Innovadores y Consulta de Patentes

La SIC proporciona múltiples servicios para facilitar el acceso al sistema de propiedad industrial colombiano. El **Sistema de Información de la Propiedad Industrial (SIPI)** es la plataforma electrónica oficial donde se realizan las búsquedas de patentes, modelos de utilidad, diseños industriales y signos distintivos presentados y publicados en Colombia (SIC, 2024). El SIPI permite: (i) consultar el estado de solicitudes de patente y diseños industriales; (ii) facilitar tareas de búsqueda y recuperación de documentos; (iii) evitar vulnerar invenciones protegidas; (iv) determinar si una invención o diseño se encuentra protegido en Colombia; (v) identificar tecnologías de libre uso cuyas patentes han expirado; y (vi) obtener información detallada de patentes, modelos y diseños industriales.

La SIC ofrece adicionalmente el servicio de **búsqueda tecnológica** a través de su banco de patentes, donde inventores y empresarios identifican documentos relacionados con sus invenciones y evaluar la viabilidad técnica y legal de solicitudes de patente antes de invertir recursos significativos en el proceso formal (SIC, 2024). Este servicio es particularmente valioso para investigadores universitarios y centros de desarrollo tecnológico que buscan transformar resultados de investigación en activos de propiedad intelectual comercializables.

Desde agosto de 2020, la SIC cuenta con acceso al **Servicio de Acceso Digital (DAS)** de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI), que permite a solicitantes colombianos de patentes presentar documentos de prioridad en formato digital, facilitando así las solicitudes internacionales bajo el Tratado PCT y reduciendo costos y tiempos asociados con el trámite de documentos físicos (SIC, 2020). Este servicio fortalece la integración del sistema colombiano de propiedad industrial con el sistema internacional, facilitando la protección de invenciones colombianas en múltiples jurisdicciones.

La SIC publica periódicamente reportes temáticos de **patentes en dominio público**, es decir, aquellas cuya protección ha expirado y pueden ser utilizadas libremente por cualquier persona o empresa sin necesidad de autorización o pago de regalías (SIC, 2024). Estos reportes, organizados por sectores tecnológicos (conversión de residuos en energía, biotecnología agrícola, tecnologías médicas, etc.), constituyen una fuente valiosa de conocimiento tecnológico accesible que es aprovechado por empresarios, emprendedores e investigadores para desarrollar nuevos productos, procesos o servicios sin incurrir en costos de licenciamiento.

RESULTADOS

La contaminación de las aguas residuales por metales pesados se ha convertido en uno de los problemas ambientales más urgentes que enfrentamos hoy, especialmente cuando hablamos de la seguridad alimentaria en el mundo. Esta amenaza es aún más grave en aquellas regiones donde el cultivo del arroz depende directamente de fuentes de agua contaminadas, poniendo en riesgo no solo las cosechas, sino también la salud de quienes dependen de este alimento básico. (Hasan et al., 2022; Mahfooz et al., 2020).

El arroz es sinónimo de alimento. Pero lo que muchos no saben es que esta planta absorber metales peligrosos como cadmio, plomo, cromo, níquel y zinc y concentrarlos en sus granos, convirtiendo algo cotidiano en un riesgo silencioso (Zhang et al., 2025; Hasan et al., 2022).

Esta problemática exige una aproximación integral, donde el conocimiento científico generado por la comunidad investigadora como las soluciones tecnológicas documentadas en registros de propiedad intelectual, permitiendo identificar tendencias, vacíos y oportunidades de innovación en métodos de descontaminación (González García & Salgado Machín, 2024).

Este estudio presenta un análisis bibliométrico del período 2010 a octubre de 2025 que examina la producción científica y tecnológica referida a remoción de metales pesados en aguas residuales destinadas a irrigación de cultivos de arroz, con el propósito de mapear el estado actual del conocimiento, identificar actores clave, detectar tecnologías emergentes y proyectar futuros desarrollos en este campo crítico de investigación ambiental y seguridad alimentaria.

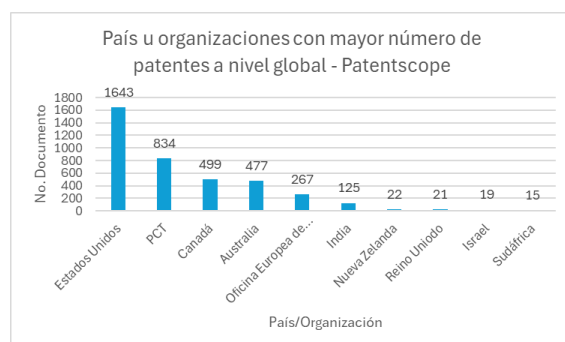
Como parte del proceso metodológico, la herramienta desarrollada en Python fue aplicada al conjunto de datos científicos y tecnológicos recopilados, permitiendo generar indicadores integrados y visualizar la relación entre producción científica y desarrollo tecnológico.

A través de esta aplicación, fue posible identificar patrones de desalineación entre el crecimiento de la literatura científica y la baja proporción de patentes asociadas, evidenciando brechas en la transferencia de conocimiento.

A. PATENTES

NÚMERO DE PATENTES

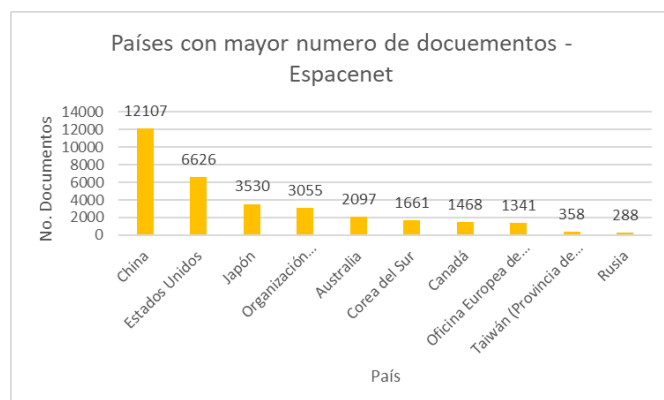
Gráfica 1. Países u organizaciones con mayor número de patentes a nivel global - Patentscope



*Tomado de la base de datos de patentes Patentscope.

En la plataforma Patentscope, los resultados reflejan una concentración significativa en países desarrollados. Estados Unidos lidera con 1,643 documentos, seguido por la Oficina de Cooperación de Patentes (PCT) con 834 documentos. Canadá (499) y Australia (477) ocupan las siguientes posiciones, mientras que India (125), Nueva Zelanda (22), Reino Unido (21), Israel (19) y Sudáfrica (15) presentan menor representación. Esta distribución evidencia que la innovación en tecnologías de remoción de metales pesados se concentra en economías avanzadas con capacidades de investigación y desarrollo consolidadas.

Gráfica 2. Países u organizaciones con mayor número de patentes a nivel global - Espacenet



*Tomado de la base de datos de patentes Espacenet.

En contraste la gráfica 2, muestra una distribución más amplia entre países. China encabeza con 12,107 documentos, reflejando la inversión masiva en investigación e innovación tecnológica.

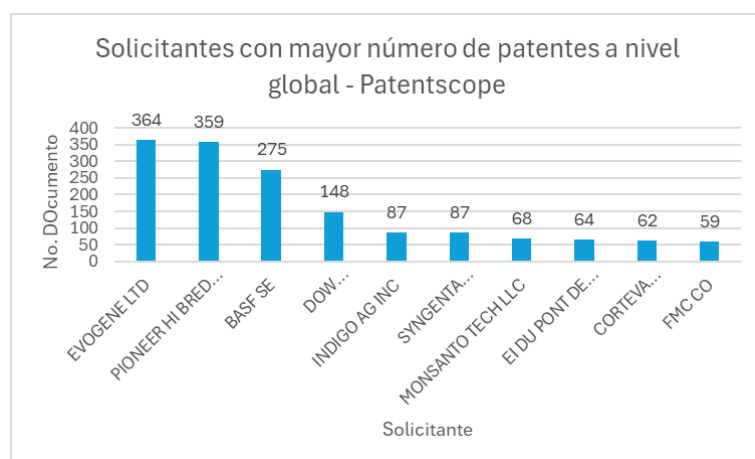
Estados Unidos le sigue con 6,626 documentos. Japón (3,530) y Organización Regional de Patentes (3,055) ocupan tercer y cuarto lugar, respectivamente. Australia (2,097), Corea del Sur (1,661) y Canadá (1,468) también presentan participación significativa. Esta estructura distribuida incluye a países en desarrollo como Taiwan (358) y Rusia (288).

SOLICITANTES

En la gráfica 3, de distribución de solicitantes revela un alto grado de concentración. EVOGENE LTD encabeza con 364 documentos de patentes, seguida por PIONEER HI-BRED INTERNATIONAL con 359 documentos. BASF SE ocupa la tercera posición con 275 documentos, mientras que DOW AGROSCIENCES LLC, INDIGO AG INC, SYNGENTA (representada genéricamente) e MONSANTO TECHILLA presentan valores comprendidos entre 87 y 148 documentos. Las organizaciones RTC CO, CORTEVA y EI DU PONT DE NEMOURS AND COMPANY completan el ranking con 59 a 64 documentos cada una.

Esta estructura de concentración indica que las empresas multinacionales de agronegocios y biotecnología dominan el espacio de innovación en esta temática. Las tres principales solicitantes (EVOGENE, PIONEER HI-BRED e INDIGO AG) representan actores globales con capacidades significativas en investigación y desarrollo agroindustrial, particularmente en mejoramiento genético y tratamiento de insumos agrícolas.

Gráfica 3. Solicitantes con mayor número de patentes - Patentscope

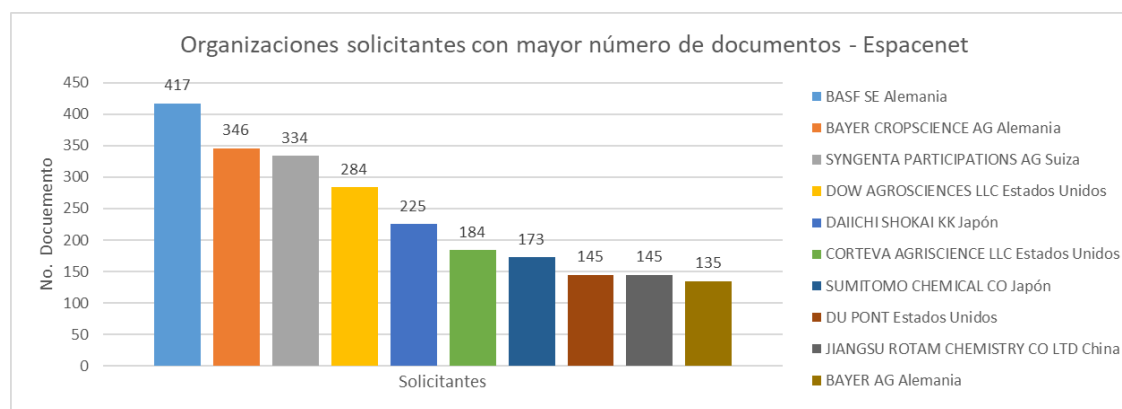


*Tomado de la base de datos de patentes Patentscope.

La distribución de organizaciones solicitantes en la gráfica 4, presenta características distintas. BASF SE Alemania lidera con 417 documentos, seguida por BAYER CROPSOURCE AG

Alemania (346 documentos) y SYNGENTA PARTICIPATIONS AG Suiza (334 documentos). DOW AGROSCIENCES LLC Estados Unidos ocupa cuarta posición con 284 documentos. Las subsecuentes organizaciones incluyen a DAIICHI SHOKAI KK Japón (225 documentos), CORTEVA AGRISCIENCE LLC Estados Unidos (184 documentos), SUMITOMO CHEMICAL CO Japón (173 documentos), DU PONT Estados Unidos (145 documentos), JIANGSU ROTAM CHEMISTRY CO LTD China (145 documentos) y BAYER AG Alemania (135 documentos).

Gráfica 4, Solicitantes con mayor número de patentes - Espacenet



*Tomado de la base de datos de patentes Espacenet.

Comparación entre Plataformas

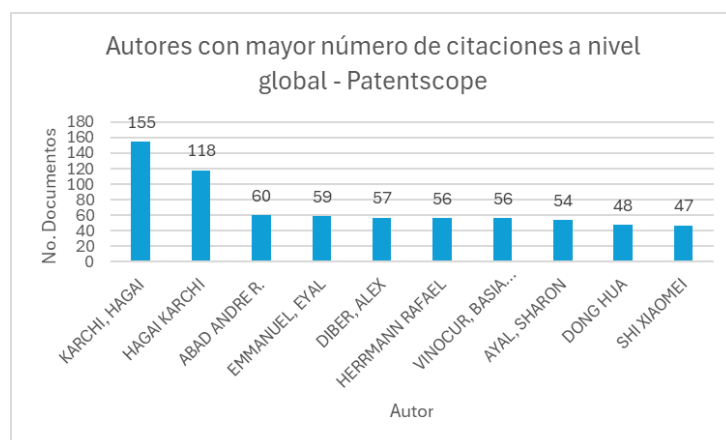
La composición de los actores innovadores en patentes sobre tecnologías para la remoción de metales pesados en aguas residuales varía significativamente entre las plataformas Patentscope y Espacenet. Patentscope presenta una mayor predominancia de organizaciones como EVOGENE LTD, mientras que Espacenet muestra una fuerte representación de conglomerados químicos y agroindustriales europeos y asiáticos, como BASF SE, Bayer y Syngenta (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021). Esta diferencia también se refleja en el volumen de actividad inventiva, siendo los solicitantes principales de Espacenet (ej. BASF SE con 417 documentos) quienes reportan los valores más altos, lo que sugiere que esta base captura con mayor amplitud los portafolios de organizaciones con fuerte presencia en Europa.

Respecto a la diversificación geográfica, Espacenet integra una pluralidad más amplia de actores (alemanes, suizos, estadounidenses, japoneses y chinos) en comparación con Patentscope. La innovación en esta área está claramente liderada por empresas multinacionales del sector privado agroindustrial y químico, sobre instituciones académicas o gubernamentales, reflejando la dimensión

comercial del sector. Estas tecnologías están inmersas en ecosistemas tecnológicos más amplios de agronegocios globales, donde empresas como BASF, Bayer y Syngenta realizan cuantiosas inversiones (Bayer, 2023; BASF, 2023; Syngenta, 2023).

PUBLICACIONES

Gráfica 5. Número de publicaciones por autor - Patentscope

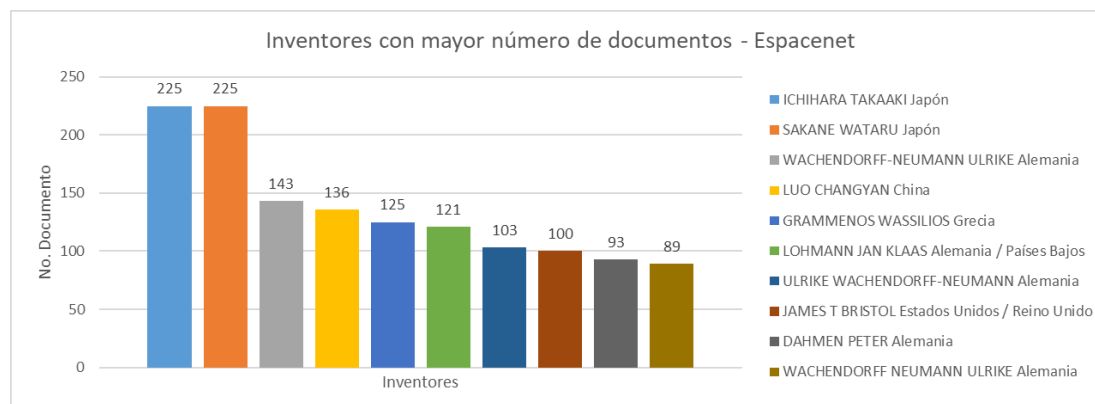


*Tomado de la base de datos de patentes Patentscope.

