

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
FACULTAD DE POSGRADOS

INFORME DE INVESTIGACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA

TEMA:

APLICACIONES DE LAS NANOBURBUJAS EN LA PRODUCTIVIDAD, CALIDAD
Y SOSTENIBILIDAD AGRÍCOLA: UN ESTUDIO BIBLIOMÉTRICO.

Autor:

Jocelyne Vanessa López Almeida

Director:

Msc. Rafael Seleyman Lazo Sulca

Milagro, 2024

Derechos de autor

Sr. Dr.

Fabricio Guevara Viejó

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Yo, Jocelyne Vanessa López Almeida en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedo los derechos de Autor de este proyecto de desarrollo, que fue realizada como requisito previo para la obtención de mi Grado, de Magister en Biotecnología, como aporte a la Línea de Investigación Innovación Tecnológica en Procesos de Producción Agropecuaria de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedo a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservo a mi favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Proyecto de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El autor declara que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, 2 de agosto de 2024

Jocelyne Vanessa López Almeida

0604885632

Aprobación del tutor del Trabajo de Titulación

Yo, Rafael Seleyman Lazo Sulca en mi calidad de director del trabajo de titulación, elaborado por Jocelyne Vanessa Lopez Almeida, cuyo tema es aplicaciones de las nanoburbujas en la productividad, calidad y sostenibilidad agrícola: un estudio bibliométrico, que aporta a la Línea de Investigación Innovación Tecnológica en Procesos de Producción Agropecuaria, previo a la obtención del Grado Magister en biotecnología. Trabajo de titulación que consiste en una propuesta innovadora que contiene, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta, considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo APRUEBO, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Informe de Investigación de la Universidad Estatal de Milagro.

Milagro, 2 de agosto de 2024

Rafael Seleyman Lazo Sulca
0918859687

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO FACULTAD DE POSGRADO CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA

El TRIBUNAL CALIFICADOR previo a la obtención del título de MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA, presentado por ING. LOPEZ ALMEIDA JOCELYNE VANESSA, otorga al presente proyecto de investigación denominado "APLICACIONES DE LAS NANOBURBUJAS EN LA PRODUCTIVIDAD, CALIDAD Y SOSTENIBILIDAD AGRÍCOLA UN ESTUDIO BIBLIOMETRICO", las siguientes calificaciones:

TRABAJO ESCRITO	56.33
SUSTENTACIÓN	38.00
PROMEDIO	94.33
EQUIVALENTE	Muy Bueno



Firma electrónica por:
DIEGO GEOVANNY
BARZALLO GRANIZO

Mgs. BARZALLO GRANIZO DIEGO GEOVANNY
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



Firma electrónica por:
CESAR ANIBAL
BARZOLA GAIBOR

Ing. BARZOLA GAIBOR CESAR ANIBAL
VOCAL



Firma electrónica por:
ALEX EDWIN GUILLEN
BONILLA

Ing. GUILLEN BONILLA ALEX EDWIN
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

A mi madre por su todo su amor y cuidado. A mi padre por su perseverancia y apoyo. A Dios, por permitirme culminar este nueva meta en mi vida y otorgarme salud y guía con el fin de culminarla. Y a mi familia gracias por su apoyo, comprensión y visión.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme fuerza, voluntad y permitirme superar cada desafío encontrado con su infinita sabiduría. A mis padres por todo su amor, cariño y apoyo en todas las circunstancias. A mis hermanos por ser compañeros y amigos en momentos de dificultad. A la Universidad de Milagro y a los profesionales que nos acompañaron durante la formación académica, por todos los conocimientos brindados.

Resumen

Propósito – Este estudio tiene como objetivo mapear la estructura conceptual y la evolución de la literatura científica reciente sobre las aplicaciones de las nanoburbujas en la productividad, calidad y sostenibilidad agrícola, para identificar áreas de interés y posibles direcciones de investigación futura.

Diseño/metodología/enfoque – Se identificaron y examinaron 635 artículos más influyentes sobre nanoburbujas en la agricultura publicados entre 2002 y 2024 a través de un análisis bibliométrico utilizando la base de datos Scopus.

Resultados – Los hallazgos reafirman el papel crítico de las nanoburbujas, destacando su aplicación en el tratamiento y purificación del agua, mejora de procesos biológicos, y aumento del rendimiento de cultivos. También se identificaron tendencias emergentes como el uso de nanoburbujas en la remediación ambiental y la producción de energía.

Limitaciones/implicaciones de la investigación – La recopilación de datos se limitó a documentos indexados en Scopus, lo cual puede influir en la representatividad y exhaustividad de los resultados. Además, la selección de documentos se basó en criterios de búsqueda específicos, lo que podría haber excluido investigaciones relevantes.

Implicaciones prácticas – Los autores, artículos y revistas influyentes identificados en este estudio facilitarán futuras búsquedas de literatura y la difusión científica en el campo, este estudio contribuye significativamente a la literatura agrícola al identificar temas de actualidad y sugerir futuras líneas de investigación. La importancia de las nanoburbujas y su potencial para mejorar la calidad y sostenibilidad de los cultivos tienen implicaciones prácticas importantes para los agricultores.

Originalidad/valor – Este es el primer estudio exhaustivo que ofrece una visión general de las principales tendencias y autores en la investigación sobre nanoburbujas en la agricultura.

Palabras clave: Producción agrícola, Sostenibilidad, Calidad agrícola, Análisis de citas, Publicaciones de investigación, Mapeo científico.

Abstract

Purpose – This study aims to map the conceptual structure and evolution of recent scientific literature on the applications of nanobubbles in agricultural productivity, quality, and sustainability, to identify areas of interest and potential future research directions.

Design/methodology/approach – The 635 most influential papers on nanobubbles in agriculture published between 2002 and 2024 were identified and scrutinized through a bibliometric analysis using the Scopus database.

Findings – The findings reaffirm the critical role of nanobubbles in agriculture, highlighting their application in water treatment and purification, enhancement of biological processes, and increase in crop yields. Emerging trends such as the use of nanobubbles in environmental remediation and energy production were also identified.

Research limitations/implications – Data collection was limited to Scopus-indexed documents, which may affect the representativeness and comprehensiveness of the results. Additionally, document selection was based on specific search criteria, which might have excluded relevant research.

Practical implications – The influential authors, papers, and journals identified in this study will facilitate future literature searches and scientific dissemination in the field. This study makes a significant contribution to agricultural literature by identifying hot topics and suggesting future research themes. The importance of nanobubbles in agriculture and their potential to improve crop quality and sustainability have important practical implications for farmers.

Originality/value – This is the first comprehensive study offering an overview of the leading trends and authors in nanobubble research in agriculture.

Keywords: Agricultural production, Sustainability, Agricultural quality, Citation analysis, Research publications, Science mapping.

Lista de Figuras

Figura 1. Nanoburbujas superficiales y en masa	13
Figura 2. Subetapas de la recopilación de datos	26
Figura 3. Diagrama de Flujo de Trabajo para el Mapeo Científico	30
Figura 4. Diagrama de Flujo para el Método PRISMA.....	33
Figura 5. Diagrama de Flujo del Método Prisma para la selección de estudios	37
Figura 6. Integridad de los metadatos bibliográficos del primer cuartil con 410 documentos de Scopus	38
Figura 7. Producción científica Anual de los 410 documentos del primer cuartil	40
Figura 8. Promedio de Citas por año para los 410 documentos del primer cuartil	41
Figura 9. Autores más relevantes entre los 410 documentos del primer cuartil	44
Figura 10. Nube de las Palabras clave de los 410 documentos del primer cuartil	45
Figura 11. Mapa temático de los 410 artículos del primer cuartil	47
Figura 12. Mapa de colaboración por países de los 410 documentos del primer cuartil	49
Figura 13. Integridad de los metadatos bibliográficos del segundo cuartil con 80 documentos de Scopus	51
Figura 14. Producción científica Anual de los 80 documentos del segundo cuartil	52
Figura 15. Promedio de Citas por año para los 80 documentos del segundo cuartil	53
Figura 16. Autores más relevantes entre los 80 documentos del segundo cuartil.....	56
Figura 17. Nube de las Palabras clave de los 80 documentos del segundo cuartil.....	56
Figura 18. Mapa temático de los 80 artículos del segundo cuartil	58
Figura 19. Mapa de colaboración por países de los 80 documentos del segundo cuartil	59
Figura 20. Integridad de los metadatos bibliográficos del tercer cuartil con 57 documentos de Scopus	61
Figura 21. Producción científica Anual de los 57 documentos del tercer cuartil	63
Figura 22. Promedio de Citas por año para los 57 documentos del tercer cuartil	64
Figura 23. Autores más relevantes entre los 57 documentos del tercer cuartil	66
Figura 24. Nube de las Palabras clave de los 57 documentos del tercer cuartil	66
Figura 25. Mapa temático de los 57 artículos del tercer cuartil	67
Figura 26. Mapa de colaboración por países de los 57 documentos del tercer cuartil.....	69
Figura 27. Integridad de los metadatos bibliográficos del cuarto cuartil con 10 documentos de Scopus	70
Figura 28. Producción científica Anual de los 10 documentos del cuarto cuartil	72
Figura 29. Promedio de Citas por año para los 10 documentos del cuarto cuartil	73
Figura 30. Autores más relevantes entre los 10 documentos del cuarto cuartil	74
Figura 31. Nube de las Palabras clave de los 10 documentos del cuarto cuartil.....	74
Figura 32. Mapa temático de los títulos de los 10 artículos del cuarto cuartil.....	76
Figura 33. Integridad de los metadatos bibliográficos del cuartil indefinido con 78 documentos de Scopus	77
Figura 34. Producción científica Anual de los 78 documentos del cuartil indefinido	79
Figura 35. Promedio de Citas por año para los 78 documentos del cuartil indefinido.....	80
Figura 36. Autores más relevantes entre los 78 documentos del cuartil indefinido.....	81
Figura 37. Nube de las Palabras clave de los 78 documentos del cuartil indefinido	82
Figura 38. Mapa temático de los 78 artículos del cuartil indefinido.....	83
Figura 39. Mapa de colaboración por países de los 78 documentos del cuartil indefinido ...	85

Lista de Tablas

Tabla 1 Declaración de las variables	5
Tabla 2 Operacionalización de las variables.....	6
Tabla 3 Métodos de generación de nanoburbujas en masa.....	14
Tabla 4 Métodos de generación de nanoburbujas superficiales	16
Tabla 5 Técnicas de Caracterización de Nanoburbujas.....	30
Tabla 6 Tipos de Indicadores Bibliométricos	24
Tabla 7 Etapas del flujo de trabajo para un mapeo científico.....	25
Tabla 8 Librerías Disponibles para el Análisis de Mapeo científico	27
Tabla 9 Opciones de análisis de librerías disponibles para el mapeo científico	29
Tabla 10 Ítems y subítems de la lista de verificación PRISMA	31
Tabla 11 Criterios de búsqueda	34
Tabla 12 Información Principal de los documentos del primer cuartil	38
Tabla 13 Los 10 Artículos más citados del primer cuartil	42
Tabla 14 Información Principal de los documentos del segundo cuartil	51
Tabla 15 Los 10 Artículos más citados del segundo cuartil.....	54
Tabla 16 Información Principal de los documentos del tercer cuartil	62
Tabla 17 Los 10 Artículos más citados del tercer cuartil	65
Tabla 18 Información Principal de los documentos del cuarto cuartil	71
Tabla 19 Los 5 Artículos más citados del cuarto cuartil	73
Tabla 20 Información Principal de los documentos del cuartil indefinido.....	78
Tabla 21 Los 10 Artículos más citados del cuartil indefinido.....	81
Tabla 22 Términos más relevantes a lo largo de los cuartiles	96
Tabla 23 Términos emergentes o en declive	96
Tabla 24 Clústeres de bigramas de los títulos de los 635 artículos	99
Tabla 25 Principales Clústeres identificados en Bibliometrix en base a los títulos y resúmenes de los 635 artículos.....	100

Índice / Sumario

Introducción.....	1
Capítulo I: El problema de la investigación	3
1.1. Planteamiento del problema.	3
1.2. Delimitación del problema	4
1.3. Formulación del problema.....	4
1.4. Preguntas de investigación	4
1.5. Determinación del tema	4
1.6. Objetivo general	4
1.7. Objetivos específicos	5
1.8. Declaración de las variables (operacionalización)	5
1.9. Justificación.....	6
1.10. Alcance y limitaciones	7
CAPÍTULO II: Marco teórico referencial.....	9
2.1. Antecedentes	9
2.2. Contenido teórico que fundamenta la investigación.....	12
2.2.1. Definición y Características de las Nanoburbujas.	12
2.2.2. Propiedades Físico-Químicas de las Nanoburbujas.....	13
2.2.3. Métodos de Generación de Nanoburbujas.	14
2.2.4. Técnicas de caracterización de nanoburbujas.....	18
2.2.5. Principios y Mecanismos de Acción en el Contexto Agrícola.	18
Interacción de las Nanoburbujas con el Suelo.....	18
Efecto de las Nanoburbujas en la Absorción de Nutrientes por las Plantas.	19
Impacto de las nanoburbujas en la fotosíntesis y la respiración de las Plantas.	19
2.2.6. Incremento del rendimiento en diferentes cultivos agrícolas con el uso de nanoburbujas.	20
Arroz.....	20
Tomate.....	21
Otras frutas y Hortalizas	21
Sostenibilidad y Nanoburbujas	22
2.2.7. Reducción de Contaminantes y Residuos.	22
2.2.8. Digestión anaerobia con nanoburbujas.....	23
2.2.9. Estudio Bibliométrico.	24
Bibliometría.	24
Tipo de Indicadores Bibliométricos.	24
2.2.10. Análisis del Mapeo científico.....	25
Recopilación y Análisis de Datos de Mapeo Científico.....	26

2.2.11. Método Prisma.....	31
CAPÍTULO III: Diseño metodológico.....	34
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	34
3.2. Recopilación de los Datos.....	34
3.2.1. Fuente de los Datos.....	34
3.2.2. Criterios de Búsqueda.....	34
3.2.3. Tipo de muestra.....	35
3.2.4. Tamaño de la muestra.....	35
3.2.5. Proceso final de selección de la muestra.....	35
3.3. Los métodos y las técnicas.....	36
3.4. Procesamiento estadístico de la información.....	36
CAPÍTULO IV: Análisis e interpretación de resultados.....	37
4.1. Análisis de los resultados.....	37
4.1.1. Primer Cuartil.....	37
4.1.2. Segundo Cuartil.....	51
4.1.3. Tercer Cuartil.....	61
4.1.4. Cuarto Cuartil.....	70
4.1.5. Cuartil indefinido.....	77
4.2. Interpretación de los resultados.....	86
4.2.1. Producción Científica Anual.....	86
Comparación de la producción científica anual.....	86
Discusión de los resultados en cuanto a la producción científica anual.....	91
4.2.2. Características de las producción científica analizada.....	93
4.2.3. Artículos más Influyentes por cuartil.....	93
4.2.4. Autores más relevantes.....	95
4.2.5. Nubes de Palabras.....	95
4.2.6. Mapas temáticos.....	96
Términos más relevantes a lo largo de los cuartiles.....	96
Términos emergentes o en declive.....	96
Discusión de los temas.....	97
4.2.7. Colaboraciones Internacionales.....	98
4.2.8. Tendencias de Investigación.....	99
1) Tendencia 1: Nanoburbujas de oxígeno y dióxido de carbono en la Optimización Agrícola.....	109
2) Tendencia 2: El Impacto de las nanoburbujas en el agua, la calidad nutricional y la resistencia a enfermedades en cultivos.....	109
Tendencia 3: La digestión anaerobia y la eficiencia del uso sostenible de los recursos en la agricultura.....	110
CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones.....	112
5.1. Conclusiones.....	112

5.2. Recomendaciones futuras	113
Bibliografía	115
Anexos	148

Introducción

La investigación sobre nanoburbujas, incluyendo sus métodos de generación, estudios básicos y aplicaciones, está en continuo crecimiento, ya que estas en si poseen diversas aplicaciones innovadoras en campos como el tratamiento de agua, la agricultura y la biomedicina, esto debido a sus propiedades únicas como su tamaño pequeño, su alta superficie y su la larga vida útil. (Takahashi, 2009).

En medicina, se utilizan en imagen médica y entrega de fármacos debido a su excelente capacidad de contraste y transporte de materiales, en la industria, aumentan la capacidad de oxidación de soluciones y reaccionan con contaminantes, por lo que se aplican ampliamente en tratamiento de aguas residuales, la purificación de aguas subterráneas y la remediación del suelo, en el campo de la agricultura, promueven el crecimiento de plantas al mejorar la permeabilidad del agua, además de la absorción de nutrientes por lo que aumentan los rendimientos de los cultivos y reducen el uso de productos químicos. (Y. Wang & Wang, 2023).

El presente trabajo examina las tendencias en el uso de nanoburbujas en la agricultura, destacando su impacto en la productividad, calidad y sostenibilidad de los cultivos, con el uso de técnicas bibliométricas abarcando un total de 645 artículos científicos de la base de datos SCOPUS, con el fin de analizar el desarrollo tecnológico y metodológico en este campo emergente, explorando las aplicaciones de las nanoburbujas en diversos aspectos agrícolas, como son su influencia en el rendimiento de los cultivos, la mejora de la calidad nutricional y la resistencia a enfermedades, así como su contribución a la eficiencia en el uso de recursos en la agricultura.

Este estudio es pionero en la realización de un mapeo científico de las nanoburbujas en el contexto agrícola, proporcionando una visión integral de este tema mediante la exploración de su evolución a lo largo del tiempo, para esto se emplearon técnicas de análisis de redes y herramientas como R Studio y Bibliometrix, que facilitaron la visualización de las tendencias y el comportamiento de la producción científica en este campo. Este documento

se organiza en cuatro capítulos, que comienzan con esta introducción. Seguidos por la problemática a analizar, un marco teórico referencial del tema, continuando con la metodología del trabajo, para llegar a la sección de análisis e interpretación de resultados, donde se hará uso de la estadística y de distintos análisis bibliométricos que abarcaran documentos, autores, revistas y países relevantes en el campo de las nanoburbujas agrícolas.

Presentando por ultimo las redes resultantes de los análisis de cocitación, coocurrencia y tendencias, las conclusiones derivadas del estudio, junto con las limitaciones encontradas y las recomendaciones para investigaciones futuras en este campo en desarrollo.

Capítulo I: El problema de la investigación

1.1. Planteamiento del problema.

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) en su último informe nos previene en cuanto a la crisis alimentaria y como esta se ha intensificado llegando a afectar a más de 258 millones de personas en 58 países desde el año 2022. Se prevé que esta situación empeore gradualmente en los próximos años, debido a diversos factores como la pandemia, la crisis económica, los conflictos bélicos y el cambio climático. (Muñoz & Medina, 2024)

La adopción de prácticas como el monocultivo, la producción de alimentos transgénicos y el uso de plaguicidas, aunque ha potenciado la industria alimentaria, ha llevado al deterioro de la calidad nutricional de los cultivos y ha acelerado el cambio climático. (Coss et al., 2017)

Según (French, Montiel y Palmieri, 2014), la mejora de los cultivos y de los procesos agrícolas es crucial para alcanzar la sostenibilidad y rentabilidad, debido a desafíos como el crecimiento poblacional, la contaminación ambiental, el agotamiento del suelo, y el riesgo de escasez de recursos hídricos y energéticos.

La necesidad de mejorar la productividad y la calidad de los cultivos se ha intensificado debido al aumento de la población mundial y las limitaciones en la disponibilidad de tierras cultivables. Los métodos tradicionales de cultivo enfrentan problemas como la degradación del suelo, el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas, y la escasez de recursos hídricos, que afectan negativamente la sostenibilidad y la calidad de la producción agrícola. (Gómez Ulloa et al., 2021)

Las nanoburbujas tienen el potencial de beneficiar la agricultura al mejorar la absorción de nutrientes, aumentar la eficiencia en el uso de los mismos, estimular la producción de hormonas de crecimiento y posiblemente reducir el uso de fertilizantes químicos, pudiendo también mejorar la calidad del agua y del suelo, reducir el estrés hídrico

en las plantas y ayudar en la remediación de suelos contaminados. (Y. Wang et al., 2021b)

Sin embargo, se necesita más investigación para comprender completamente sus efectos y optimizar su aplicación en diferentes cultivos y condiciones agrícolas, se carece en si de un análisis exhaustivo sobre los autores, investigaciones, revistas, instituciones y países más influyentes en este campo, así como de una estructura de conocimiento que permita identificar las tendencias y direcciones de investigación en este ámbito emergente. Llenando este vacío de conocimiento y proporcionando una comprensión más completa y fundamentada sobre el uso de nanoburbujas en la agricultura, se logrará maximizar su potencial para abordar los desafíos agrícolas actuales y futuros.

1.2. Delimitación del problema

Este estudio tiene como objetivo mapear la estructura conceptual y la evolución de la literatura científica reciente publicada sobre nanoburbujas en la agricultura para identificar las áreas de interés y las posibles direcciones para futuras investigaciones.

1.3. Formulación del problema

¿Cuál es el impacto de las nanoburbujas en la productividad y calidad de los cultivos, según la evidencia científica disponible en la literatura?

1.4. Preguntas de investigación

- ¿Cómo influyen las nanoburbujas en la productividad agrícola?
- ¿Qué efecto tienen las nanoburbujas en la calidad nutricional y la resistencia a enfermedades de los cultivos?
- ¿Cuál es la eficacia de las nanoburbujas en el uso sostenible de los recursos en la agricultura?

1.5. Determinación del tema

Aplicaciones de las nanoburbujas en la productividad, calidad y sostenibilidad agrícola: un estudio bibliométrico.

1.6. Objetivo general

Determinar los factores de estudio que utilizan las nanoburbujas como alternativas

innovadoras en la productividad, calidad y sostenibilidad agrícola.

1.7. Objetivos específicos

- Investigar el impacto de las nanoburbujas en la productividad agrícola.
- Determinar las tendencias de impacto de las nanoburbujas en la calidad nutricional y la resistencia a enfermedades en cultivos.
- Determinar cómo las nanoburbujas influyen en la eficiencia del uso sostenible de los recursos en la agricultura.

1.8. Declaración de las variables (operacionalización)

A continuación, se mostraran las hipótesis y variables con las que se trabajó esta investigación:

Tabla 1

Declaración de las variables

Objetivo General	Hipótesis	Variable Independiente	Variable Dependiente
Determinar Los Factores De Estudio Que Utilizan Las Nanoburbujas Como Alternativas Innovadoras En La Productividad, Calidad Y Sostenibilidad Agrícola.	El uso de la bibliometría permitirá determinar los factores de estudio de la aplicación de las nanoburbujas en la productividad y calidad agrícola.	Técnicas de bibliometría (Método PRISMA).	Técnicas de bibliometría.
Objetivo Especifico	Hipótesis	Variable Independiente	Variable Dependiente
Investigar el impacto de las nanoburbujas en la productividad agrícola.	El análisis bibliométrico permitirá identificar las tendencias de impacto en la productividad agrícola.	Técnicas de análisis en bibliometría.	Productividad en la agricultura.
Determinar las tendencias de impacto de las nanoburbujas en la calidad nutricional y la resistencia a enfermedades en cultivos.	El análisis bibliométrico permitirá determinar los factores de estudio en la calidad nutricional y la resistencia a enfermedades en los cultivos.	Técnicas de análisis en bibliometría.	Calidad nutricional y resistencia a enfermedades en cultivos.
Determinar cómo las nanoburbujas influyen en la eficiencia del uso sostenible de los recursos en la agricultura.	El análisis bibliométrico permitirá explorar los determinantes de eficiencia en el uso sostenible de los recursos en la agricultura.	Técnicas de análisis en bibliometría.	Uso eficiente y sostenible de recursos en la agricultura.

A partir de las variables mostramos a continuación sus dimensiones e indicadores:

Tabla 2

Operacionalización de las variables

Variables	Dimensiones	Indicadores
Técnicas de bibliometría.	Determinación de factores mediante bibliometría.	Uso de técnicas PRISMA en bibliometría.
Productividad en la agricultura.	Impacto de nanoburbujas en la productividad agrícola.	Tendencias y resultados en productividad agrícola.
Calidad nutricional y resistencia a enfermedades en cultivos.	Impacto de nanoburbujas en calidad nutricional y resistencia a enfermedades.	Tendencias y resultados en calidad nutricional y resistencia a enfermedades.
Uso sostenible de recursos en la agricultura.	Influencia de nanoburbujas en la eficiencia del uso sostenible de recursos agrícolas.	Tendencias y resultados en uso sostenible de recursos agrícolas.

Autor: Jocelyne L.,2024.

1.9. Justificación

La editorial académica MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) de acceso abierto, la cual publica una amplia gama de revistas científicas en diversos campos del conocimiento, alienta a investigadores interesados en contribuir con artículos para el número especial de esta llamado Nanoburbujas y sus aplicaciones, siendo que se recalca el creciente interés y la importancia potencial de las nanoburbujas en múltiples campos, por lo a su vez es fundamental que exista una comprensión clara y actualizada de su investigación y aplicaciones. (Zhang, L., et al., 2024)

En el contexto del tema de investigación sobre las nanoburbujas y sus aplicaciones, es fundamental mantenerse al día con los avances más recientes en el campo, dado que este tema está en constante evolución y descubrimiento de nuevos conocimientos y aplicaciones de manera regular, es crucial para los investigadores y profesionales interesados estar al tanto de los desarrollos más recientes.

Y esto se logra con el uso de la bibliometría como herramienta de apoyo en la ciencia,

implicando un análisis cuantitativo de la producción literaria y haciendo uso de indicadores bibliométricos para comprender la naturaleza y la evolución de esta disciplina específica. Siendo que esta práctica no solo promueve la difusión del conocimiento, sino que también impulsa su desarrollo al proporcionar información valiosa sobre las publicaciones científicas, los estudios bibliométricos, por lo mismo, permiten no solo explorar un tema en profundidad, sino también evaluar internamente el proceso científico, lo que podría inspirar a su vez incluso nuevas líneas de investigación, partiendo de la reflexión sobre la producción científica y sus tendencias. (Angarita Becerra, 2014)

Al observar además un aumento exponencial en la publicación sobre el tema de la aplicación de las nanoburbujas en los últimos años, se plantea este estudio bibliométrico cuyo objetivo es proporcionar una visión general exhaustiva del estado actual del conocimiento, identificar brechas de investigación, evaluar la efectividad y el potencial de las nanoburbujas, y ofrecer recomendaciones para su aplicación práctica futura.

1.10. Alcance y limitaciones

El alcance de esta investigación se establece mediante un criterio de búsqueda específico en la base de datos de Scopus, que arroja un total de 635 publicaciones relacionadas. Este criterio se limita a las publicaciones cuyos títulos, resúmenes o palabras clave contienen los términos "nanoburbuja" o "nanoburbujas", y están vinculadas a las áreas temáticas de medio ambiente, agricultura y ciencias de la tierra. Esta selección rigurosa garantiza que las publicaciones incluidas en el análisis estén directamente relacionadas con el tema de interés y proporcionen información relevante y actualizada sobre las aplicaciones de las nanoburbujas en estos campos específicos.

Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones inherentes a este enfoque de búsqueda. Aunque se ha realizado un esfuerzo para seleccionar publicaciones relevantes utilizando criterios específicos, es posible que algunas investigaciones relevantes no hayan sido capturadas por el criterio de búsqueda utilizado. Además, el análisis se basa en la disponibilidad y la calidad de los datos en la base de datos de Scopus, lo que puede influir en

la representatividad y exhaustividad de los resultados. Por lo tanto, es crucial interpretar los hallazgos de esta investigación dentro de este contexto y considerar posibles sesgos o limitaciones en la cobertura de la literatura científica sobre el tema de las nanoburbujas en los campos del medio ambiente, la agricultura y las ciencias de la tierra.

CAPÍTULO II: Marco teórico referencial

2.1. Antecedentes

Zheng, T. et al., (2016) llevaron a cabo un análisis bibliométrico de la investigación relacionada con micro/nano-burbujas desde 1991 hasta 2014, usando la base de datos Science Citation Index EXPANDED y el Informe de Citas de Revistas (JCR) de Thomson Reuters del año 2014, aplicando una frase de búsqueda temática específica. Este estudio incluyó el análisis de diversos parámetros como tipo de documento, idioma, país, instituto, entre otros, utilizando Microsoft Excel 2010 y BibExcel 1.0.0.0, para la generación de diagramas de red se utilizó también Pajek 1.0.0.1, además, se calculó a través de la plataforma InCites el cuartil del JIF con mayor precisión. Los resultados de esta investigación mostraron que Estados Unidos fue el país más productivo y colaborativo internacionalmente, con un alto índice h de 111. Este estudio aplicó con éxito el "análisis de clúster de palabras" para rastrear los puntos calientes de la investigación, destacando innovaciones en métodos de detección y aplicaciones médicas mediante micro/nano-burbujas.

Movahed, S. M. A. & Sarmah, (2021) realizaron un análisis cientométrico sobre las tendencias globales y características de la investigación en microburbujas y nanoburbujas en ingeniería ambiental, para esto adoptaron un enfoque de tres niveles que implicaba el análisis bibliométrico, análisis de redes sociales (SNA) y el análisis de datos, para la extracción de datos usaron la colección principal de Web of Science y para los análisis preliminares usaron Microsoft Excel 2020, se logró visualizar conexiones entre países, autores y palabras clave con la aplicación de técnicas de SNA. La búsqueda se limitó al periodo 2000-2020, y utilizaron VOSviewer para construir mapas bibliométricos los cuales revelaron un notable crecimiento en las publicaciones relacionadas con estas tecnologías. Los resultados de este estudio muestran que las microburbujas se utilizaban principalmente en el tratamiento de agua y aguas residuales, mientras que las nanoburbujas aún estaban en una fase incipiente de investigación, centrándose en comprender su naturaleza y estabilidad.

Mendes, J. et al., (2022) realizaron un estudio bibliométrico sobre startups agrícolas

(AgTechs), utilizando las bases de datos Web of Science y Scopus con el uso a su vez de cadenas de búsqueda temáticas, para el análisis de datos utilizaron los softwares SciMAT que permitió realizar el análisis de redes, y VOSviewer que se utilizó para construir y visualizar redes bibliométricas, con parámetros específicos para su análisis, como el periodo de estudio y los criterios de inclusión y exclusión. Los resultados de este estudio mostraron que el tema está en crecimiento exponencial, con un 71.3% de los artículos publicados en los últimos tres años, también se logró identificar importantes contribuciones de AgTechs en el escenario de la agricultura, destacando finalmente la necesidad de investigar más sobre factores humanos, modelos de negocio y aspectos de gestión en este campo.

Zhou, S. et al., (2022) abordaron el potencial no explotado de la tecnología de microburbujas (MB) y nanoburbujas (NB) en el tratamiento del agua y aguas residuales y la restauración ecológica, para esto realizaron un revisión sistemática de los fundamentos de las MB y NB, incluyendo su tamaño y concentración, propiedades fisicoquímicas y métodos de generación, además de centrarse en los avances más recientes en las aplicaciones de MB y NB, identificando los desafíos de implementación y proponiendo direcciones de investigación futura para una comprensión más amplia de esta tecnología.

Jia, M. et al., (2023) realizaron una revisión integral sobre la aplicación de las nanoburbujas en sistemas de tratamiento del agua y aguas residuales, para esto abordaron los avances en la tecnología de NB más allá del laboratorio, identificando más de 20 estudios piloto y a escala completa, y discutiendo las controversias y perspectivas futuras de esta tecnología, se analizaron además las propiedades fundamentales de las NB, los avances recientes en su aplicación en diversos procesos de tratamiento, las consideraciones económicas preliminares, y las controversias existentes en la investigación sobre NB. Este estudio logro proporcionar así, una comprensión paso a paso de este tema y resaltar las lagunas de conocimiento que requieren investigación futura, para avanzar en el uso de las NB en la industria del tratamiento de aguas residuales.

Trujillo, J. & Limaymanta, (2023) realizaron un estudio bibliométrico sobre el desarrollo de la nanociencia y la nanotecnología en México, la metodología de este estudio incluyó la

búsqueda y recuperación de datos de la Web of Science con el uso de una ecuación de búsqueda específica, además se empleó el software Biblioshiny, con el fin de analizar diversos campos como autor, título del artículo, revista, palabras clave, entre otros. Los resultados de esta investigación muestran que partiendo del análisis de 15,876 artículos de investigación publicados entre 1975 y 2021, existe un promedio de 17.61 citas por artículo, revelan también que más del 98% de los artículos están escritos en inglés, con un promedio de 5.66 autores por documento, los autores finalmente concluyen, que el análisis realizado subraya la importancia del desarrollo de la nanociencia y la nanotecnología para el avance científico y tecnológico de México.

Robinson, H. & Vélez, M., (2023) realizaron un análisis bibliométrico sobre el uso del caolín en el control de plagas agrícolas, con el uso de la base de datos de Scopus y del paquete 'bibliometrix' en R, logran examinar la tendencia de la producción científica, la procedencia geográfica de los autores, la frecuencia de las palabras clave, las redes de colaboración, los documentos más citados y las revistas de mayor impacto. Los hallazgos de este estudio indican un creciente volumen de investigaciones y una amplia cooperación internacional, con Estados Unidos, Italia y España a la vanguardia, confirmando además la eficacia del caolín en una amplia gama de cultivos y contra múltiples plagas, subrayando su potencial para fortalecer la resiliencia de la agricultura global y promover la sostenibilidad ambiental.

Farrera, I. et al., (2023) proporcionan un panorama de la innovación agrícola a través de un diagnóstico evolutivo de las últimas dos décadas, a través del análisis de 462 documentos de las bases de datos Scopus y Scielo mediante técnicas bibliométricas con el software VOSviewer, los resultados muestran un claro dominio del tema en Europa y América del Norte, con poca evidencia de participación de países latinoamericanos. Este estudio logró identificar tres líneas de investigación que confirman que los trabajos sobre innovación agrícola han tenido un desarrollo creciente y continuarán siendo un tema de interés en los próximos años, destacando una oportunidad para los investigadores de América Latina.

Yujia, Z. et al., (2023) realizaron una revisión sistemática sobre el progreso y la

tendencia de desarrollo de las nanoburbujas de oxígeno en la agricultura, resumiendo los métodos de preparación y las propiedades de las nanoburbujas de oxígeno, así como sus aplicaciones en la producción agrícola y la gestión ambiental, incluyendo además en cuanto a sus aplicaciones la promoción de la germinación de semillas, el crecimiento de cultivos, la mejora de la producción acuícola, la reducción de emisiones de metano en campos de arroz, y la eliminación de contaminantes metálicos y orgánicos del suelo, este estudio concluye con sugerencias de investigación futura para profundizar en los mecanismos de acción de las nanoburbujas de oxígeno y expandir su aplicabilidad en la agricultura.

Morgado, M. et al., (2024) evaluaron la evolución histórica de la investigación sobre nanomateriales aplicados a la industria de fertilizantes mediante un estudio bibliométrico. La metodología de este estudio incluyó el uso de las bases de datos Web of Science y Scopus, y de herramientas como RStudio y Biblioshiny, con el fin de identificar tendencias y autores relevantes en este campo, además se utilizó la ecuación Index Ordinario para clasificar los artículos según su impacto, número de citas y año de publicación. Los resultados de este estudio muestran que, partiendo de la revisión de las publicaciones de los últimos trece años, se logró identificar una expansión de la nanotecnología en el campo agrícola y la necesidad de estudios que aclaren las relaciones entre fertilizantes y fisiología vegetal, destacando a su vez el potencial de los nanomateriales para resolver los obstáculos enfrentados por los fertilizantes tradicionales.

2.2. Contenido teórico que fundamenta la investigación.

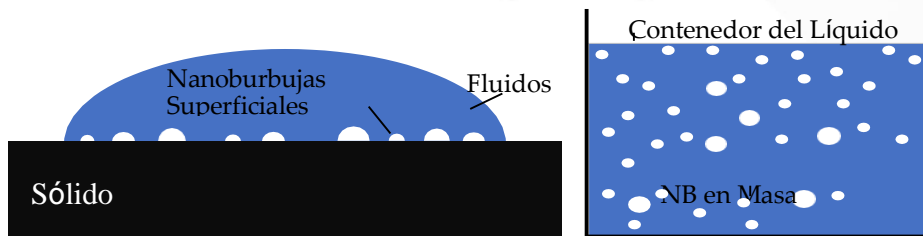
2.2.1. Definición y Características de las Nanoburbujas.

A diferencia de las burbujas más grandes, las nanoburbujas (NB) poseen una estabilidad extremadamente elevada y forman un sistema coloidal único, existiendo durante varios días e incluso permaneciendo estables por más de un mes. Las NB se dividen en dos tipos: superficiales y en masa, como se ilustra en la Figura 1, siendo que las NB superficiales son aquellas burbujas a escala nanométrica adheridas a superficies sólidas en interfaces sólido-líquido, con típicas formas de cúpula, las cuales poseen además un radio de la línea de contacto que varía entre 50 y 500 nm, con alturas que van de 10 a 100 nm. Por otro lado,

tenemos las NB en masa, siendo estas esféricas y encontrándose en agua u otros líquidos, con diámetros inferiores a 1000 nm. (Wang & Wang, 2023).

Figura 1

NB superficiales y en masa.



Fuente: (Wang & Wang, 2023)

2.2.2. Propiedades Físico-Químicas de las Nanoburbujas.

Las NB tienen aplicaciones en diversos campos debido a sus propiedades singulares, siendo estas su estabilidad prolongada, su potencial zeta negativo, su capacidad para generar radicales libres, su acción limpiadora, su atracción superficial y habilidad para oxidar y eliminar contaminantes. (Patel et al., 2021)

Debido además a su alta eficiencia en la transferencia de masa y a su capacidad para aumentar la presión interna y el área de contacto entre un líquido y un gas, estas burbujas conducen a reacciones químicas eficientes, que a su vez facilitan la disolución y transferencia de oxígeno, nitrógeno, ozono o dióxido de carbono en entornos líquidos, lo cual es crucial para su aplicación en agricultura y protección del ambiente. (Le & Sritontip, 2021)

2.2.3. Métodos de Generación de Nanoburbujas.

En cuanto a la generación de NB en masa tenemos los siguientes métodos con sus ventajas y desventajas:

Tabla 3

Métodos de generación de nanoburbujas en masa.

Método	Descripción/ Propiedades	Propiedades de las NB generadas	Ventajas	Desventajas	Fuente
Agitación Mecánica	Consiste en la preparación de NB en masa mediante la agitación rotacional iterativa de una fase líquida con surfactantes.	NB en masa estables por más de 60 días y con diámetros de menos de 200 nm. Consistencia en el diámetro medio y el potencial zeta de las NB.	Principio simple y fácil.	Prepara solo pocas NB.	Jadhav et al., 2021.
Membrana con porosidad a Nanoescala	Consiste en la inyección de gas en los poros a nanoescala de una membrana bajo presión.	Tamaño de NB en masa controlado por el tamaño del poro de membrana.	Controla el tamaño de las burbujas.	Necesita membranas especializadas con poros de tamaño preciso. La obstrucción o suciedad en los poros afecta negativamente la eficiencia.	Ulatowski & Sobieszuk, 2018.
Microfluídico	Consiste en la utilización de chips microfluídicos para regular el flujo de gas y líquido, resultando en la formación de NB bajo fuerzas viscosas en la fase líquida.	Control preciso del tamaño y uniformidad de las NB en masa.	Control preciso del tamaño y distribución de las NB. Alto grado de automatización e integración con otros procesos.	Requiere equipos y técnicas complejas.	Y. Fan et al., 2018.

Cavitación Acústica	Consiste en inducir presión negativa local en el líquido mediante alta velocidad de rotación de una hélice o medio ciclo de presión negativa generado mediante ondas sonoras de alta intensidad, lo cual resulta en la formación de NB.	Estabilización en agua mediante adsorción de iones hidroxilo.	Eficiencia y rapidez.	Necesita dispositivos y aparatos específicos junto con dispositivos de ultrasonido. La capacidad de regular el tamaño y la disposición de las NB podría verse restringida.	Xu et al., 2021.
Cavitación Hidrodinámica	Consiste en inducir la cavitación en un medio mediante la alteración de la velocidad del flujo del mismo, lo que provoca fluctuaciones de presión.	NB con diámetros menores a 200 nm o hasta 301 nm.	Alta eficiencia energética, bajo costo y escalabilidad.	La eficacia podría verse afectada por variables como la rapidez del flujo y la presión.	Zheng et al., 2022.
Liberación de Gas Disuelto	Consiste en aumentar la presión disponible para disolver el gas, antes de reducir la presión necesaria para hacer que las moléculas de gas disuelto precipiten y formen las NB.	El tamaño promedio de las NB está relacionado con la solubilidad del gas presente en la solución, y su diámetro es inversamente proporcional a la solubilidad del gas.	Fácil y sencillo de implementar.	Control limitado sobre el tamaño y distribución de las burbujas. Puede resultar en tamaños más grandes.	B. Wang et al., 2021.
Variación Periódica de Presión	Consiste en controlar la disolución y precipitación del gas mediante ajustes periódicos de presión a una solución saturada de este.	NB más pequeñas bajo tiempos más largos de exposición.	NB uniformes controladas por la presión.	Solo se puede obtener pocas NB.	Q. Wang et al., 2019.

Compresión de Aire Hidráulico	Consiste en la utilización de la compresión de aire hidráulico para la generación de nanoburbujas. Mediante este método se demuestra la posibilidad de producción de NB a gran escala.	Aumento de las concentraciones de NB. NB con potencial aplicación en entornos industriales y agrícolas.	Producción a gran escala a bajo costo y con alta eficiencia	Control limitado sobre el tamaño y distribución.	Yang et al., 2022.
-------------------------------	--	---	---	--	--------------------

Autor: Jocelyne L., 2024.

En cuanto a la generación de NB superficiales tenemos los siguientes métodos con sus ventajas y desventajas:

Tabla 4

Métodos de generación de nanoburbujas superficiales.

Método	Descripción/ Propiedades	Propiedades de las NB generadas	Ventajas	Desventajas	Fuente
Electrólisis en Solución Acuosa	Consiste en la producción de NB cuando la concentración de moléculas alcanza la concentración crítica requerida para la nucleación.	Obtención de NB de oxígeno.	Precisión en la generación de nanoburbujas.	Requiere equipo especializado de electrólisis.	S. Lee et al., 2005.
De Agua Fría	Consiste en la utilización de superficies de grafito calentadas y agua fría como materiales esenciales.	NB más densos y con una vida útil de más de cinco días.	Facilidad de implementación y acceso.	Control limitado sobre el tamaño y estabilidad de las NB.	An et al., 2016.
Intercambio de Solvente	Consiste en la sustitución de un líquido con alta solubilidad de gas por otro con baja solubilidad. Se realiza utilizando el método de sustitución etanol-agua o el de solución de cloruro de sodio-agua.	A mayor cantidad de gas disuelto en la solución, mayor número de NB.	Fácil implementación.	Control limitado sobre el tamaño y estabilidad de las NB.	J et al., 2017.

Depresurización	Consiste en alterar la solubilidad del gas controlando la presión ejercida sobre el líquido dentro del contenedor así cuando la presión se reduce y la solubilidad del gas disminuye se forman las NB.	NB generadas a partir de un corto periodo de presión.	Control y generación rápida de NB.	NB inestables.	Fang et al., 2018.
Irradiación por Microondas	Consiste en la irradiación de ondas electromagnéticas aumentando la probabilidad de que el gas escape de la interfaz, cuando la solubilidad del gas en el agua disminuye, se forman las NB.	Correlación directa entre la formación de NB y las tasas de dosis de irradiación crecientes.	Producción controlada de NB sin impurezas.	Requiere equipo de microondas especializado.	K. Yuan et al., 2022.

Autor: Jocelyne L., 2024.

2.2.4. Técnicas de caracterización de nanoburbujas.

A continuación, mencionamos las técnicas disponibles para la caracterización de nanoburbujas:

Tabla 5

Técnicas de caracterización de nanoburbujas.

Técnica	Descripción	Referencia
Microscopía electrónica de transmisión (TEM)	Utiliza un haz de electrones que atraviesa una muestra ultrafina, permitiendo obtener imágenes de alta resolución que revelan la morfología y el tamaño de las nanoburbujas.	Uchida et al., 2011.
Espectroscopia de dispersión dinámica de luz (DLS)	Mide las fluctuaciones en la intensidad de la luz dispersada por las nanoburbujas en suspensión, proporcionando información sobre su tamaño y distribución en función del movimiento Browniano.	Oh & Kim, 2017.
Microscopía de fuerza atómica (AFM)	Utiliza una sonda muy fina que recorre la superficie de la muestra para generar imágenes tridimensionales de alta resolución, permitiendo caracterizar la topografía y la distribución de las nanoburbujas en una superficie.	Walczyk & Schönherr, 2014.
Microscopía óptica de campo oscuro (DFM)	Utiliza luz dispersa en lugar de luz directa para observar nanoburbujas en suspensiones, mejorando el contraste y permitiendo la visualización de partículas pequeñas y transparentes.	Bhandari et al., 2017.
Resonancia magnética nuclear (RMN)	Proporciona información sobre la estructura y dinámica de las moléculas en el entorno de las nanoburbujas, permitiendo estudiar su composición y comportamiento en soluciones complejas.	Niwano et al., 2023.
Espectroscopia Raman	Utiliza la dispersión inelástica de la luz para obtener información sobre las vibraciones moleculares de las nanoburbujas, permitiendo la identificación de su composición química.	Jadhav & Barigou, 2020.
Microscopía de barrido electrónico (SEM)	Utiliza electrones para escanear la superficie de una muestra y produce imágenes detalladas de la topografía y composición de las nanoburbujas.	Takahara & Suzuki, 2021.
Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)	Mide las propiedades eléctricas de las nanoburbujas en soluciones, permitiendo estudiar su estabilidad y comportamiento electroquímico.	Song et al., 2014
Espectroscopia de absorción de rayos X (XAS)	Analiza la absorción de rayos X para obtener información sobre la estructura atómica y la composición de las nanoburbujas.	Nappini et al., 2017.

2.2.5. Principios y Mecanismos de Acción en el Contexto Agrícola.

Interacción de las Nanoburbujas con el Suelo.

Las NB interactúan con los microorganismos del suelo y les sirven de fuente de

energía y nutrición, lo que mejora su actividad y promueve el ciclo de nutrientes, a su vez también juegan un papel en la exudación de las raíces de las plantas, lo que aumenta la liberación de nutrientes al suelo y por lo tanto beneficia a las plantas y microorganismos del mismo. Las NB mejoran a su vez los procesos de mineralización del suelo, facilitando de esta manera la descomposición de la materia orgánica en nutrientes esenciales que pasan a estar fácilmente disponibles para que las plantas los absorban y se beneficien de ellos. (Yujia et al., 2023)

Efecto de las Nanoburbujas en la Absorción de Nutrientes por las Plantas.

Se ha probado que la inyección de NB aumenta los niveles totales de nitrógeno y fósforo en el suelo, contribuyendo a su fertilidad. (Y. Zhang et al., 2024). A su vez distintas NB logran aumentar los niveles de oxígeno en este, promoviendo condiciones aeróbicas favorables para la absorción de nutrientes y el crecimiento de las raíces, lo que conduce, a un mejor rendimiento de los cultivos y a conservar la salud de las plantas.(Yujia et al., 2023)

Este efecto de las NB en las plantas se debe también a su promoción en el aumento de las hormonas de crecimiento y los genes de absorción de nutrientes, lo que, combinado con sus propiedades hidrofóbicas y de carga superficial, mejoran la liberación y absorción de nutrientes del suelo, reduciendo así la demanda de fertilizantes en distintos cultivos. (Y. Wang et al., 2021b)

Impacto de las nanoburbujas en la fotosíntesis y la respiración de las Plantas.

Las nanoburbujas de oxígeno (ONB), desempeñan un papel crucial en la absorción de nutrientes, la fotosíntesis y la respiración en las plántulas de arroz, al administrar estas ONB, los radicales hidroxilo que se producen por los consiguientes procesos de oxidación contribuyen al aumento general del contenido total de clorofila favoreciendo a su vez la fotosíntesis de las plantas. (Huang, Nhung, Dodbiba, et al., 2023b)

Las nanoburbujas también fomentan un ambiente óptimo para la respiración de las raíces de las plantas como la del arroz, diversificando a su vez las comunidades microbianas del suelo e intensificando los procesos biológicos, como la transducción de señales de

hormonas vegetales. (Ho et al., 2023)

2.2.6. Incremento del rendimiento en diferentes cultivos agrícolas con el uso de nanoburbujas.

Arroz.

El tratamiento con nanoburbujas estimula la síntesis de la hormona de crecimiento en las plantas de arroz, regulando además los genes de absorción de nutrientes de la planta por lo que existe un aumento en la absorción y utilización de nutrientes por las raíces de la misma. (Y. Wang et al., 2021b). También tenemos que las NB mitigan la transferencia de arsénico del suelo a las plantas de arroz, por lo que permiten un aumento de biomasa en sus raíces y brotes. (Z. Sha et al., 2020b)

Las NB también sirven para aliviar el estrés oxidativo inducido por el cadmio, ya que logran incrementar las actividades enzimáticas antioxidantes, y con eso aumentar a su vez la biomasa del arroz mejorando el proceso de la fotosíntesis también. (Huang, Nhung, Wu, et al., 2023)

Otros estudios nos indican que suministrar oxígeno en forma de NB a suelos de arroz continuamente inundados disminuye el desarrollo de condiciones reductoras, por lo que reduce a su vez la emisión de metano, un potente gas de efecto invernadero. (Minamikawa et al., 2015b)

Las NB de hidrógeno molecular prueban aumentar la calidad del campo y del grano de arroz, incrementando su longitud, anchura y grosor, así como el peso de 1000 granos del mismo. (Cheng et al., 2021)

En cuanto a la mejora de la calidad del almacenamiento del arroz, las NB logran que el arroz irrigado tenga niveles más bajos de ácidos grasos libres, y aumente a su vez su capacidad antioxidante. (Cai et al., 2022b)

En combinación con nitrógeno las NB prueban ser un medio eficaz para reducir el consumo no beneficioso de este, logrando un mayor rendimiento del cultivo y una mayor eficiencia en la utilización de nitrógeno. (Sang et al., 2018)

Las Nb también han sido probadas en varios tipos de arroz, mostrando mejorar el rendimiento del arroz de linaje y el súper arroz. (Yinfei et al., 2021)

Tomate.

El riego de agua combinada con NB de hidrógeno ha probado aumentar los antioxidantes naturales en los frutos de tomate. (J. He et al., 2024)

Se descubrió además que las nanoburbujas de oxígeno aumentan la germinación de las semillas en un 10 % y el crecimiento de las plantas de tomate en un 30 % a 50 %. (Xue et al., 2023)

También se estudió como la irrigación NB con diferentes concentraciones de oxígeno disuelto afecta significativamente el microambiente del suelo en la zona de las raíces del tomate, resultando en diferencias en la composición y las funciones metabólicas de las comunidades bacterianas, lo que a su vez permite un aumento en el rendimiento del tomate. (J. Wang et al., 2024a)

Otros ensayos de campo en tomate Cherry nos muestran que existe un aumento del consumo de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) disponible en el suelo y una mejora en la calidad del fruto con una menor huella de carbono, cuando este es tratado con NB de hidrógeno. (M. Li et al., 2024)

Otras frutas y Hortalizas

La aplicación de NB con selenio reduce la acumulación de Se en el suelo y permite un aumento del mismo en cultivos de pepino. (Y. Zhou et al., 2022)

También tenemos que se logra un aumento en la firmeza de la fresa con el riego de NB de hidrógeno, esta firmeza se mantiene al momento de la cosecha y durante el período de almacenamiento, logrando con la aplicación de NB retardar la descomposición de las fresas cosechadas. (Jin et al., 2023)

En cuanto a NB de oxígeno y ozono se tiene que, en plantas de lechuga cultivadas en sustrato, se verifica un aumento de la cantidad de oxígeno disuelto, de su rendimiento y se eleva además la tasa de fotosíntesis, la conductancia de hidrogeno y la concentración de

dióxido de carbono intercelular. (Q. Zhao et al., 2024)

Sostenibilidad y Nanoburbujas

Las nanoburbujas han demostrado mejorar el crecimiento de diversas plantas y la germinación de las semillas, reduciendo potencialmente el consumo tanto de agua como de fertilizantes y químicos asociados a la agricultura convencional, entre esos tenemos el arsénico y cadmio. Además, estas NB reducen la liberación de metano al ambiente, combatiendo de esta manera el calentamiento global. Con estos antecedentes, es que se comienza a utilizarlas en otras aplicaciones como son la fitorremediación, la remoción de contaminantes en suelos, e incluso en la producción a través de digestión anaerobia de metano como combustible.

2.2.7. Reducción de Contaminantes y Residuos.

Las NB por su alta carga superficial y gran área específica, pueden adherirse eficientemente a los contaminantes en el agua, tales contaminantes pueden migrar hacia la superficie del agua debido a efectos de flotación o filtración con el uso de las NB. Debido a su alta tasa de transferencia de masa gas-líquido las NB también promueven la degradación de contaminantes por microorganismos aeróbicos y la generación de radicales hidroxilo con su fuerte capacidad oxidante, por lo que son utilizadas con éxito en el tratamiento de aguas residuales industriales y en la remediación in situ de aguas subterráneas contaminadas, con altas tasas de eliminación de diversos contaminantes. (Sakr et al., 2022) (Ye et al., 2019)

Siendo así que las NB logran una tasa de eliminación del 89% de la demanda química de oxígeno (DQO) en aguas residuales de tintura, en otro estudio se demuestra una tasa de eliminación del 64% de amoníaco en aguas residuales de coque, en otro caso también tenemos que las NB eliminan más del 95% de benceno y clorobenceno, así como el 67% de nitrobenceno en aguas subterráneas contaminadas, por último en estudios sobre la aplicación de NB en la remediación de sitios contaminados a escala de columna y campo, se tiene altas tasas de eliminación de contaminantes como tricloroetileno (TCE), metil-t-butil éter (MTBE) y diésel. (S. Liu et al., 2012) (S. Liu et al., 2010) (Xia & Hu, 2019) (Ye et al., 2019).

Las NB se presentan como una posible estrategia para la remediación de la anoxia o hipoxia y el control de las emisiones de metano en aguas con floraciones algales, lo que en última instancia combate el calentamiento global. (Shi et al., 2018).

También se tiene que las NB se pueden usar en combinación con lechos flotantes de resina sumergida para mejorar las propiedades fisicoquímicas de los ríos negros y malolientes, siendo que a través del enriquecimiento de oxígeno y la adsorción de este lecho, estimulan a los microorganismos funcionales a degradar los contaminantes presentes. (Y. Sun et al., 2018). En el mismo contexto las NB de ozono son una tecnología innovadora para la remediación in situ de aguas subterráneas contaminadas con compuestos orgánicos. (Hu & Xia, 2018).

Sin embargo, se señalan algunas limitaciones en el uso de NB para estos tratamientos, como su mayor costo en comparación con métodos tradicionales, el riesgo potencial de aumentar la toxicidad y movilidad de los metales pesados en el agua, y la dificultad en la generación de burbujas a escala nanométrica. (Ye et al., 2019).

2.2.8. Digestión anaerobia con nanoburbujas.

La aplicación de nanoburbujas representa una prometedora herramienta para mejorar la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica al abordar los pasos críticos de hidrólisis y metanogénesis, y al mismo tiempo garantizar la estabilidad operativa mediante la reducción de los niveles de sulfuro y ácidos grasos volátiles. (Y. Fan et al., 2020)

En si las NB facilitan el acceso y la digestión del sustrato, así como la actividad enzimática debido a su reducido tamaño, alta capacidad de interacción electrostática y capacidad para generar especies reactivas de oxígeno, siendo que las NB de oxígeno pueden establecer un entorno microaeróbico que mejora la eficiencia del sistema de transporte de electrones, lo que resulta en una disminución de los ácidos grasos volátiles gracias a una mayor actividad bacteriana facultativa. Además, las NB de hidrogeno y dióxido de carbono potencian la metanogénesis hidrogenotrófica, por lo mismo, varios estudios han explorado la aplicación de la tecnología de NB en el proceso de digestión anaerobia. (Chuenchart et al.,

2021)

2.2.9. Estudio Bibliométrico.

Bibliometría.

La Bibliometría es un ciencia que analiza cualitativamente la producción científica, estudiando su naturaleza y su curso como disciplina, con la aplicación de métodos matemáticos y estadísticos. (Camps, 2007)

Esta ciencia hace uso de leyes bibliométricas que se basan a su vez, en el comportamiento estadístico regular que a lo largo del tiempo han mostrado los diferentes elementos que forman parte de la Ciencia, tales instrumentos son llamados indicadores bibliométricos aquellas medidas que nos proporcionaran información sobre los resultados de la actividad científica en cualquiera de sus manifestaciones. (Escorcia Otálora, 2008)

Los principales indicadores bibliométricos, aquellos que con más frecuencia se utilizan, son los siguientes (Solano López et al., 2009):

- Productividad de las publicaciones, los autores y de las instituciones editoras y lugares de edición.
- Análisis de la producción por su temática, citas e índices de impacto.

Otros elementos de análisis en la investigación bibliométrica serian: las palabras clave o descriptores, los títulos y resúmenes. (Becerra, 2014)

Tipo de Indicadores Bibliométricos.

A continuación, se muestra los tipos de indicadores bibliométricos existentes junto a sus características y descripción:

Tabla 6

Tipos de Indicadores Bibliométricos.

Tipo de Indicador	Descripción	Características
Personales.	A estos se le atribuyen una serie de rasgos cualitativos relacionados directamente con el autor del estudio.	Edad de los Investigadores. Sexo de los Investigadores. Antecedentes personales.
De productividad.	Son de carácter cuantitativo, debido a que aportan información	Índice de productividad personal, colaboración, de multiautoría, de

	sobre la cantidad de trabajos realizados.	institucionalidad y de transitoriedad.
De citación.	Se basan en el análisis de las referencias e informan de la obsolescencia de un documento publicado.	Índice de antigüedad/obsolescencia. Factor de impacto de las revistas. Índice de inmediatez. Índice de actualidad temática. Índice de aislamiento. Índice de autocitación Coeficiente general de citación.
De contenido.	Es el estudio de los temas triviales por cualquier área científica y a partir de ello suscita el gran interés por descubrir la evolución de las corrientes investigadoras a lo largo del tiempo.	Temáticos o textuales. Descriptores.
Metodológicos.	Aporta información sobre los cambios que se han producido en la forma de realizar (modus operandi) de la propia investigación (el método, las técnicas y los procedimientos).	Paradigma adoptado. Teoría desde o para la que se trabaja. Diseños específicos utilizados. Riesgos muestrales. Técnicas de análisis.

Fuente: Adaptado de (Escorcia Otálora, 2008).

2.2.10. Análisis del Mapeo científico.

El flujo de trabajo estándar para un mapeo científico comprende 5 etapas:

Tabla 7

Etapas del flujo de trabajo para un mapeo científico.

Etapa	Nombre	Descripción
1	Diseño del estudio	Definir las preguntas de investigación y seleccionar los métodos bibliométricos apropiados para responder a esas preguntas.
2	Recopilación de datos	Seleccionar la base de datos, filtrar el conjunto de documentos y exportar los datos, posiblemente construyendo una base de datos propia.
3	Análisis de datos	Utilizar herramientas de software bibliométrico o estadístico para analizar los datos, que pueden incluir escribir código propio.
4	Visualización de datos	Decidir el método de visualización y utilizar el software de mapeo apropiado para representar los resultados del análisis.
5	Interpretación	Interpretar y describir los hallazgos, reconociendo que los métodos bibliométricos complementan, pero no reemplazan la

lectura en profundidad en el campo.

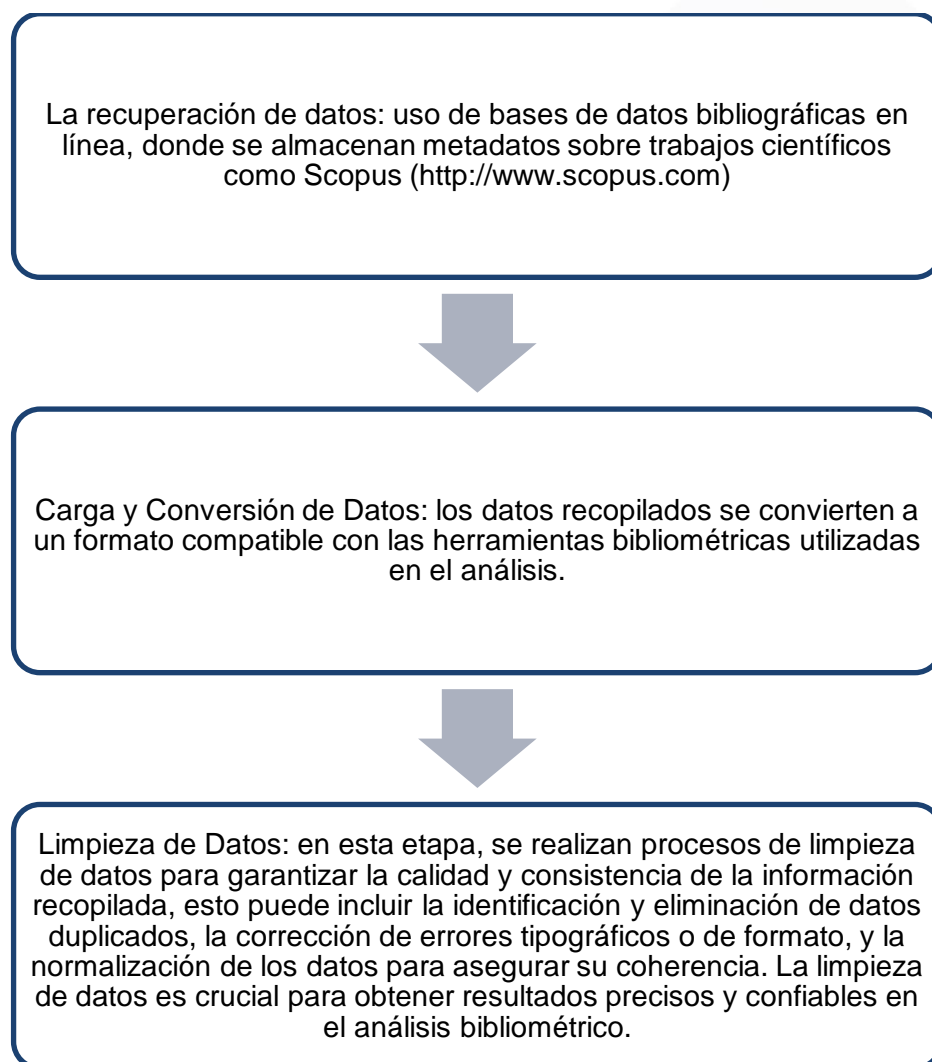
Fuente: Aria & Cuccurullo, (2017)

Recopilación y Análisis de Datos de Mapeo Científico.