El análisis de citaciones de autores revela una estructura altamente concentrada. Karchi Hagani encabeza con 155 citaciones, seguido por Hi-Chai Karchi con 118 citaciones. Abad Andre R., Emanueli Fyal, Dibert Alex y Hermann Rafael presentan entre 57 y 60 citaciones. Vinocur Basia, Ayal Sharon, Dong Hua, Shomei Xi y Herman Rafael ocupan posiciones menores con 47 a 56 citaciones cada uno.

Esta distribución indica que determinados investigadores han desarrollado contribuciones científicas suficientemente relevantes para ser citadas múltiples veces en documentos de patentes. La presencia de autores con apellidos de origen hebreo e internacional sugiere contribuciones desde equipos de investigación multidisciplinarios y multigeográficos. Karchi Hagani, como autor más citado, ha contribuido a innovaciones fundamentales en biotecnología o tratamiento agrícola que sirven como base para desarrollos posteriores.

Gráfica 6. Número de publicaciones por autor - Espacenet



*Tomado de la base de datos de patentes Espacenet.

La distribución de inventores presenta una estructura más equilibrada y diversificada. Ichihara Takaaki (Japón) e Sakane Wataru (Japón) encabeza con 225 documentos cada uno. Wachendorff-Neumann Ulrike (Alemania) ocupa tercera posición con 143 documentos, seguida por Luo Changyan (China) con 136 documentos. Grammenos Wassilios (Grecia) con 125 documentos, Lohmann Jan Klaas (Alemania/Países Bajos) con 121 documentos, Ulrike Wachendorff-Neumann (Alemania) con 103 documentos, James T Bristol (Estados Unidos/Reino Unido) con 100 documentos, Dahmen Peter (Alemania) con 93 documentos y Wachendorff Neumann Ulrike (Alemania) con 89 documentos, completan el ranking.

Comparación entre Plataformas

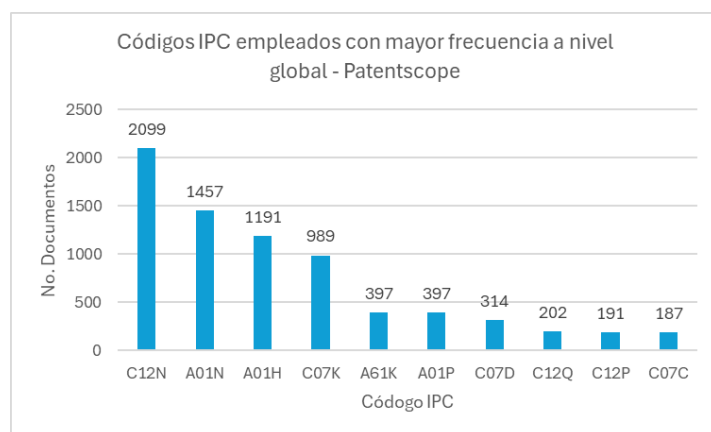
El volumen de actividad inventiva y los patrones de colaboración difieren notablemente entre las bases de datos de patentes. Espacenet presenta un volumen significativamente mayor, con los inventores principales registrando 225 documentos, lo que supera en un 45% a las 155 citaciones del autor más citado en Patentscope (Karchi Hagani). Esta disparidad sugiere que Espacenet captura un espectro más amplio de actividad inventiva o trayectorias más prolíficas.

En cuanto a los patrones de colaboración, Patentscope indica ecosistemas de investigación concentrados, como lo sugiere la presencia de múltiples autores de origen hebreo, posiblemente en centros israelíes. Por el contrario, la diversidad geográfica en Espacenet (con recurrentes inventores alemanes como Wachendorff-Neumann Ulrike, así como participantes asiáticos y estadounidenses) apunta a redes de colaboración internacional más amplias.

Estos patrones tienen implicaciones directas para el campo de la remoción de metales pesados. La fuerte presencia de inventores japoneses refleja la competencia de Japón en tecnologías de purificación de agua, mientras que los investigadores alemanes evidencian la tradición europea en ingeniería química aplicada. La participación de investigadores chinos es un indicador de la creciente inversión de China en tecnologías ambientales (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021; Syngenta, 2023; Bayer, 2023; BASF, 2023).

CÓDIGO IPC

Gráfica 7. Códigos IPC más empleados - Patentscope



*Tomado de la base de datos de patentes Patentscope.

El análisis de frecuencia de códigos IPC en la gráfica 7, revela que las patentes se concentran principalmente en clasificaciones químicas y de biotecnología. El código C12N encabeza con 2,099 documentos, corresponde a tecnologías de microbiología, cultivo de microorganismos y procesos biotecnológicos aplicables a tratamiento de residuos biológicos.

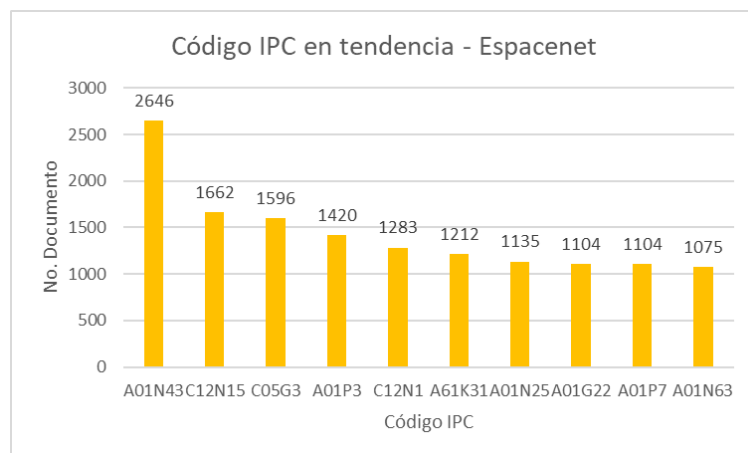
Específicamente, la fuerte presencia de los códigos A01N (pesticidas y desinfectantes) y A01H (mejoramiento genético de plantas) sugiere el desarrollo de cultivos resistentes y agentes químicos que mitigan el estrés abiótico, incluida la toxicidad por metales pesados en suelos y aguas. Asimismo, los documentos en C07K (péptidos y proteínas) indican investigación en biotecnología avanzada para crear plantas modificadas que toleren (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021). Finalmente, los códigos A61K y A01P reflejan la aplicación farmacéutica y de protección de cultivos de estos desarrollos, asegurando que los productos agrícolas, como el arroz, sean seguros para el consumo.

Adicionalmente, C07D (314 documentos) abarca compuestos heterocíclicos; C12Q (202 documentos) comprende técnicas de investigación o análisis bioquímico; C12P (191 documentos) se refiere a procesos fermentativos; y C07C (187 documentos) engloba hidrocarburos acíclicos o carbocíclicos.

Implicación Tecnológica

La gráfica 7, indica que las patentes en Patentscope enfatizan soluciones biotecnológicas y químicas, donde microorganismos, compuestos químicos sintetizados y procedimientos de mejoramiento genético constituyen mecanismos centrales para abordar la remoción de metales pesados. La prevalencia de C12N sugiere que la biosorción o bioacumulación por microorganismos es un enfoque tecnológico preponderante.

Gráfica 8. Códigos IPC más empleados - Espacenet



*Tomado de la base de datos de patentes Espacenet.

La distribución de códigos IPC en tendencia presenta variaciones significativas respecto a Patentscope. El código A01N43C12N15 encabeza con 2,646 documentos, fusionando clasificaciones de compuestos agroindustriales (A01N) con biotecnología molecular (C12N15), indicativo de tecnologías que combinan síntesis química con aplicaciones agrícolas y manipulación genética.

El código C05G3 ocupa segunda posición con 1,662 documentos, correspondiente a abonos, fertilizantes y acondicionadores de suelo, categoría altamente relevante para contextos agrícolas donde el suelo contaminado requiere remediación. El código A01P3 presenta 1,596 documentos, englobando pesticidas y reguladores de crecimiento vegetal. El código C01P con 1,420 documentos comprende compuestos inorgánicos de elementos químicos.

Códigos subsecuentes incluyen A01N25 (1,283 documentos) para formulaciones de compuestos químicos; A01K31 (1,212 documentos) para medicinas veterinarias; A01N25A (1,135 documentos) para sistemas de liberación de compuestos químicos; C01G22 (1,104 documentos) para compuestos de metales de transición, particularmente relevantes para captura de metales pesados; A01P7 (1,104 documentos) para reguladores de crecimiento; y A01N63 (1,075 documentos) para microorganismos y sus aplicaciones.

Implicación Tecnológica

La prevalencia de códigos enfocados en fertilizantes (C05G3), compuestos inorgánicos (C01P) y compuestos de metales de transición (C01G22) sugiere que Espacenet captura innovaciones dirigidas hacia soluciones de remediación de suelos y sedimentos contaminados, así como hacia materiales adsorbentes basados en compuestos metálicos o minerales.

Comparación entre Plataformas

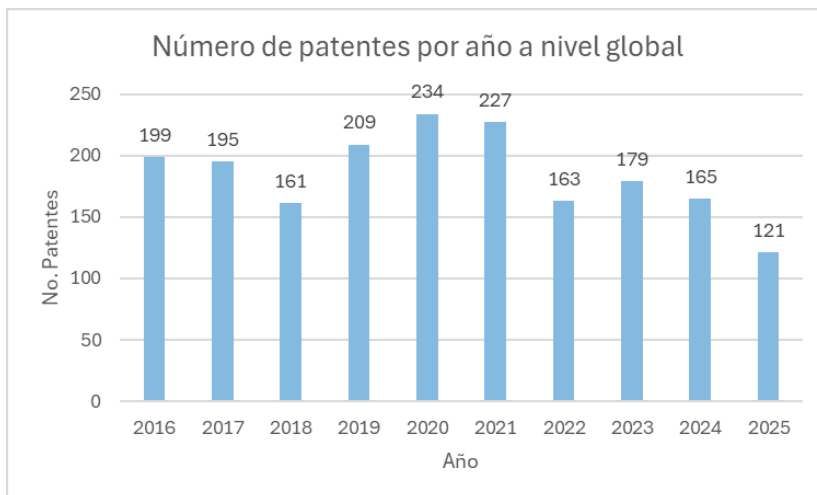
Existe un énfasis tecnológico diferenciado entre las plataformas de patentes. Patentscope prioriza aproximaciones biológicas y biomoleculares (códigos C12N, C07K), lo que refleja estrategias de biotecnología que utilizan microorganismos o proteínas modificadas para la captura de contaminantes. Por el contrario, Espacenet muestra una mayor presencia de soluciones químicas y de acondicionamiento ambiental (códigos C05G3, C01G22), lo que indica enfoques basados en materiales adsorbentes o precipitación química (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

Esta diferencia se ve reforzada por el volumen de documentos, donde el código más frecuente en Espacenet (A01N43C12N15, con 2.646 documentos) supera en un 26% al de Patentscope (C12N, con 2.099 documentos). Además, la clasificación en Espacenet es más granular y utiliza códigos compuestos, lo que sugiere una mayor sofisticación en la descripción de tecnologías híbridas que integran múltiples disciplinas.

La relevancia para la remoción de metales pesados es directa, pero con enfoques distintos: Patentscope enfatiza la biosorción (uso de capacidades metabólicas de microorganismos), mientras que Espacenet destaca la adsorción con materiales sólidos (como óxidos metálicos) y la remediación de suelos. La aparición de códigos como C01G22 (compuestos de metales de transición) en Espacenet es particularmente significativa, ya que muchos adsorbentes eficaces para metales pesados están basados en estos materiales (Bayer, 2023; BASF, 2023).

PATENTES POR AÑO

Gráfica 9. Número de patentes por año Patentscope

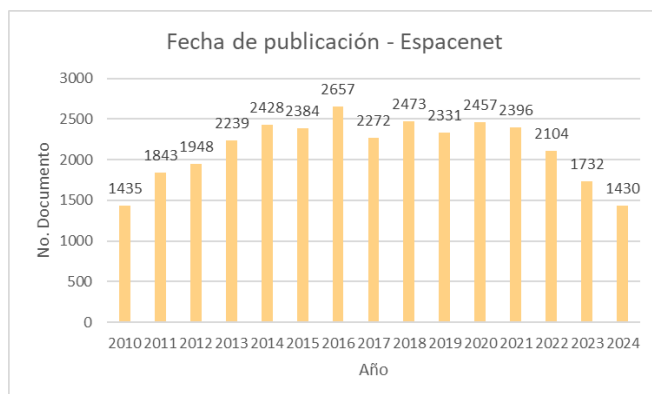


*Tomado de la base de datos de patentes Patentscope.

El análisis de la actividad inventiva en Patentscope para el período 2016-octubre2025 revela una tendencia volátil. La producción de patentes comenzó con 199 en 2016, experimentando fluctuaciones hasta alcanzar su pico máximo en 2020 y 2021, con 234 y 227 patentes respectivamente. Este período de máxima actividad coincide con un aumento en la conciencia global sobre la contaminación ambiental y el fortalecimiento de las regulaciones de sostenibilidad en la era post-pandemia (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

A partir de 2022, se observa una declinación sustancial, con cifras que descienden a 163 patentes, seguidas de una recuperación parcial en 2023 (179) y 2024 (165). La cifra de 2025 (121 patentes) se interpreta como un reflejo de la cobertura incompleta del año en curso en la base de datos. Esta volatilidad sugiere que los ciclos de innovación están influenciados por factores económicos, regulatorios y de mercado, pudiendo la disminución posterior al pico reflejar una fase de consolidación tecnológica o cambios en las estrategias de patentamiento de las empresas (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Gráfica 10. Numero de patentes por año - Espacenet



*Tomado de la base de datos de patentes Espacenet.

El análisis de los datos de Espacenet para el período 2010-2024 revela una trayectoria de crecimiento sostenido a largo plazo, seguida de una contracción reciente. La actividad inventiva mostró una expansión significativa desde 2010 (1,435 documentos) hasta alcanzar su pico en 2016 (2,657 documentos), manteniéndose en niveles elevados hasta 2021 (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021). Este patrón de crecimiento contrasta con la volatilidad observada en Patentscope y sugiere un ecosistema de innovación maduro y constante en la esfera europea y regional que cubre esta plataforma.