La recopilación de datos se divide en tres subetapas:

Figura 2

Subetapas de la recopilación de datos.



Fuente: Jocelyne López, 2024.

Scopus: Base de Datos

Elsevier ha creado una base de datos académica de citas que cubre las áreas de ciencias de la vida, ciencias de la salud, ciencias físicas, humanidades y ciencias sociales, tal base indexa revistas científicas, libros y actas de conferencias, además de ofrecer indicadores

de impacto como SJR (Scimago Journal Rank, mide la influencia de las revistas en función de las citas recibidas), SNIP (Source Normalized Impact per Paper, compara el impacto de las citas entre diferentes campos) y el índice h (H-index, mide tanto la productividad como el impacto de las publicaciones de un autor). Se necesita suscripción para acceder a la página web de esta base de datos. (Universidad de Puerto Rico, 2024)

Librerías para el Análisis de Mapeo Científico (AMC).

Las librerías son códigos que pueden ser empleados por varios programas que no están interconectados, tal capacidad las hace una opción atractiva para quienes necesitan flexibilidad y versatilidad, sin embargo, suelen requerir conocimientos del lenguaje de programación del entorno, por lo que es necesaria la experiencia en programación. (Moral-Muñoz et al., 2020)

A continuación, se describen las diferentes librerías disponibles para el análisis del mapeo científico:

Tabla 8

Librerías Disponibles para AMC.

Software	Desarrollador	Lenguaje de programación	Descripción
Bibliometrix	Universidad de Nápoles Federico II	R	Paquete de código abierto en R Studio para realizar análisis AMC (análisis de mapeo científico) completos. Permite trabajar con datos de Web of Science (WoS), y Scopus, ofreciendo múltiples opciones de análisis y visualización.
BiblioTools	Universidad de Lyon	Python	Biblioteca de Python con scripts para realizar análisis AMC. Permite la adquisición, preprocesamiento, análisis, visualización y reporte de datos, trabajando con archivos de WoS y Scopus.
Citan	Universidad de Deakin	R	Conjunto de herramientas para realizar análisis de rendimiento a partir de datos de Scopus en una base de datos SQLite. Calcula varios índices de impacto y proporciona gráficos descriptivos.
Metaknowledge	Universidad	Python	Paquete de Python para análisis

	de Waterloo		bibliométricos/cientométricos basados en análisis de rendimiento. Trabaja con datos de varias bases, y ofrece opciones avanzadas de visualización.
ScientoPy	Universidad del Cauca	Python	Script de Python de código abierto para análisis cientométricos temporales. Permite filtrar y normalizar datos, realizar evaluaciones de temas y búsquedas con comodines, y ofrece varias opciones de visualización.
scientoText	Universidad del Sur de Asia	R	Paquete de R para análisis bibliométricos/cientométricos basado en indicadores. Ofrece análisis de coautoría, principales autores/países/instituciones, colaboración internacional y frecuencia de términos.

Fuente: Adaptado de Moral-Muñoz et al., (2020)

A continuación, se especifican las variadas opciones de análisis que ofrecen las herramientas mencionadas:

Tabla 9

Opciones de Análisis de las Librerías Disponibles para el Mapeo Científico.

Librerías	Red temática	Red de autores	Red de referencias	Otras redes	Evolución	Rendimiento	Detección de ráfagas	Espectrograma	Geoespacial
Bibliometrix	X	X	X	X	X	X	X	X	Red, gráfico de tres campos, nube de palabras, mapa de árbol, historiograma, diagrama estratégico, mapa de evolución y mapa mundial.
BiblioTools	X	X	X	X				X	Red.
Citan						X			Barras, diagramas de caja y gráficos circulares.
Metaknowledge	X	X	X	X		X			Gráfico de líneas de tiempo, espectrograma y red.
ScientoPy									Gráfico de líneas de tiempo, gráfico de barras, gráfico de evolución y nube de palabras.

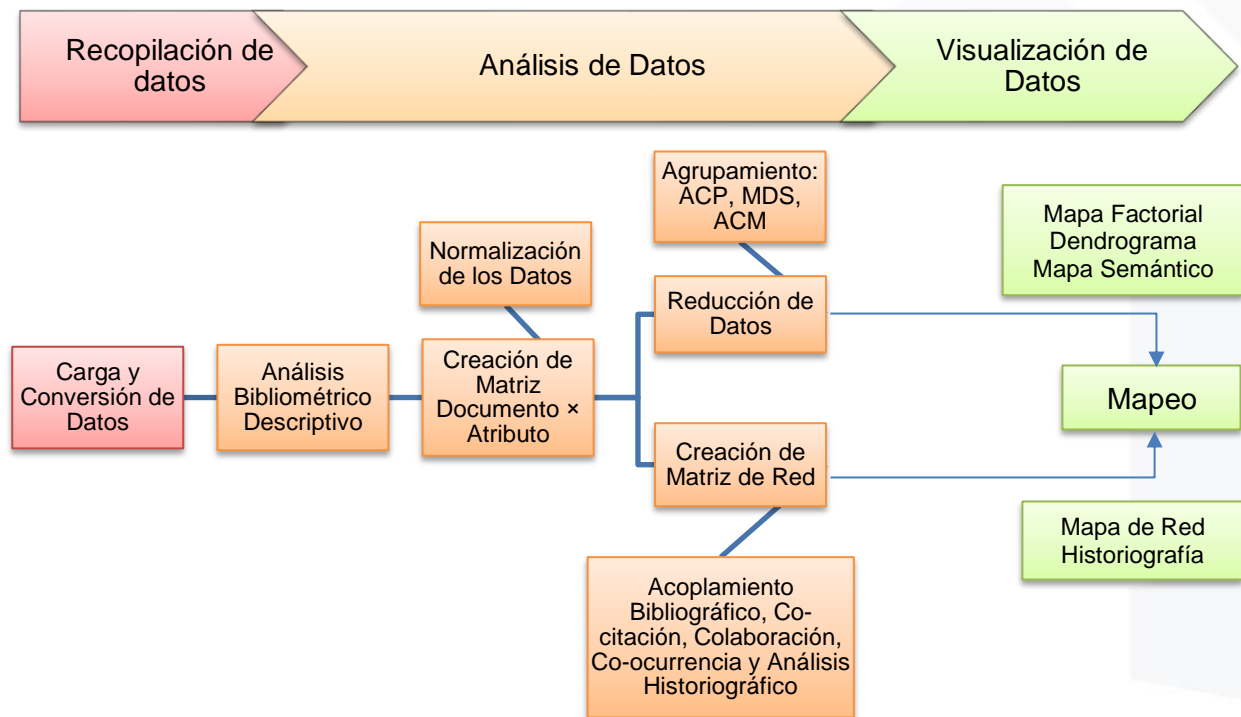
Fuente: Moral-Muñoz et al., 2020.

Bibliometrix y el Flujo de Trabajo para el Mapeo Científico.

Respecto al diagrama de flujo recomendado para realizar el Mapeo Científico tenemos:

Figura 3

Diagrama de Flujo de Trabajo para el Mapeo Científico.



Fuente: Jocelyne López, 2024.

Bibliometrix nos permite realizar las etapas segunda a cuarta del flujo de trabajo visualizado en la figura 1 siendo que se logra (Aria & Cuccurullo, 2017):

- La Carga y conversión de datos a un marco de datos de R Studio.
- El Análisis descriptivo de un marco de datos bibliográficos.
- La Creación de red para análisis de acoplamiento bibliográfico, cocitación, colaboración y coocurrencia.
- La Normalización de Datos.
- El Mapeo de la estructura conceptual
- El Mapeo de la red.

2.2.11. Método Prisma.

El Método PRISMA incluye o proporciona (Page et al., 2021):

- Asistencia a autores:
Para revisiones sistemáticas.
Para estudios bibliométricos.
- Lista de verificación PRISMA 2020:

Incluye siete secciones o dominios con 27 ítems, algunos ítems incluyen subítems, como se muestra a continuación:

Tabla 10

Ítems y Subítems de la lista de verificación PRISMA.

Sección	Ítem	Descripción
1. Título	1. Título	Identificar el informe como una revisión sistemática, un meta-análisis, o ambos.
2. Resumen	2. Resumen estructurado	Proveer un resumen que incluya objetivos, métodos, resultados y conclusiones.
3. Introducción	3. Racionalidad	Explicar el contexto y la importancia de la revisión.
	4. Objetivos	Indicar claramente los objetivos de la revisión, incluyendo preguntas específicas y marcos conceptuales.
	5. Criterios de elegibilidad	Describir los criterios de inclusión y exclusión de los estudios.
	6. Fuentes de información	Listar todas las bases de datos y otras fuentes de información.
	7. Estrategia de búsqueda	Proveer detalles completos de las estrategias de búsqueda utilizadas.
4. Métodos	8. Selección de estudios	Explicar el proceso de selección de estudios, desde la búsqueda inicial hasta la inclusión final.
	9. Proceso de recolección de datos	Describir los métodos de recolección de datos de los estudios incluidos.
	10. Ítems de datos	Listar los datos extraídos de cada estudio.
	11. Evaluación del riesgo de sesgo en estudios individuales	Explicar cómo se evaluó el riesgo de sesgo en los estudios incluidos.
	12. Medidas de resumen	Indicar las medidas estadísticas utilizadas para resumir los resultados de los estudios.
	13. Métodos de síntesis	Describir los métodos utilizados para sintetizar los datos.
	14. Evaluación del riesgo de sesgo entre los estudios	Explicar cualquier evaluación del riesgo de sesgo entre los estudios.
	15. Análisis adicionales	Describir cualquier análisis adicional realizado.

5. Resultados	16. Selección de estudios	Proveer un diagrama de flujo que ilustre el proceso de selección de estudios.
	17. Características de los estudios	Resumir las características de los estudios incluidos.
	18. Resultados de los estudios individuales	Presentar los resultados de cada estudio incluido.
	19. Síntesis de los resultados	Resumir los resultados principales de la síntesis de datos.
	20. Riesgo de sesgo entre los estudios	Describir los resultados de cualquier evaluación del riesgo de sesgo entre los estudios.
6. Discusión	21. Análisis adicionales	Reportar los resultados de cualquier análisis adicional realizado.
	22. Resumen de la evidencia	Resumir los hallazgos principales de la revisión.
	23. Limitaciones	Discutir las limitaciones de la evidencia incluida y de la revisión en sí.
7. Otros ítems	24. Conclusiones	Proveer una interpretación general de los resultados en el contexto de la evidencia disponible.
	25. Financiación	Describir las fuentes de financiación y otros apoyos para la revisión.
	26. Conflictos de interés	Declarar cualquier conflicto de interés potencial.
	27. Disponibilidad de datos	Proveer información sobre la disponibilidad de los datos utilizados en la revisión.

Fuente: (PRISMA Statement, 2024)

- Recomendaciones para los autores:

Revisar la declaración PRISMA 2020 en las fases iniciales del proceso de escritura.

Considerar los ítems de manera prospectiva para asegurar que se tienen en cuenta todos.

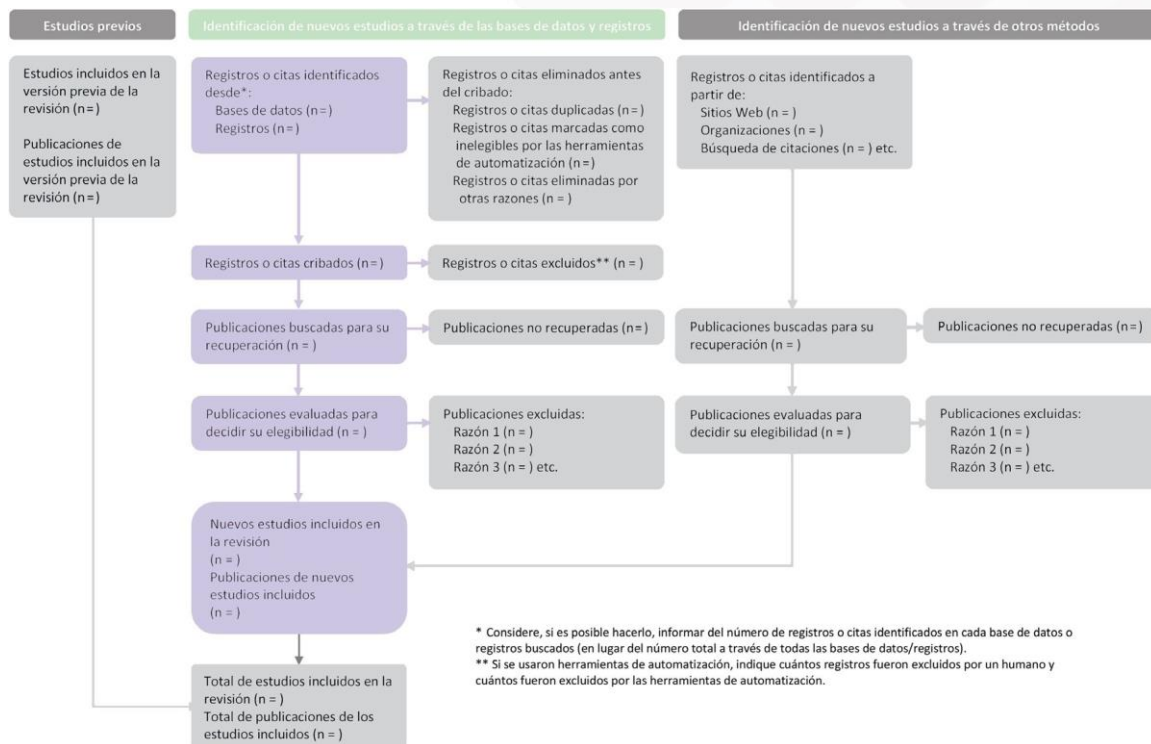
- Aplicación web PRISMA:

Permite completar la lista de verificación a través de una interfaz fácil de usar (<https://prisma.shinyapps.io/checklist/>), esta se puede exportar a Word o en formato PDF.

Descarga de plantillas editables del diagrama de flujo de trabajo desde el sitio web de PRISMA mostrado en la Fig.4.

Figura 4

Diagrama de Flujo para el Método PRISMA.



Fuente: Page et al., 2021.

CAPÍTULO III: Diseño metodológico

3.1. Tipo y diseño de investigación.

Este informe de investigación representa un estudio no experimental, debido a que no hay una manipulación de las variables, siendo el fenómeno de estudio observado en su entorno natural, por lo que, el presente estudio será descriptivo y exploratorio, abarcando un mapeo científico con el uso de técnicas bibliométricas de una cantidad significativa de artículos en el campo de las nanoburbujas en la agricultura.

3.2. Recopilación de los Datos.

3.2.1. Fuente de los Datos.

Para la revisión de la literatura científica referente al campo de las nanoburbujas se eligió la base de datos Scopus, debido a que es considerada uno de los repositorios más grandes y relevantes de publicaciones indexadas, y una de las bases de datos bibliográficas más reconocidas a nivel mundial, por su excelente organización y altos estándares de calidad y credibilidad, así como por su impacto global significativo y una cobertura extensa, siendo una elección coherente con revisiones bibliométricas anteriores en la investigación de las nanoburbujas o la agricultura. (Ramos et al., 2023). Considerando finalmente la recomendación de Donthu et al., (2021) de seleccionar solo una base de datos, minimizando errores humanos durante el análisis de los mismos.

3.2.2. Criterios de Búsqueda.

A continuación, se presenta los criterios de búsqueda utilizados para la recopilación de los datos a analizar:

Tabla 11

Criterios de búsqueda.

Criterio	Detalle
Base de datos.	Scopus
Espacio de tiempo.	2002-2024
Periodo de consulta.	18 de mayo del 2024
Tipos de documentos.	Artículo, libro, capítulo de libro, documento de conferencia.

Tipo de revista.	Cualquier tipo.
Campo de búsqueda.	Título, resumen, palabras clave.
Ecuación de búsqueda.	TITLE-ABS-KEY (nanobubble OR nanobubbles) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "EART"))
Resultados	645

3.2.3. Tipo de muestra.

Se optó por una muestra no probabilística de tipo intencional o de juicio, esta selección se basa en el criterio del investigador para identificar y seleccionar aquellos documentos que más se ajustan a los objetivos del estudio, la muestra incluirá aquellos trabajos que aporten datos relevantes y robustos sobre las aplicaciones de las nanoburbujas en la productividad, calidad y sostenibilidad agrícola.

3.2.4. Tamaño de la muestra.

El tamaño de la muestra fue determinado utilizando los criterios específicos de búsqueda detallados, resultando en un total de 635 publicaciones relacionadas, este número es adecuado para realizar un análisis bibliométrico completo y representativo de la población. La muestra incluye documentos cuyos títulos, resúmenes o palabras clave contienen los términos "nanoburbuja" o "nanoburbujas", y están vinculados a las áreas temáticas de medio ambiente, agricultura y ciencias de la tierra.

3.2.5. Proceso final de selección de la muestra.

Cribado de Documentos: se revisaron los títulos y resúmenes de los documentos recuperados para evaluar su relevancia con respecto al tema del estudio, aquellos documentos irrelevantes o duplicados fueron excluidos. Los artículos fueron enumerados desde el más antiguo al más reciente del 1 al 635 respectivamente.

Selección Final: el análisis de citas, a pesar de sus limitaciones debido a que los artículos pueden ser citados por diversas razones, es considerado un método objetivo y con menos sesgos sistemáticos para evaluar el impacto de la investigación en el campo de estudio, siendo que este enfoque ha sido utilizado en investigaciones bibliométricas anteriores, clasificando los artículos según la frecuencia de las citas en los mismos. (Ramos

et al., 2023). Por lo tanto, se procedió a agrupar los 635 artículos totales en cuartiles según la frecuencia de las citas, llegando a dividirse en 5 cuartiles relevantes para su estudio. La información fue extraída por cuartil en formato csv, completando para cada artículo variables como nombres de los autores, palabras clave, título del documento, año, título de la fuente y número de citas.

3.3. Los métodos y las técnicas.

Se utilizaron técnicas bibliométricas para analizar la producción científica sobre nanoburbujas en la agricultura, las herramientas principales a usar incluyen R Studio y Bibliometrix, que permiten la visualización y el análisis de redes de coautoría, coocurrencia de palabras clave y cocitación de documentos.

Se uso además el método PRISMA, con su lista de verificación y su respectivo diagrama de flujo para garantizar que todos los pasos necesarios se sigan adecuadamente.

3.4. Procesamiento estadístico de la información.

Utilizando la herramienta bibliometrix de R, se realizará un análisis bibliométrico de los conjuntos de datos finales en formato CSV, permitiendo obtener una visión integral del campo de estudio al cuantificar material bibliográfico objetivamente y resumir la literatura existente, además de identificar temas emergentes, se realizarán análisis de rendimiento destacando las principales estructuras de citas, fuentes, autores y artículos relevantes. Luego, a través de un análisis de coocurrencia, se identificarán brechas y tendencias en la investigación.

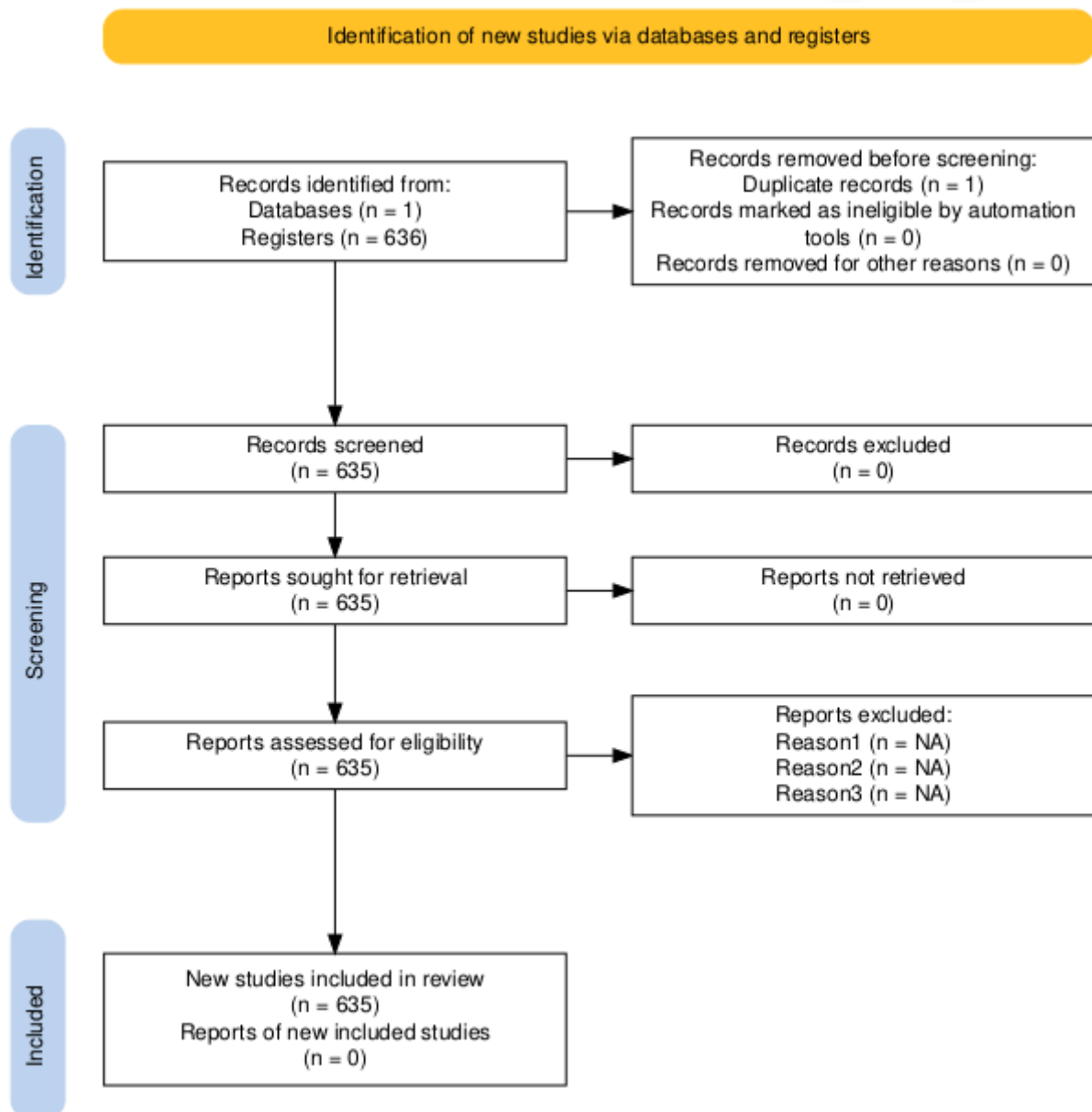
CAPÍTULO IV: Análisis e interpretación de resultados

4.1. Análisis de los resultados.

Selección de estudios.

Figura 5

Diagrama de Flujo del Método Prisma para la selección de estudios.



Se cribaron 635 registros, de los cuales no se excluyó ninguno.

Finalmente, se incluyeron 635 nuevos estudios en este estudio.

4.1.1. Primer Cuartil.

Figura 6

Integridad de los metadatos bibliográficos del primer cuartil con 410 documentos de Scopus.

Metadata	Description	Missing Counts	Missing %	Status
AU	Author	0	0.00	Excellent
DI	DOI	0	0.00	Excellent
DT	Document Type	0	0.00	Excellent
SO	Journal	0	0.00	Excellent
DE	Keywords	0	0.00	Excellent
ID	Keywords Plus	0	0.00	Excellent
LA	Language	0	0.00	Excellent
PY	Publication Year	0	0.00	Excellent
TI	Title	0	0.00	Excellent
TC	Total Citation	0	0.00	Excellent
C1	Affiliation	1	0.24	Good
CR	Cited References	1	0.24	Good
AB	Abstract	6	1.46	Good
RP	Corresponding Author	13	3.17	Good
WC	Science Categories	410	100.00	Completely missing

Observando la tabla presente del análisis en cuanto a la calidad de los 410 documentos pertenecientes al primer cuartil tenemos que la mayoría de los metadatos se encuentran completos, con 10 de los 15 tipos evaluados como Excelentes, teniendo solo una categoría, aquella referida a la clasificación de la Web of Science en disciplinas específicas o áreas de investigación (WC), calificada como ausente en todos los documentos, porque tal base de datos no fue usada en esta investigación. A pesar de que algunos metadatos poseen un pequeño porcentaje de faltantes, la integridad general de la información está clasificada como buena, por lo que la calidad a analizar es alta, es decir la mayoría de los documentos están bien representados en términos de metadatos.

Tabla 12

Información Principal de los documentos del primer cuartil.

Descripción	Resultados
Periodo de tiempo	2002:2024
Fuentes (Revistas, Libros, etc)	113
Documentos	410
Tasa de crecimiento anual %	21,06
Edad promedio del documento	3,02
Citas promedio por documento	23,76

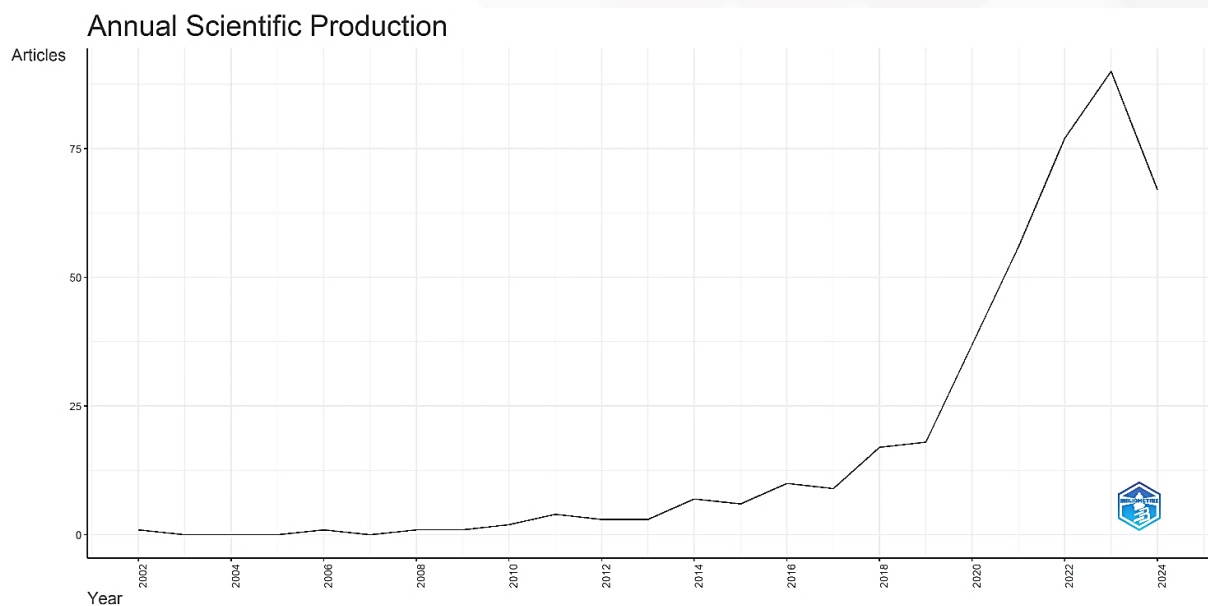
Referencias	22783
Palabras clave adicionales (ID)	4592
Palabras clave del autor (DE)	1189
Autores	1290
Autores de documentos de autor único	5
Coautores por documento	5,8
Porcentaje de coautorías internacionales	34,15
Artículo	355
Ponencia de conferencia	1
Errata	1
Nota	2
Retractado	1
Revisión	50

La tabla proporciona una visión de los datos bibliométricos recopilados entre 2002 y 2024, siendo un total de 113 fuentes y 410 documentos, con una tasa de crecimiento anual significativa del 21,06%, indicando un incremento constante en la producción académica, a su vez la edad promedio de los documentos es de 3,02 años, lo que sugiere que el conjunto de datos es relativamente reciente, continuando tenemos que en promedio, cada documento recibe 23,76 citas, demostrando un alto impacto en el campo correspondiente a las nanoburbujas.

El contenido de los documentos incluye 4592 palabras clave adicionales y 1189 palabras clave del autor, reflejando una rica diversidad temática, en términos de autoría, hay 1290 autores involucrados, pero solo 5 de estos son documentos de autor único, lo que enfatiza la tendencia hacia la colaboración, con un promedio de 5,8 coautores por documento, además tenemos que el 34,15% de las publicaciones son resultado de coautorías internacionales, subrayando la naturaleza global de la investigación. Los tipos de documentos están dominados por artículos siendo estos 355, seguidos de revisiones con un total de 50, por lo que la mayoría de los trabajos publicados son contribuciones originales de investigación y revisiones exhaustivas del estado del arte en este campo.

Figura 7

Producción científica Anual de los 410 documentos del primer cuartil.



El gráfico muestra la producción científica anual en términos de los artículos publicados desde el año 2002 hasta 2024, siendo que, a lo largo de este periodo, se observa una tendencia general de aumento, por la cantidad de artículos publicados anualmente, con algunas características destacables:

Durante los primeros años del periodo analizado (2002-2015), la producción científica se mantuvo relativamente estable, con un crecimiento muy gradual y un bajo número de artículos publicados por año.

A partir de 2016, comienza a observarse un incremento más notable en la producción, aunque este sigue siendo moderado.

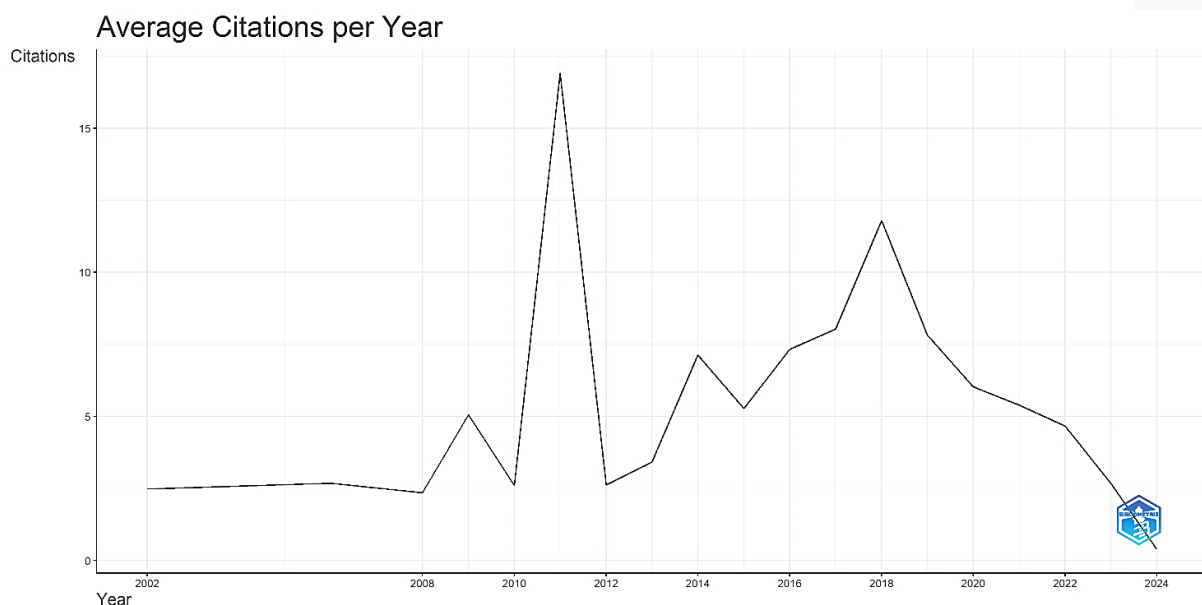
A partir de 2020, la producción científica experimenta un crecimiento exponencial, alcanzando su punto más alto en 2022 con más de 75 artículos publicados en ese año, esta subida drástica podría estar influenciada por varios factores, como un aumento en la financiación de la investigación, avances tecnológicos que facilitan la publicación, o un mayor enfoque en temas de investigación emergentes como lo son: remediación de suelos, tratamientos de sedimentos y aguas residuales, remoción de diversos contaminantes, estudios en germinación de plantas y semillas, estudios en fenómenos de flotación,

preservación de alimentos frescos, en acuicultura, enfoque en nanoburbujas de oxígeno, hidrogeno y dióxido de carbono, control en las emisiones de metano, en procesos de digestión anaerobia y en la fertilización e irrigación por goteo.

En 2023 y 2024, se observa una disminución en el número de artículos publicados, aunque la producción sigue siendo significativamente mayor que en los años previos a 2020, esta caída podría indicar un ajuste post-crecimiento exponencial, posiblemente debido a la saturación del mercado de publicaciones, cambios en las políticas de financiación, o un regreso a niveles más sostenibles de producción. De igual manera debemos tomar en cuenta que estamos solo a mitad del año 2024, y por lo tanto aun no vemos una totalidad de artículos publicados en el mismo.

Figura 8

Promedio de Citas por año para los 410 documentos del primer cuartil.



El promedio de citas por año se ha mantenido relativamente constante entre 2000 y 2010, con un valor alrededor de 5, sin embargo, en 2010 hay un notable aumento, alcanzando un pico significativo en 2011 donde se registran más de 15 citas por año, este pico puede indicar la publicación de documentos altamente influyentes o un aumento en la visibilidad y relevancia de los artículos en ese periodo, después de este pico hay una disminución abrupta en este promedio, seguida de cierta estabilidad entre 2012 y 2014, donde vuelve a estar en

un rango cercano a las 5 citas por año. A partir de 2014, se observa un nuevo aumento, alcanzando otro pico menor alrededor de 2018, posteriormente, el promedio de citas comienza a disminuir nuevamente, con una tendencia decreciente que se acentúa hacia 2024.

Tabla 13

Los 10 Artículos más citados del primer cuartil.

Artículo	DOI	Total de Citas
Agarwal A., 2011, Chemosphere	10.1016/j.chemosphere.2011.05.054	753
Ma X., 2018, Environ Sci Technol Lett	10.1021/acs.estlett.8b00016	277
Calgaroto S., 2014, Minerals Eng	10.1016/j.mineng.2014.02.002	221
Hu L., 2018, J Hazard Mater	10.1016/j.jhazmat.2017.08.030	220
Azevedo A., 2016, Minerals Eng	10.1016/j.mineng.2016.05.001	198
Ahmadi R., 2014, Int J Min Sci Technol	10.1016/j.ijmst.2014.05.021	190
Kyzas Gz., 2019, Chem Eng J	10.1016/j.cej.2018.09.019	166
Yasui K., 2018, Ultrason Sonochem	10.1016/j.ultsonch.2018.05.038	147
Etchepare R., 2017, Minerals Eng	10.1016/j.mineng.2017.06.020	137
Liu S., 2016, Acs Sustainable Chem Eng	10.1021/acssuschemeng.5b01368	133

El artículo más citado es de Agarwal A, publicado en 2011 en la revista Chemosphere con 753 citas, siendo una revisión de los principios y aplicaciones de la tecnología de microburbujas y nanoburbujas para el tratamiento del agua.

El segundo artículo más citado es de Ma X., publicado en 2018, posee 277 citas, este introduce un método novedoso de nanoespumación para mejorar las membranas de desalinización, contribuyendo significativamente en el área de tratamiento de agua, que enfrenta constantemente el desafío de mejorar la eficiencia de estas membranas.

El tercer artículo más citado es de Calgaroto S., publicado en 2014, posee 221 citas, este es una revisión sobre las propiedades interfaciales de las nanoburbujas y sus aplicaciones futuras en la flotación, este estudio ofrece un control detallado de las propiedades interfaciales de las nanoburbujas, lo que proporciona información valiosa para optimizar y personalizar los procesos de flotación por lo mismo se debe su cantidad de citas.

El cuarto artículo más citado es de Hu L, publicado en 2018, posee 220 citas, esta investigación de la aplicación de micro nano-burbujas de ozono para la remediación de aguas subterráneas, la combinación de química (oxidación con ozono), ingeniería (desarrollo y aplicación de micro nano-burbujas) y ciencias ambientales (remediación de aguas subterráneas) hace que el artículo sea relevante para múltiples campos de investigación, ampliando su audiencia y potencial de citación.

El quinto artículo más citado es Azevedo A., de 2016, con 198 citas, esta investigación trata sobre la dispersión acuosa de nanoburbujas, su generación, propiedades y características, esta explicación detallada de los fenómenos interfaciales y cómo afectan la generación y comportamiento de las nanoburbujas proporciona una base teórica sólida que puede ser útil para futuras investigaciones en este campo.

El sexto artículo más citado es de Ahmadi R., de 2014, con 190 citas, trata sobre la flotación con nano microburbujas de partículas finas y ultrafinas de calcopirita, esta investigación demuestra mejoras claras en la recuperación de partículas finas y ultrafinas, lo que es crucial para la eficiencia y rentabilidad de los procesos mineros.

El séptimo artículo más citado es de Kyzas Gz., de 2019, con 166 citas, sobre nanoburbujas en masa, este destaca por abordar problemas clave con modelos teóricos y simulaciones numéricas, proporcionando nuevas perspectivas sobre la estabilidad de las nanoburbujas y la generación de radicales OH.

El octavo artículo más citado es de Yasui K., de 2018, con 147 citas, destaca por su enfoque innovador, resultados significativos en términos de velocidad de adsorción mejorada por las nanoburbujas, y la propuesta de un mecanismo teórico que puede influir en futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el tratamiento de aguas contaminadas y otros campos relacionados con la adsorción de contaminantes.

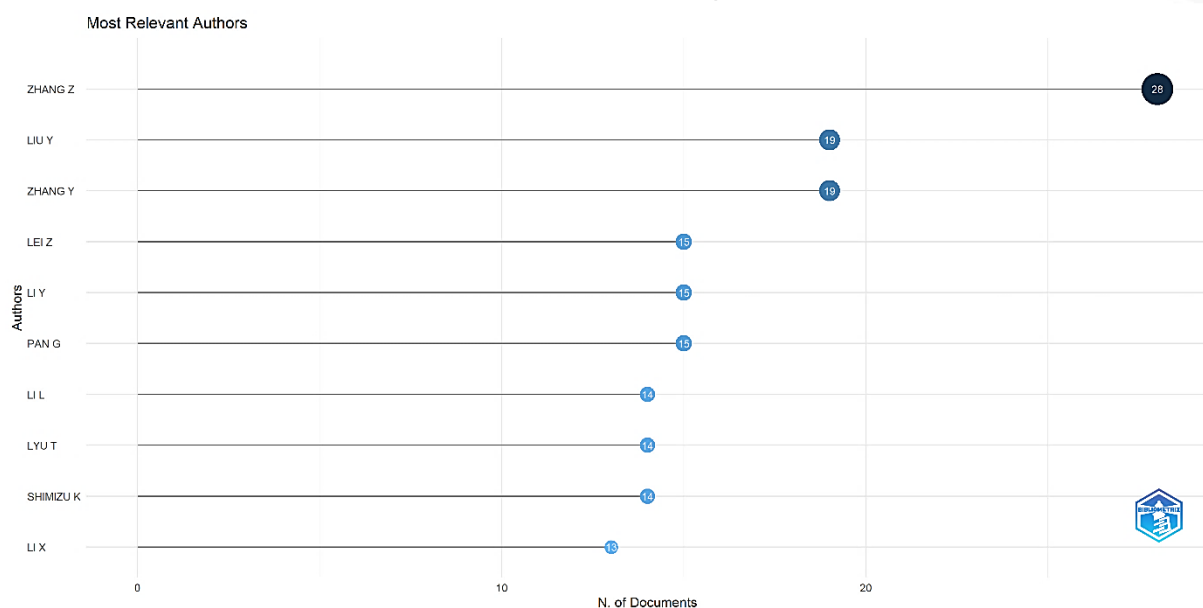
El noveno artículo más citado es de Etchepare R., de 2017, con 137 citas, trata la generación de nanoburbujas usando una bomba multifásica, además de sus propiedades y características en la flotación.

El último artículo más citado de este top 10 es de Liu S., de 2016, con 133 citas, este estudio sobre la capacidad oxidativa de las nanoburbujas y su efecto en la germinación de semillas, es un tema de gran interés para la agricultura y la producción de alimentos, ya que la capacidad de las nanoburbujas para aumentar la tasa de germinación tiene un impacto significativo en la productividad agrícola. Este artículo representa la creciente atención hacia las aplicaciones de nanoburbujas en biotecnología y agricultura, con un gran potencial para futuras citas a medida que el campo se desarrolle y se reconozcan más ampliamente diversas aplicaciones.

Finalmente se recalca que varios artículos fueron publicados en años recientes (2018 y 2019), lo que sugiere un interés continuo en el tema, además por su distribución en varias revistas, se muestra una diversidad en la difusión de la investigación.

Figura 9

Autores más relevantes entre los 410 documentos del primer cuartil.



Zhang Z. con un total de 28 documentos se destaca significativamente por encima de los otros autores, siendo el más prolífico en este conjunto de datos, a continuación, Liu Y. y Zhang Y. ocupan el segundo lugar, con una influencia considerable en su campo, como se refleja en su número de publicaciones. Lei Z., Ly Y., Pan G. tienen cada uno 15 documentos publicados, superando a los autores con 14 o menos.

área de investigación importante, indicando estudios sobre cómo las nanoburbujas pueden mejorar la eficiencia de la digestión anaeróbica, un proceso crucial para la producción de biogás y la gestión de residuos orgánicos, destacando estudios sobre la mejora en la producción de metano utilizando nanoburbujas de hidrógeno durante la digestión anaeróbica de paja de maíz. (C. He et al., 2022)

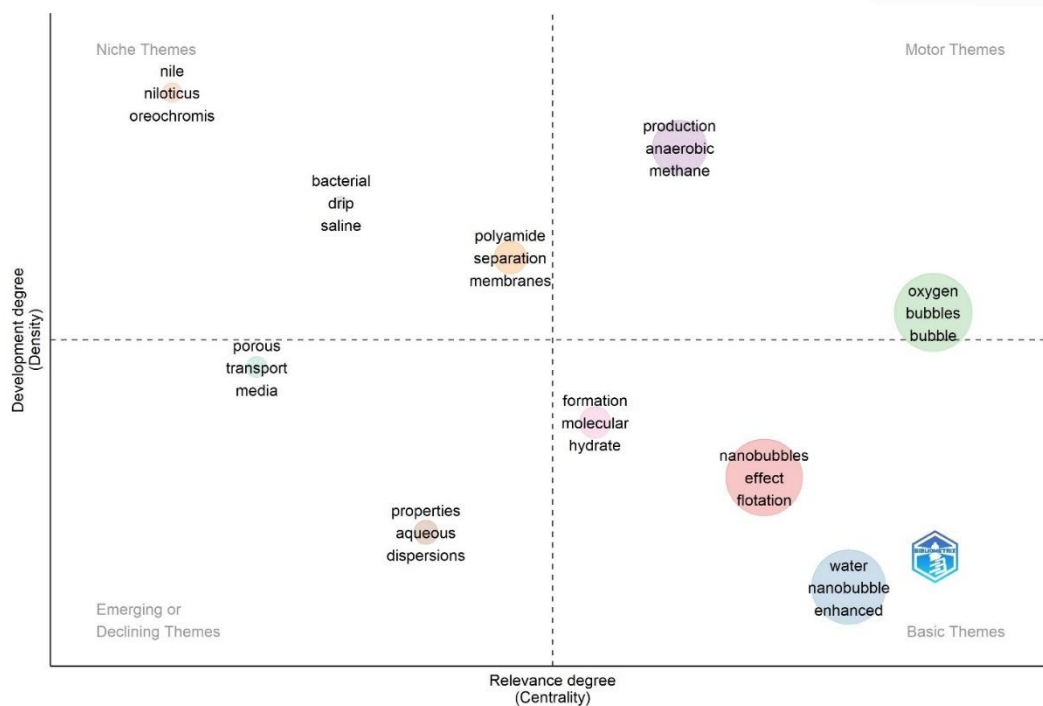
Otros términos como adsorción y oxidación sugieren que se está explorando las nanoburbujas por su capacidad para mejorar estos procesos químicos, cruciales en el tratamiento de contaminantes. El tamaño de partícula, hidrofobicidad y potencial zeta indican que las investigaciones también se centran en las propiedades físico-químicas de las nanoburbujas y cómo estas propiedades afectan su comportamiento y eficacia en diferentes aplicaciones. (W. Liu et al., 2022) (S. Yuan et al., 2023)

El término dióxido de carbono y nitrógeno sugiere estudios relacionados con estos químicos, en diversas investigaciones con aplicaciones agrónomas, destacando estudios sobre mejora de la aireación del suelo y reducción de emisiones de nitrógeno mediante el uso de nanoburbujas de oxígeno en agua residual tratada, y su relevancia para la agricultura sostenible y la gestión de recursos hídricos. (Baram et al., 2021)

La presencia del término no humano indica que muchas investigaciones se realizan en condiciones experimentales controladas sin sujetos humanos, típicas en fases iniciales de investigación. Finalmente, la frecuencia del término estudio controlado confirma que los estudios están diseñados con rigor experimental, asegurando la validez y reproducibilidad de los resultados. La mención de microburbuja, aunque menos prominente, sugiere que algunas investigaciones también consideran las microburbujas, que comparten ciertas propiedades con las nanoburbujas, pero difieren en tamaño y en aplicaciones específicas. (D. Shen et al., 2024)

Figura 11

Mapa temático de los 410 artículos del primer cuartil.



Este mapa revela la distribución de los temas en función de su relevancia y grado de desarrollo, dividiéndolo en cuatro cuadrantes:

En el cuadrante superior izquierdo, se encuentran los temas de nicho, que son altamente especializados, pero con una baja relevancia general, destacándose en artículos titulados como “Pretratamiento de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) con nanoburbujas de ozono para mejorar la eficacia de la vacuna por inmersión con *Streptococcus agalactiae*” debido a aplicación específica en acuicultura, con no más de 5 artículos dentro de este cuartil. (Linh et al., 2022)

Otros términos de este cuadrante se encuentran en artículos titulados como “Riego por goteo con micro/nanoburbujas de oxígeno y su efecto en los microambientes del suelo salino y el crecimiento del tomate mediante la alteración de las comunidades bacterianas” siendo una aplicación muy específica en el campo de la agricultura sostenible y gestión de

suelos. (J. Wang et al., 2024b)

Los últimos 3 términos se encuentran en títulos como “Grabado de capas de poliamida mediante nanopartículas de CaCO_3 auto atacables in situ mejora las propiedades de separación y el rendimiento antiincrustante de membranas de ósmosis inversa” siendo un campo específico en innovación en tecnología de membranas de ósmosis inversa y su aplicación en tecnologías ambientales y sostenibles. (Long et al., 2024)

El cuadrante superior derecho alberga los temas motores, áreas de investigación clave y muy activas, encontrándose términos como producción, anaeróbico, oxígeno y metano, destacando la importancia de la producción de biogás y la digestión anaeróbica en la literatura científica actual, encontramos así en estos títulos como “Mejora de la producción de metano mediante digestión anaerobia de *Erigeron canadensis* mediante la suplementación con agua de nanoburbujas de oxígeno” siendo un tema recurrente el de la optimización de procesos de digestión anaerobia para la conversión eficiente de biomasa lignocelulósica en energía limpia, así como el de la utilización de nanoburbujas de oxígeno en diversos campos como el agrícola, ambiental, y de mejora de diversos procesos.

En el cuadrante inferior derecho, están los temas básicos, que son altamente relevantes, pero menos desarrollados, sirviendo como fundamentos para futuras investigaciones, aquí, términos como oxígeno, burbujas, y burbuja aparecen prominentes, indicando que la investigación sobre la oxigenación mediante burbujas es esencial pero aún puede expandirse, también tenemos otros términos como agua, nanoburbuja, y mejorado sugieren que las nanoburbujas y sus aplicaciones en el mejoramiento del agua son temas fundamentales con un gran potencial de desarrollo.

Los términos formación, molecular, e hidratos se refieren a investigaciones como aquellas sobre los efectos moleculares de la lignina en la formación de hidratos de metano en nanoporos de arcilla, ya que este es un tema crucial debido a su impacto potencial en la explotación de recursos energéticos y en la comprensión de procesos geológicos marinos, además, el conocimiento sobre cómo inhibir la formación de estos hidratos tiene implicaciones

importantes para la industria energética, especialmente en la prevención de bloqueos en tuberías y en la exploración de metano como recurso energético. Aunque este tema es de alta relevancia, la investigación específica sobre los efectos de la lignina en este proceso es todavía incipiente, la comprensión detallada del mecanismo molecular mediante el cual la lignina afecta la formación de hidratos de metano es limitada y se basa principalmente en estudios teóricos y simulaciones de dinámica molecular recientes. (Fengyi et al., 2023)

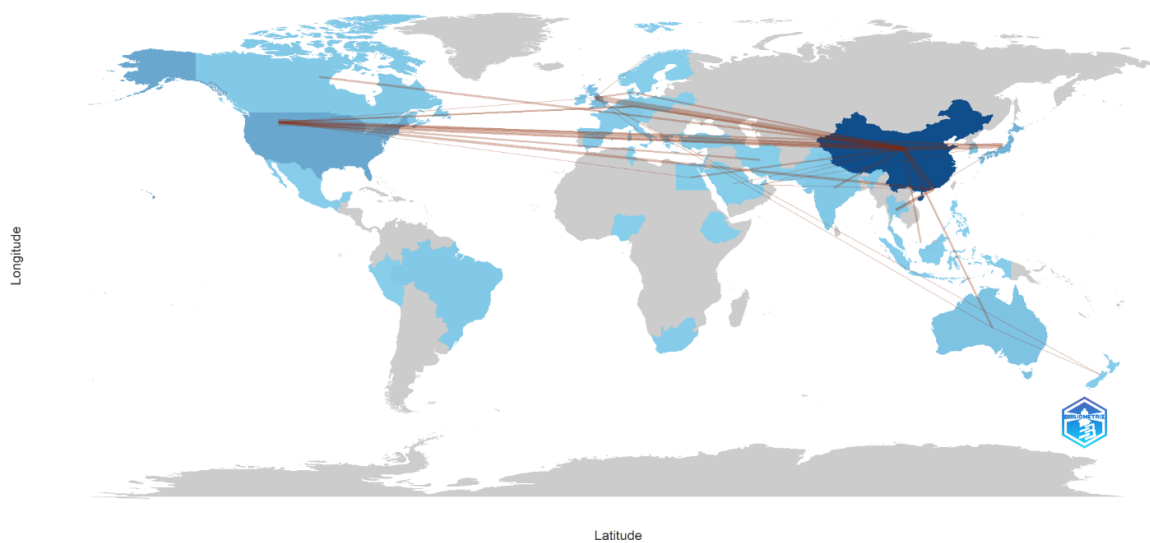
El cuadrante inferior izquierdo contiene los temas emergentes o en declive, que tienen baja relevancia y están menos desarrollados, aquí, los términos como poroso, transporte, y medio indican áreas de investigación como el transporte bacteriano mediado por micro nanoburbujas en medios porosos, siendo que este tema se encuentra en una fase inicial de exploración y por lo mismo concluyen sugiriendo que el agregar nanoburbujas en agua que contiene patógenos es una medida efectiva para aumentar la eficiencia de filtración y reducir el riesgo de contaminación patógena durante la irrigación agrícola, algo relevante para un estudio futuro. (M. Zhao, Yang, et al., 2024)

Otros términos como propiedades, acuoso, y dispersiones sugieren estudios sobre propiedades físico-químicas en sistemas acuosos, que ya no son tan relevantes debido a que la búsqueda de métodos de generación y aplicación de nanoburbujas han sido ampliamente estudiada y aplicada desde la publicación del artículo relacionado "Dispersión acuosa de nanoburbujas: generación, propiedades y características" en 2016. (Azevedo et al., 2016)

Figura 12

Mapa de colaboración por países de los 410 documentos del primer cuartil.

Country Collaboration Map



A continuación, se destacan los aspectos más importantes de este gráfico:

China y Estados Unidos son los principales actores en esta área de investigación, con numerosas conexiones internacionales, China aparece como el país con mayor número de colaboraciones, especialmente con países europeos como Alemania, Reino Unido, y Francia, así como con Japón, Australia, y otros países asiáticos, debido a esta amplia red de colaboraciones sabemos que China es un líder en el estudio y aplicación de nanoburbujas en la agricultura, impulsando tanto la investigación básica como aplicada en este campo.

Europa muestra una densa red de colaboraciones, con países como Alemania, Reino Unido, Francia, Italia y España conectados no solo entre sí, sino también con China y Estados Unidos, además tenemos que otros países asiáticos como Japón, Corea del Sur y la India también tienen múltiples conexiones internacionales.

América Latina y África tienen una menor representación en términos de colaboraciones internacionales en comparación con otras regiones, sin embargo, países como Brasil y Sudáfrica están conectados con China y Europa, lo que sugiere que estas regiones están comenzando a integrarse en la red global de investigación sobre nanoburbujas, este incipiente interés puede ser crucial para el desarrollo de tecnologías agrícolas sostenibles en estas áreas, donde la productividad y la gestión eficiente de recursos son particularmente importantes.

4.1.2. Segundo Cuartil.

Figura 13

Integridad de los metadatos bibliográficos del segundo cuartil con 80 documentos de Scopus.

Metadata	Description	Missing Counts	Missing %	Status
C1	Affiliation	0	0.00	Excellent
AU	Author	0	0.00	Excellent
RP	Corresponding Author	0	0.00	Excellent
DI	DOI	0	0.00	Excellent
DT	Document Type	0	0.00	Excellent
SO	Journal	0	0.00	Excellent
DE	Keywords	0	0.00	Excellent
ID	Keywords Plus	0	0.00	Excellent
LA	Language	0	0.00	Excellent
PY	Publication Year	0	0.00	Excellent
TI	Title	0	0.00	Excellent
TC	Total Citation	0	0.00	Excellent
CR	Cited References	1	1.25	Good
AB	Abstract	2	2.50	Good
WC	Science Categories	80	100.00	Completely missing

Del análisis en cuanto a la calidad de los 80 documentos pertenecientes al segundo cuartil tenemos que la mayoría de los metadatos de este cuartil se encuentran completos, con 13 de los 15 tipos evaluados como Excelentes, teniendo solo una categoría aquella referida a la clasificación de la Web of Science (WC), calificada como ausente en todos los documentos, porque tal base de datos no fue usada en esta investigación, en general tenemos una calidad alta en el conjunto de metadatos.

Tabla 14

Información Principal de los documentos del segundo cuartil.

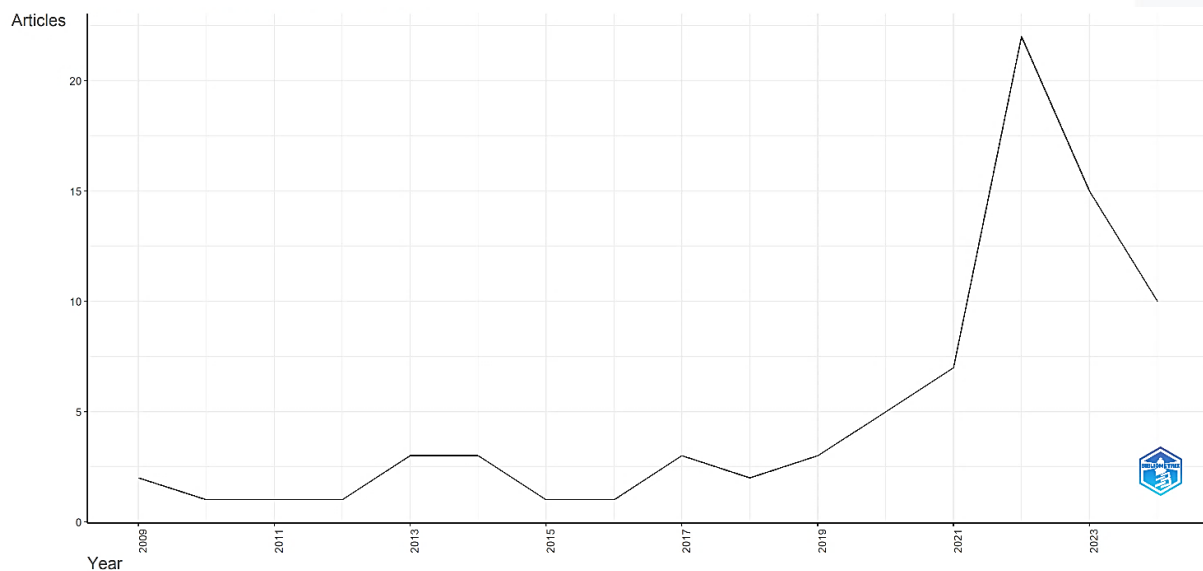
Descripción	Resultados
Periodo de tiempo	2009:2024
Fuentes (Revistas, Libros, etc)	36
Documentos	80
Tasa de crecimiento anual %	11.33
Edad promedio del documento	3.71
Citas promedio por documento	11.82
Referencias	3607
Palabras clave adicionales (ID)	908
Palabras clave del autor (DE)	212
Autores	366
Autores de documentos de autor único	2
Coautores por documento	5.81
Porcentaje de coautorías internacionales	23.75
Artículo	72

Nota	2
Revisión	6

Los documentos abarcan desde 2009 hasta 2024, cubriendo 15 años de investigación, estos tienen 36 fuentes diferentes, como revistas y libros, además esta colección tiene una tasa de crecimiento anual del 11.33%, indicando un aumento sostenido en la producción de los mismos, también estos poseen una edad promedio de 3.71 años, lo que sugiere que la colección incluye tanto trabajos recientes como más antiguos. Cada documento tiene en promedio 11.82 citas, lo que sugiere un buen nivel de impacto en la comunidad científica. Solo 2 documentos fueron escritos por un solo autor, mientras que en promedio hay 5.81 coautores por documento, reflejando una tendencia hacia la colaboración, de estos el 23.75% son coautorías internacionales. Por último, tenemos que 72 son artículos, 2 son notas y 6 son revisiones, lo que indica una colección de documentos científicamente relevante, con una alta colaboración entre autores y un impacto significativo en términos de citas.

Figura 14

Producción científica Anual de los 80 documentos del segundo cuartil.



El gráfico muestra la producción científica anual en términos de los artículos publicados desde el año 2009 hasta 2024, a lo largo de este período, se observa una tendencia general de aumento en la cantidad de artículos publicados anualmente, con algunas características destacables:

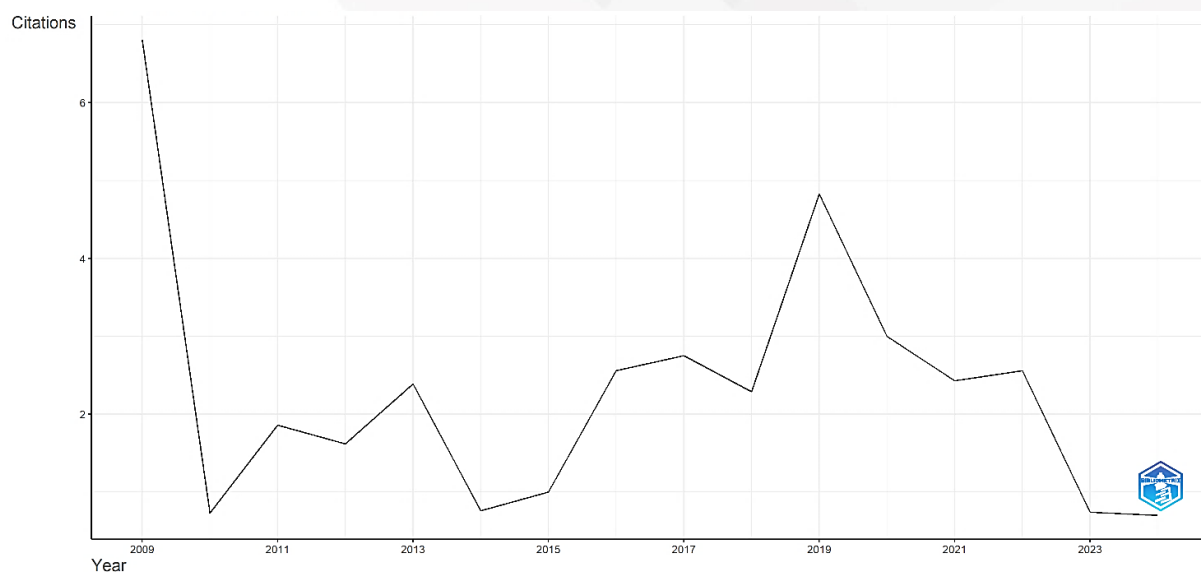
Durante los primeros años del período (2009-2017), la producción científica se mantuvo relativamente estable, con un crecimiento muy gradual y un bajo número de artículos publicados por año, oscilando entre 0 y 5 artículos y a partir de 2018, comienza a observarse un incremento más notable en la producción, aunque sigue siendo moderado.

A partir de 2020, la producción científica experimenta un crecimiento exponencial, alcanzando su punto más alto en 2022 con más de 20 artículos publicados en ese año, esta subida drástica podría estar influenciada por varios factores, como un aumento en la financiación de la investigación, avances tecnológicos que facilitan la publicación, o un mayor enfoque en temas de investigación emergentes como lo son: la flotación de grafito, nanoburbujas antimicrobianas que promueven la cicatrización de heridas, diferentes técnicas de flotación con NB, la degradación de contaminantes con NB, las nanoburbujas ultra densas, la irrigación por goteo con nanoburbujas en sandía y arroz, sus efectos y características, el combate contra las biopelículas, la limpieza de membranas en el tratamiento de agua, los modelos de simulación para nanoburbujas.

En 2023 y 2024, se observa una disminución en el número de artículos publicados, aunque la producción sigue siendo significativamente mayor que en los años previos a 2020, esta caída podría indicar un ajuste post crecimiento exponencial, posiblemente debido a la saturación del mercado de publicaciones, cambios en las políticas de financiación, o un regreso a niveles más sostenibles de producción.

Figura 15

Promedio de Citas por año para los 80 documentos del segundo cuartil.



Desde 2009 hasta 2010, se observa un notable descenso en el promedio de citas, pasando de un promedio de más de 6 citas por año en 2009 a menos de 2 citas por año en 2010, en cambio entre 2011 y 2018, el promedio de citas muestra cierta estabilidad con fluctuaciones moderadas. En 2019, se registra un pico significativo, con un aumento en el promedio de citas que supera las 4 citas por año, este podría indicar la publicación de documentos altamente influyentes o un aumento en la visibilidad y relevancia de los artículos en ese período, después de este pico, el promedio de citas comienza a disminuir nuevamente, con una tendencia decreciente que se acentúa hacia 2023, donde el promedio se mantiene por debajo de las 2 citas por año, esta disminución podría reflejar una menor influencia de los artículos recientes o una competencia creciente en la literatura científica.

Tabla 15

Los 10 Artículos más citados del segundo cuartil.