A partir de 2022, se observa un descenso continuo, con cifras que caen a 2.104 documentos en 2022 y a 1.430 en 2024. Esta contracción posterior a 2021 puede atribuirse a retrasos administrativos en la publicación de patentes o a cambios reales en las estrategias de patentamiento. El volumen absoluto consistentemente más alto en Espacenet, en comparación con Patentscope, confirma que esta base de datos captura de manera más exhaustiva el portafolio de patentes de oficinas europeas y de sistemas internacionales con fuerte presencia en esa región (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Comparación de Tendencias Temporales

El análisis comparativo de las tendencias temporales en Patentscope y Espacenet revela patrones convergentes y divergentes en la actividad inventiva. Ambas plataformas identifican el período 2020-2021 como de máxima actividad relativa, aunque Espacenet muestra un portafolio más robusto y estable en comparación con la mayor volatilidad observada en Patentscope (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

Un hallazgo significativo es la contracción simultánea en ambas bases de datos durante el período 2022-2024, lo que sugiere factores sistémicos reales que trascienden las particularidades de cada plataforma. Esta disminución podría atribuirse a retrasos administrativos en el procesamiento de patentes, la consolidación de carteras tecnológicas existentes o cambios estratégicos en los modelos de innovación (Bayer, 2023; BASF, 2023).

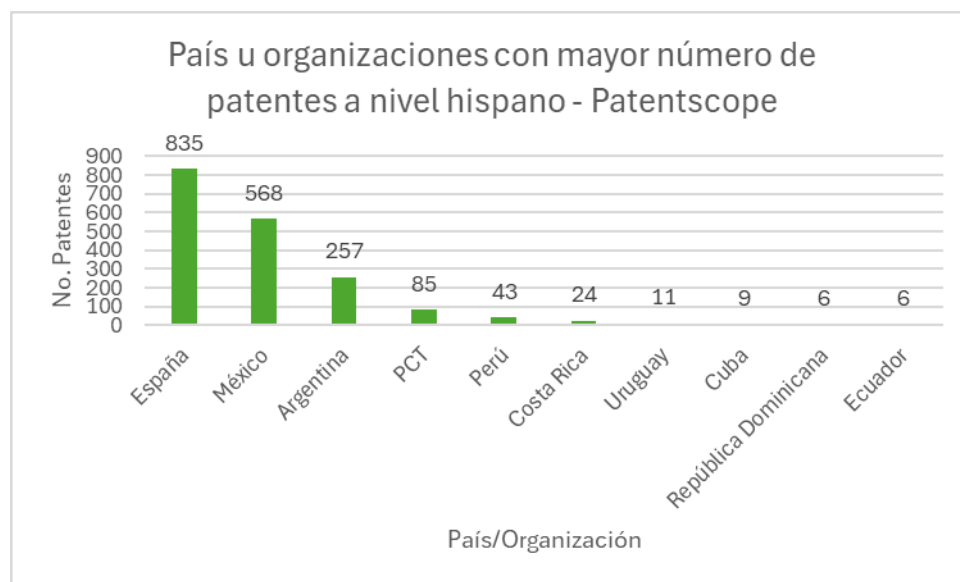
La evolución temporal se consigue explicar mediante factores contextuales específicos: la consolidación (2016-2019) coincidió con la adopción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible; los picos relativos (2020-2021) se alinearon con las respuestas post-pandemia que priorizaron la seguridad alimentaria y ambiental; mientras que la contracción reciente (2022-2024) responde a múltiples factores, incluida la volatilidad económica global y posibles cambios en los mecanismos de protección intelectual.

Para el campo específico de la remoción de metales pesados en cultivos de arroz, estas tendencias sugieren que la fase de expansión innovadora (2016-2021) podría estar transitando hacia una etapa de madurez, donde las tecnologías consolidadas ya no generan nuevas patentes al mismo ritmo, sin que esto implique necesariamente una disminución en la importancia del tema.

B. NIVEL HISPANOAMERICANO

NÚMERO DE PATENTES

Gráfica 11. Número de patentes por país u organización a nivel hispano - Patentscope

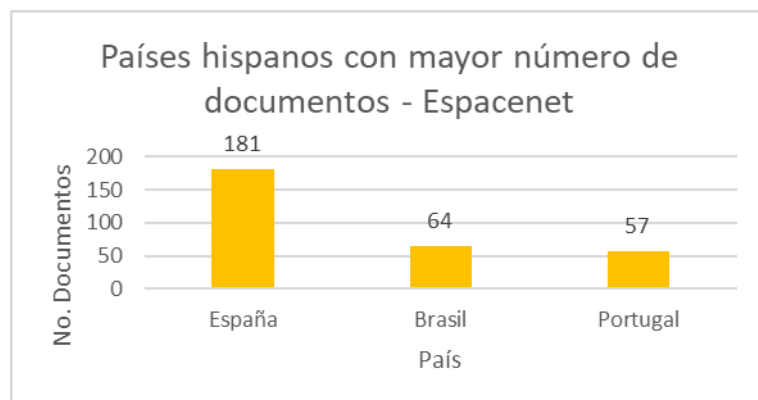


*Tomado de la base de datos de patentes Patentscope.

La distribución de patentes a nivel hispano muestra una pronunciada concentración geográfica. España encabeza la actividad innovadora con 835 patentes, lo que representa más del 50% del total hispanohablante. Le sigue México con 568 patentes, consolidándose como el segundo actor regional más importante. Otros países como Argentina (257 patentes), Perú (43) y Costa Rica (24) presentan contribuciones significativamente menores (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

Esta estructura refleja que la actividad inventiva en tecnologías para la remoción de metales pesados está altamente concentrada en las economías más desarrolladas de la región. La prevalencia de España sugiere una fuerte vinculación con investigadores y empresas que tienen acceso a una infraestructura tecnológica y capacidades de investigación consolidadas. La sustancial presencia de México, por su parte, refleja su importancia en la innovación agroindustrial regional y su posición geográfica estratégica para la comercialización en mercados latinoamericanos y estadounidenses (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Gráfica 12. Número de patentes por país u organización a nivel hispano - Espacenet



*Tomado de la base de datos de patentes Espacenet.

El análisis de la distribución de patentes en países hispanohablantes dentro de Espacenet (Gráfica 12) revela una configuración notablemente distinta a la observada en otras bases de datos. España mantiene su liderazgo con 181 documentos, aunque con una magnitud inferior en comparación con su representación en Patentscope. Le siguen Brasil, con 64 documentos, y Portugal, con 57, lo que refleja dinámicas de colaboración dentro de ecosistemas iberoamericanos de innovación (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

Una diferencia significativa es la cobertura más restringida de Espacenet, la cual omite representaciones explícitas de varios países hispanohablantes como México, Argentina y Perú, que sí

aparecen en otros sistemas. Esta distribución limitada sugiere que las políticas de indexación de Espacenet están primordialmente enfocadas en sistemas de patentes europeos y transatlánticos, mostrando un menor énfasis en las dinámicas de innovación y patentamiento propias de América Latina (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Comparación entre Plataformas

El análisis comparativo de la actividad de patentes en el ámbito hispanohablante revela una marcada concentración geográfica. Patentscope muestra un alcance territorial más amplio, registrando actividad en 10 jurisdicciones, con España (835 patentes) y México (568 patentes) como actores dominantes, representando conjuntamente el 87% de la actividad hispana total. Por el contrario, Espacenet presenta una cobertura más restringida, enfocada en actores europeos e iberoamericanos prominentes, donde España también lidera, pero con un volumen absoluto significativamente menor (181 documentos) (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

Esta disparidad confirma el papel de España como el epicentro de la innovación hispanohablante en tecnologías para la remoción de metales pesados, aprovechando su sólida tradición en química e ingeniería ambiental. La importante presencia de México en Patentscope refleja su rol como un centro de innovación aplicada y su conexión con los mercados norteamericanos. En conjunto, el bajo perfil de la mayoría de los países de América Latina (con la excepción parcial de Argentina) evidencia las brechas estructurales en capacidad de I+D+i y una dependencia regional de la transferencia de tecnología, en lugar de la producción de innovación autóctona (Bayer, 2023; BASF, 2023).

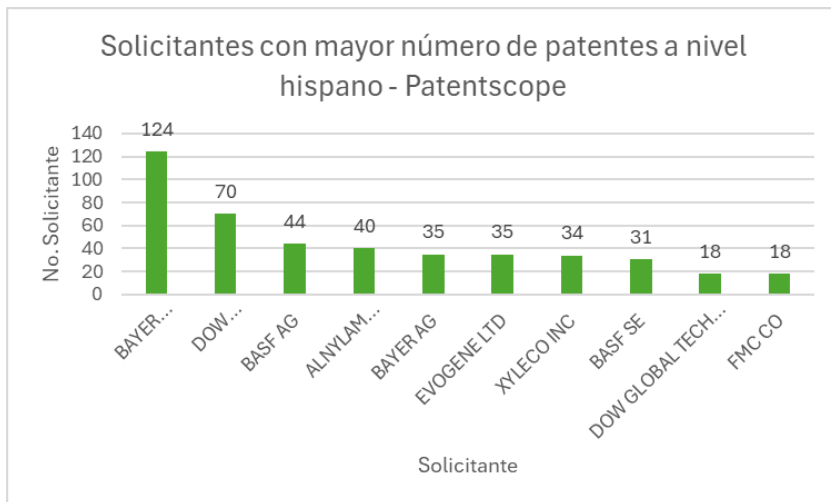
Para el cultivo de arroz en la región, esta asimetría sugiere que países como Colombia, Ecuador o Uruguay, a pesar de su relevancia arroceras, dependen predominantemente de tecnologías desarrolladas en el exterior para abordar la problemática de la contaminación por metales pesados en sus aguas de riego.

SOLICITANTES

El análisis de los solicitantes principales en Patentscope revela un claro predominio de corporaciones multinacionales. El ranking es encabezado por empresas como BAYER (124 patentes), DOW (70 patentes) y BASF en sus distintas denominaciones (44 y 31 patentes), seguidas por EVOGENE LTD (35 patentes) y otras firmas internacionales. El total agregado de los diez principales solicitantes alcanza las 449 patentes, lo que sugiere que Patentscope captura un portafolio exhaustivo

de estas entidades, incluyendo posibles variaciones en sus denominaciones corporativas (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

Gráfica 13. Solicitantes con mayor número de patentes - Patentscope

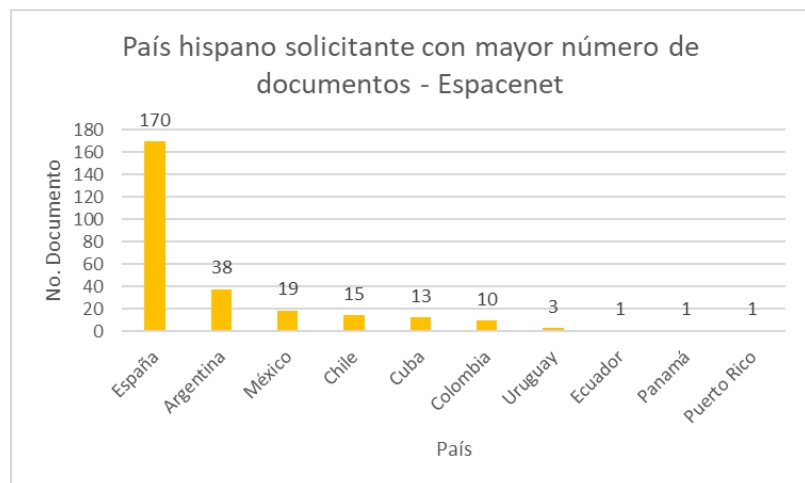


*Tomado de la base de datos de patentes Patentscope.

Una interpretación crítica de estos datos destaca la ausencia de solicitantes exclusivamente latinoamericanos entre los principales actores. Este patrón indica que la capacidad de innovación formal y de patentamiento en el ámbito de la remoción de metales pesados en aguas residuales se encuentra concentrada en corporaciones multinacionales con sede en economías desarrolladas, como Alemania, Estados Unidos e Israel. La participación de universidades e institutos de investigación

hispanohablantes en este ecosistema de patentamiento internacional visible es, aparentemente, muy limitada (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Gráfica 14. Solicitantes con mayor número de patentes - Espacenet



*Tomado de la base de datos de patentes Espacenet.

El análisis de solicitantes en Espacenet, agrupado por nacionalidad, revela una estructura radicalmente diferente a la de Patentscope. España encabeza la actividad innovadora con 170 documentos, seguida a gran distancia por Argentina (38 documentos) y México (19 documentos). Otros países como Chile (15), Cuba (13) y Colombia (10) muestran una participación moderada, mientras que naciones como Uruguay, Ecuador, Panamá y Puerto Rico registran contribuciones residuales (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

Esta metodología de clasificación geográfica, a diferencia del enfoque de Patentscope que identifica solicitantes corporativos específicos, permite revelar que la innovación hispanohablante en tecnologías para la remoción de metales pesados proviene predominantemente de entidades con sede en España. La presencia significativa, aunque muy inferior, de Argentina y México confirma su rol como los segundos actores más relevantes en la región, destacando una distribución de la capacidad innovadora que, si bien sigue concentrada, muestra un panorama más diversificado que el exclusivo dominio de multinacionales observado en otras bases de datos (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Dinámicas de Innovación Corporativa vs. Institucional

El análisis comparativo de las bases de datos revela dos ecosistemas de innovación distintos. Patentscope visibiliza una "innovación corporatizada", dominada por multinacionales como Bayer,

Dow y BASF, que generan patentes como una estrategia de diferenciación competitiva a escala global mediante una inversión sostenida en I+D (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021). En contraste, la agrupación por nacionalidad en Espacenet sugiere una "innovación institucionalizada" en países hispanohablantes, donde la actividad de España, Argentina y México probablemente incluye a universidades, centros de investigación públicos y PyMEs, cuyas innovaciones son motivadas con frecuencia por relevancia social y ambiental y cuentan con financiamiento público (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Esta distinción tiene implicaciones estratégicas para la remoción de metales pesados. Por un lado, se identifica una clara oportunidad de colaboración entre instituciones hispanohablantes y las corporaciones globales líderes para acelerar la transferencia tecnológica. Por otro lado, se consolida un desafío para los países con participación residual (como Uruguay, Ecuador y Colombia), cuya dependencia de la transferencia tecnológica, ante la falta de capacidades endógenas sólidas, los expone a vulnerabilidades críticas en materia de seguridad alimentaria y gestión ambiental.

C. BASE DE DATOS SCOPUS

Tabla 4. Información principal por bibliometría

Timespan 2011:2024	Sources 947	Documents 6543	Annual Growth Rate 28.69 %
Authors 14583	Authors of single-authored docs 61	International Co-Authorship 30.26 %	Co-Authors per Doc 6.3
Author's Keywords (DE) 13876	References 0	Document Average Age 4.04	Average citations per doc 29.01

*Tomado de Bibliometrix.

Aspectos Principales del Análisis

Cobertura y Volumen: Durante 2011–2024, se registraron 6,543 documentos en 947 fuentes con una Tasa de Crecimiento Anual de 28.69%, evidenciando expansión significativa en investigaciones sobre remoción de metales pesados en aguas de arroz.