Artículo	DOI	Total de Citas
Scardino A., 2009, Biofouling	10.1080/08927010903165936	187
Li H., 2013, Int J Environ Res Public Health	10.3390/ijerph110100473	70
Kaack L., 2019, Iawa J	10.1163/22941932-40190259	62
Chen H., 2009, Biofouling	10.1080/08927010902807645	31
Ulatowski K., 2020, Water Environ J	10.1111/wej.12577	31
Azevedo A., 2017, Water Sci Technol	10.2166/wst.2017.113	28
Deckers S., 2011, J Am Soc Brew Chem	10.1094/ASBCJ-2011-0524-01	26

Zhou W., 2018, Minerals	10.3390/min8070264	25
Nghia N., 2021, Aquac Res	10.1111/are.15124	25
Rahmawati A., 2021, Aquac Fish	10.1016/j.aaf.2020.03.005	24

El artículo más citado es de Scardino A., publicado en 2009 con 187 citas, siendo un estudio sobre superficies superhidrofóbicas y la resistencia a la bioincrustación, el cual es una base para comprender cómo las nanoburbujas contribuyen a las propiedades superhidrofóbicas y a la disuasión de la incrustación, abriendo nuevas vías para desarrollar materiales y recubrimientos más eficaces y sostenibles.

El segundo artículo más citado es de Li H., publicado en 2013, posee 70 citas, este trata sobre el comportamiento de transporte subsuperficial de micro nanoburbujas y sus aplicaciones potenciales para la remediación de aguas subterráneas.

El tercer artículo más citado es de Kaack L., publicado en 2019, posee 62 citas, este plantea la hipótesis de que las membranas de las punteaduras permiten el transporte de agua bajo presión negativa mediante la producción de nanoburbujas estables recubiertas con surfactantes, al mismo tiempo que impiden la entrada de burbujas grandes que causarían embolismo.

El cuarto artículo más citado es de Chen H., publicado en 2009, posee 31 citas, este trata sobre desincrustar y limpiar utilizando nanoburbujas en acero inoxidable.

El quinto artículo más citado es de Ulatowski K., publicado en 2020, posee 31 citas, y es una revisión de las dispersiones de nanoburbujas de gas como agente importante en procesos ambientales y sus métodos de generación.

El sexto artículo más citado es de Azevedo A., publicado en 2017, posee 28 citas, este estudia la clarificación de agua cruda mediante flotación con microburbujas y nanoburbujas generadas con una bomba multifase.

El séptimo artículo más citado es de Deckers S., publicado en 2011, posee 26 citas, este estudia la presencia de nanoburbujas en bebidas espumosas.

El octavo artículo más citado es de Zhou W., publicado en 2018, posee 25 citas, y este estudia la adherencia de las nanoburbujas en partículas hidrofobizadas y como esto

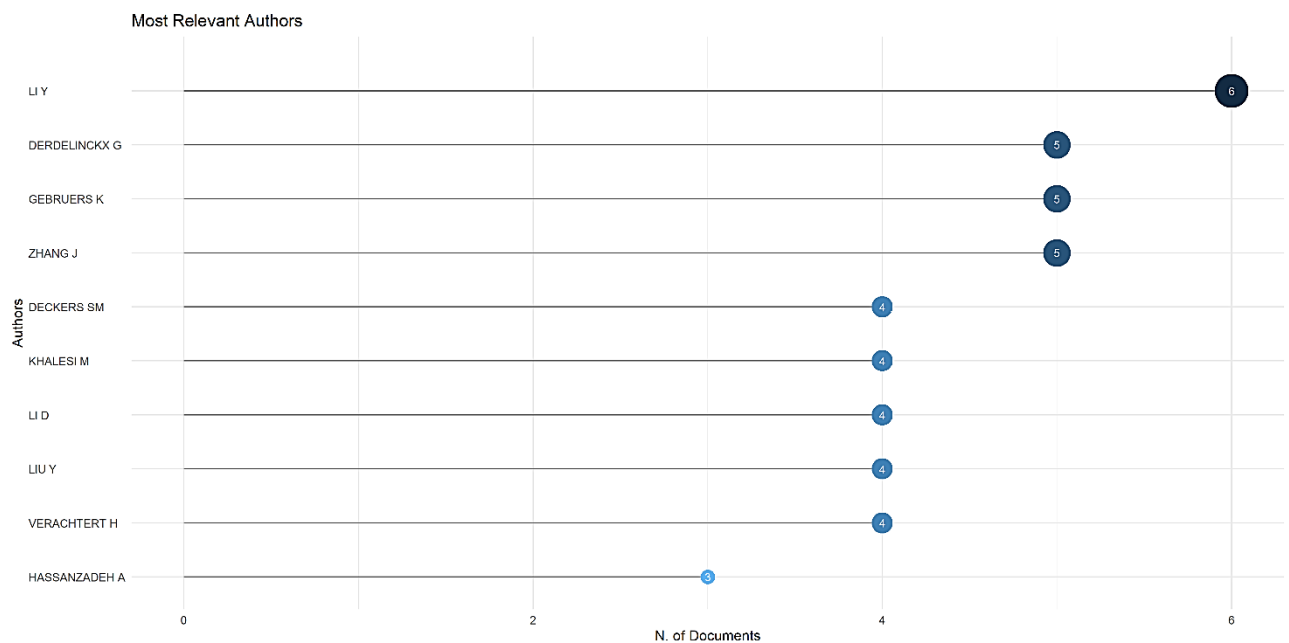
disminuye la carga superficial de los sólidos.

El noveno artículo más citado es de Nghia N., publicado en 2021, posee 25 citas, el cual trata sobre el control de *Vibrio parahaemolyticus* (cepa AHPND) y la mejora de la calidad del agua mediante la tecnología de nanoburbujas.

El décimo artículo más citado es de Rahmawati A., publicado en 2021, posee 24 citas, este estudio es sobre la mejora del crecimiento del camarón *Penaeus vannamei* utilizando nanoburbujas en estanques de circuito cerrado bajo techo.

Figura 16

Autores más relevantes entre los 80 documentos del segundo cuartil.



Li Y. con un total de 6 documentos se destaca significativamente por encima de los otros autores, siendo el más prolífico en este conjunto de datos, con una contribución notablemente mayor, a continuación, Derdelinckx G., Gebruers K. y Zhang J. ocupan el segundo lugar con 5 documentos cada uno, reflejando una influencia considerable en su campo. Existe una mayoría de autores con 3 o menos publicaciones.

Figura 17

Nube de las Palabras clave de los 80 documentos del segundo cuartil.



La frecuencia de términos como oxidación y tratamiento de aguas residuales sugiere que muchos estudios investigan cómo las nanoburbujas pueden mejorar procesos de oxidación y tratamiento de aguas residuales, abordando desafíos en la degradación de contaminantes y mejorando la calidad del agua. (Z. Chen et al., 2022) (Wei et al., 2023)

La presencia de ozono y peróxido de hidrógeno señala investigaciones sobre el uso de estos oxidantes en combinación con nanoburbujas para potenciar procesos de oxidación avanzada. (Ng et al., 2023)

El término oxígeno disuelto es recurrente, indicando que la mejora de la oxigenación del agua es una aplicación clave de las nanoburbujas, lo cual es esencial en el tratamiento de aguas y en aplicaciones ambientales. Asimismo, aguas residuales y agua subrayan el enfoque en la gestión y purificación del agua, con un interés particular en mejorar el manejo de aguas residuales y la calidad del agua. (Bai et al., 2024)

Términos como degradación, pH, y calidad del agua destacan la importancia de entender cómo las nanoburbujas afectan estos parámetros críticos en el tratamiento de aguas y en la remoción de contaminantes. La presencia de transferencia de masa y microburbuja indica estudios sobre la dinámica de fluidos y el comportamiento de burbujas en sistemas acuosos. (M. Zhao, Cui, et al., 2024)

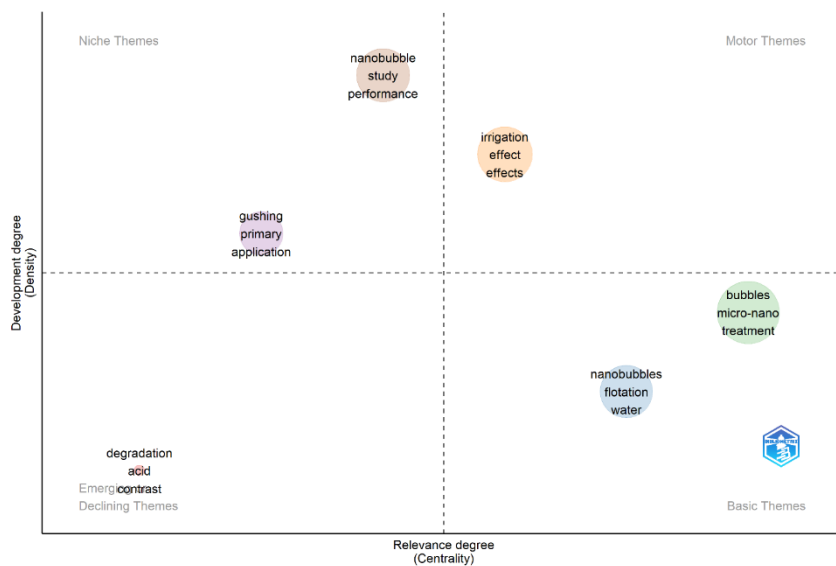
El término estudio controlado sugiere que los estudios están diseñados con rigor experimental, asegurando la validez y reproducibilidad de los resultados. La inclusión de urea

y dióxido de azufre señala aplicaciones específicas de las nanoburbujas en procesos químicos y ambientales. Términos como flotación, demanda bioquímica de oxígeno y radical hidroxilo revelan enfoques en la mejora de procesos de flotación y en la generación de radicales hidroxilo para la degradación de contaminantes. La aparición de términos como humano y gestión del agua indica que algunas investigaciones también consideran el impacto en la salud humana y la gestión integrada del agua. (Nazari et al., 2023)

La mención de demanda química de oxígeno, desnitrificación y remoción de contaminantes sugiere un enfoque en la medición y mejora de la eficiencia en la remoción de contaminantes. Finalmente, términos como cambio climático y agua subterránea reflejan la relevancia de las nanoburbujas en contextos de cambio climático y en la mejora de la calidad del agua subterránea, respectivamente. (Y. Zhang et al., 2023)

Figura 18

Mapa temático de los 80 artículos del segundo cuartil.



En este, los temas se dividen en cuatro cuadrantes:

En el cuadrante superior izquierdo, se encuentran los temas de nicho como nanoburbuja, rendimiento del estudio, erosión rápida y aplicación primaria, indicando estudios en la intersección de nanotecnología aplicada y mejoras en procesos industriales, especialmente en tratamiento de agua y modelado de fenómenos de fluidos. (Rezvani

Mahmouee et al., 2023) (Khalesi et al., 2015)

El cuadrante superior derecho alberga los temas motores como irrigación, efecto y efectos, destacando la importancia de estudiar los efectos y la eficacia de los sistemas de irrigación y su interacción con nanoburbujas y otros procesos relevantes, reflejando su relevancia y dinamismo en estos campos. (Tan et al., 2022)

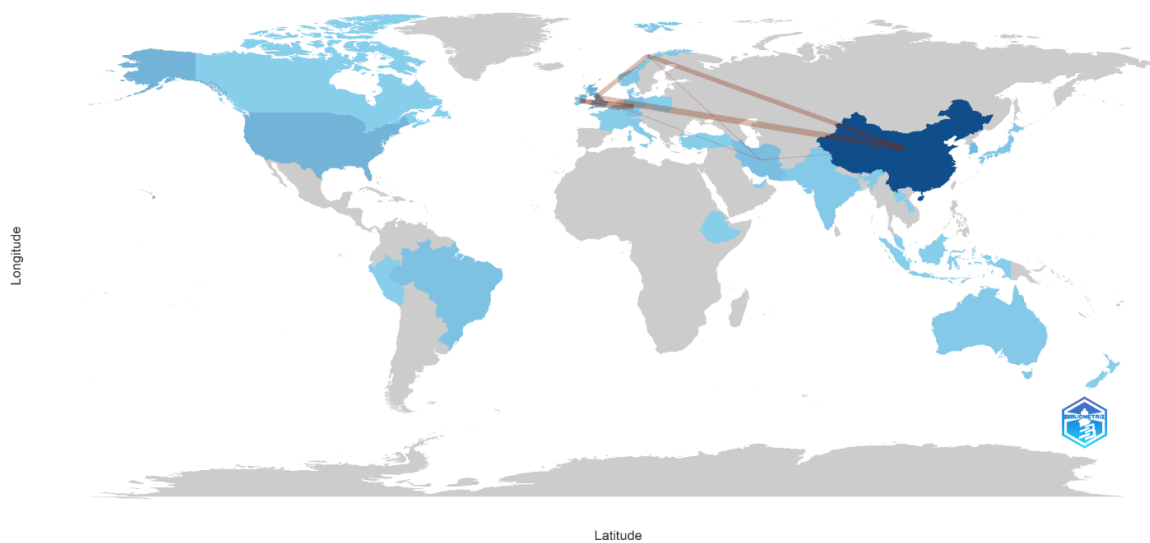
En el cuadrante inferior derecho, están los temas básicos como nanoburbujas, flotación, agua, burbujas, micronano y tratamiento aparecen prominentes. Tales términos se relacionan a títulos como “Simulación Avanzada de la Flotación de Cuarzo Usando Micro-Nanoburbujas mediante un Servicio Híbrido de Datos Históricos (HD) y Aprendizaje Profundo” y “Desarrollo de un Sistema Piloto a Escala de 10 Litros Mejorado con Micro-Nanoburbujas (MNB) para el Tratamiento de Aguas Residuales mediante Fotocatálisis”, siendo de gran interés las simulaciones o estudios de campo donde se desarrollen proyectos pilotos para tratamiento de agua y procesos minerales. (Nazari et al., 2023) (M. Zhao, Cui, et al., 2024)

El cuadrante inferior izquierdo contiene los temas emergentes o en declive, con términos como degradación, ácido y contraste indican áreas de investigación que podrían estar en fase inicial de exploración, relacionadas a los siguientes títulos “Nanoburbujas de ácido poliláctico conjugadas con lactoferrina encapsuladas con perfluoropentano como agente de contraste para imágenes de doble modalidad por ultrasonido/resonancia magnética” e “Investigación sobre la cinética y las vías de degradación de los ésteres de ácido acético gaseoso”, los cuales son estudios recientes que innovan y mejoran procesos en la biomedicina y la protección ambiental. (Ding et al., 2022) (Y. Wang et al., 2024)

Figura 19

Mapa de colaboración por países de los 80 documentos del segundo cuartil.

Country Collaboration Map



China y Estados Unidos son los principales actores en esta área de investigación, con numerosas conexiones internacionales, China aparece como el país con mayor número de colaboraciones, especialmente con países como Noruega, Reino Unido, Irán y otros como Australia, Canadá, Alemania, Nueva Zelanda, Pakistán, Suiza, y Estados Unidos, esta amplia red de colaboraciones sugiere que China es un líder en el estudio y aplicación de nanoburbujas, impulsando tanto la investigación básica como aplicada en este campo.

Europa muestra una densa red de colaboraciones, con países como Alemania, Reino Unido, Irlanda, y Suiza conectados no solo entre sí, sino también con otros países como China y Estados Unidos. Por ejemplo, Alemania tiene colaboraciones con Bélgica, Irlanda, y Suiza, mientras que el Reino Unido está conectado con Canadá, Alemania, Irán, Irlanda, Noruega y Estados Unidos, esta interconexión sugiere un entorno de investigación colaborativo en Europa, extendiéndose a otros continentes.

Asia también tiene una notable participación en la red de colaboraciones internacionales, con Japón y Corea del Sur mostrando múltiples conexiones. Japón, por ejemplo, colabora con Dinamarca y Pakistán, mientras que Corea del Sur tiene conexiones con Brasil, Etiopía, Laos, Emiratos Árabes Unidos y Estados Unidos. Estas colaboraciones reflejan su activa participación en la investigación de nanoburbujas.

América Latina y África tienen una menor representación en términos de colaboraciones

internacionales en comparación con otras regiones, sin embargo, países como Brasil y Sudáfrica están conectados con China y Europa, lo que sugiere que estas regiones están comenzando a integrarse en la red global de investigación sobre nanoburbujas. Por ejemplo, Brasil tiene colaboraciones con Emiratos Árabes Unidos y Estados Unidos, este incipiente interés puede ser crucial para el desarrollo de tecnologías agrícolas sostenibles en estas áreas, donde la productividad y la gestión eficiente de recursos son particularmente importantes.

4.1.3. Tercer Cuartil.

Figura 20

Integridad de los metadatos bibliográficos del tercer cuartil con 57 documentos de Scopus.

Metadata	Description	Missing Counts	Missing %	Status
CI	Affiliation	0	0.00	Excellent
AU	Author	0	0.00	Excellent
CR	Cited References	0	0.00	Excellent
DT	Document Type	0	0.00	Excellent
SO	Journal	0	0.00	Excellent
DE	Keywords	0	0.00	Excellent
ID	Keywords Plus	0	0.00	Excellent
LA	Language	0	0.00	Excellent
PY	Publication Year	0	0.00	Excellent
TI	Title	0	0.00	Excellent
TC	Total Citation	0	0.00	Excellent
AB	Abstract	1	1.75	Good
RP	Corresponding Author	1	1.75	Good
DI	DOI	9	15.79	Acceptable
WC	Science Categories	57	100.00	Completely missing

Del análisis en cuanto a la calidad de los 57 documentos pertenecientes al tercer cuartil, tenemos que la mayoría de los metadatos de este cuartil se encuentran completos, con 11 de los 15 tipos evaluados como Excelentes, sólo una categoría aquella referida a la clasificación de la Web of Science (WC) está calificada como ausente en todos los documentos, ya que esta base de datos no fue utilizada en esta investigación, y a pesar de que algunos metadatos poseen un pequeño porcentaje de faltantes, la integridad general de

la información está clasificada como buena.

Tabla 16

Información Principal de los documentos del tercer cuartil.

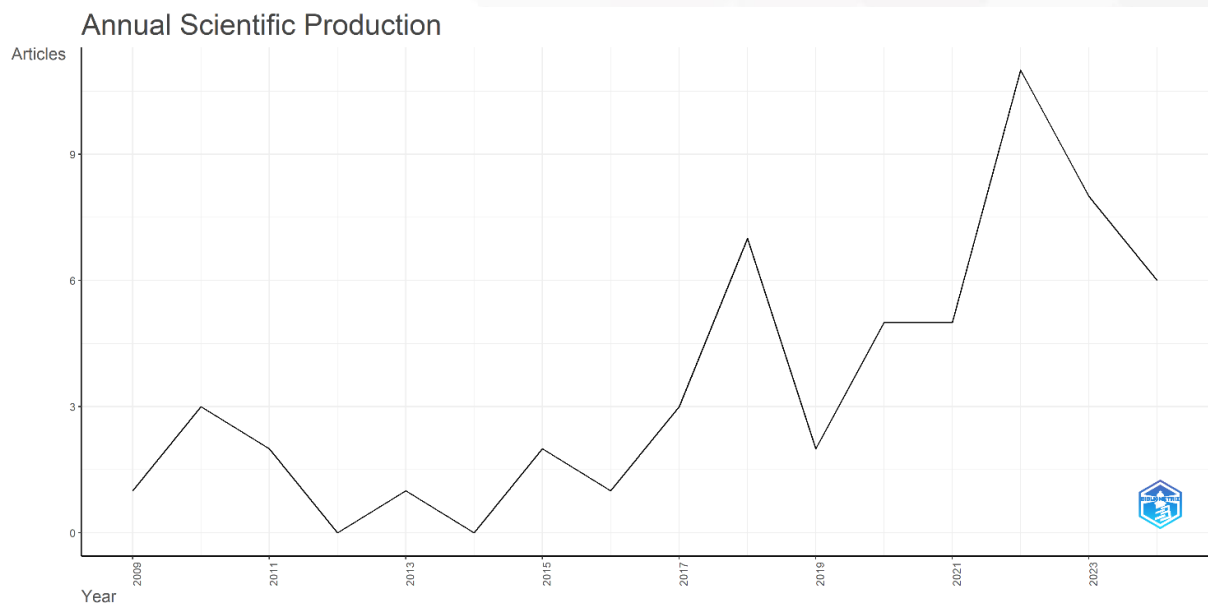
Descripción	Resultados
Periodo de tiempo	2009:2024
Fuentes (Revistas, Libros, etc.)	24
Documentos	57
Tasa de crecimiento anual %	12.69
Edad promedio del documento	4.53
Citas promedio por documento	12.33
Referencias	2319
Palabras clave adicionales (ID)	410
Palabras clave del autor (DE)	125
Autores	198
Autores de documentos de autor único	0
Coautores por documento	4.18
Porcentaje de coautorías internacionales	15.79
Artículo	47
Ponencia de conferencia	5
Editorial	1
Revisión	4

La tabla proporciona una visión de los datos bibliométricos recopilados entre 2009 y 2024, siendo un total de 24 fuentes y 57 documentos, con una tasa de crecimiento anual del 12,69%, indicando un incremento constante en la producción académica, además tenemos que la edad promedio de estos es de 4,53 años, lo que sugiere que el conjunto de datos es relativamente reciente, y que cada documento recibe 12,33 citas, demostrando un impacto significativo en su campo correspondiente.

Hay 198 autores involucrados, y ninguno de estos documentos es de autor único, enfatizando la tendencia hacia la colaboración, con un promedio de 4,18 coautores por documento. El 15,79% de las publicaciones son resultado de coautorías internacionales, subrayando la naturaleza global de la investigación. Los tipos de documentos están dominados por artículos (47), seguidos de ponencias de conferencias (5), revisiones (4) y editoriales (1), lo que sugiere que la mayoría de los trabajos publicados son contribuciones originales de investigación y presentaciones en conferencias.

Figura 21

Producción científica Anual de los 57 documentos del tercer cuartil.



El gráfico muestra la producción científica anual en términos de los artículos publicados desde el año 2009 hasta 2024, con un total de 57 documentos en el tercer cuartil. A lo largo de este período, se observa una tendencia general de aumento en la cantidad de artículos publicados por año, con algunas características destacables:

Durante los primeros años del periodo (2009-2015), la producción científica se mantuvo relativamente estable, con un crecimiento muy gradual y un bajo número de artículos publicados por año, en estos años, se registran solo uno o dos artículos publicados anualmente, lo que refleja una actividad de investigación y publicación limitada.

A partir de 2016, comienza a observarse un incremento más notable en la producción, aunque sigue siendo moderado.

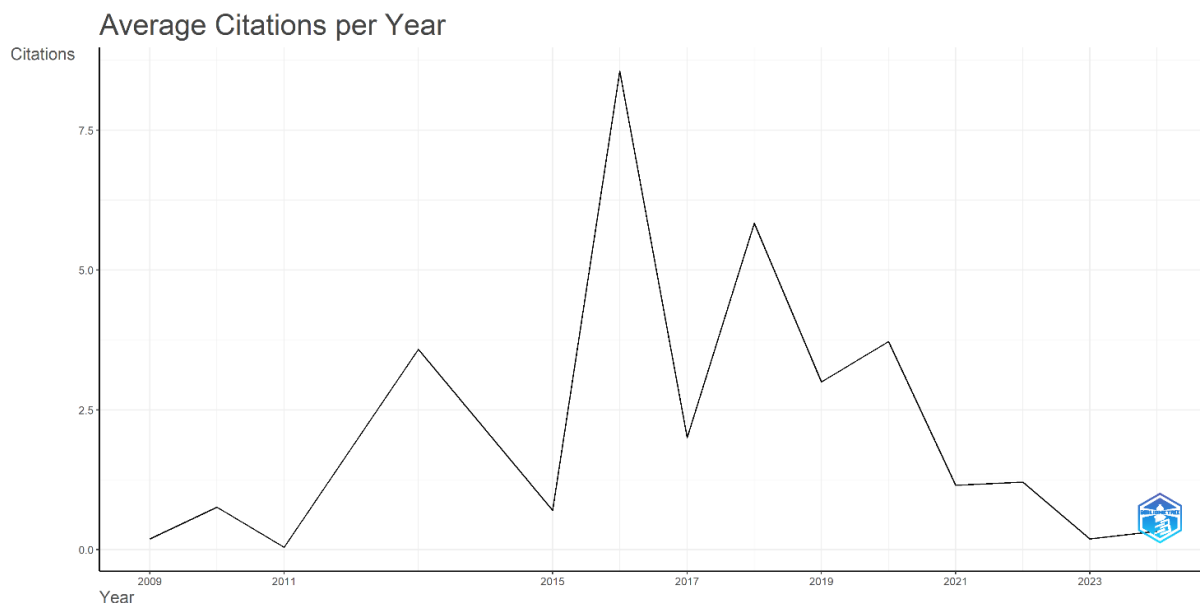
A partir de 2020, la producción científica experimenta un crecimiento exponencial, alcanzando su punto más alto en 2022 con más de 11 artículos publicados en ese año, con temas de investigación emergentes como la aplicación de nanoburbujas y carbón en el transporte cerrado de semillas de *Litopenaeus vannamei* y en la crianza de camarones, los tratamientos con nanoburbujas de ozono que demuestran aumentar la vida en florero de flores cortadas como el *Cymbidium* 'Spring Pearl', la remediación de aguas subterráneas y el

tratamiento de suelos contaminados con diésel y la flotación de carbón mediante nanoburbujas y su uso en los procesos de separación y purificación en la industria minera.

En 2023 y 2024, se observa una disminución en el número de artículos publicados, aunque la producción sigue siendo significativamente mayor que en los años previos a 2020, esta caída podría indicar un ajuste post crecimiento exponencial, posiblemente debido a la saturación del mercado de publicaciones, cambios en las políticas de financiación, o un regreso a niveles más sostenibles de producción.

Figura 22

Promedio de Citas por año para los 57 documentos del tercer cuartil.



Existen picos significativos en 2013 y 2016, relacionados a la publicación de documentos altamente influyentes o un aumento en la visibilidad y relevancia de los artículos en ese periodo.

A partir de 2017, se observa un nuevo aumento, alcanzando otro pico menor alrededor de 2018, posteriormente, el promedio de citas comienza a disminuir nuevamente, con una tendencia decreciente que se acentúa hacia 2024.

Tabla 17

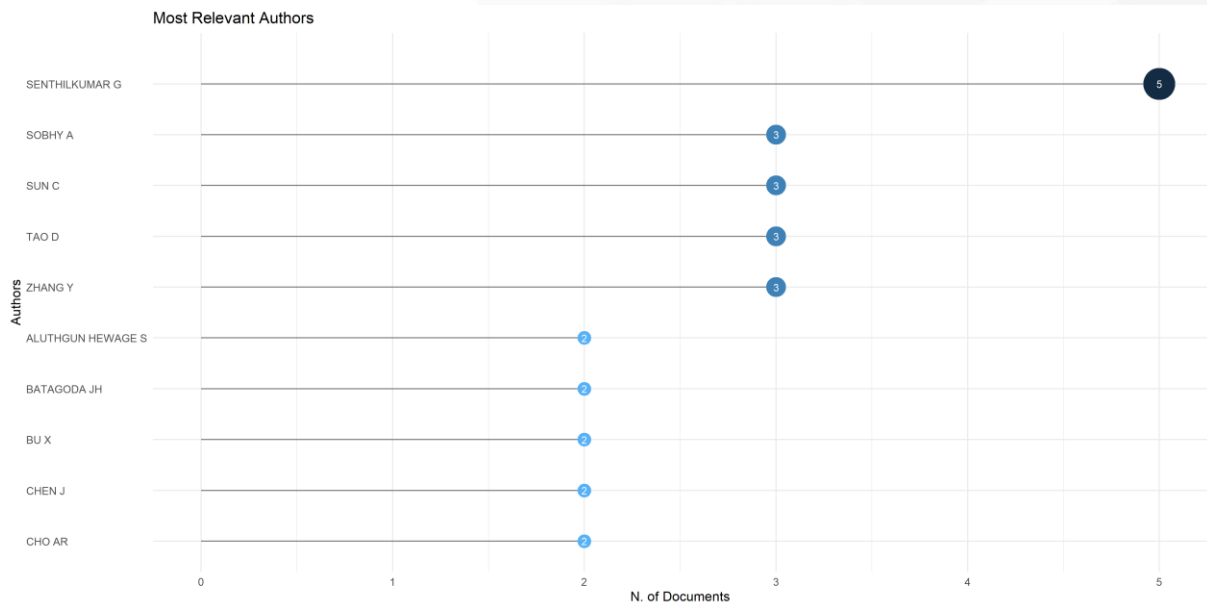
Los 10 Artículos más citados del tercer cuartil.

Artículo	DOI	Total de Citaciones
Meegoda J., 2018, Environ Eng Sci	10.1089/ees.2018.0203	142
Gurung A., 2016, Geosystem Eng	10.1080/12269328.2016.1153987	77
Ahmed A., 2018, Environ Eng Sci	10.1089/ees.2017.0377	67
Khan P., 2020, Water Sci Technol Water Supply	10.2166/ws.2020.121	47
Sobhy A., 2013, Int J Coal Preparation Utilization	10.1080/19392699.2013.810623	43
Pourkarimi Z., 2017, Physicochem Probl Miner Process	10.5277/ppmp170220	41
Deckers S., 2010, Brewingscience		31
Bu X., 2018, Physicochem Probl Miner Process	10.5277/ppmp1873	30
Pourkarimi Z., 2018, Physicochem Probl Miner Process	10.5277/ppmp1804	23
Sobhy A., 2019, Int J Coal Preparation Utilization	10.1080/19392699.2018.1459582	21

El artículo más citado es de Meegoda J., publicado en 2018 con un total de 142 citas, que trata sobre la estabilidad de las nanoburbujas. Otros artículos significativos incluyen el trabajo de Gurung A, publicado en 2016 con 77 citas que trata sobre los fenómenos fundamentales de las nanoburbujas y su comportamiento en las tecnologías de tratamiento de aguas residuales, y el artículo de Ahmed Aka, publicado en 2018 con 67 citas que habla de las propiedades coloidales de nanoburbujas de aire, oxígeno y nitrógeno en agua, estos resultados indican un interés continuo en los temas abordados por estos artículos, especialmente en años recientes (2018 y 2019).

Figura 23

Autores más relevantes entre los 57 documentos del tercer cuartil.



El autor más prolífico es Senthilkumar G., con un total de 5 artículos publicados, luego encontramos a Sobhy A., Tao D., y Zhang Y., cada uno con 3 artículos publicados, lo que los sitúa como contribuyentes significativos en este campo de investigación.

Figura 24

Nube de las Palabras clave de los 57 documentos del tercer cuartil.



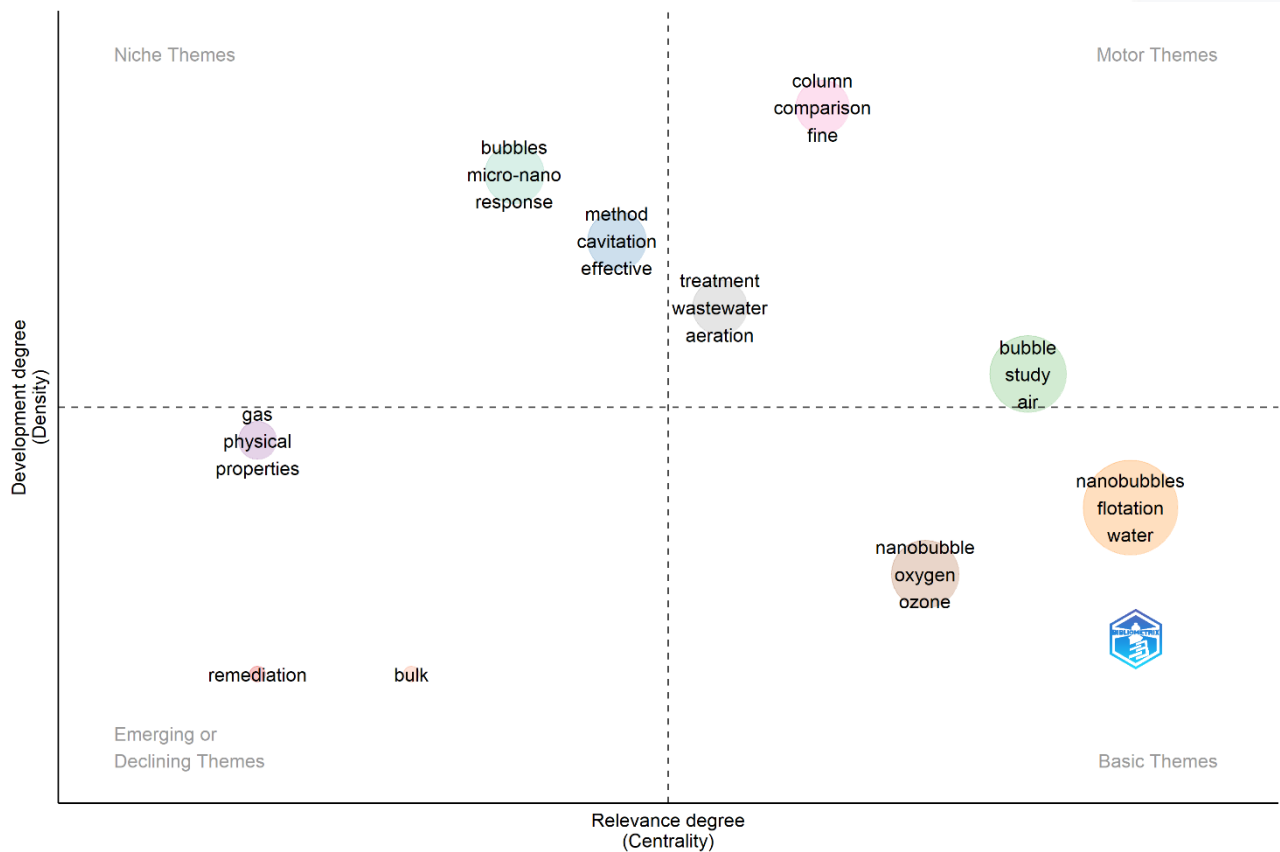
Nanoburbujas, burbuja, flotación y tratamiento del agua son los términos más destacados, lo que sugiere un enfoque significativo en estos temas en los 57 documentos del

tercer cuartil. La presencia repetida de artículo, nanoburbuja y tratamiento de aguas residuales indica un énfasis particular en estos aspectos específicos de la investigación.

Otros términos como aireación, nanotecnología, oxidación, tamaño de partícula y potencial zeta también son frecuentes, lo que sugiere un interés adicional en las propiedades físico-químicas de las nanoburbujas y su impacto en procesos como la oxidación y la adsorción de contaminantes. La aparición de términos como aire, oxígeno, oxígeno disuelto, dióxido de carbono y nitrógeno refuerza la idea de que la oxigenación del agua y su tratamiento es un tema importante en esta área de investigación.

Figura 25

Mapa temático de los 57 artículos del tercer cuartil.



En el cuadrante superior izquierdo se encuentran los temas de nicho como burbujas, micronano, respuesta, método, cavitación y efectivo, esto indica investigaciones específicas relacionadas con la tecnología de micro y nano burbujas, sus métodos de aplicación y su efectividad, así como los fenómenos de cavitación y respuestas específicas a estos métodos,

estos estudios son importantes para aplicaciones muy particulares y específicas, pero no tienen un amplio impacto en el campo general. (Nazari et al., 2020)

El cuadrante superior derecho alberga los temas motores como columna, comparación, fino, tratamiento, aguas residuales, aireación, burbuja, estudio y aire, esto destaca la importancia de los estudios sobre el tratamiento de aguas residuales, la aireación y el uso de columnas de burbujas finas, la comparación de métodos y la efectividad de diferentes tratamientos son temas críticos en esta área, subrayando la relevancia de mejorar las tecnologías para la purificación y tratamiento del agua, lo cual es crucial para el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente. (Ahmed, Sun, Hua, Zhang, Zhang, Marhaba, et al., 2018)

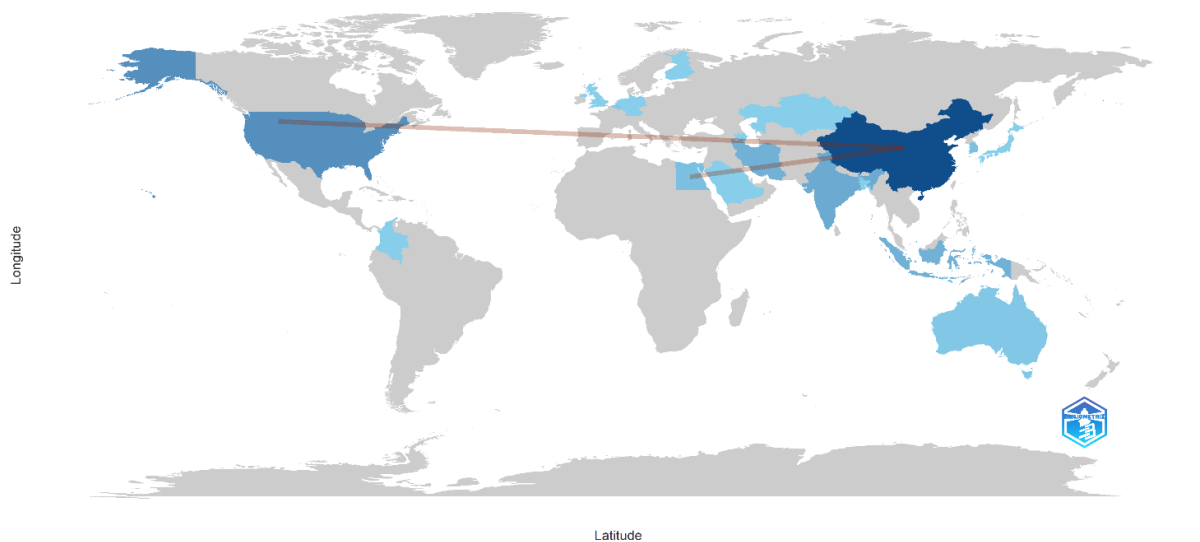
En el cuadrante inferior derecho están los temas básicos, aquí, términos como nanoburbuja, oxígeno, ozono, flotación y agua aparecen prominentes, esto sugiere que la investigación sobre nanoburbujas y su aplicación en procesos de oxigenación, ozonización y flotación en el tratamiento de agua es esencial pero aún puede expandirse, estos temas son fundamentales, y su desarrollo podría tener un gran impacto en la mejora de tecnologías de tratamiento de agua y en aplicaciones industriales diversas.

El cuadrante inferior izquierdo contiene los temas emergentes o en declive, que tienen baja relevancia y están menos desarrollados, aquí, los términos como gas, físico, propiedades, remediación y a granel indican áreas de investigación que podrían estar en fase inicial de exploración relacionados a los siguientes títulos “Cosecha de *Dunaliella salina* utilizando electrocoagulación producción de gas como prometedor combustible de hidrógeno” y “Efecto de las nanoburbujas a granel en la floculación de caolín en presencia de poliacrilamida catiónica”, estos representan áreas emergentes dentro del estudio de las nanoburbujas debido a su potencial para innovar y mejorar procesos en bioenergía, tratamiento de aguas y aplicaciones industriales. (J. Sha et al., 2024) (Purwono et al., 2024)

Figura 26

Mapa de colaboración por países de los 57 documentos del tercer cuartil.

Country Collaboration Map



China y Estados Unidos son los principales actores en esta área de investigación, con numerosas conexiones internacionales, China aparece como el país con mayor número de colaboraciones, con enlaces significativos con Egipto (3 colaboraciones), Estados Unidos (3 colaboraciones), Alemania, Irán y Arabia Saudita, esta amplia red de colaboraciones sugiere que China desempeña un papel central en el avance de la investigación sobre nanoburbujas, colaborando tanto con países de Europa como de Asia y África, lo que indica su liderazgo y su interés en impulsar tanto la investigación básica como aplicada en este campo.

Estados Unidos también muestra una red significativa de colaboraciones, conectándose con China (3 colaboraciones), Egipto y Corea del Sur, la colaboración con Corea del Sur y Egipto indica la diversificación de sus esfuerzos de investigación y su interés en asociarse con países de diferentes regiones para avanzar en este campo tecnológico.

Europa, representada por Alemania, muestra conexiones con China e Irán, lo que destaca la participación europea en la investigación sobre nanoburbujas y su colaboración con países asiáticos, esta interacción sugiere que Europa está comprometida con el

desarrollo y la innovación en esta área, aunque con una menor cantidad de conexiones comparadas con China y Estados Unidos.

Irán, con colaboraciones con Alemania y China, muestra su participación activa en la investigación sobre nanoburbujas, destacando su esfuerzo por integrarse en la red internacional de investigación.

Egipto, con colaboraciones tanto con China como con Estados Unidos, demuestra su interés y participación en el desarrollo de tecnologías basadas en nanoburbujas, esta colaboración indica un enfoque hacia la mejora de tecnologías agrícolas y de tratamiento de agua, áreas críticas para su desarrollo sostenible.

4.1.4. Cuarto Cuartil

Figura 27

Integridad de los metadatos bibliográficos del cuarto cuartil con 10 documentos de Scopus.

Metadata	Description	Missing Counts	Missing %	Status
AB	Abstract	0	0.00	Excellent
C1	Affiliation	0	0.00	Excellent
AU	Author	0	0.00	Excellent
CR	Cited References	0	0.00	Excellent
DI	DOI	0	0.00	Excellent
DT	Document Type	0	0.00	Excellent
SO	Journal	0	0.00	Excellent
DE	Keywords	0	0.00	Excellent
ID	Keywords Plus	0	0.00	Excellent
LA	Language	0	0.00	Excellent
PY	Publication Year	0	0.00	Excellent
TI	Title	0	0.00	Excellent
TC	Total Citation	0	0.00	Excellent
RP	Corresponding Author	3	30.00	Poor
WC	Science Categories	10	100.00	Completely missing

Del análisis en cuanto a la calidad de los 10 documentos pertenecientes al cuarto cuartil, tenemos que la mayoría de los metadatos de este cuartil se encuentran completos, con 13 de los 15 tipos evaluados como Excelentes, sin embargo, se observa que hay una categoría de metadatos, aquella referida a la clasificación de la Web of Science (WC)

calificada como ausente en todos los documentos, debido a que esta base de datos no fue usada en esta investigación, y a pesar de que algunos metadatos poseen un pequeño porcentaje de faltantes, como el Autor Correspondiente (RP) con un 30.00% de ausencia, la integridad general de la información está clasificada como buena.

Tabla 18

Información Principal de los documentos del cuarto cuartil.

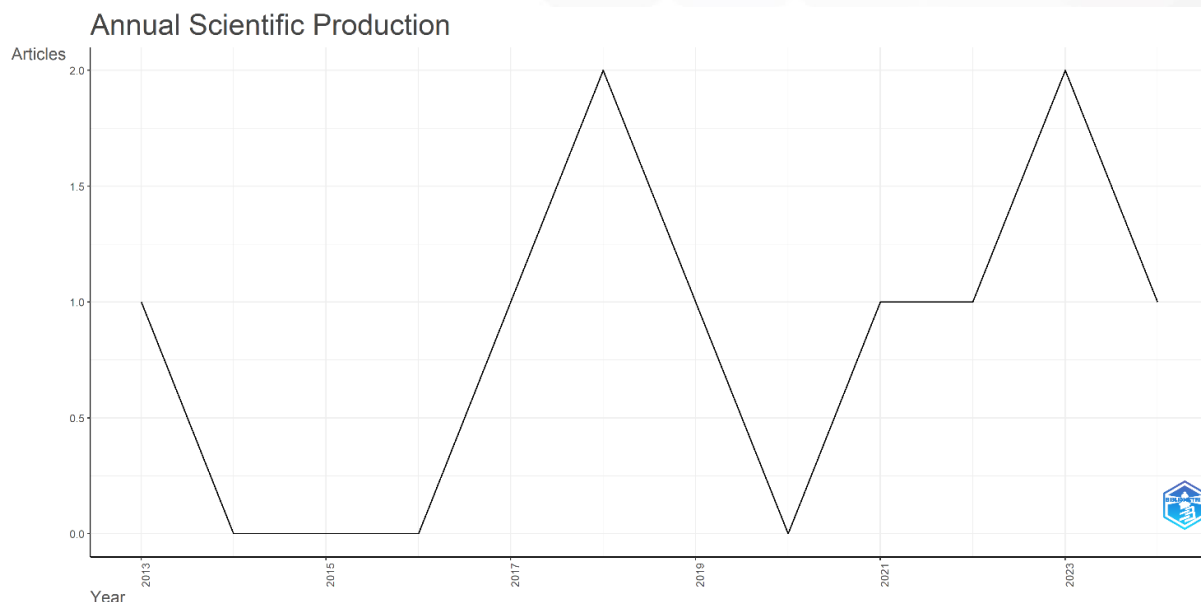
Descripción	Resultados
Período de tiempo	2013:2024
Fuentes (Revistas, Libros, etc)	6
Documentos	10
Tasa de crecimiento anual %	0
Edad promedio del documento	4.2
Citas promedio por documento	13.5
Referencias	410
Palabras clave (ID)	55
Palabras clave del autor (DE)	10
Autores	44
Autores de documentos de autor único	0
Coautores por documento	5
Porcentaje de coautorías internacionales	10
Artículo	8
Ponencia de conferencia	1
Revisión	1

La tabla proporciona una visión de los datos bibliométricos recopilados entre 2013 y 2024, siendo un total de 6 fuentes y 10 documentos del cuarto cuartil, con una tasa de crecimiento anual del 0%, indicando una estabilidad en la producción académica, a su vez, la edad promedio de los documentos es de 4.2 años, lo que sugiere que el conjunto de datos es relativamente reciente, continuando, tenemos que en promedio, cada documento recibe 13.5 citas, lo cual demuestra un impacto moderado en el campo correspondiente.

En términos de autoría, hay 44 autores involucrados, pero ninguno de estos documentos es de autor único, lo que enfatiza la tendencia hacia la colaboración, con un promedio de 5 coautores por documento, además, tenemos que el 10% de las publicaciones son resultado de coautorías internacionales, subrayando la naturaleza global de la investigación. Los tipos de documentos están dominados por artículos, siendo estos 8, seguidos de una ponencia de conferencia y una revisión.

Figura 28

Producción científica Anual de los 10 documentos del cuarto cuartil.



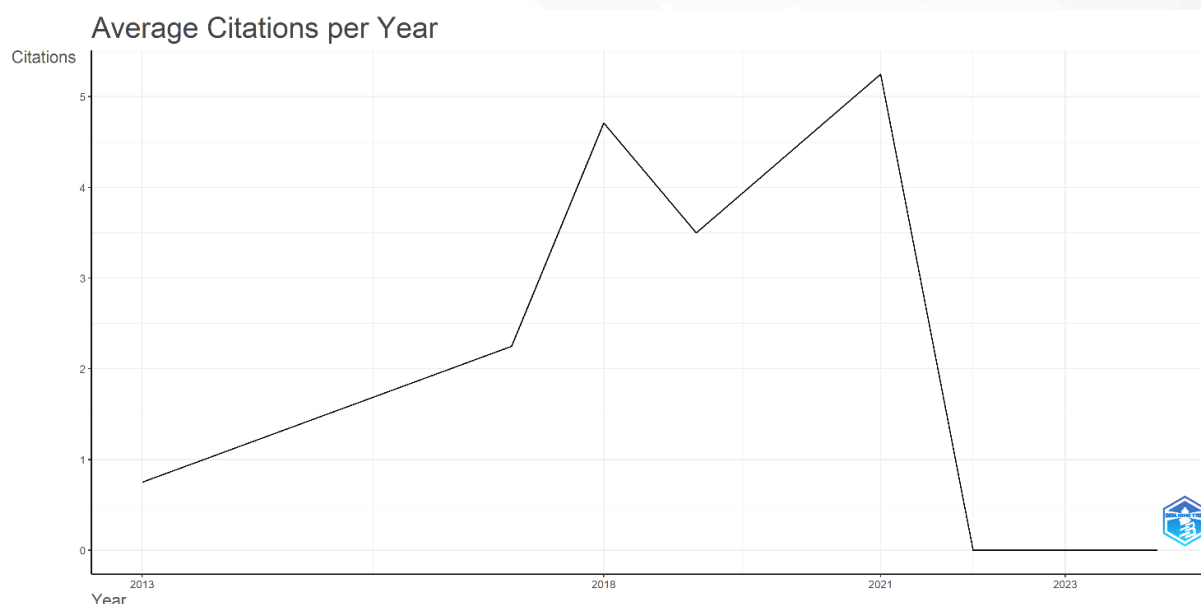
El gráfico muestra la producción científica anual en términos de los artículos publicados desde el año 2013 hasta 2024, a lo largo de este periodo, se observa una tendencia general de fluctuación en la cantidad de artículos publicados anualmente.

En 2015, no se registraron publicaciones, indicando una caída en la producción científica para ese año, a partir de 2016, comienza a observarse un incremento notable en la producción, alcanzando un pico en 2018 con 2 artículos publicados.

En los años siguientes, la producción experimenta fluctuaciones significativas. En 2018, la producción científica vuelve a caer a cero, pero se recupera nuevamente en 2019, esta tendencia de altibajos continúa, con años de baja producción como 2020, donde no se publicaron artículos, seguido por un repunte en 2021 y 2022, alcanzando nuevamente 1 artículo publicado en cada uno de esos años. En 2023, se observa otro incremento, con la publicación de 2 artículos.

Figura 29

Promedio de Citas por año para los 10 documentos del cuarto cuartil.



A partir de 2017, hay un notable aumento en el promedio de citas, alcanzando un pico significativo en 2018, donde se registran más de 4 citas por año, sin embargo, en 2019, hay una disminución abrupta en el promedio de citas.

Después de 2019, se observa una recuperación en 2021, donde el promedio de citas por año vuelve a alcanzar más de 4 citas, indicando otro periodo de alta influencia y visibilidad de los documentos publicados, no obstante, a partir de 2022, el promedio de citas comienza a disminuir drásticamente, llegando a prácticamente 0 citas por año en 2023.

Tabla 19

Los 5 Artículos más citados del cuarto cuartil.

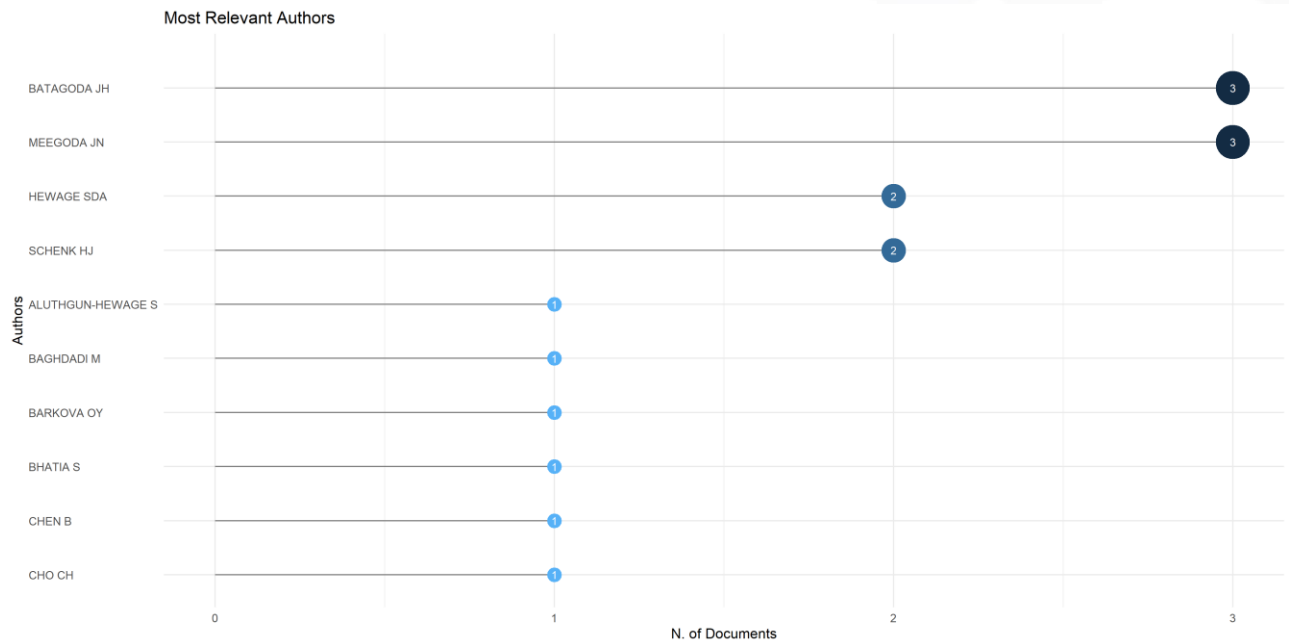
Artículo	DOI	Total de Citas
Batagoda J., 2018, J Environ Eng Sci	10.1680/jenes.18.00015	37
Jansen S., 2018, Acta Horti	10.17660/ActaHortic.2018.1222.3	29
Batagoda J., 2019, J Environ Eng Sci	10.1680/jenes.18.00012	21
Singh B., 2021, Toxicol Environ Health Sci	10.1007/s13530-021-00081-x	21
Meegoda J., 2017, J Environ Eng Sci	10.1680/jenes.17.00006	18

El artículo más citado es de Batagoda J., publicado en 2018 con 37 citas, sobre el

tratamiento de aguas residuales con nanoburbujas de ozono, seguido por Jansen S. en 2018 con 29 citas el cual habla de los desafíos en la comprensión de la entrada de aire en el xilema de angiospermas, seguido por Singh B. en 2021 con 21 citas el cual estudia los efectos y aplicaciones de las nanoburbujas en la purificación del agua.

Figura 30

Autores más relevantes entre los 10 documentos del cuarto cuartil.



Batagoda J. y Meegoda J., con un total de 3 documentos cada uno, se destacan significativamente por encima de los otros autores, siendo los más prolíficos en este conjunto de datos, con una contribución notablemente mayor.

Figura 31

Nube de las Palabras clave de los 10 documentos del cuarto cuartil.



El término más destacado es ozono, lo que indica que una gran cantidad de estos estudios se centran en el uso, propiedades y aplicaciones del ozono. Las palabras contaminante orgánico persistente y tratamiento in situ son también términos prominentes, sugiriendo que muchos de los documentos investigan cómo el ozono puede ser utilizado para tratar contaminantes persistentes directamente en el lugar de origen, siendo relevante en contextos de descontaminación ambiental y tratamiento de aguas residuales.

El término burbuja micro también aparece frecuentemente, lo que sugiere que hay un interés considerable en el uso de microburbujas junto con el ozono, posiblemente para mejorar la eficiencia de procesos de oxigenación y tratamiento de aguas. Términos como desinfección, descontaminación y eliminación de contaminantes resaltan el enfoque de estas investigaciones en métodos de limpieza y purificación.

Además, palabras como floculación, degradación, solubilización, cloro, radical libre e intercambio iónico indica que hay investigaciones comparativas y combinadas con otros métodos y agentes químicos para optimizar los resultados de descontaminación y tratamiento.

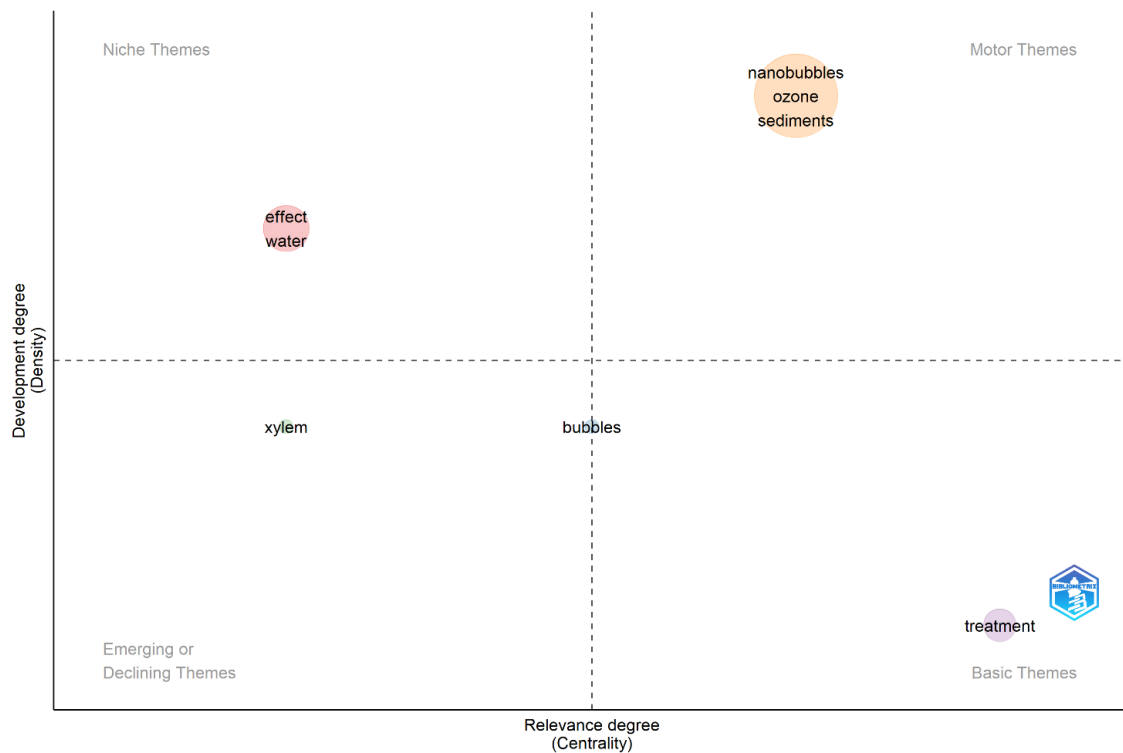
Palabras como sedimentos contaminados, río y oxígeno disuelto indican que las investigaciones también se centran en la mejora de la calidad del agua en entornos naturales, un aspecto crucial para la salud ambiental y la sostenibilidad.

Finalmente, términos como innovación en investigación y tecnologías emergentes confirman que estos estudios están en la vanguardia de la ciencia y la tecnología, buscando

nuevas y mejoradas aplicaciones para abordar desafíos ambientales complejos.

Figura 32

Mapa temático de los títulos de los 10 artículos del cuarto cuartil.



En este los temas se dividen en cuatro cuadrantes:

En el cuadrante superior izquierdo, se encuentran los temas de nicho como efecto y agua, indicando estudios específicos relacionados con los efectos en el agua en diferentes contextos.

El cuadrante superior derecho alberga los temas motores encontrándose términos como nanoburbujas, ozono y sedimentos, destacando la importancia del uso de nanoburbujas

y ozono en la remediación de sedimentos y otros estudios ambientales críticos.

En el cuadrante inferior derecho, están los temas básicos, aquí, términos como tratamiento aparecen prominentes, indicando que la investigación sobre métodos de tratamiento es esencial pero aún puede expandirse, sugiriendo un gran potencial de desarrollo.

El cuadrante inferior izquierdo contiene los temas emergentes o en declive, que tienen baja relevancia y están menos desarrollados, aquí, los términos como xilema y burbujas indican áreas de investigación de posible declive en términos de interés.

4.1.5. Cuartil indefinido.

Figura 33

Integridad de los metadatos bibliográficos del cuartil indefinido con 78 documentos de Scopus.

Metadata	Description	Missing Counts	Missing %	Status
AU	Author	0	0.00	Excellent
DT	Document Type	0	0.00	Excellent
SO	Journal	0	0.00	Excellent
DE	Keywords	0	0.00	Excellent
ID	Keywords Plus	0	0.00	Excellent
LA	Language	0	0.00	Excellent
PY	Publication Year	0	0.00	Excellent
TI	Title	0	0.00	Excellent
TC	Total Citation	0	0.00	Excellent
AB	Abstract	2	2.56	Good
C1	Affiliation	3	3.85	Good
CR	Cited References	5	6.41	Good
RP	Corresponding Author	21	26.92	Poor
DI	DOI	29	37.18	Poor
WC	Science Categories	78	100.00	Completely missing

Del análisis en cuanto a la calidad de los 78 documentos pertenecientes al cuartil indefinido, tenemos que la mayoría de los metadatos de este cuartil se encuentran completos, con 10 de los 15 tipos evaluados como Excelentes, solo una categoría de metadatos, aquella referida a la clasificación de la Web of Science (WC), está calificada como ausente en todos los documentos, debido a que esta base de datos no fue usada en esta investigación.

Algunos metadatos poseen un porcentaje de faltantes, por ejemplo, el resumen (AB)

tiene un 2.56% de datos faltantes, la afiliación (C1) tiene un 3.85%, y las referencias citadas (CR) tienen un 6.41%. Además, los autores correspondientes (RP) y los DOIs (DI) tienen porcentajes de datos faltantes más altos, con un 26.92% y un 37.18% respectivamente, lo que los clasifica como metadatos pobres en estos documentos.

Tabla 20

Información Principal de los documentos del cuartil indefinido.

Descripción	Resultados
Período de tiempo	2005-2024
Fuentes (Revistas, Libros, etc.)	46
Documentos	78
Tasa de crecimiento anual (%)	4.56
Edad promedio del documento	6.91 años
Citas promedio por documento	18.95
Referencias	2696
Palabras clave (ID)	423
Palabras clave del autor (DE)	127
Autores	228
Autores de documentos de autor único	10
Coautores por documento	3.81
Porcentaje de coautorías internacionales	21.79%
Artículo	30
Ponencia de conferencia	36
Revisión	4

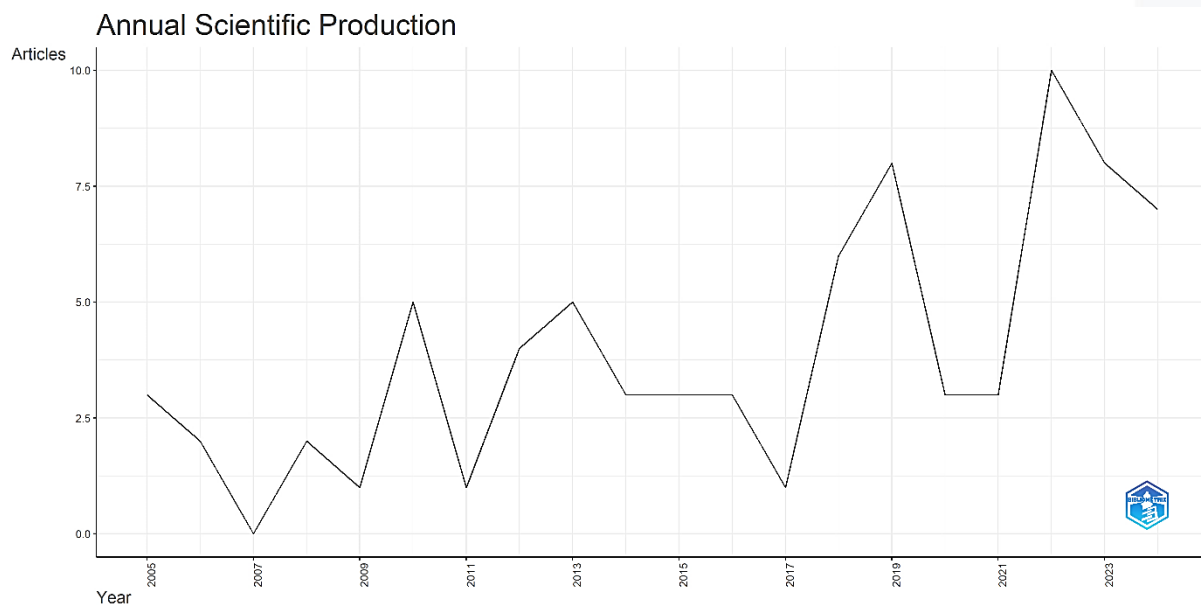
La tabla proporciona una visión de los datos bibliométricos recopilados entre 2005 y 2024, siendo un total de 46 fuentes y 78 documentos del cuartil indefinido, estos con una tasa de crecimiento anual del 4.56%, que indica un incremento moderado en la producción académica a lo largo de los años y con una edad promedio de 6.91 años, lo que sugiere que el conjunto de datos incluye una mezcla de publicaciones recientes y más antiguas. En promedio, cada documento recibe 18.95 citas, demostrando un impacto significativo en su campo respectivo.