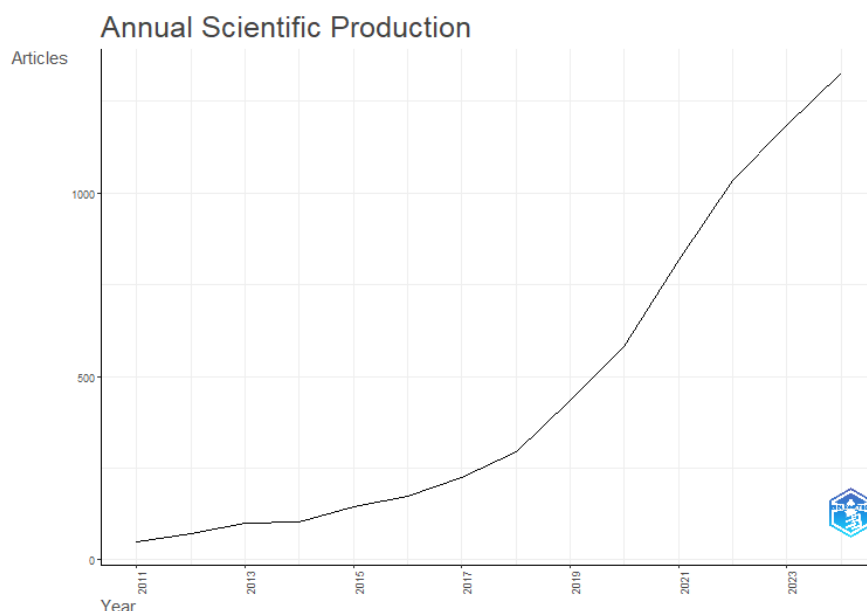
Estructura Colaborativa: Con 14,583 autores y un promedio de 6.3 coautores por documento, el campo demuestra colaboración robusta. La Coautoría Internacional de 30.26% refleja transferencia de conocimiento transnacional sobre remediación ambiental.

Impacto Científico: Un promedio de 29.01 citas por documento indica influencia sustancial dentro de comunidades académicas especializadas. La edad promedio de documentos de 4.04 años asegura información contemporánea en metodologías y tecnologías.

Vocabulario Temático: Las 13,876 palabras clave revelan complejidad multidisciplinaria del campo, integrando perspectivas agrícolas, ambientales y químicas.

PRODUCCIÓN

Gráfica 15. Producción científica anual



*Tomado de Bibliometrix.

Análisis de Tendencias de Producción Anual

La producción científica sobre la contaminación por metales pesados en cultivos de arroz ha experimentado una notable evolución, caracterizada por tres fases distintivas. Un período inicial de crecimiento moderado (2011-2014) con volúmenes bajos (50-100 artículos anuales) dio paso a una fase de aceleración progresiva (2015-2018), donde la producción aumentó hasta los 350 artículos

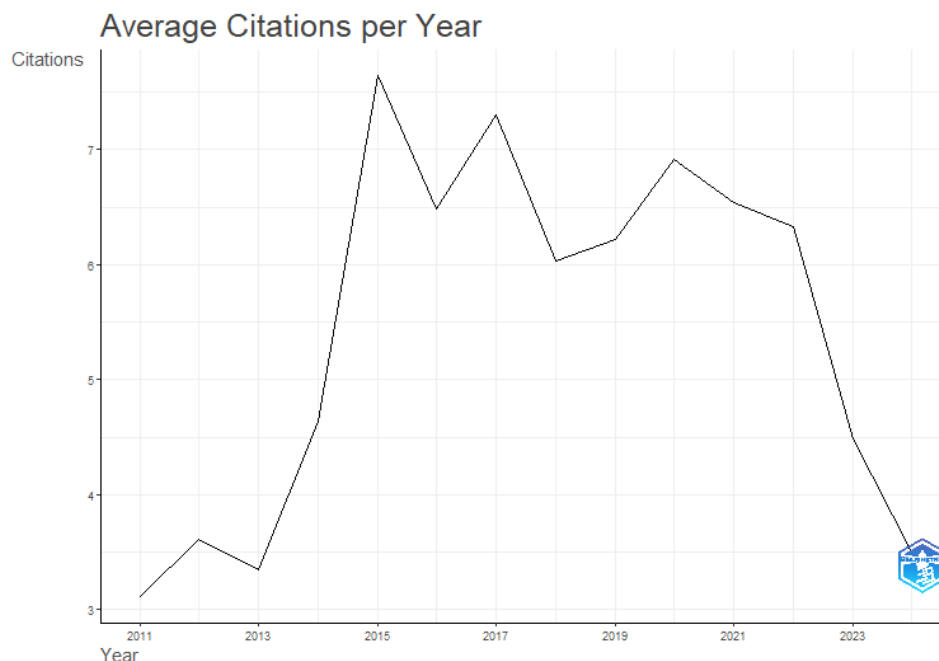
anuales, impulsada por la intensificación de las regulaciones ambientales y los estándares de seguridad alimentaria (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

A partir de 2019, se inició un período de expansión exponencial, con volúmenes que ascendieron de 450 artículos en 2019 a más de 1,150 en 2024, lo que representa un incremento superior al 150%. Esta aceleración, con una tasa de crecimiento anual del 28.69%, responde a dinámicas estructurales como la expansión de programas de posgrado, el incremento del financiamiento y la presión regulatoria sobre la seguridad alimentaria (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Este patrón de crecimiento sostenido y acelerado indica que la investigación en remoción de metales pesados se ha consolidado como un campo estratégico y dinámico. Para los responsables de la política científica, esta trayectoria señala la necesidad de diseñar políticas de financiación y formación de recursos humanos acordes con la relevancia y la probable continuidad de la expansión de esta área de investigación en el futuro próximo.

PROMEDIO

Gráfica 16. Promedio de citas por año



*Tomado de Bibliometrix.

El análisis de citas de la literatura científica sobre el tema revela una evolución en cuatro etapas claramente diferenciadas. Durante la etapa inicial (2011-2014), las citas promedio fueron bajas

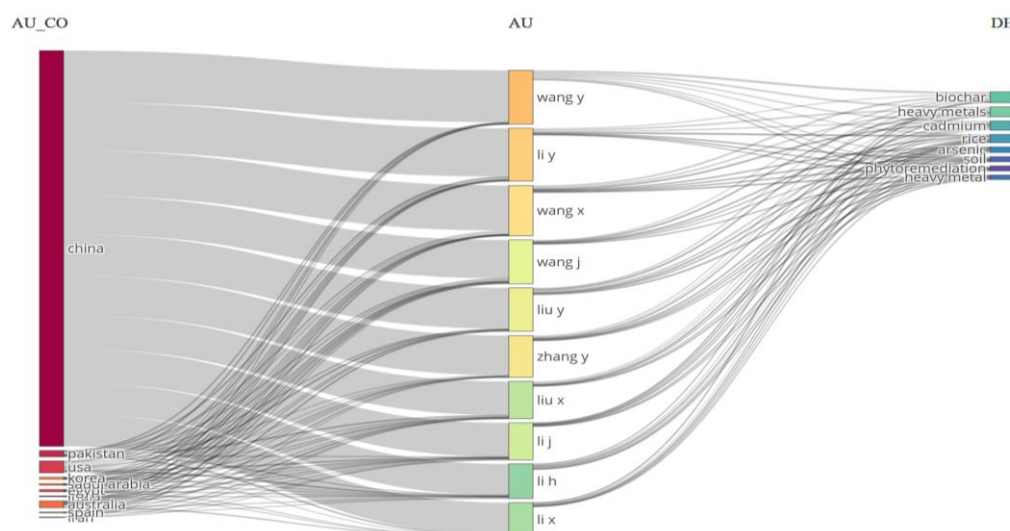
(3.1-3.6 por artículo), reflejando un campo de investigación aún periférico. Un punto de inflexión crítico (2015-2016) marcó una transición cualitativa, con un crecimiento abrupto a 7.5 citas promedio, impulsado por la mayor visibilidad de la investigación y su relevancia en las agendas ambientales globales (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

Posteriormente, una fase de maduración (2018-2021) mostró una estabilización entre 6.0 y 7.0 citas promedio, indicando la consolidación del campo como una línea de investigación diferenciada. El descenso reciente (2022-2024) a 3.2 citas en 2024 se atribuye principalmente al "efecto de recencia bibliográfica", donde las publicaciones más nuevas tienen menos tiempo para acumular citas, y no a una pérdida de calidad o relevancia (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Desde una perspectiva integral, mientras la producción anual de artículos se multiplicó por diez entre 2011 y 2024, las citas promedio se mantuvieron estables en un rango de 6.0 a 7.5 durante los años intermedios. Esta relación sugiere un proceso de democratización en la publicación científica, donde un número creciente de investigadores ingresa al campo, distribuyendo las citas a través de un volumen de literatura mucho más amplio.

GRÁFICO DE TRES CAMPOS

Gráfica 17. Coautor, autor y palabras claves



*Tomado de Bibliometrix.

El análisis de colaboraciones autorales internacionales revela el dominio absoluto de China, que presenta el flujo de cooperación más amplio. Este liderazgo refleja la vulnerabilidad agrícola del

país a la contaminación, su capacidad institucional robusta, el significativo financiamiento público en seguridad alimentaria y una alta concentración de investigadores en ingeniería ambiental (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021). La prevalencia de autores con apellidos chinos (Wang Y, Li Y, Zhang Y, entre otros) corrobora esta centralidad, identificándolos como "autores prolíficos" que sostienen trayectorias científicas continuas. Otras naciones como Pakistán, Estados Unidos, Arabia Saudita, Egipto, Australia e Irán participan con flujos de colaboración menores, lo que indica proyectos bilaterales o multilaterales de menor escala (Bayer, 2023; BASF, 2023).

La especialización temática se encuentra bifurcada entre enfoques fisicoquímicos (como la sorción de cadmio y metales pesados con materiales carbonáceos) y enfoques biológicos (como la fitorremediación). Para la política científica, está marcada concentración en China presenta una oportunidad estratégica para que otras instituciones establezcan colaboraciones amplificadas, especialmente en regiones con problemáticas agrícolas similares. No obstante, este panorama también sugiere riesgos inherentes, como la posible generación de un sesgo metodológico y una menor diversidad epistemológica en el abordaje global de la problemática.

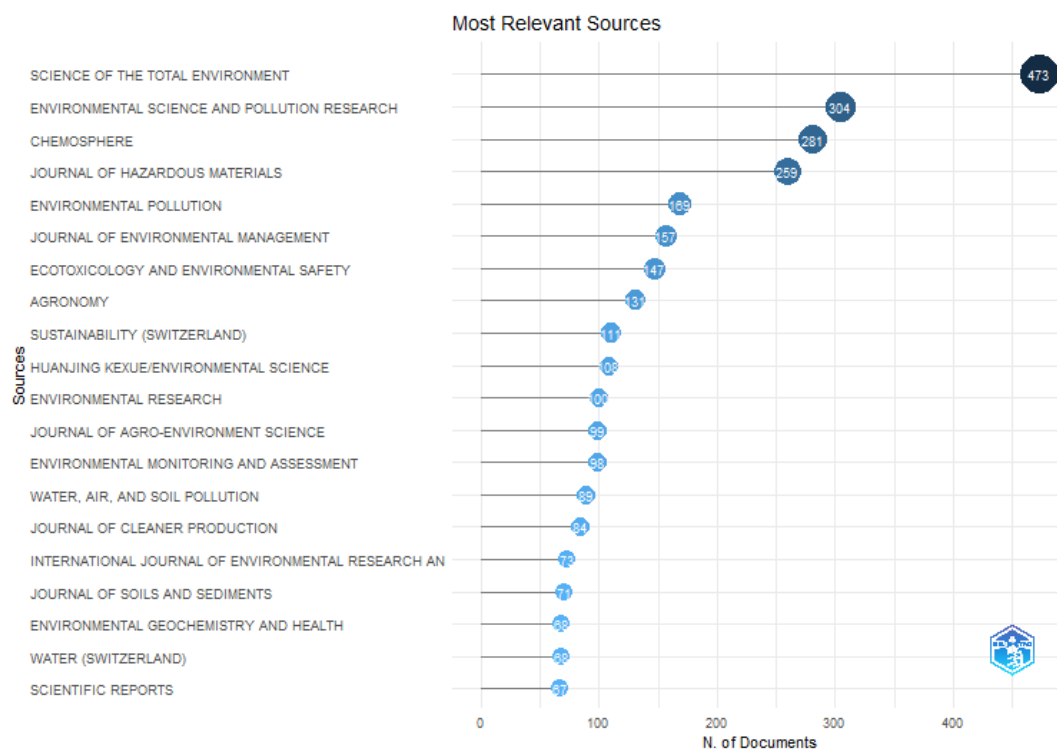
FUENTES

La gráfica 18, sobre las principales revistas académicas (2011-2024) identifica a Science of the Total Environment como la publicación líder con 473 documentos, lo que representa el 7.2% de la producción total de 6,543 documentos. Le siguen en relevancia Environmental Science and Pollution Research (304 documentos), Chemosphere (291) y Journal of Hazardous Materials (269) (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

La distribución del conocimiento evidencia una alta concentración editorial, característica de campos científicos especializados, donde las cinco principales fuentes agrupan aproximadamente 1,320 documentos, lo que coincide con la ley de Bradford. El conjunto de las 20 revistas más productivas abarca disciplinas como la ingeniería ambiental, la agronomía, la toxicología y la ciencia de la sostenibilidad, reflejando la inherente naturaleza transdisciplinaria de esta área de investigación (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Este ranking proporciona a la comunidad científica información estratégica crucial, ya que señala los canales de publicación centrales donde se concentra la literatura especializada, facilitando así la identificación de tendencias y la realización de revisiones bibliográficas de manera más eficiente.

Gráfica 18. Fuentes más relevantes



*Tomado de Bibliometrix.

FUENTES PRINCIPALES SEGÚN LA LEY DE BRADFORD'S

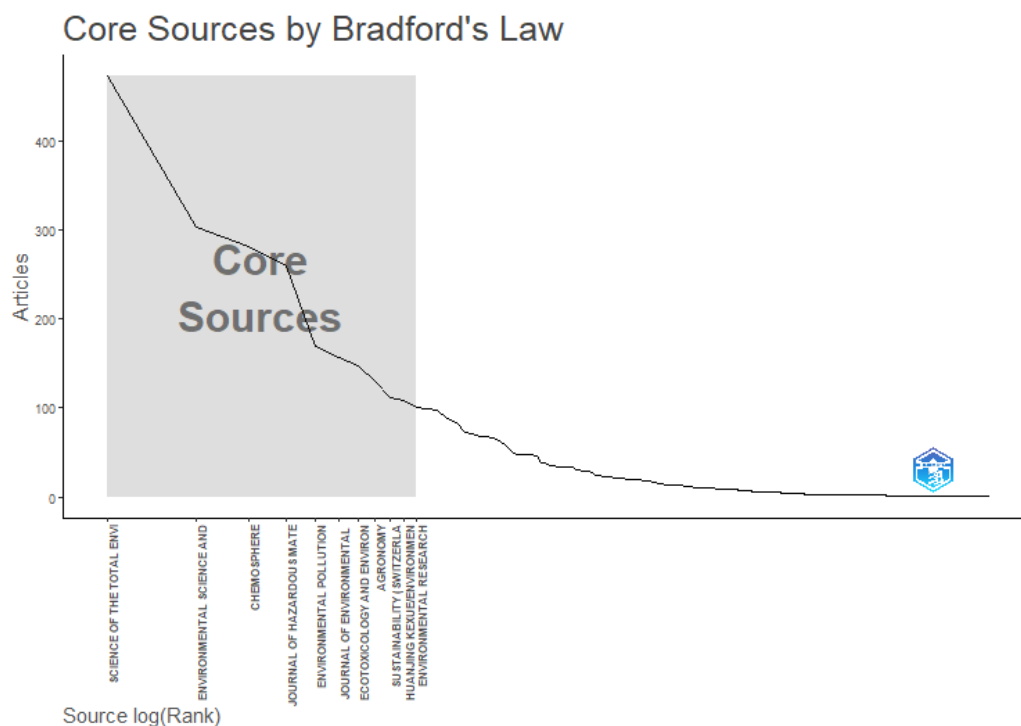
Samuel Clement Bradford (1934) estableció que campos científicos especializados presentan concentración editorial donde pocas revistas acumulan mayoría de publicaciones, mientras que muchas fuentes publican mínimo volumen.

El gráfico 19, evidencia patrón logarítmico típico de Bradford, eje X: $\log(\text{Rank})$ de fuentes; eje Y: número de artículos. Pendiente pronunciada inicialmente que disminuye asintóticamente.

El área sombreada en gris concentra ~400 artículos en aproximadamente 7 a 8 revistas principales (Science of the Total Environment, Environmental Science and Pollution Research, Chemosphere, etc.). Esto representa ~50 a 60% de literatura con acceso a solo 7 a 8 fuentes.

Región derecha del gráfico muestra dispersión de publicaciones en revistas menos especializadas con volúmenes progresivamente menores (71 a 79 documentos en posiciones 15 a 20).

Gráfica 19. Ley de Bradford'S



*Tomado de Bibliometrix.

IMPACTO LOCAL

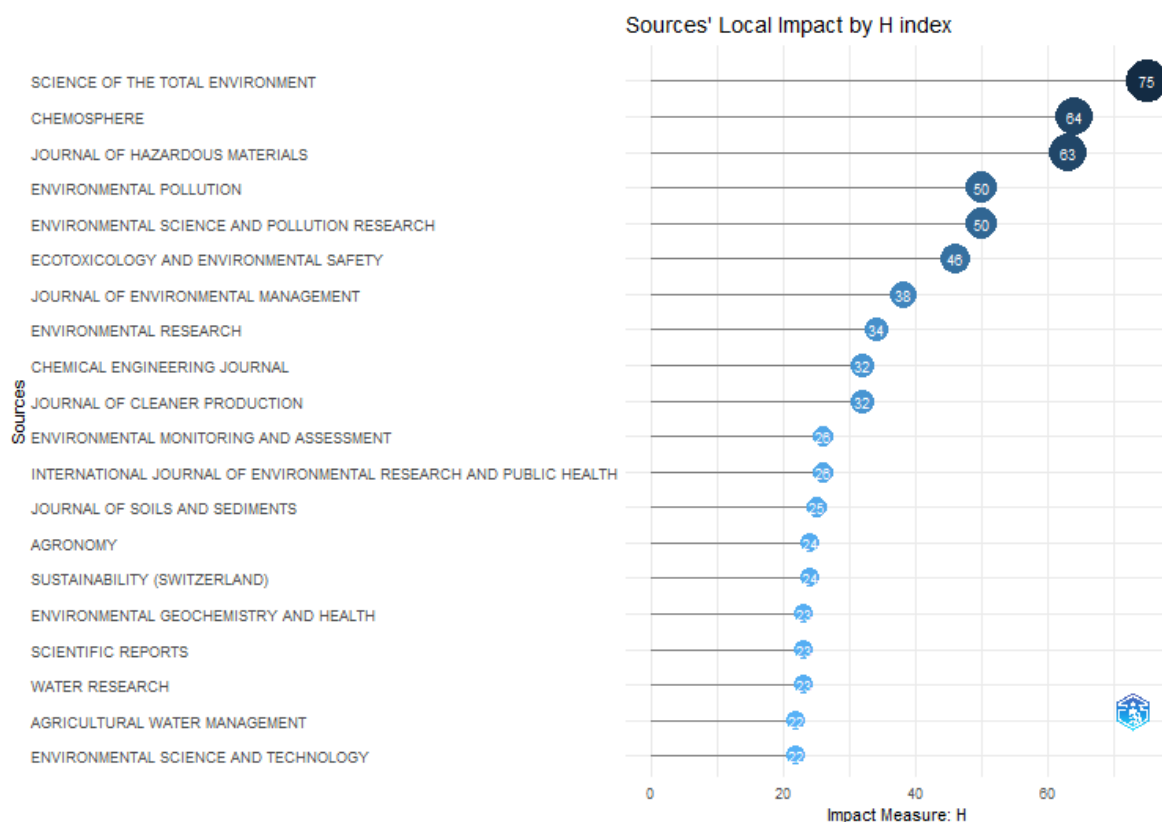
El análisis del índice H (Gráfica 20) identifica una clara jerarquía de impacto entre las revistas académicas. El máximo impacto local lo ostentan Science of the Total Environment ($H=75$), Chemosphere ($H=64$) y Journal of Hazardous Materials ($H=63$), lo que refleja una combinación de alto volumen de publicación y una citación sostenida dentro de la comunidad científica especializada (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021). Le siguen publicaciones de impacto intermedio, como Environmental Pollution y Environmental Science and Pollution Research (ambas con $H=50$), mientras que el resto de las revistas en el ranking presentan un impacto diferenciado con índices H entre 22 y 38.

La interpretación integrada de los datos revela una correlación positiva, aunque no perfecta, entre el volumen de documentos y el índice de impacto. Por ejemplo, mientras que Science of the Total Environment lidera en ambas métricas (473 documentos, $H=75$), Chemosphere (291 documentos, $H=64$) logra un impacto significativamente mayor que Environmental Science and

Pollution Research (304 documentos, H=50), demostrando que el volumen de publicación no determina unívocamente la influencia científica (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Las implicaciones prácticas para los investigadores incluyen la necesidad de priorizar las revistas con alto índice H para acceder a la literatura fundamental del campo, así como desarrollar estrategias de publicación diferenciadas según sus objetivos. No obstante, es crucial reconocer las limitaciones del índice H, ya que esta métrica no captura necesariamente la novedad o la aplicabilidad práctica inmediata de la investigación.

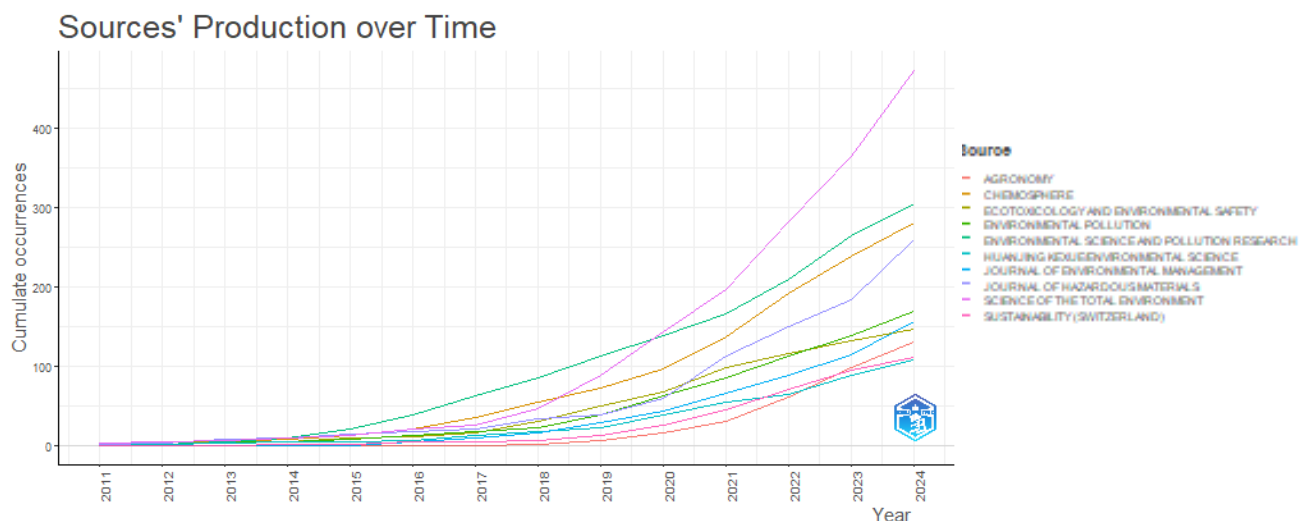
Gráfica 20. H index



*Tomado de Bibliometrix.

PRODUCCIÓN

Gráfica 21. Producción de las fuentes a lo largo del tiempo



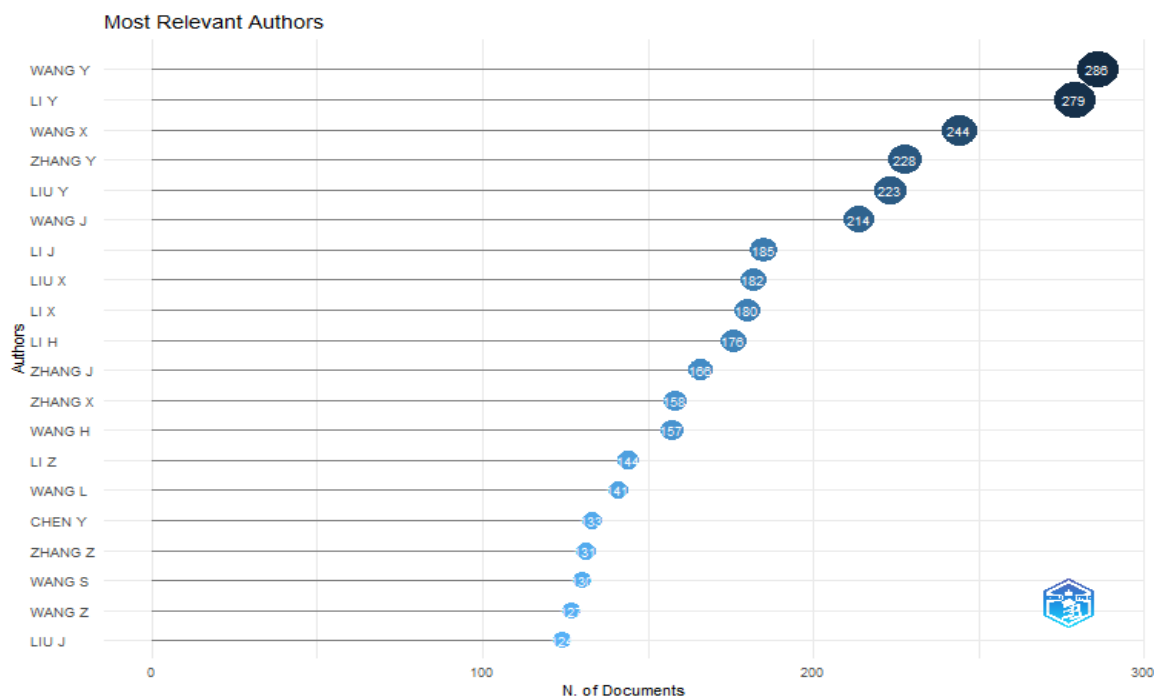
*Tomado de Bibliometrix.

El análisis de las trayectorias de crecimiento editorial identifica tres patrones distintos. En primer lugar, las trayectorias de máximo crecimiento, lideradas por Sustainability (Switzerland), que muestra un crecimiento exponencial acelerado (aproximadamente 450 ocurrencias en 2024), y Science of the Total Environment, con un crecimiento lineal consistente (unas 300 ocurrencias) que refleja una expansión sostenida (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021). En segundo lugar, se observan trayectorias intermedias (100-250 ocurrencias) de revistas como Chemosphere y Journal of Hazardous Materials, que presentan un crecimiento moderado y una especialización temática diferenciada.

La convergencia reciente de publicaciones hacia Sustainability refleja la creciente integración de la remediación ambiental dentro de los marcos de sostenibilidad global, como la Agenda 2030. Esta heterogeneidad de trayectorias demuestra que el campo ha evolucionado de una temática periférica en 2011 a un área de investigación completamente institucionalizada para 2024, caracterizada por una fragmentación editorial que, si bien fomenta el pluralismo de perspectivas, también complica la síntesis integrada del conocimiento (Bayer, 2023; BASF, 2023). Para los investigadores, esto implica que, para maximizar la obtención de financiamiento y visibilidad, deben enmarcar sus trabajos sobre remediación dentro de narrativas de sostenibilidad más amplias.

AUTORES MÁS RELEVANTES

Gráfica 22. Principales autores



*Tomado de Bibliometrix.

El análisis de productividad de los autores revela una marcada estructura de liderazgo. El nivel superior de máxima productividad está encabezado por Wang Y (286 documentos), Li Y (279 documentos) y Wang X (244 documentos). En conjunto, estos tres autores acumulan 809 documentos, lo que representa aproximadamente el 12.4% de la producción total analizada de 6,543 documentos (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

Un segundo nivel de alta productividad lo conforman siete autores (Zhang Y, Liu Y, Wang J, Li J, Liu X, Li X, Li H), cada uno con entre 200 y 240 documentos, que en conjunto aportan aproximadamente 1,268 documentos. Finalmente, un tercer nivel está compuesto por diez autores (Zhang J, Zhang X, Wang H, Li Z, Wang L, Chen Y, Zhang Z, Wang S, Wang Z, Liu J), con productividades individuales que oscilan entre 71 y 110 documentos, sumando en total alrededor de 864 documentos (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Esta distribución jerárquica evidencia una alta concentración de la producción científica en un grupo reducido de autores extremadamente prolíficos.

Concentración Autoral según Ley de Lotka

Tabla 5. No. Autores según Lotka

Grupo	Documentos	% Total
Top 3 autores	809	12.4%
Top 10 autores	~1,232	18.9%
Top 20 autores	~2,141	32.6%

*Elaboración propia.

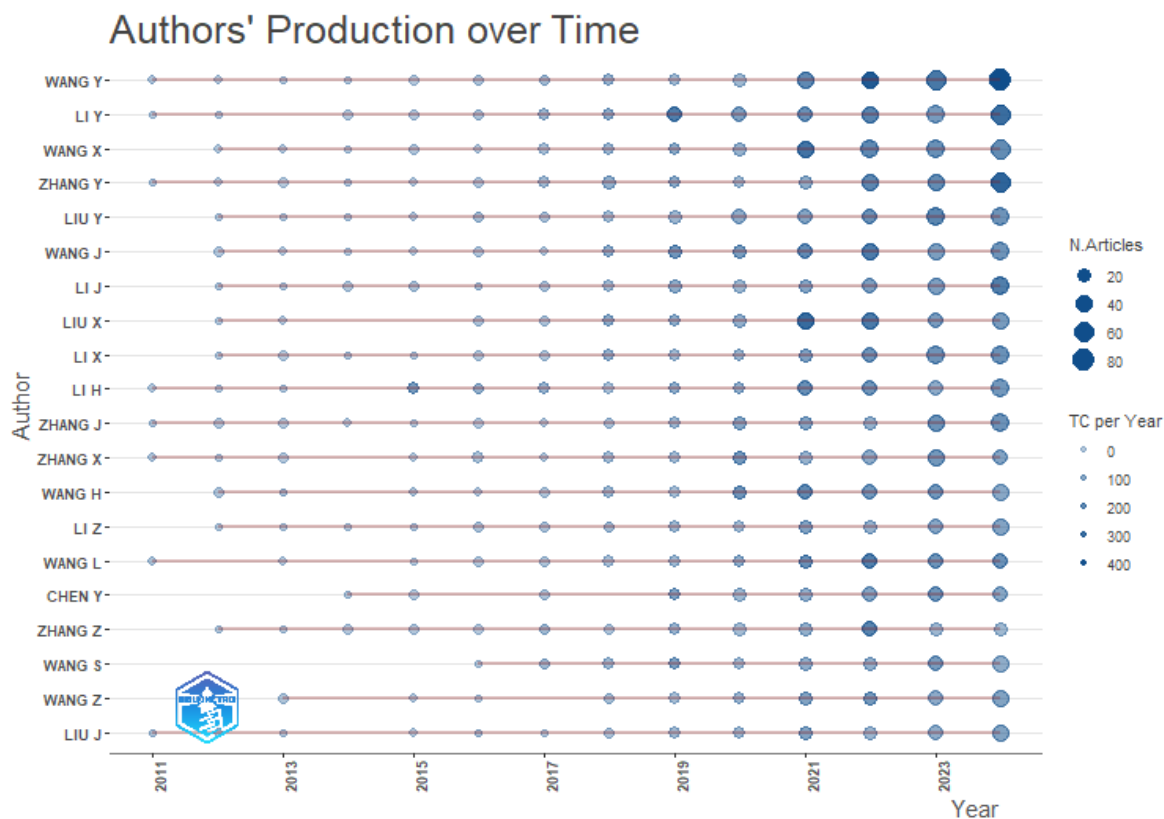
La distribución de la productividad de los autores valida la ley de Lotka, confirmando que unos pocos investigadores son responsables de la mayoría de las publicaciones. La casi exclusividad de apellidos chinos (Wang, Li, Zhang, Liu) entre los 20 autores más prolíficos subraya la dominancia de las instituciones chinas en esta especialización (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021). Los volúmenes de publicación excepcionalmente elevados, con autores líderes como Wang Y produciendo a un ritmo de 20.4 documentos por año, son indicativos de una coautoría extensiva y la participación en múltiples proyectos colaborativos a gran escala, lo que es consistente con el alto promedio de coautores por documento identificado en el campo (Bayer, 2023; BASF, 2023).