En términos de autoría, hay 228 autores involucrados, con 10 documentos de autor único, lo que indica una tendencia hacia la colaboración, con un promedio de 3.81 coautores por documento, además, el 21.79% de las publicaciones son resultado de coautorías internacionales, subrayando la naturaleza global de la investigación. Los tipos de documentos están dominados por ponencias de conferencia, siendo estas 36, seguidas de artículos con

un total de 30 y revisiones con 4.

Figura 34

Producción científica Anual de los 78 documentos del cuartil indefinido.



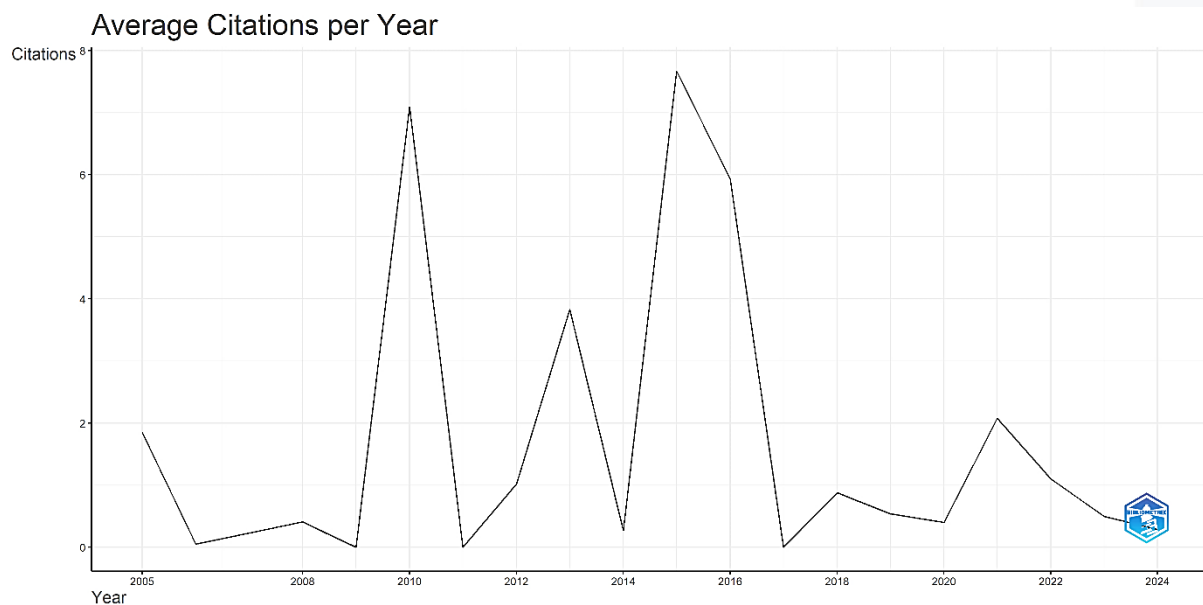
El gráfico muestra la producción científica anual en términos de los artículos publicados desde el año 2005 hasta 2024, a lo largo de este periodo, se observa una variabilidad notable en la cantidad de artículos publicados anualmente, con algunas características destacables.

Durante los primeros años del periodo (2005-2007), la producción científica muestra una tendencia decreciente, con un bajo número de artículos publicados por año. Entre 2008 y 2017, hay fluctuaciones en la producción, con algunos picos notables, pero en general, la cantidad de artículos permanece en un rango bajo a moderado.

En 2018, la producción científica experimenta un crecimiento más significativo, alcanzando su punto más alto en 2022 con más de 10 artículos publicados en ese año. En 2023, se observa una disminución en el número de artículos publicados. Aunque la producción sigue siendo mayor que en años anteriores.

Figura 35

Promedio de Citas por año para los 78 documentos del cuartil indefinido.



Entre 2005 y 2009, el promedio de citas por año se mantuvo relativamente bajo, con una leve tendencia decreciente. En 2010, hay un notable aumento en el promedio de citas, alcanzando un pico significativo en 2011, donde se registran más de 7 citas por año, este pico puede indicar la publicación de documentos altamente influyentes o un aumento en la visibilidad y relevancia de los artículos en ese periodo.

En 2015, se observa otro aumento considerable, alcanzando un segundo pico significativo, este comportamiento sugiere otra ola de documentos altamente citados o un aumento temporal en la visibilidad de los trabajos publicados durante esos años.

Posteriormente, el promedio de citas comienza a disminuir nuevamente, con una tendencia decreciente que se acentúa hacia 2020. Entre 2020 y 2024, se observa un aumento ligero en el promedio de citas en 2022, seguido de otra disminución en los años siguientes.

Tabla 21

Los 10 Artículos más citados del cuartil indefinido.

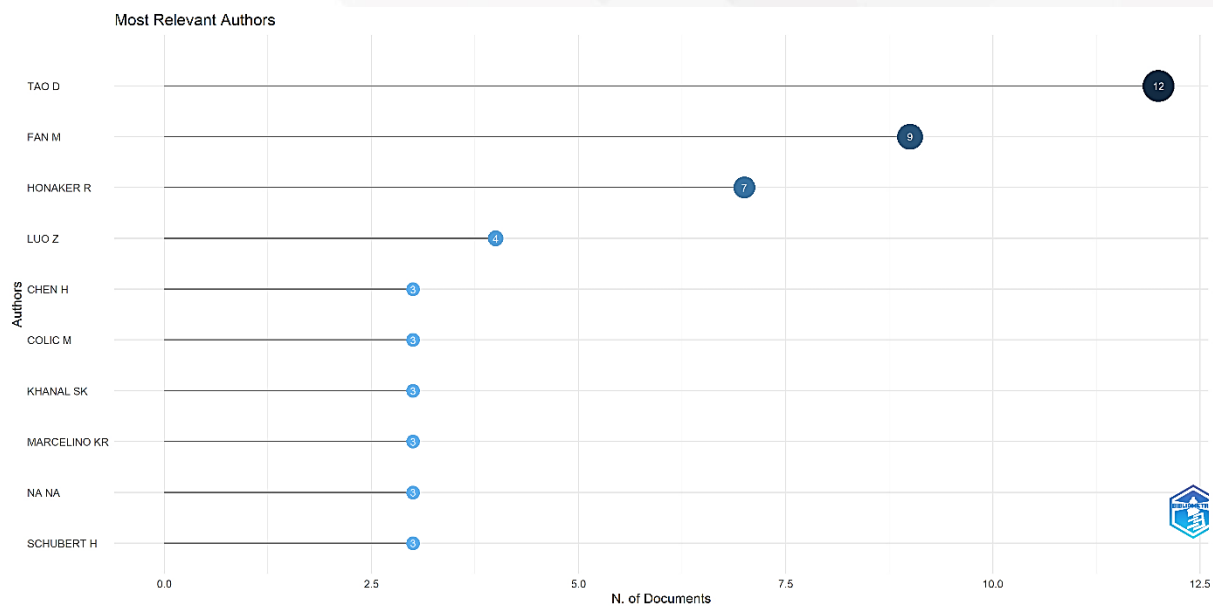
Artículo	DOI	Total de Citas
Fan M., 2010, Min Sci Technol (China)-A-B-C	10.1016/S1674-5264(09)60154-X	196
Calgaroto S., 2015, Int J Miner Process	10.1016/J.Minpro.2015.02.010	175
Sobhy A., 2013, Int J Miner Process	10.1016/J.Minpro.2013.04.016	152
Fan M., 2010, Min Sci Technol (China)-A-B	10.1016/S1674-5264(09)60179-4	148
Schubert H., 2005, Int J Miner Process	10.1016/J.Minpro.2005.07.002	108
Fan M., 2010, Min Sci Technol (China)-A	10.1016/S1674-5264(09)60205-2	104
Zhou W., 2016, Int J Miner Process	10.1016/J.Minpro.2016.11.003	85
Amaral Filho J., 2016, Int J Miner Process	10.1016/J.Minpro.2016.01.012	75
Fan M., 2010, Min Sci Technol (China)	10.1016/S1674-5264(09)60259-3	73
Mikhlin Y., 2015, Int J Miner Process	10.1016/J.Minpro.2015.10.004	54

El artículo más citado es de Fan M, publicado en 2010 con 196 citas, sobre la generación de nanoburbujas y sus aplicaciones en la flotación por espuma, siendo este la parte 2 sobre fundamentos y análisis teórico.

Otros artículos influyentes incluyen el de Calgaroto S., publicado en 2015 con 175 citas, y el de Sobhy A., publicado en 2013, con 152 citas, los cuales estudian la flotación con nanoburbujas.

Figura 36

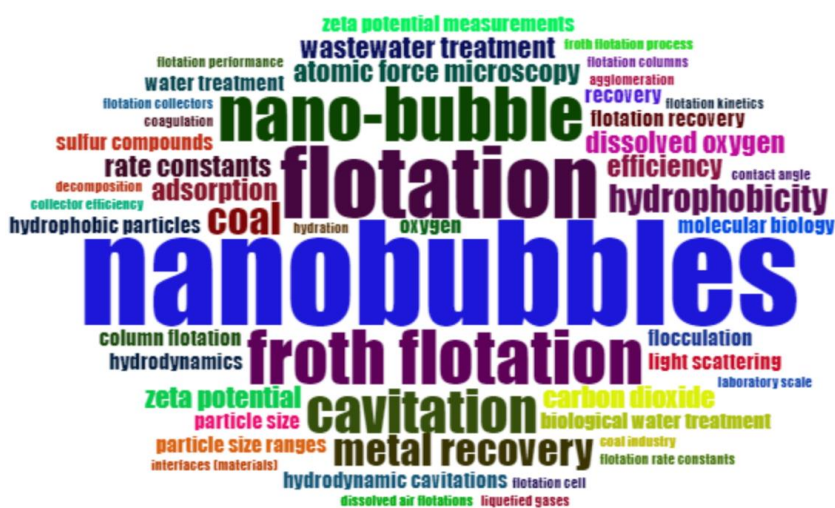
Autores más relevantes entre los 78 documentos del cuartil indefinido.



Tao D. con un total de 12 documentos se destaca significativamente por encima de los otros autores, siendo el más prolífico en este conjunto de datos, a continuación, Fan M. ocupa el segundo lugar con 9 documentos. Honaker R. le sigue con 7 documentos publicados, Luo Z. cuenta con 4 documentos, y Chen H., Couic M., Khanal SK., Marcelino KR., Na NA., y Schubert H. tienen cada uno 3 documentos publicados, siendo menor en comparación con los autores mencionados previamente.

Figura 37

Nube de las Palabras clave de los 78 documentos del cuartil indefinido.



Los términos flotación y cavitación son prominentes, sugiriendo que muchos de los documentos investigan cómo las nanoburbujas pueden mejorar estos procesos, siendo

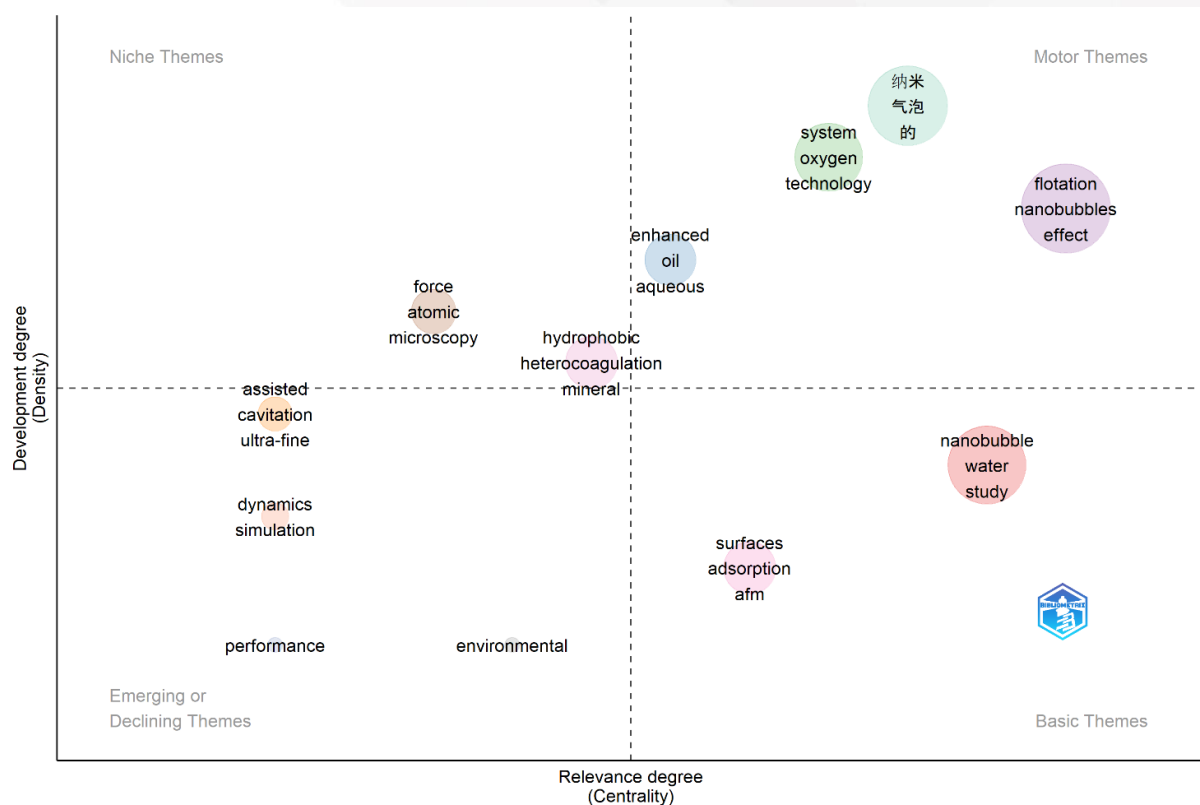
relevantes en contextos de recuperación de metales y tratamiento de aguas. Las palabras tratamiento de aguas y aguas residuales aparecen frecuentemente, indicando que las aplicaciones ambientales son un enfoque importante en estas investigaciones.

La flotación por espuma también es un término destacado, señalando que esta técnica se estudia ampliamente en combinación con nanoburbujas. La recuperación de metales y la eficiencia de estos procesos son áreas de interés considerable, reflejadas en la presencia de términos como recuperación de metales y eficiencia. Los estudios sobre oxígeno disuelto y el potencial zeta indican que las propiedades físico-químicas de las nanoburbujas y su interacción con otros compuestos son aspectos clave de la investigación.

Los términos hidrofobicidad y tamaño de partícula sugieren que se presta mucha atención a cómo las propiedades de superficie y tamaño afectan el comportamiento y la efectividad de las nanoburbujas. El uso de dióxido de carbono y la medición del potencial zeta también se destacan, lo que sugiere aplicaciones en la química ambiental y posiblemente en la mejora de procesos industriales.

Figura 38

Mapa temático de los 78 artículos del cuartil indefinido.



En este los temas se dividen en cuatro cuadrantes:

En el cuadrante superior izquierdo, se encuentran los temas de nicho como microscopía de fuerza atómica y heterocoagulación sugieren investigaciones sobre técnicas de análisis y comportamiento de partículas en diferentes condiciones, lo cual es relevante en estudios de eficiencia y control de procesos. (M. Fan et al., 2010)

El cuadrante superior derecho alberga los temas motores se encuentran términos como flotación, nanoburbujas, sistema, oxígeno, y tecnología, destacando la importancia de estos conceptos en la literatura científica actual, estos temas reflejan aplicaciones avanzadas y estudios sobre la optimización de procesos mediante el uso de nanoburbujas, así como investigaciones sobre su impacto en la flotación y la mejora de la eficiencia en diferentes sistemas. (Sobhy & Tao, 2013)

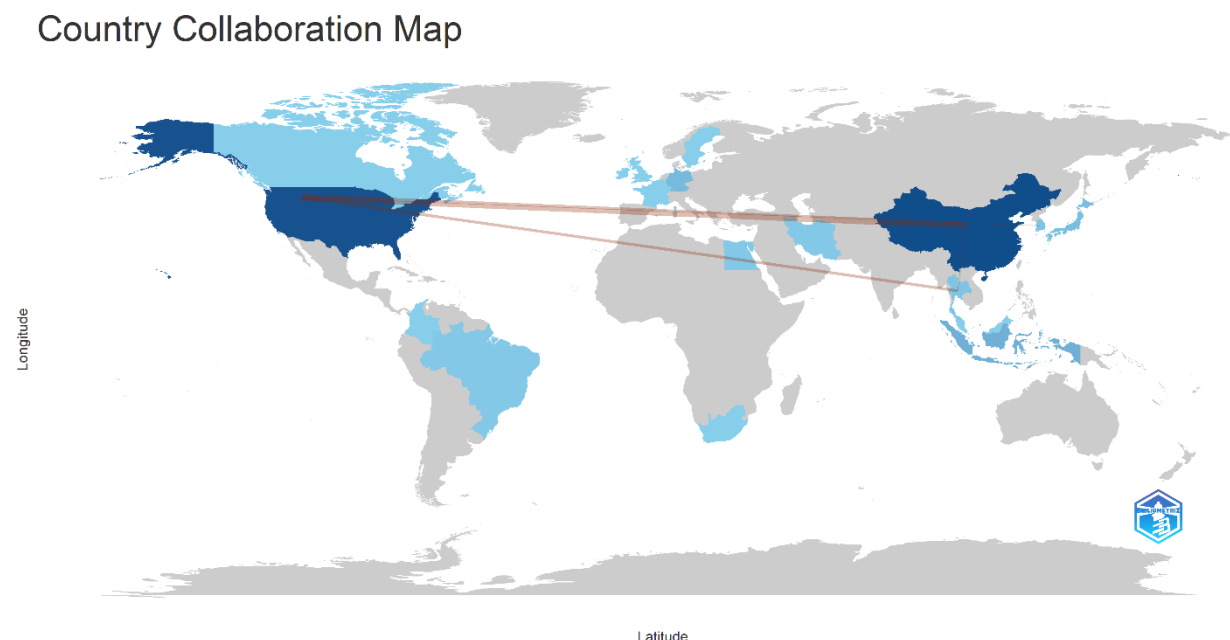
En el cuadrante inferior derecho, están los temas básicos, aquí, términos como nanoburbuja, estudio, superficies, adsorción y AFM (microscopía de fuerza atómica) aparecen prominentes, indicando que la investigación sobre la interacción de nanoburbujas con superficies y su comportamiento en procesos de adsorción es esencial pero aún puede

expandirse, también tenemos otros términos como agua, mejorado y aceite sugiere que las aplicaciones de nanoburbujas en el mejoramiento de procesos relacionados con el agua y el petróleo son temas fundamentales con un gran potencial de desarrollo.

El cuadrante inferior izquierdo contiene los temas emergentes o en declive, aquí, los términos como desempeño, ambiental, cavitación, dinámica y simulación indican áreas de investigación que podrían estar en fase inicial de exploración con títulos relacionados como “Comportamientos de descomposición del hidrato de carbono atrapado en un sistema plano doblemente simétrico: un estudio de simulación de dinámica molecular” y “Características de micro nanoburbujas y sus aplicaciones en la mejora del ambiente del suelo” siendo estos relevantes para entender los comportamientos de descomposición de materiales y para explorar las características y aplicaciones de las nanoburbujas en la agricultura lo cual puede abrir nuevas vías para mejorar la sostenibilidad y la productividad agrícola, así como para abordar desafíos ambientales globales como el cambio climático y la seguridad alimentaria.

Figura 39

Mapa de colaboración por países de los 78 documentos del cuartil indefinido.



Estados Unidos y China son los principales actores en esta área de investigación, con numerosas conexiones internacionales, Estados Unidos aparece como el país con mayor

número de colaboraciones, especialmente con países asiáticos como Japón y China, así como con países europeos, debido a esta amplia red de colaboraciones, sabemos que Estados Unidos es un líder en el estudio y aplicación de nanoburbujas, impulsando tanto la investigación básica como aplicada en este campo.

China muestra una densa red de colaboraciones, conectándose no solo con Estados Unidos sino también con varios países europeos y asiáticos, además de Estados Unidos, China colabora con Japón y otros países asiáticos, indicando su participación activa en la investigación, así como con algunos países europeos.

Europa tiene una representación moderada en términos de colaboraciones, con países como Alemania, Reino Unido y Francia conectados no solo entre sí, sino también con Estados Unidos y China, esto sugiere una participación activa en la red global de investigación sobre nanoburbujas.

América Latina y África tienen una menor representación en términos de colaboraciones internacionales en comparación con otras regiones, sin embargo, países como Brasil están conectados con Estados Unidos y China, lo que sugiere que estas regiones están comenzando a integrarse en la red global de investigación sobre nanoburbujas, este incipiente interés puede ser crucial para el desarrollo de tecnologías agrícolas sostenibles en estas áreas, donde la productividad y la gestión eficiente de recursos son particularmente importantes.

4.2. Interpretación de los resultados.

4.2.1. Producción Científica Anual.

Comparación de la producción científica anual.

Se identifican 3 fases dentro de la producción científica anual en cada cuartil, siendo estas una Inicial con una producción baja y estable a lo largo de más de 10 años, seguida por un Intermedia donde se evidencia un incremento en la producción y diversos picos a lo largo de los años en especial en 2021 y 2022 identificados como los puntos más altos de producción anual, y con una fase Final a partir de 2023 donde comienza a decrecer el número de

publicaciones en cada cuartil.

Al contrario del estudio bibliométrico de (Movahed & Sarmah, 2021) sobre las micro y nanoburbujas, donde se identifican picos en 2019 y 2020

Para hablar de los temas relevantes en cuanto a cada cuartil y año tenemos:

- Primer cuartil:

En total tenemos 28 publicaciones hasta el año 2015, las cuales tienen en común el estudio y la aplicación de burbujas a nano y microescala en diversos contextos científicos y tecnológicos, abarcando desde la dispersión y morfología de minerales como la caolinita y el talco, hasta el uso de nanoburbujas en tratamientos médicos y medioambientales.

En total tenemos 55 publicaciones entre el 2016 al 2019, las cuales abarcan una amplia gama de aplicaciones de las nanoburbujas en diversos campos científicos y tecnológicos, por ejemplo, investigaciones como la de Azevedo et al., (2016) sobre la generación y propiedades de nanoburbujas en soluciones acuosas proporcionan una base fundamental para entender sus características distintivas y su comportamiento en diferentes medios, otros estudios como el de Calgaroto et al., (2016) de la separación de especies insolubles mediante flotación con nano y microburbujas destacan su importancia en la industria minera, mejorando la eficiencia en la separación de minerales.

En el ámbito de la biomedicina, investigaciones de Yao et al., (2016) sobre la ablación térmica de tumores utilizando ultrasonido y nanoburbujas, comparando diferentes tipos como las nanoburbujas lipídicas y las microburbujas, subrayan su potencial para tratamientos médicos no invasivos.

En la ingeniería ambiental, se exploran aplicaciones innovadoras como el de uso de nanoburbujas de oxígeno para la remediación de hipoxia y reducción de emisiones de metano en cuerpos de agua, ofreciendo soluciones sostenibles para problemas ambientales críticos. (Etchepare et al., 2017). Asimismo, la capacidad oxidativa de las nanoburbujas se investiga en relación con la germinación de semillas, sugiriendo beneficios significativos para la agricultura. (Ahmed, Shi, et al., 2018).

De 2020 a 2022 tenemos 170 publicaciones, las cuales exploran el uso de nanoburbujas en el tratamiento y la purificación del agua, para abordar contaminantes ambientales y mejorar la calidad de la misma. (L. Liu et al., 2020) (J. Wang, Chen, et al., 2020). Además, en estos años también, la aplicación de las nanoburbujas en la mejora de procesos biológicos es un tema recurrente, con el fin de mejorar las actividades microbianas y los procesos metabólicos. (X. Wang, Yuan, Lei, et al., 2020) (Z. Guo et al., 2020)-

Adicionalmente, la investigación sobre el uso de las nanoburbujas en agricultura, y como estas promueven la utilización de nutrientes y el crecimiento de plantas en arroz al aumentar la expresión de genes de absorción de nutrientes y estimular la producción de hormonas de crecimiento, subrayan su potencial para mejorar el rendimiento de los cultivos y la absorción de nutrientes en las plantas. (Y. Wang et al., 2021a)

Continuando para 2022 seguimos con temas recurrentes en el uso de nanoburbujas en procesos de tratamiento de agua, tanto para la eliminación de contaminantes como para mejorar la calidad del agua, por ejemplo, se exploran métodos como la fotocatalisis mejorada con nanoburbujas de H_2O_2 /aire para la degradación de contaminantes en aguas residuales, así como la adsorción de ácidos perfluoroalquilados en materiales soportados por carbón activado granular y quitosano, con el papel clave de las nanoburbujas en estos procesos. (Vu et al., 2022) (W. Liu et al., 2022)

Otro tema común es la aplicación de las nanoburbujas en la agricultura y la mejora de procesos biológicos, se investiga cómo las nanoburbujas pueden estimular el crecimiento de plantas y mejorar la producción de cultivos, así como mejorar la actividad microbiana y los procesos metabólicos, la investigación también se centra en la influencia de las nanoburbujas en la calidad de los productos agrícolas, como el almacenamiento de arroz y la calidad de las fresas, lo que sugiere un amplio potencial para aplicaciones en la agricultura y la seguridad alimentaria. (J. Lu et al., 2022) (Cai et al., 2022a) (W. Fan et al., 2021) (L. Li et al., 2022)

Por otro lado, también se exploran aplicaciones innovadoras de nanoburbujas en diversas áreas, como la remediación de suelos contaminados, la producción de energía

(como la formación de hidratos de metano), la mejora de procesos industriales (como la flotación de minerales) y la investigación básica sobre la física y la química de las burbujas a escala nanométrica. (Mi et al., 2022) (Soyluoglu et al., 2022) (C. Guo et al., 2022) (Z. He et al., 2022).

Entre las 157 publicaciones de los años 2023 a 2024 los títulos más recurrentes siguen siendo en el tratamiento del agua, en la agricultura y la horticultura, en la remediación ambiental y la producción de energía.

- Segundo cuartil:

En total tenemos 16 publicaciones entre los años 2009 a 2017, las cuales se centran en tecnologías emergentes como soluciones innovadoras para descontaminar y purificar recursos hídricos, en métodos de tratamiento y fenómenos físico-químicos y en aplicaciones específicas, como el control de la formación de espuma en bebidas carbonatadas. (Deckers et al., 2011) (Deckers et al., 2013) (Azevedo et al., 2017)

De 2018 a 2020 con 10 publicaciones se habla de un interés común en la creación y aplicación en campos como la medicina y la biotecnología, además de revisiones en cuanto a su aplicación en el tratamiento del agua, también se centran en la comprensión teórica y práctica de los procesos de tratamiento y separación utilizando burbujas a nivel micro y nanométrico. (W. Zhou et al., 2018) (Silva et al., 2020) (J. Zhang et al., 2020)

En 2021 a 2024 con un total de 54 publicaciones se continua en el estudio de evidenciar la aplicación de estas burbujas en la desinfección y purificación del agua, explorando los aspectos teóricos y prácticos de las propiedades y comportamiento a nivel nanométrico. (Temesgen & Han, 2021) (S. Zhou, Li, et al., 2022) (Senthilkumar & Sankar, 2023)

- Tercer cuartil:

De 2009 a 2015 tenemos 9 publicaciones, estas destacan la innovación en la tecnología de flotación y los fenómenos de transporte en sistemas microfluídicos, exploran las propiedades y aplicaciones de las burbujas a nivel nanométrico, especialmente en la

industria de bebidas y la interfaz entre sólidos y líquidos y resaltan la estabilidad y selectividad de las burbujas en diversas aplicaciones industriales, como la separación de espuma en procesos de purificación y tratamiento. (Y. Zhang et al., 2009) (Borkent et al., 2011) (Kondrat'ev & Moshkin, 2015)

De 2016 a 2019 tenemos 13 publicaciones las cuales exploran los aspectos básicos y las aplicaciones prácticas de las nanoburbujas en el tratamiento de aguas residuales y soluciones salinas, se centran en las propiedades físico-químicas y la generación controlada de estas, investigando los procesos de formación y estabilidad de las nanoburbujas en diferentes condiciones. (Gurung et al., 2016) (Bu et al., 2018) (Sobhy & Tao, 2019)

De 2020 a 2022 tenemos 21 publicaciones las cuales exploran las aplicaciones y los beneficios potenciales de las nanoburbujas en la limpieza y purificación del agua, así como en la remediación ambiental y profundizan en los mecanismos de generación y comportamiento en diferentes procesos. (Takarina et al., 2020) (S. Y. Lee et al., 2021) (Chung et al., 2022)

Los últimos años 2023 a 2024 tenemos 14 publicaciones que continúan explorando el comprender y aprovechar el potencial de las micro nanoburbujas en una variedad de aplicaciones, desde la limpieza y purificación del agua hasta la mejora de la eficiencia en procesos industriales y ambientales. (Joy et al., 2023) (J. Sha et al., 2024)

- Cuarto cuartil:

Con 10 publicaciones a lo largo de los años, no tienen un tema común específico, ya que abordan una variedad de áreas de investigación y aplicaciones, desde la fisiología vegetal hasta la tecnología de tratamiento de aguas residuales y la biotecnología. (Batagoda, Hewage, et al., 2018) (Barkova et al., 2022) (Z. Sun et al., 2023)

- Cuartil indefinido:

Los picos considerables en el año 2010 y 2013, pertenecen a una serie de artículos que exploran la generación de nanoburbujas y su aplicación en la flotación por espuma, específicamente en el contexto del tratamiento de fosfato, y a libros correspondientes a las

aplicaciones y propiedades de las nanoburbujas. (M. Fan et al., 2010) (Maruyama et al., 2013) (Oshita & Uchida, 2013)

Un incremento considerable de publicaciones entre 2018 a 2022, donde hay un total de 30 estudios, se centra en la aplicación de nanoburbujas en la acuicultura para mejorar el contenido de oxígeno en los medios de cultivo para peces, investiga cómo las nanoburbujas pueden afectar la remoción de metales pesados en suelos contaminados, en la aplicación de nanoburbujas en el proceso de flotación del carbón, lo que puede mejorar la eficiencia y la selectividad de este proceso crucial en la industria minera. (Batagoda, Meegoda, et al., 2018) (White et al., 2019) (Thant et al., 2022)

De 2023 a 2024, con un total de 15 publicaciones recientes, se encuentran estudios que exploran cómo las nanoburbujas en el agua del florero pueden prolongar la vida útil de las flores cortadas al inhibir la transpiración, cómo la aeración con micro nanoburbujas puede mejorar el rendimiento de las plantas y la nitrificación en sistemas acuapónicos y cómo la aplicación de nanoburbujas en el pretratamiento de aguas residuales puede reducir los costos de tratamiento y mejorar la capacidad del mismo. (Chae et al., 2023) (Lawal et al., 2024).