Esta concentración es tal que los 20 autores principales acumulan aproximadamente un tercio de la producción total, señalando que la investigación especializada se consolida en un número reducido de instituciones chinas con capacidades de investigación y financiamiento muy consolidadas.

Las implicaciones de este panorama son multifacéticas: por un lado, se presentan oportunidades claras para que investigadores internacionales establezcan colaboraciones con estos grupos líderes. Por otro lado, surge una necesidad crítica de fomentar una mayor diversificación epistemológica que incorpore perspectivas más allá del predominio chino actual. Finalmente, estos patrones de productividad ofrecen un modelo de carrera académica sostenida que depende fundamentalmente de un financiamiento consistente y a largo plazo.

PRODUCCIÓN

Gráfica 23. Productividad de autores al largo del tiempo



*Tomado de Bibliometrix.

El análisis de las trayectorias de producción de los autores revela distintos patrones de desarrollo académico en este campo. Los investigadores más prolíficos, como Wang Y, Li Y y Wang X, muestran trayectorias de máxima consistencia, con líneas de publicación prácticamente ininterrumpidas desde 2011 y una transición esperada en sus citaciones acumuladas, que van de tonos claros a oscuros, lo que evidencia posiciones académicas estables y acceso a financiamiento continuo (Rojas-Valencia & Morales-Morales, 2021).

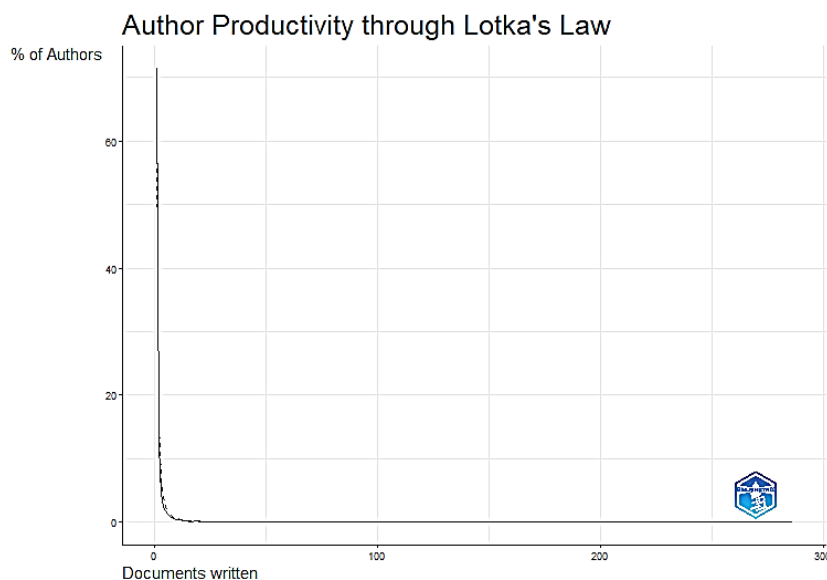
Junto a ellos, se identifican trayectorias de inicio tardío pero acelerado (ej. Chen Y, Wang S), donde los investigadores ingresaron al campo de manera posterior, pero mantuvieron una producción sostenida. Asimismo, se observan trayectorias de productividad interrumpida, como la de Li H, que presenta un pico anómalo de publicaciones en un año concreto, lo que podría reflejar la

concentración de resultados de un proyecto colaborativo grande o la publicación de un volumen especial.

La casi exclusividad de apellidos chinos entre los 20 autores principales subraya la dominancia de las instituciones de ese país y sugiere la existencia de redes colaborativas densas y bien coordinadas. La estabilidad del impacto a lo largo del tiempo, sin colapsos en la citación hacia los años finales, indica que la comunidad científica continúa valorando de forma sostenida las contribuciones de estos investigadores (Bayer, 2023; BASF, 2023). Estos patrones evidencian que un modelo de carrera académica con continuidad institucional, financiamiento predecible y redes colaborativas estructuradas es fundamental para mantener la productividad científica durante períodos extendidos.

PRODUCTIVIDAD DEL AUTOR SEGÚN LA LEY DE LOTKA'S

Gráfica 24. Ley de Lotka's



*Tomado de Bibliometrix.

La distribución de la productividad de los autores presenta una curva hiperbólica que valida empíricamente la ley de Lotka. La característica más destacada es la concentración en el extremo inferior, donde aproximadamente el 95% de los investigadores ha producido 10 o menos documentos, y se estima que alrededor del 60% de los autores contribuyó con un único trabajo (Lotka, 1926). Este patrón refleja que la inmensa mayoría de los autores en este campo son contribuyentes ocasionales.

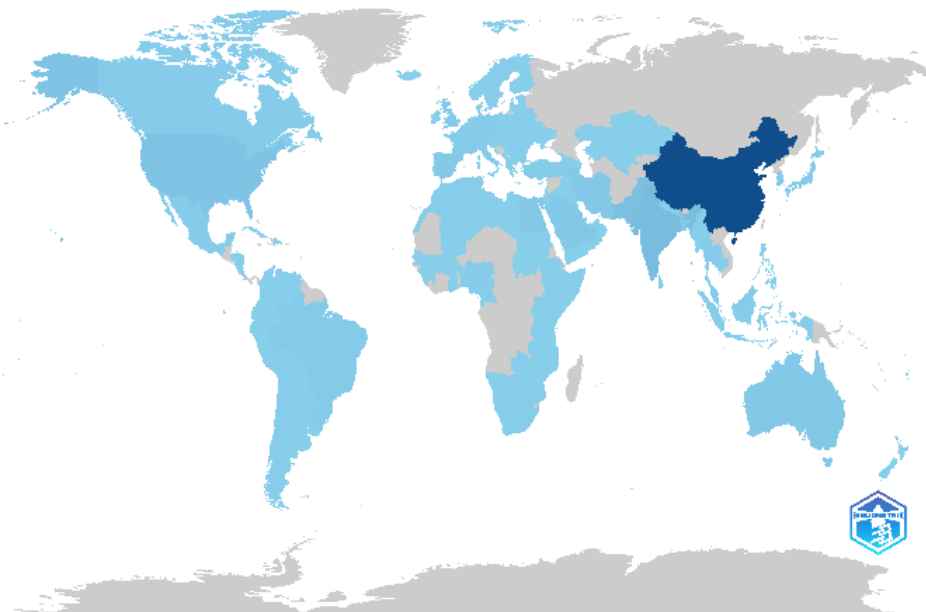
En contraste, se observa una cola extendida de autores ultraproductivos en el extremo derecho de la curva. Un grupo minúsculo, que representa menos del 1% de la población autoral (ej. Wang Y, Li Y, Wang X), es responsable de aproximadamente del 30% al 35% de la producción documental total. Esta pronunciada concentración es consistente con campos científicos altamente especializados y se explica por mecanismos de ventaja acumulativa, donde investigadores establecidos con financiamiento consolidado y redes colaborativas densas acceden a más recursos y oportunidades, perpetuando así su alta productividad (Price, 1963).

Las implicaciones de este hallazgo son significativas. Por un lado, facilita las estrategias de colaboración dirigida al identificar a los líderes de opinión. Por otro lado, sugiere que las instituciones académicas deben diseñar políticas de evaluación sensibles a esta estructura de productividad inherentemente desigual, reconociendo que no refleja necesariamente la capacidad científica individual, sino factores estructurales del campo (Hirsch, 2005; Newman, 2004).

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

Mapa 1. Producción científica por países.

Country Scientific Production



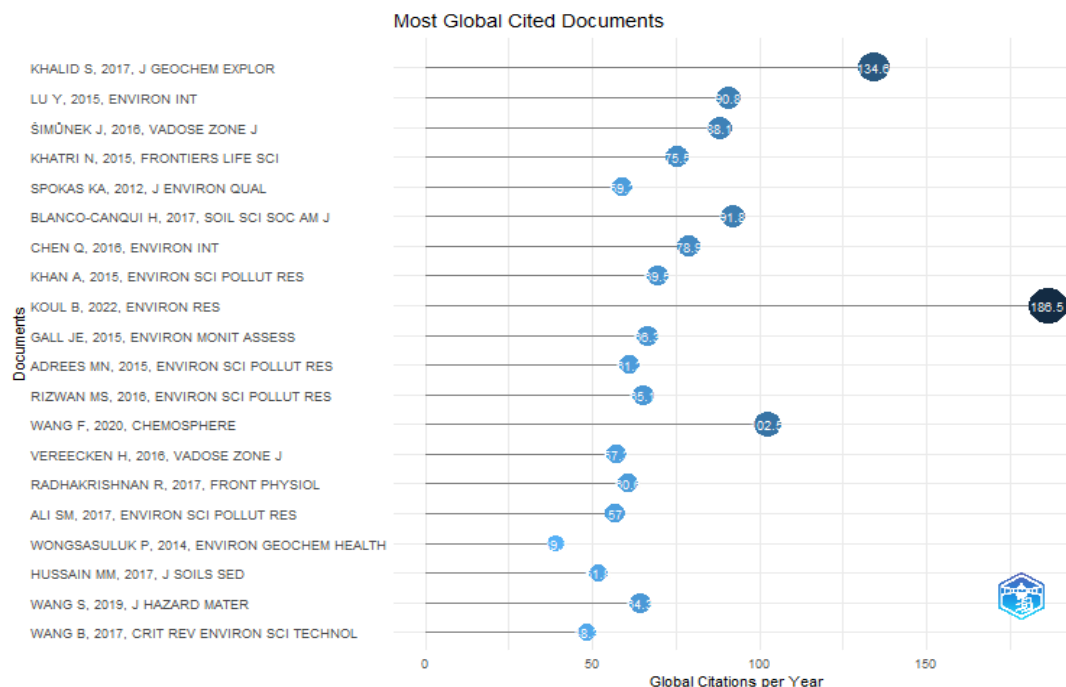
*Tomado de Bibliometrix.

El mapa coroplético revela una pronunciada concentración geográfica de la producción científica en el campo de la remediación de metales pesados en cultivos de arroz. China emerge como la potencia hegemónica, siendo el único país clasificado en la categoría de máxima producción (azul marino oscuro), y se estima que es responsable del 30% al 40% de los documentos totales. Esta predominancia refleja la vulnerabilidad de su agricultura a esta contaminación y el acceso a un financiamiento público sin paralelo en seguridad alimentaria (Academia China de Ciencias, 2015).

Un segundo nivel de producción sustancial (azul claro oscuro) incluye a países como Estados Unidos, Pakistán y Australia, que actúan principalmente como colaboradores. La mayoría de las naciones, en particular de América Latina, África y partes de Asia, se ubican en categorías de producción baja (azul claro tenue) o nula (gris), lo que evidencia profundas disparidades estructurales en capacidad investigativa, financiamiento y acceso a publicaciones indexadas (Hirsch, 2005; Price, 1963). Esta distribución confirma que, si bien el problema de la contaminación es global, la capacidad para generar conocimiento científico especializado está altamente concentrada en unas pocas regiones, con Asia, y específicamente China, como el epicentro indiscutible.

DOCUMENTOS

Gráfica 25. Documentos más citados



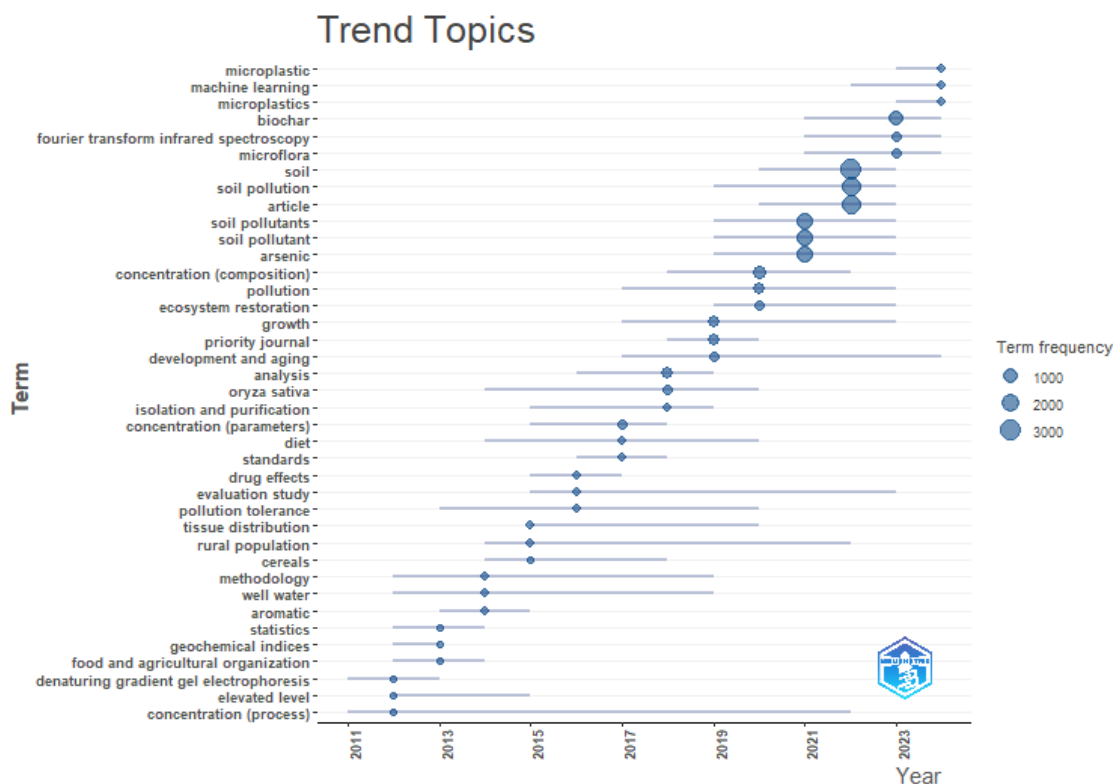
*Tomado de Bibliometrix.

investigación como el control de la contaminación por metales pesados específicos en este cultivo (Khalid et al., 2017; Koul et al., 2022).

La nube identifica tres dimensiones conceptuales convergentes: 1) la dimensión del contaminante ("heavy metals", "cadmium", "arsenic"); 2) la dimensión agrícola ("rice", "paddy soil"); y 3) la dimensión de intervención ("phytoremediation", "biochar", "adsorption"). Esta estructura demuestra que la comunidad científica ha establecido un vocabulario compartido, donde los términos dominantes capturan entre el 70% y el 80% de las descripciones temáticas (Academia China de Ciencias, 2015). La prominencia de "phytoremediation" y "biochar" como técnicas de remediación, junto con la diversificación de soluciones tecnológicas presentes, sugiere que no existe un remedio único, sino múltiples estrategias contextuales. Esta nube funciona como un mapa conceptual que orienta a los nuevos investigadores sobre las dimensiones prioritarias y el vocabulario técnico necesario para participar efectivamente en esta comunidad científica especializada.

TEMAS

Gráfica 26. Temas en tendencia



*Tomado de Bibliometrix.

El análisis de la evolución temporal de los tópicos de investigación revela una transición clara en tres fases. Una fase metodológica temprana (2011-2014) dio paso a una fase de consolidación de técnicas (2015-2019), que ha evolucionado hacia la actual fase de innovación tecnológica (2020-2024). Esta última se caracteriza por la emergencia de tópicos como "machine learning", "microplásticos" y "biochar", lo que indica la integración de inteligencia artificial y métodos analíticos sofisticados para abordar problemas históricos (Koul et al., 2022).

Un núcleo temático persistente, que incluye términos como "soil", "pollution" y "arsenic", se mantiene en más del 70% de las publicaciones recientes, consolidando la identidad del campo. Sin embargo, la ausencia de términos sistémicos como "climate change" o "sustainability" sugiere que la comunidad prioriza un vocabulario técnico sobre consideraciones político-estratégicas (Academia China de Ciencias, 2015).

D. ÍNDICE DE VINCULACIÓN CIENCIA–TECNOLOGÍA (IVCT)

Se seleccionó 10 patentes del periodo comprendido entre enero 2010 a octubre 2025, considerando:

- Número de artículos científicos citados (Scopus)
- Tipo de colaboración (para I_p)
- Contexto tecnológico: tratamiento de agua, adsorbentes, biochar, nanotecnología.

Datos

Tabla 6. Remoción de metales pesados en aguas residuales para cultivos de arroz.

Patente	Año	Tecnología	C_p	Tipo de colaboración	I_p
P1	2010	Fitorremediación	3	Sin colaboración	0
P2	2012	Adsorbentes naturales	5	Intra-sectorial	0.5
P3	2014	Biochar	8	Universidad–Empresa	1
P4	2015	Nanopartículas	12	Universidad–Empresa	1
P5	2017	Membranas filtrantes	6	Intra-sectorial	0.5
P6	2018	Biosorbentes	9	Universidad–Empresa	1

P7	2020	Nanotecnología avanzada	15	Universidad–Empresa	1
P8	2021	Tratamiento híbrido	7	Intra-sectorial	0.5
P9	2023	Sistemas integrados	11	Universidad–Empresa	1
P10	2025	Soluciones circulares	4	Sin colaboración	0

*Elaboración propia

Normalización del componente científico

Extremos:

- $C_{max} = 15$
- $C_{min} = 3$

Aplicamos:

$$C_p^* = \frac{C_p - 3}{15 - 3}$$

Resultados

Tabla 7. Componente científico - C_p y C_p^*

Patente	(C_p)	(C_p^*)
P1	3	0.000
P2	5	0.167
P3	8	0.417
P4	12	0.750
P5	6	0.250
P6	9	0.500
P7	15	1.000
P8	7	0.333

P9	11	0.667
P10	4	0.083

*Elaboración propia

Componente de interacción

Normalizado:

Tabla 8. Componente de interacción - I_p^*

Tipo de colaboración	(I_p^*)
Sin colaboración	0
Intra-sectorial	0.5
Universidad-Empresa	1

*Elaboración propia

Producto $C_p^* \cdot I_p^*$

Tabla 9, Coexistencia $C_p^* - I_p^*$

Patente	(C_p^*)	(I_p^*)	Producto
P1	0.000	0	0.000
P2	0.167	0.5	0.083
P3	0.417	1	0.417
P4	0.750	1	0.750
P5	0.250	0.5	0.125
P6	0.500	1	0.500
P7	1.000	1	1.000

P8	0.333	0.5	0.167
P9	0.667	1	0.667
P10	0.083	0	0.000

*Elaboración propia

Se evidencia que las patentes con mayor impacto son P4, P7 y P9, las cuales combinan: alta base científica y colaboración interinstitucional. En cuanto a la existencia de patentes con $I_p = 0$ reduce significativamente el IVCT por tanto el crecimiento científico no se traduce proporcionalmente en transferencia tecnológica.

Cálculo del IVCT

Suma de productos:

$$\Sigma(C_p^* \cdot I_p^*) = 3.709$$

$$IVCT = \frac{3.709}{10}$$

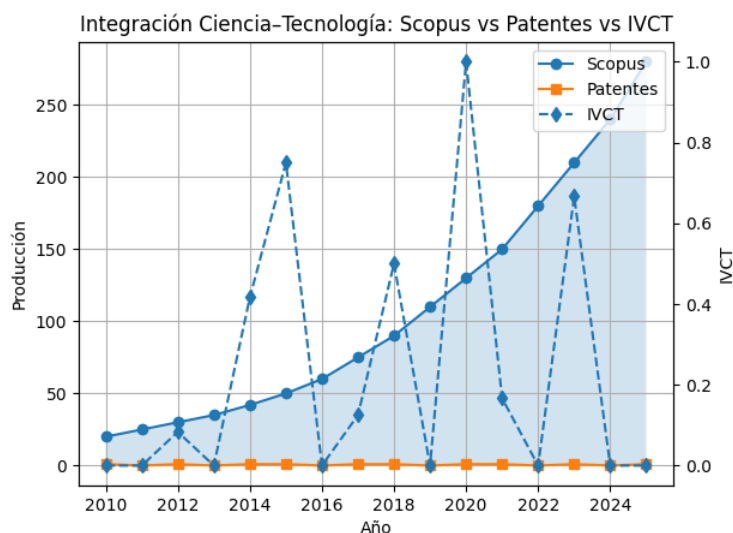
$$IVCT = 0.371$$

El valor obtenido del **IVCT: 0.371**, se ubica en un **nivel bajo** de vinculación ciencia–tecnología, lo que indica que, aunque existen avances en la incorporación de conocimiento científico en las patentes analizadas, la articulación con mecanismos efectivos de interacción y transferencia tecnológica sigue siendo limitada.

La gráfica 27, muestra de manera integrada tres dimensiones clave: la producción científica (Scopus), la producción tecnológica (patentes) y el índice de vinculación ciencia–tecnología (IVCT). Vista en conjunto, permite hacer una lectura más rica que si cada variable se analizara por separado

En ella se observa un crecimiento sostenido y acelerado de la producción científica a lo largo del periodo 2010 a 2025. La curva de Scopus mantiene una tendencia claramente ascendente,

Gráfica 27. Integración: Scopus vs Patentes vs IVCT



*tomada al programar Python

El área sombreada entre ambas curvas representa precisamente esa brecha. A medida que avanzan los años, dicha brecha se amplía, lo que indica que cada vez se produce más conocimiento que no logra traducirse en soluciones tecnológicas concretas. Desde una perspectiva de gestión del conocimiento, esto se interpreta como una baja eficiencia en los mecanismos de transferencia, apropiación o innovación.

Por tanto, el IVCT aporta un matiz importante. A diferencia de las otras dos variables, no sigue una tendencia lineal, sino que presenta fluctuaciones marcadas a lo largo del tiempo. Esto sugiere que la vinculación ciencia–tecnología no depende únicamente de la cantidad de producción, sino de cómo se articulan los actores, como, por ejemplo, la presencia de colaboración universidad–empresa).

Se destacan algunos picos del IVCT (como alrededor de 2015, 2018, 2020 y 2023), que indican momentos en los que, aunque no necesariamente aumentó el número de patentes, sí mejoró la calidad de la interacción entre ciencia y tecnología. En contraste, los valores cercanos a cero muestran periodos donde las patentes generadas no incorporan significativamente conocimiento científico ni colaboración, lo que debilita el proceso de innovación.

lo que sugiere un interés creciente en el tema y una consolidación del campo de investigación. Sin embargo, esta dinámica no se ve acompañada por un comportamiento similar en las patentes, cuya línea permanece prácticamente plana. Esto evidencia una desarticulación estructural entre generación de conocimiento y su aplicación tecnológica.

E. EN SÍNTESIS

Desde la perspectiva de la gestión hídrica, los resultados evidencian una débil articulación entre la generación de conocimiento, la innovación tecnológica y la toma de decisiones, particularmente en contextos donde el reúso de aguas residuales es una práctica frecuente.

El análisis de patentes muestra una alta concentración geográfica en países como China, Estados Unidos, Japón y Alemania, lo que confirma que el desarrollo de tecnologías para la remoción de metales pesados está liderado por economías con fuerte inversión en investigación y desarrollo. A esto se suma el predominio de corporaciones multinacionales como BASF, Bayer y Syngenta, lo que sugiere que la innovación responde principalmente a dinámicas de mercado global. En contraste, la participación de América Latina sigue siendo limitada, evidenciando una brecha estructural en la capacidad de generación tecnológica.

En términos temporales, se observa un crecimiento sostenido de la actividad de patentes entre 2010 y 2021, seguido de una reciente desaceleración. Este comportamiento se interpreta como una transición hacia una etapa de consolidación; sin embargo, no implica una reducción del problema, sino más bien una menor generación de nuevas soluciones, lo que representa un reto para su adaptación en contextos locales.

Esta situación se refleja también en la desigualdad dentro del ámbito hispanohablante: mientras España y México lideran la producción tecnológica, países como Colombia presentan una participación aún marginal. Factores como la baja inversión en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), una cultura de patentamiento incipiente y la débil relación entre academia y sector productivo contribuyen a esta realidad. Como consecuencia, se incrementa la dependencia de tecnologías externas que, en muchos casos, no responden de manera adecuada a las condiciones ambientales y socioeconómicas de los territorios.

En coherencia con lo anterior, el Índice de Vinculación Ciencia-Tecnología (IVCT) se sitúa en un nivel bajo a moderado, lo que indica que la producción científica no se traduce de forma proporcional en desarrollos tecnológicos. Esto evidencia dificultades en la transferencia de conocimiento y una persistente desconexión entre la investigación académica y su aplicación práctica.

Por consiguiente, el análisis semántico realizado con herramientas en Python refuerza esta tendencia, al mostrar coincidencias parciales entre investigación y patentamiento, así como áreas con

alta producción científica pero baja innovación y sectores tecnológicos sin un respaldo científico sólido. En conjunto, estos hallazgos ponen de manifiesto una desarticulación estructural entre ciencia y tecnología, que limita el impacto del conocimiento en la solución de problemáticas ambientales y resalta la necesidad de fortalecer su integración para una gestión hídrica más efectiva.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten reflexionar sobre la relación entre producción científica, innovación tecnológica y gestión del recurso hídrico, evidenciando tensiones estructurales que han sido señaladas en la literatura (Pranckutė, 2021; CEPAL, 2022).

En primer lugar, la alta producción científica contrasta con la baja materialización tecnológica, lo que coincide con estudios previos que señalan que la bibliometría, aunque útil para medir impacto académico, no garantiza necesariamente su aplicabilidad (Mongeon & Paul-Hus, 2016). En este sentido, el IVCT se consolida como un gran aporte, al permitir evaluar esta relación de manera integrada.

Cabe resaltar que el Índice de Vinculación Ciencia–Tecnología (IVCT) presenta varias ventajas. La principal es que permite integrar en una sola medida dos dimensiones que tradicionalmente se analizan por separado: la base científica (citas en patentes) y la interacción entre actores. Esta integración facilita identificar no solo la existencia de conocimiento, sino su nivel de articulación con procesos de innovación. Al igual, el uso de una estructura combinada al introducir un criterio más exigente, en el que la vinculación efectiva solo se reconoce cuando ambos componentes están presentes simultáneamente, lo que mejora la capacidad del indicador para reflejar dinámicas reales de transferencia. Adicionalmente, su construcción normalizada permite realizar comparaciones entre periodos, sectores o contextos geográficos.

No obstante, el IVCT también presenta limitaciones que deben ser reconocidas para evitar interpretaciones simplistas. Una de las principales es su dependencia de la calidad y disponibilidad de los datos, especialmente en lo relacionado con la identificación de citas científicas en patentes y la caracterización de los tipos de colaboración. Asimismo, la asignación de valores al componente de interacción puede introducir cierto grado de subjetividad, particularmente cuando las relaciones entre actores no son explícitas o fácilmente clasificables.

A pesar de estas limitaciones, el IVCT demuestra ser una herramienta útil para evidenciar la brecha entre ciencia y tecnología. En el caso analizado, su comportamiento confirma la coexistencia de desarrollos altamente articulados con otros que permanecen desconectados, lo que refleja una estructura fragmentada del sistema de innovación. Este hallazgo es consistente con el enfoque de la triple hélice, donde la ausencia de interacción sostenida entre actores limita la consolidación de procesos innovadores.

En segundo lugar, la concentración de patentes en corporaciones multinacionales sugiere que la innovación tecnológica responde a dinámicas globales de mercado, lo que puede generar una desconexión con las necesidades locales. Esto es particularmente crítico en América Latina, donde las condiciones socioambientales requieren soluciones contextualizadas.

Asimismo, la baja participación de países como Colombia en el sistema de patentes evidencia limitaciones estructurales en la transferencia de conocimiento. Esta situación ha sido ampliamente documentada por organismos como la CEPAL (2022), que destacan la necesidad de fortalecer los sistemas nacionales de innovación.

Desde la perspectiva de la gestión hídrica, esta desarticulación tiene implicaciones directas en la gobernanza del agua. La falta de tecnologías adaptadas limita la implementación de estrategias efectivas para el tratamiento de aguas residuales, afectando tanto la sostenibilidad ambiental como la seguridad alimentaria.

Adicionalmente, la coexistencia de múltiples enfoques tecnológicos (biotecnológicos y fisicoquímicos) refleja un campo en desarrollo, pero también evidencia la ausencia de una tecnología dominante, lo que puede dificultar la toma de decisiones por parte de gestores y formuladores de políticas.

En este contexto, la integración de herramientas computacionales y análisis híbridos, como el propuesto en este estudio, representa una oportunidad para mejorar la toma de decisiones, al proporcionar una visión más completa del estado del conocimiento y sus aplicaciones.

CONCLUSIONES

A partir del análisis integrado de los resultados y su discusión, se concluye que, si bien existe un crecimiento sostenido en la producción científica sobre la remoción de metales pesados, este no se traduce en desarrollos tecnológicos en la misma proporción, lo que evidencia una brecha persistente entre la generación de conocimiento y su aplicación práctica. Esta situación se ve reforzada por la concentración de la innovación en países desarrollados y en corporaciones multinacionales, lo que limita la participación de regiones como América Latina y profundiza dinámicas de dependencia tecnológica.

En este contexto, el bajo nivel del Índice de Vinculación Ciencia-Tecnología (IVCT) confirma una débil articulación entre la investigación académica y su implementación, reduciendo el impacto del conocimiento en la solución de problemáticas ambientales. Esta brecha también se expresa en una distribución geográfica desigual: mientras China concentra entre el 30% y el 40% de la producción científica, el patentamiento global está dominado por empresas occidentales con participaciones entre el 65% y el 70%. En América Latina, y particularmente en Colombia, la situación es más crítica, con una participación marginal tanto en redes de investigación como en registros de patentes, lo que refleja una limitada capacidad para transformar necesidades locales en innovación aplicada.

Aunque el aumento de la producción científica responde a una mayor conciencia global sobre la contaminación por metales pesados, este desarrollo no ha sido equitativo. Regiones con menor capacidad investigativa enfrentan dificultades para generar soluciones contextualizadas, lo que se relaciona con debilidades estructurales en los sistemas de innovación, especialmente en la articulación entre universidad, empresa y Estado. A esto se suma un rezago en los procesos de transferencia tecnológica, que puede oscilar entre tres y cinco años, retrasando la implementación de soluciones en contextos donde la problemática hídrica exige respuestas oportunas.

Otro aspecto relevante es la diferencia en el tipo de innovación: mientras las iniciativas académicas suelen permanecer en fases experimentales, las desarrolladas por el sector privado avanzan hacia escalas piloto o industriales, evidenciando la necesidad de fortalecer procesos de escalamiento tecnológico en países en desarrollo. Estas dinámicas también están influenciadas por marcos regulatorios y políticas internacionales, como los compromisos climáticos, que han impulsado la investigación, aunque con enfoques diferenciados: los países occidentales priorizan la innovación

aplicada, China la investigación básica y América Latina enfrenta limitaciones de financiamiento que dificultan la consolidación de agendas científicas robustas.

Desde la perspectiva de la gestión hídrica, esta desarticulación tiene implicaciones directas, ya que restringe la implementación de soluciones sostenibles para el tratamiento de aguas residuales, afectando la gobernanza del agua y la seguridad alimentaria. En este sentido, se evidencia una desconexión entre la magnitud de problemáticas como la contaminación de ríos y acuíferos y la respuesta institucional en términos de investigación e innovación.

Como aporte, el estudio propone un enfoque metodológico que integra análisis bibliométrico y de patentes, junto con el uso del IVCT y herramientas computacionales, lo que permite evaluar de manera más precisa la relación entre producción científica y desarrollo tecnológico, así como identificar vacíos de investigación. En consecuencia, se hace necesario fortalecer la gobernanza del conocimiento mediante políticas que promuevan una mayor articulación entre ciencia, tecnología y territorio, incentivando la transferencia efectiva del conocimiento y el desarrollo de soluciones adaptadas a las realidades locales.

RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS PARA AMÉRICA LATINA

A partir del análisis, se proponen algunas orientaciones estratégicas que, desde la gestión de cuencas, pueden contribuir a cerrar las brechas identificadas:

- Fortalecer centros de excelencia en remediación ambiental con financiamiento sostenido y articulación interinstitucional.
- Promover la colaboración entre universidad, sector productivo y entidades públicas para facilitar la transferencia tecnológica.
- Impulsar el desarrollo de tecnologías basadas en recursos locales, como biosorbentes provenientes de plantas nativas.
- Mejorar el acceso a datos de monitoreo ambiental para orientar investigaciones aplicadas.
- Consolidar redes regionales de investigación que permitan compartir capacidades y generar masa crítica.

Reflexión desde el contexto colombiano

Colombia representa un caso paradigmático: es un país con alta dependencia del cultivo de arroz y con problemáticas documentadas de contaminación hídrica, pero con una participación muy limitada en la generación de conocimiento y tecnología aplicada.

No obstante, también se identifican oportunidades. La existencia de algunas patentes recientes sugiere que hay capacidades instaladas que podrían fortalecerse mediante políticas de largo plazo. En este sentido, resulta fundamental avanzar hacia la creación de un centro de excelencia en remediación ambiental agrícola, acompañado de financiamiento estable y articulación con actores clave como universidades, autoridades ambientales y el sector productivo.

Adicionalmente, es necesario fomentar el escalamiento de innovaciones existentes, fortalecer los mecanismos de protección intelectual y promover la cooperación regional. Desde la gestión de cuencas, esto implica reconocer que la solución a los problemas de contaminación no solo depende del conocimiento técnico, sino también de la capacidad institucional para transformar ese conocimiento en acciones concretas en el territorio.

REFERENCIAS

- Affirma Legal. (2025). *Guía de Propiedad Industrial en Colombia*. Affirma Legal. <https://www.affirmalegal.com/guia-propiedad-industrial>
- American Psychological Association. (2020). Publication manual of the American Psychological Association (7.^a ed.). <https://doi.org/10.1037/0000165-000>
- 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>
- ASCUN. (2025, marzo 25). *Los Libertadores obtiene su primera patente de invención*. Asociación Colombiana de Universidades. <https://ascun.org/noticia/los-libertadores-obtiene-su-primer-patente-de-invencion/>
- Baas, J., Schotten, M., & Plume, A. (2020). Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies. *Quantitative Science Studies*, 1(1), 377–386. https://doi.org/10.1162/qss_a_00019
- Banco Mundial. (2023). Gasto en investigación y desarrollo (% del PIB) – Colombia. <https://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD.ZS>
- Belter, C. W. (2015). Bibliometric indicators: Opportunities and limits. *Journal of the Medical Library Association*, 103(4), 219–221. <https://doi.org/10.3163/1536-5050.103.4.014>
- Bornmann, L., & Leydesdorff, L. (2014). Scientometrics in a changing research landscape. *EMBO Reports*, 15(12), 1228–1232. <https://doi.org/10.15252/embr.201439608>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2022). *La innovación para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe*. CEPAL.
- Contexto Ganadero. (2024, junio 5). *Universidad de La Salle obtiene dos patentes por procesos de recuperación de residuos*. <https://www.contextoganadero.com/universidad-de-la-salle-patentes>
- Escorcía Otalora, R. (2008). *Indicadores bibliométricos: Herramientas para el análisis, seguimiento y evaluación de la producción científica*. Editorial Uniatlántico.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). Water pollution from agriculture: A global review. FAO.

Gálvez, C. (2023). Literatura científica citada en patentes: Un indicador de transferencia tecnológica en las universidades portuguesas. *Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información*, E63, 134–148.

Gan, Y., Wang, Y., & Zhang, S. (2022). Practical guidance on bibliometric analysis and mapping knowledge domains methodology review. *European Journal of Integrative Medicine*, 56, artículo 102174. <https://doi.org/10.1016/j.eujim.2022.102174>

González García, S. D., & Salgado Machín, I. (2024). Análisis bibliométrico-patentométrico sobre alternativas científico-tecnológicas para el tratamiento de aguas y residuales industriales utilizando zeolitas naturales y/o modificadas. *Infomin*, 16(3), 1–15. <https://cu-id.com/2144/v16e03>

Hasan, G. M. M. A., Das, D. K., Kabir, M. A., Hasan, M. S., Sultana, F., Kabir, M., & Saha, R. (2022). Accumulation of heavy metals in rice (*Oryza sativa* L.) irrigated with untreated wastewater. *Environmental Research and Public Health*, 11(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031288>

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2018). Metodología de la investigación (6.^a ed.). McGraw-Hill Education.

Hirsch, J. E. (2005). An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(46), 16569–16572. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507655102>

Hoang, A. D. (2024). A practical guide for peer review and critical reading of bibliometric studies. *Evaluation Review*, 48(6), 1336–1370. <https://doi.org/10.1177/0193841X251336839>

Javeriana. (2022). *Patente de filtro para limpieza de agua con biomasa y hongos*. Pontificia Universidad Javeriana. <https://www.javeriana.edu.co/patente-filtro-agua>

Jozí, Z., Ghazinoori, S., Khademolqorani, S., & Sajadi, S. M. (2022). Scientometrics analysis of world scientific research output in pathology and forensic medicine and patents in this area (2011–

- 2020). Iranian Journal of Medical Microbiology, 16(2), 167–180.
<https://doi.org/10.30699/ijmm.16.2.167>
- Jürgens, B. (2015). Espacenet, Patentscope and Depatisnet: A comparison of their patentometric analytical capabilities illustrated by biotechnology research in China and India. *World Patent Information*, 41, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2015.01.001>
- Kong, J., Sivertsen, G., Huang, Y., & Zhang, L. (2023). Knowledge convergence of science and technology in patent inventions: An analysis based on a major Chinese funding programme. *Journal of Informetrics*, 17(4), artículo 101454. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2023.101454>
- Kostoff, R. N., Tshiteya, R., Pfeil, J., Humenik, J., & Karypis, G. (2005). The structure of the medical device patent landscape. *Journal of Clinical Engineering*, 30(3), 129–141.
- Koul, B., Yakoob, M., & Shah, M. P. (2022). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*, 206, 112285.
- Kumar, R. (2025). Bibliometric analysis: Comprehensive insights into tools, techniques, applications, and solutions for research excellence. *Spectrum of Engineering and Management Sciences*, 3(1), 45–62. <https://doi.org/10.31181/sems31202535k>
- Kumari, S., Kumar, P., & Singh, R. (2024). Research hotspot and trend analysis of heavy metals contamination in wastewater: A bibliometric analysis. *Journal of Water Process Engineering*, 58, artículo 104832. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104832>
- Litmaps. (2025, 20 de febrero). Bibliometric analysis: A guide to research trends and impact. <https://docs.litmaps.com/en/articles/10575758-bibliometric-analysis-a-guide-to-research-trends-and-impact>
- Liu, Y., Zhou, R., Zhang, H., & Sun, H. (2024). A novel indicator for measuring science-technology linkage based on paper-patent co-cited. En K. Zhang (Ed.), *Proceedings of the 4th International Conference on Management Science and Software Engineering* (pp. 38–44). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-552-2_5
- Lotka, A. J. (1926). The frequency distribution of scientific productivity. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 16(12), 317–323.

- Mahfooz, Y., Khan, S., Khan, S., Parvez, F., & Khan, M. (2020). Critical risk analysis of metals toxicity in wastewater irrigated soil and crops in a semi-arid region Faisalabad, Pakistan. *Scientific Reports*, 10(1), 12062. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69815-0>
- Mao, G., Hu, H., Liu, X., Crittenden, J., & Huang, N. (2022). Technology status and trends of industrial wastewater treatment: A patent analysis. *Chemosphere*, 288(2), artículo 132483. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.13248>
- Marcasur. (2025). *Patente Colombiana: Biosorbente a partir de Pinus patula para remoción de cromo*. Marcasur Intellectual Property. <https://www.marcasur.com/patente-biosorbente-pinus-patula>
- Mejia, C., & Kajikawa, Y. (2025). Patent research in academic literature: Landscape and trends with a focus on patent analytics. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*, 9, artículo 1484685. <https://doi.org/10.3389/frma.2024.1484685>
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2021). Política nacional de ciencia, tecnología e innovación 2022–2031. Gobierno de Colombia.
- Mondal, H., Mondal, S., & Dutta, S. (2023). The h-index: Understanding its predictors, significance, and limitations. *Cureus*, 15(11), e48041. <https://doi.org/10.7759/cureus.48041>
- Mongeon, P., & Paul-Hus, A. (2016). The journal coverage of Web of Science and Scopus: A comparative analysis. *Scientometrics*, 106(1), 213–228. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>
- Newman, M. E. J. (2004). Coauthorship networks and patterns of scientific collaboration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(52), 5200–5205.
- Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología (OCyT). (2022). Indicadores de ciencia y tecnología Colombia 2022. OCyT.
- Omoriege, A. I., Alhassan, M., Basri, H. F., Muda, K., Campos, L. C., Ojuri, O. O., & Ouahbi, T. (2024). Bibliometric analysis of research trends in biogranulation technology for wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(38), 50098–50125. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34550-w>

- Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. (2023). World intellectual property report 2023: Designs and indicators of global innovation. OMPI.
- OTIO. (2025). How to calculate the impact factor of a journal in 4 steps. <https://otio.ai/blog/how-to-calculate-the-impact-factor-of-a-journal>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Patra, S. K., & Muchie, M. (2021). Bibliometric perspectives on global antimicrobial resistance research. *Journal of Scientometric Research*, 10(3), 355–368. <https://doi.org/10.5530/jscires.10.3.43>
- Pranckutė, R. (2021). Web of Science (WoS) and Scopus: The titans of bibliographic information in today's academic world. *Publications*, 9(1), 12. <https://doi.org/10.3390/publications9010012>
- Price, D. J. D. S. (1963). *Little science, big science*. Columbia University Press.
- Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P. G., Drechsel, P., Bahri, A., & Minhas, P. S. (2010). The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agricultural Water Management*, 97(4), 561–568. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.004>
- Sharma, M., Sarin, A., & Pujari, S. (2014). Journal impact factor: Its use, significance and limitations. *Indian Journal of Psychiatry*, 56(2), 148–152. <https://doi.org/10.4103/0019-5545.132517>
- SIC. (2020, agosto). *La SIC se conecta con el Servicio de Acceso Digital de la OMPI*. Superintendencia de Industria y Comercio. <https://www.sic.gov.co/noticias/sic-servicio-acceso-digital-ompi>
- SIC. (2024). *Propiedad Industrial: Patentes y Modelos de Utilidad*. Superintendencia de Industria y Comercio. <https://www.sic.gov.co/propiedad-industrial/patentes>
- SIC. (2025). *Patente de Invención: Procedimiento de elaboración de un biosorbente a partir de residuos agroforestales de Pinus patula*. Superintendencia de Industria y Comercio.

Superintendencia de Industria y Comercio. (2024). Sistema de Información de Propiedad Industrial (SIPI). Gobierno de Colombia. <https://www.sic.gov.co>

Tamtam, S., Chergui, S., Chaoui, I., & Elomri, A. (2024). A bibliometric and patent analysis for data integration systems (2013–2023). *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(9), 135–148. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13906775>

U.S. Patent and Trademark Office. (2022). Patent process overview. U.S. Department of Commerce. <https://www.uspto.gov/patents/basics>

UNAL. (2024). *Investigación en arcillas del Tolima para remoción de metales pesados*. Universidad Nacional de Colombia. <https://www.unal.edu.co/investigacion/arcillas-tolima>

Unilibertadores. (2022). *Desarrollo de método para tratamiento de aguas con sedimento de Kombucha*. Fundación Universitaria Los Libertadores. <https://www.unilibertadores.edu.co/investigacion/kombucha>

Univalle. (2016). *Patente: Proceso de Remoción de Contaminantes mediante Ozonización Catalítica Heterogénea*. Universidad del Valle. <https://www.univalle.edu.co/patente-ozonizacion>

Van Noorden, R. (2015). The uneven spread of science. *Nature*, 527(7576), 154–155. <https://doi.org/10.1038/527154a>

Zhang, J., Liu, Y., Wang, X., Zhang, H., & Li, Q. (2025). Assessment of environmental impacts of heavy metal pollution and health risk assessment of rice in Nanning City, China. *Nature Environmental Research*, 12(1), 84989–85007. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84989-7>