Movahed y Sarmah (2021) señalan que la química física es la disciplina dominante en la investigación de nanoburbujas, cubriendo temas como la estabilidad y los métodos de generación. Esta observación es consistente con nuestros primeros trabajos, especialmente en el tercer cuartil (2009-2015), donde nuestras publicaciones se centraron en la tecnología de flotación y los fenómenos de transporte en sistemas microfluídicos, explorando las propiedades y aplicaciones de las burbujas a nivel nanométrico. Sin embargo, nuestra investigación también abarcó una variedad más amplia de aplicaciones industriales, como la separación de espuma en procesos de purificación y tratamiento, lo que indica una orientación ligeramente más aplicada.

Discusión de los resultados en cuanto a la producción científica anual.

La ciencia de materiales multidisciplinaria y la nanotecnología, identificadas por Movahed y Sarmah como áreas clave, concuerdan con las publicaciones en el primer cuartil

(2016-2019), ya que estos estudios sobre la generación y propiedades de nanoburbujas en soluciones acuosas (Azevedo et al., 2016) y su uso en la separación de especies insolubles mediante flotación (Calgaroto et al., 2016) destacan la relevancia de estos campos, siendo además que estas áreas no solo se centran en los aspectos fundamentales, sino que también exploran aplicaciones prácticas en la industria minera y de la biomedicina, lo que complementa y amplía las categorías identificadas por Movahed y Sarmah.

El trabajo de Movahed y Sarmah también observa un aumento significativo en las publicaciones de ciencias ambientales relacionadas con nanoburbujas, especialmente en 2020, igual que lo reflejado en esta investigación, ya que existe un incremento considerable de publicaciones entre 2020 y 2022, donde se exploran aplicaciones de nanoburbujas en el tratamiento y la purificación del agua, remediación ambiental y mejora de procesos biológicos (L. Liu et al., 2020; J. Wang et al., 2020). Esto subraya la creciente importancia y el potencial de las nanoburbujas en abordar problemas ambientales críticos, una área que se espera continúe expandiéndose.

Movahed y Sarmah además mencionan usos innovadores como la limpieza de membranas y la germinación de semillas, al igual que las publicaciones más recientes analizadas en este estudio (2023-2024) abordan innovaciones en la agricultura, producción de energía y remediación de suelos contaminados (C. Guo et al., 2022; Z. He et al., 2022). Esta convergencia destaca la versatilidad de las nanoburbujas y su capacidad para impactar múltiples disciplinas de manera significativa.

Por último, en el estudio de Movahed y Sarmah se habla de que el número de publicaciones en ciencias ambientales seguirá aumentando y eventualmente superará a aquellas del campo de la química física, concordando con los datos recientes de este estudio que muestran un patrón similar, con un enfoque cada vez mayor en aplicaciones ambientales y biológicas, identificando de igual manera que la investigación futura probablemente continúe con esta tendencia, con un énfasis creciente en soluciones sostenibles y tecnológicamente avanzadas utilizando nanoburbujas.

4.2.2. Características de las producción científica analizada.

La frecuencia de citas y la calidad de los 635 metadatos están correlacionadas en este estudio bibliométrico, los documentos del primer cuartil, con mayor frecuencia de citas, presentan una integridad de datos sobresaliente y son fundamentales para comprender el impacto de las nanoburbujas en la agricultura, en cuanto a los estudios de los cuartiles inferiores, aunque menos citados, siguen proporcionando información valiosa y complementan los hallazgos de los documentos más influyentes, esta estructura de análisis bibliométrico permite una visión integral del campo, identificando tanto los estudios consolidados como las áreas emergentes de investigación.

En esta investigación, se utilizó la base de datos Scopus con un período de tiempo que abarca desde 2002 hasta 2024, durante este período, se identificó un total de 645 documentos relevantes relacionados con las nanoburbujas en los campos de medio ambiente, agricultura y ciencias de la tierra, al comparar este resultado con el estudio de (Zheng, T. et al., 2016), que abarcó desde 1991 hasta 2014, la principal diferencia radica en el período de tiempo, esta investigación se centró en un intervalo más reciente, comenzando en 2002, lo que puede reflejar cambios y avances más actuales en el campo de las nanoburbujas, además, mientras que Zheng et al. identificó un total de 9444 publicaciones, mi estudio encontró un número más limitado de documentos, esta diferencia puede atribuirse no solo al período de tiempo más corto, sino también a las especificidades de los criterios de búsqueda, así como a la cobertura de la base de datos utilizada al ser ambos criterios diferentes al del estudio comparativo previo.

4.2.3. Artículos más Influyentes por cuartil.

Movahed y Sarmah (2021) identifican un aumento constante en el número de citas sobre nanoburbujas y microburbujas hasta 2020, mencionando solo un pico a 2019 lo que difiere con esta investigación donde se identifican los siguientes picos a lo largo del periodo:

En el Primer Cuartil, el pico más alto se encuentra en 2011, seguido por otro en 2018, en 2011, se publicaron artículos innovadores que exploraron nuevas aplicaciones y principios

fundamentales de las tecnologías de burbujas, lo que impulsó un aumento en las citas debido a la relevancia y novedad de los estudio, por lo que este año se destaca por la publicación del artículo de Agarwal A., "Principle and Applications of Microbubble and Nanobubble Technology for Water Treatment," que acumuló 753 citas, convirtiéndose en un referente en el tratamiento del agua con microburbujas y nanoburbujas.

En el Segundo Cuartil, los picos significativos en 2009 y 2019 reflejan dos olas importantes de investigación, el pico de 2009 puede atribuirse a estudios como el de Scardino A.J., "The role of nano-roughness in antifouling," que acumuló 187 citas y destacó la importancia de la nanotecnología para la prevención de bioincrustaciones.

El Tercer Cuartil muestra picos en 2016 y 2018, años en los que la investigación sobre la estabilidad de las nanoburbujas y su aplicación en la remediación ambiental y la purificación del agua se consolidó, el artículo más citado de este cuartil, "Stability of nanobubbles" de Meegoda J., publicado en 2018, acumuló 142 citas, subrayando la importancia de la estabilidad de las nanoburbujas para su uso práctico en diversas aplicaciones.

El Cuarto Cuartil exhibe picos en 2018 y 2021, en 2018, la publicación de Batagoda J., "Nano-ozone bubbles for drinking water treatment," con 37 citas, marcó un hito en la innovación del tratamiento de agua potable utilizando nanoburbujas de ozono.

Finalmente, el Cuartil Indefinido muestra picos en 2010 y 2015, reflejando avances pioneros en la generación de nanoburbujas y su aplicación en la flotación por espuma, el artículo más citado en este cuartil, "Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part III): Specially designed laboratory scale column flotation of phosphate" de Fan M., publicado en 2010, acumuló 196 citas, destacando su impacto en la industria del fosfato.

Aunque hay variaciones en los promedios de citas y los artículos más influyentes en cada cuartil, se observa una tendencia general de aumentos temporales seguidos por disminuciones hacia el final del periodo analizado. Además, los artículos más citados varían en influencia y relevancia según el cuartil, indicando diferentes niveles de impacto en la investigación de nanoburbujas en la agricultura.

4.2.4. Autores más relevantes.

El análisis de los autores más prolíficos en todos los cuartiles revela que Zhang Z., con 28 publicaciones, es el líder destacado, indicando una productividad sobresaliente y una influencia considerable en su campo, habiendo publicado numerosos estudios que destacan su aplicación en diversos ámbitos como la digestión anaeróbica, la mejora de la calidad del agua y la producción de energía.

Los autores Zhang Y. y Liu Y. con 19 publicaciones han contribuido significativamente al campo de la tecnología de nanoburbujas y sus aplicaciones en diferentes áreas, como la agricultura, el tratamiento de aguas y la recuperación de recursos.

Le sigue Tao D., con 12 publicaciones, demuestra una fuerte presencia con sus estudios que abarcan desde investigaciones fundamentales hasta aplicaciones prácticas en procesos industriales, proporcionando una comprensión integral de los beneficios y mecanismos de las nanoburbujas en estos contextos.

Este grupo de autores representa a los investigadores más productivos y potencialmente influyentes en sus respectivos campos y cuartiles, subrayando la diversidad y la amplitud de la investigación dentro de este análisis.

4.2.5. Nubes de Palabras

En todos los cuartiles, los términos relacionados con el tratamiento del agua y aguas residuales, como tales y, además, oxígeno disuelto, y calidad del agua aparecen recurrentemente, indicando que la investigación se centra significativamente en aplicaciones ambientales y de purificación de agua.

Al contrario de lo presente el estudio de (Zheng, T. et al., 2016) en su visión detallada de las palabras clave más frecuentes, identifica áreas como el ultrasonido, la entrega de fármacos y genes, la sonoporación y la cavitación, siendo muy diferentes a los identificados en el presente estudio, esto se puede deber a la variedad en la base de datos y los criterios de búsqueda utilizados además de una ecuación de búsqueda mucho más amplia en términos a la de esta investigación.

4.2.6. Mapas temáticos.

Términos más relevantes a lo largo de los cuartiles.

Tabla 22

Términos más relevantes a lo largo de los cuartiles.

Término	Cuartiles mencionados	Referencias principales
Oxígeno	1, 2, 3, Indefinido	Oxigenación de agua para riego de cultivos, digestión anaerobia, tratamiento de suelos.
Tratamiento	1, 2, 3, 4, Indefinido	Purificación de agua, tratamiento de aguas residuales, tecnologías ambientales.
Metano	1	Producción de biogás, digestión anaerobia, reducción de emisiones en cultivos.
Flotación	2, 3, Indefinido	Separación en procesos minerales y tratamiento de aguas.
Agua	1, 2, 3, 4, Indefinido	Tratamiento, purificación, aplicaciones en diferentes campos de la agricultura.
Burbujas	1, 2, 3	Oxigenación, tratamiento de aguas, cavitación.
Producción	1, 3	Producción de biogás, mejora de procesos agrícolas
Efecto/Efectos	1, 2, 4	Efectos de nanoburbujas en irrigación, crecimiento de plantas, tratamiento de suelos.
Riego/Irrigación Sistema	1, 2 Indefinido	Sistemas de irrigación mejorados con nanoburbujas. Optimización de procesos mediante nanoburbujas, sistemas de flotación y tratamiento.
Membranas	1, Indefinido	Innovación en tecnología de membranas para ósmosis inversa y aplicaciones en tecnologías ambientales y sostenibles.

Los términos más repetidos a lo largo de los cuartiles incluyen tratamiento de agua, oxígeno, flotación, ozono y aireación, la investigación se centra predominantemente en aplicaciones ambientales y tratamiento de agua, con enfoques específicos en la oxigenación, remoción de contaminantes, y eficiencia de procesos. Los temas motores como producción de biogás, irrigación, tratamiento de aguas residuales y remediación de sedimentos son áreas activas y cruciales.

Términos emergentes o en declive.

Tabla 23

Términos emergentes o en declive.

Término	Cuartil	Estado	Referencias principales
Poroso	1	Emergente	Transporte bacteriano en medios porosos, filtración de agua para irrigación agrícola.
Transporte	1	Emergente	Transporte bacteriano, filtración de agua, sistemas de irrigación.

Medio	1	Emergente	Eficiencia de filtración, reducción de contaminación patógena.
Propiedades	1	Declive	Propiedades físico-químicas en sistemas acuosos, ampliamente exploradas.
Acuoso	1	Declive	Sistemas acuosos con nanoburbujas, reducción de nuevas investigaciones.
Dispersiones	1	Declive	Métodos de generación y aplicación de nanoburbujas, ya bien estudiados.
Degradación	2	Emergente	Cinética y vías de degradación, aplicaciones en biomedicina y protección ambiental.
Ácido	2	Emergente	Nanoburbujas conjugadas con ácido poliláctico, imágenes de doble modalidad.
Contraste	2	Emergente	Agentes de contraste en imágenes, innovación en biomedicina.
Gas	3	Emergente	Producción de hidrógeno, tratamiento de aguas, potencial en bioenergía.
Físico	3	Emergente	Características físicas de nanoburbujas, aplicaciones en remediación.

Estos términos reflejan investigaciones emergentes en el campo de la biomedicina y la protección ambiental.

La disminución en investigaciones sobre las propiedades físico-químicas de sistemas acuosos con nanoburbujas sugiere que estos aspectos ya han sido ampliamente explorados y que la atención se está desplazando hacia aplicaciones más específicas y avanzadas.

Discusión de los temas.

Los resultados del análisis bibliométrico de Morgado, Pires y Dantas (2024) y la investigación actual revelan diferencias y similitudes en la evolución de los temas de investigación en los campos de nanomateriales y nanoburbujas, ambos estudios subrayan la relevancia de las nanopartículas y nanoburbujas en la investigación actual, destacando su papel fundamental y emergente en diversas aplicaciones.

Mientras que Morgado, Pires y Dantas (2024) se enfocan más en aplicaciones industriales y medioambientales de los nanomateriales en la industria de fertilizantes, la investigación actual pone un énfasis significativo en aplicaciones médicas y de tratamiento de agua con nanoburbujas, además la investigación actual presenta una mayor diversidad de términos específicos relacionados con procesos y aplicaciones avanzadas (como la cavitación y la aireación), lo que sugiere una ampliación en el campo de estudio y una exploración más profunda de las tecnologías de nanoburbujas.

4.2.7. Colaboraciones Internacionales.

Los cinco principales países que se repiten consistentemente a lo largo de los cuartiles en términos de colaboración y producción científica son:

- China: Lidera en cantidad de colaboraciones internacionales, especialmente con Europa, Estados Unidos y otros países asiáticos.
- Estados Unidos: Muestra numerosas conexiones internacionales, con colaboraciones significativas con países asiáticos y europeos.
- Alemania: Representa a Europa con una densa red de colaboraciones dentro del continente y con China y Estados Unidos.
- Reino Unido: Otro actor europeo importante con conexiones en Europa, Asia y Estados Unidos.
- Japón: Mantiene múltiples colaboraciones internacionales, especialmente con China, Estados Unidos y Europa.

Estos países forman el núcleo de la red global de investigación sobre nanoburbujas en la agricultura, impulsando tanto la investigación básica como aplicada y fomentando la innovación a través de amplias colaboraciones internacionales.

La comparación de los resultados de las colaboraciones internacionales entre el artículo de Movahed y Sarmah (2021) y la investigación actual muestra que:

China, Estados Unidos y Japón aparecen como líderes en ambos estudios, reflejando su papel dominante en la investigación de nanoburbujas, la continuidad de estos países en la vanguardia subraya su compromiso sostenido y recursos invertidos en este campo.

Hay una expansión de la red de colaboración internacional en los últimos años, integrando a más actores europeos en el núcleo de la investigación global, ya que la investigación actual destaca la participación significativa de Alemania y el Reino Unido, países que no se mencionan en detalle en el estudio de Movahed y Sarmah.

Existe un crecimiento drástico en publicaciones sobre nanoburbujas después de 2015, el cual fue señalado por Movahed y Sarmah, y ahora se refleja en la investigación actual con

un enfoque en aplicaciones agrícolas.

4.2.8. Tendencias de Investigación.

Concluyendo con este análisis, en base a los títulos y resúmenes de los artículos, se identifican los siguientes clústeres principales:

Tabla 24

Clústeres de bigramas de los títulos de los 635 artículos.

Cluster	Callon Centrality	Callon Density	Rank Centrality	Rank Density	Cluster Frequency
Oxygen Nanobubbles	0,00635439	5,5555555 6	4	1	18
Wastewater Treatment	0,01021242	5,8823529 4	8	2	17
Carbon Dioxide	0	11,1111111 1	1	8	9
Micro-Nano Bubble	0,00625	9,0277777 8	3	6	25
Anaerobic Digestion	0,00833333	8,9166666 7	6	5	51
Micro-Nano Bubbles	0,00810185	9,5987654 3	5	7	55
Nanobubble Technology	0,00326797	6,3492063 5	2	3	32
Bulk Nanobubbles	0,00925926	8,3333333 3	7	4	12

Pertinente a nuestro análisis previo identificamos 4 clúster principales: Digestión Anaerobia, Tratamiento de Aguas residuales, Nanoburbujas de Oxígeno y Nanoburbujas de Dióxido de carbono.

Tabla 25

Principales Clústeres identificados en Bibliometrix en base a los títulos y resúmenes de los 635 artículos.

Clúster	Artículos Principales	Autor y Año
Nanoburbujas en la digestión anaerobia.	Hydrogen fertilization with hydrogen nanobubble water improves yield and quality of cherry tomatoes compared to the conventional fertilizers.	La fertilización con hidrógeno mediante agua de NB de hidrógeno mejora el rendimiento y la calidad de los tomates cherry en comparación con los fertilizantes convencionales. Li et al., 2024
	Enhancement of methane production from anaerobic digestion of <i>Erigeron canadensis</i> via O ₂ -nanobubble water supplementation.	Mejora de la producción de metano en la digestión anaeróbica de <i>Erigeron canadensis</i> mediante suplementación con agua de nanoburbujas de O ₂ . Pei et al., 2024
	Synchronous improvement of methane production and digestate dewaterability in sludge anaerobic digestion by nanobubble.	Mejora sincrónica de la producción de metano y la deshidratación del digestato en la digestión anaeróbica de lodos mediante nanoburbujas. Wang et al., 2024
	Nanobubble water promotes anaerobic digestion of high-solids cattle manure under mesophilic and thermophilic conditions.	El agua de NB promueve la digestión anaeróbica del estiércol de ganado de alto contenido sólido en condiciones mesofílicas y termofílicas. Zhang et al., 2024
	Nanobubble technology to enhance energy recovery from anaerobic digestion of organic solid wastes: potential mechanisms and recent advancements.	Tecnología de nanoburbujas para mejorar la recuperación de energía de la digestión anaeróbica de residuos sólidos orgánicos: mecanismos potenciales y avances recientes. Hou et al., 2024
	Process mechanisms of nanobubble technology enhanced hydrolytic acidification of anaerobic digestion of lignocellulosic biomass.	Mecanismos del proceso de acidificación hidrolítica mejorada por tecnología de nanoburbujas en la digestión anaeróbica de biomasa lignocelulósica. Zhu et al., 2024
	Use of nanobubble water bioaugmented anaerobically digested sludge for high-efficacy energy production from high-solids anaerobic digestion of corn straw.	Uso de lodo digerido anaeróbicamente bioaumentado con agua de NB para la producción de energía de alta eficacia en la digestión anaeróbica de paja de maíz. Wang et al., 2023
	Simultaneous addition of CO ₂ -nanobubble water and iron nanoparticles to enhance methane production from anaerobic digestion of corn straw.	Adición simultánea de agua de nanoburbujas de CO ₂ y nanopartículas de hierro para mejorar la producción de metano en la digestión anaeróbica de paja de maíz. He et al., 2023

Nanoburbujas en la digestión anaerobia.	Two-step anaerobic digestion of rice straw with nanobubble water.	Digestión anaeróbica de dos etapas de paja de arroz con agua de nanoburbujas.	Wang et al., 2023
	Supplementation of CO ₂ -nanobubble water to enhance the methane production from anaerobic digestion of corn straw.	Suplementación de agua de nanoburbujas de CO ₂ para mejorar la producción de metano en la digestión anaeróbica de paja de maíz.	Song et al., 2023
	Inhibition mechanism of air nanobubbles on brass corrosion in circulating cooling water systems.	Mecanismo de inhibición de las nanoburbujas de aire sobre la corrosión del latón en sistemas de agua de refrigeración circulante.	Zhang et al., 2023
	Air nanobubble water improves plant uptake and tolerance toward cadmium in phytoremediation.	El agua de nanoburbujas de aire mejora la absorción de plantas y la tolerancia al cadmio en la fitorremediación.	Yan et al., 2023
	Hydrogen nanobubble water: a good assistant for improving the water environment and agricultural production.	Agua de nanoburbujas de hidrógeno: un buen asistente para mejorar el medio ambiente acuático y la producción agrícola.	Zhao et al., 2023
	Effect of air nanobubbles on oxygen transfer, oxygen uptake, and diversity of aerobic microbial consortium in activated sludge reactors.	Efecto de las nanoburbujas de aire en la transferencia de oxígeno, la captación de oxígeno y la diversidad del consorcio microbiano aeróbico en reactores de lodo activado.	Yaparathne et al., 2022
	Enhancement of methane production by anaerobic digestion of corn straw with hydrogen-nanobubble water.	Mejora de la producción de metano mediante digestión anaeróbica de paja de maíz con agua de nanoburbujas de hidrógeno.	He et al., 2022
	Microbubble- and nanobubble-aeration for upgrading conventional activated sludge process: a review.	Aireación con microburbujas y nanoburbujas para mejorar el proceso convencional de lodos activados: una revisión.	Zhou, Liu, et al., 2022
	Preharvest application of hydrogen nanobubble water enhances strawberry flavor and consumer preferences.	La aplicación pre-cosecha de agua de nanoburbujas de hidrógeno mejora el sabor de las fresas y las preferencias del consumidor.	Li et al., 2022
	Supplementation of KOH to improve salt tolerance of methanogenesis in the two-stage anaerobic digestion of food waste using pre-acclimated anaerobically digested sludge by air-nanobubble water.	Suplementación de KOH para mejorar la tolerancia a la sal de la metanogénesis en la digestión anaeróbica de dos etapas de residuos alimentarios utilizando lodo digerido anaeróbicamente pre-aclimatado por agua de nanoburbujas de aire.	Hou et al., 2022
Air nanobubbles induced reversible self-assembly of 7S globulins isolated from pea (<i>Pisum sativum</i> L.).	Autoensamblaje reversible inducido por nanoburbujas de aire de globulinas 7S aisladas del guisante (<i>Pisum sativum</i> L.).	Yan et al., 2022	

Nanoburbujas en la digestión anaerobia.	Enhanced energy recovery via separate hydrogen and methane production from two-stage anaerobic digestion of food waste with nanobubble water supplementation.	Recuperación de energía mejorada mediante producción separada de hidrógeno y metano en la digestión anaeróbica de dos etapas de residuos alimentarios con suplementación de agua de nanoburbujas.	Hou et al., 2021
	Addition of air-nanobubble water to mitigate the inhibition of high salinity on co-production of hydrogen and methane from two-stage anaerobic digestion of food waste.	Adición de agua de nanoburbujas de aire para mitigar la inhibición de alta salinidad en la co-producción de hidrógeno y metano en la digestión anaeróbica de dos etapas de residuos alimentarios.	Hou et al., 2021a
	Formation of a hydrogen radical in hydrogen nanobubble water and its effect on copper toxicity in <i>Chlorella</i> .	Formación de un radical de hidrógeno en agua de nanoburbujas de hidrógeno y su efecto sobre la toxicidad del cobre en <i>Chlorella</i> .	Liu et al., 2021
	Novel insight into enhanced recoverability of acidic inhibition to anaerobic digestion with nano-bubble water supplementation.	Nueva perspectiva sobre la recuperabilidad mejorada de la inhibición ácida en la digestión anaeróbica con suplementación de agua de NB.	Fan et al., 2021
	Nanobubble technology in anaerobic digestion: a review.	Tecnología de nanoburbujas en la digestión anaeróbica: una revisión.	Chuenchart et al., 2021
	Hydrogen nanobubble water delays petal senescence and prolongs the vase life of cut carnation (<i>Dianthus caryophyllus</i> L.) flowers.	El agua de nanoburbujas de hidrógeno retrasa la senescencia de los pétalos y prolonga la vida en florero de las flores cortadas de clavel (<i>Dianthus caryophyllus</i> L.).	Li et al., 2021
	Supplementation of O ₂ -containing gas nanobubble water to enhance methane production from anaerobic digestion of cellulose.	Suplementación de agua de nanoburbujas de gas que contiene O ₂ para mejorar la producción de metano en la digestión anaeróbica de celulosa.	Wang et al., 2020
	Enhanced hydrolysis and acidification of cellulose at high loading for methane production via anaerobic digestion supplemented with high mobility nanobubble water.	Hidrólisis y acidificación mejoradas de celulosa a alta carga para la producción de metano mediante digestión anaeróbica suplementada con agua de nanoburbujas de alta movilidad.	Wang, Yuan, Guo, et al., 2020
Effect of nano-bubble water on high solid anaerobic digestion of pig manure: focus on digestion stability, methanogenesis performance and related mechanisms.	Efecto del agua de nanoburbujas en la digestión anaeróbica de alto contenido sólido de estiércol de cerdo: enfoque en estabilidad de la digestión, rendimiento de la metanogénesis y mecanismos relacionados.	Fan et al., 2020	

Nanoburbujas en la digestión anaerobia.	Improved methane production from corn straw using anaerobically digested sludge pre-augmented by nanobubble water.	Mejora en la producción de metano a partir de paja de maíz utilizando lodo digerido anaeróbicamente pre-aumentado con agua de nanoburbujas.	Wang, Lei, et al., 2020
	Alleviation of copper toxicity in <i>Daphnia magna</i> by hydrogen nanobubble water.	Alivio de la toxicidad del cobre en <i>Daphnia magna</i> mediante agua de nanoburbujas de hidrógeno.	Fan et al., 2020
	Simultaneous enhancement on lignin degradation and methane production from anaerobic co-digestion of waste activated sludge and alkaline lignin supplemented with N ₂ -nanobubble water.	Mejora simultánea en la degradación de lignina y la producción de metano de la co-digestión anaeróbica de lodo activado residual y lignina alcalina suplementada con agua de nanoburbujas de N ₂ .	Yang et al., 2020
	Effects of nanobubble water supplementation on biomass accumulation during mycelium cultivation of <i>Cordyceps militaris</i> and the antioxidant activities of extracted polysaccharides.	Efectos de la suplementación con agua de nanoburbujas en la acumulación de biomasa durante el cultivo de micelio de <i>Cordyceps militaris</i> y las actividades antioxidantes de los polisacáridos extraídos.	Xiao et al., 2020
	Enhanced hydrolysis of waste activated sludge for methane production via anaerobic digestion under N ₂ -nanobubble water addition.	Hidrólisis mejorada de lodo activado residual para la producción de metano mediante digestión anaeróbica con adición de agua de nanoburbujas de N ₂ .	Yang et al., 2019
	Ceramic Membrane Fouling Mechanisms and Control for Water Treatment.	Mecanismos de ensuciamiento de membranas cerámicas y control para el tratamiento de agua.	Cai et al., 2023
Nanoburbujas de Oxígeno	Progress in Research on Preparation and Application of Oxygen Nanobubbles in Agriculture.	Avances en la investigación sobre la preparación y aplicación de nanoburbujas de oxígeno en la agricultura.	Yujia et al., 2023
	Capacity of Nerium Oleander to Phytoremediate Sb-Contaminated Soils Assisted by Organic Acids and Oxygen Nanobubbles.	Capacidad de Nerium oleander para fitorremediar suelos contaminados con Sb asistidos por ácidos orgánicos y nanoburbujas de oxígeno.	Seridou et al., 2023
	Eco-Friendly Enhancement of Secondary Effluent Characteristics with Air and Oxygen Nanobubbles Generated by Ceramic Membrane Filters.	Mejora ecológica de las características del efluente secundario con aire y nanoburbujas de oxígeno generadas por filtros de membrana cerámica.	Ahmed et al., 2023
	Mitigation of Arsenic Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa L.</i>) Seedlings by Oxygen Nanobubbles in Hydroponic Cultures.	Mitigación de la acumulación de arsénico en plántulas de arroz (<i>Oryza sativa L.</i>) mediante nanoburbujas de oxígeno en cultivos hidropónicos.	(Huang, Nhung, Dodbiba, et al., 2023a)

Nanoburbujas de Oxígeno	Effects of Hyperoxia During Oxygen Nanobubble Treatment on Innate Immunity, Growth Performance, Gill Histology, and Gut Microbiome in Nile Tilapia, <i>Oreochromis niloticus</i> .	Efectos de la hiperoxia durante el tratamiento con nanoburbujas de oxígeno en la inmunidad innata, el rendimiento del crecimiento, la histología de las branquias y el microbioma intestinal en tilapia del Nilo (<i>Oreochromis niloticus</i>).	Linh et al., 2023
	Oxygen Nanobubble-Loaded Biochars Mitigate Copper Transfer from Copper-Contaminated Soil to Rice and Improve Rice Growth	Los biocarbonos cargados con nanoburbujas de oxígeno mitigan la transferencia de cobre del suelo contaminado con cobre al arroz y mejoran el crecimiento del arroz	Chu et al., 2023
	Nanobubble oxygenated increases crop production via soil structure improvement: The perspective of microbially mediated effects	La oxigenación con nanoburbujas aumenta la producción de cultivos mediante la mejora de la estructura del suelo: La perspectiva de los efectos mediados por microbios	Chen et al., 2023
	Drip irrigation with nanobubble oxygenated treated wastewater improves soil aeration	Las aguas residuales tratadas con oxígeno de nanoburbujas mejoran la aireación del suelo.	Baram et al., 2022
	Experimental Study of Al-Modified Zeolite with Oxygen Nanobubbles in Repairing Black Odorous Sediments in River Channels.	Estudio experimental de zeolita modificada con Al con nanoburbujas de oxígeno en la reparación de sedimentos negros y malolientes en canales fluviales.	Guo et al., 2022
	Removal Mechanisms of Geosmin and MIB by Oxygen Nanobubbles During Water Treatment.	Mecanismos de eliminación de geosmina y MIB por nanoburbujas de oxígeno durante el tratamiento de agua.	Soyluoglu et al., 2022
	Oxygen Nanobubbles for Lake Restoration—Where Are We at? A Review of a New-Generation Approach to Managing Lake Eutrophication.	Nanoburbujas de oxígeno para la restauración de lagos—¿Dónde estamos? Una revisión de un enfoque de nueva generación para la gestión de la eutrofización de lagos.	Waters et al., 2022
	Stability of Oxygen Nanobubbles Under Freshwater Conditions.	Estabilidad de las nanoburbujas de oxígeno en condiciones de agua dulce.	Soyluoglu et al., 2021
	Reducing Arsenic Toxicity Using the Interfacial Oxygen Nanobubble Technology for Sediment Remediation.	Reducción de la toxicidad del arsénico utilizando la tecnología de nanoburbujas de oxígeno interfaciales para la remediación de sedimentos.	Tang et al., 2021
Germination and Seedling Growth Response of Sprouts and Leafy Vegetables After Applying Oxygen Nanobubble Water.	Respuesta de germinación y crecimiento de plántulas de brotes y vegetales de hoja después de aplicar agua con nanoburbujas de oxígeno.	Lee et al., 2021	

Nanoburbujas de Oxígeno	Oxygen Nanobubbles Enhanced Photodegradation of Oxytetracycline Under Visible Light: Synergistic Effect and Mechanism.	Nanoburbujas de oxígeno mejoraron la fotodegradación de oxitetraciclina bajo luz visible: efecto sinérgico y mecanismo.	Wang et al., 2020
	Minerals Loaded with Oxygen Nanobubbles Mitigate Arsenic Translocation from Paddy Soils to Rice.	Minerales cargados con nanoburbujas de oxígeno mitigan la translocación de arsénico de los suelos de arrozales al arroz.	Sha et al., 2020
	Anoxia Remediation and Internal Loading Modulation in Eutrophic Lakes Using Geoengineering Method Based on O ₂ NB	Remediación de anoxia y modulación de la carga interna en lagos eutróficos utilizando un método de geoingeniería basado en nanoburbujas de oxígeno.	Zhang et al., 2020
	Oxidation of Flooded Paddy Soil Through Irrigation with Water Containing Oxygen NB.	Oxidación de suelo inundado mediante irrigación con agua que contiene nanoburbujas de oxígeno.	Minamikawa & Makino, 2020
	Mitigation of Methylmercury Production in Eutrophic Waters by Interfacial Oxygen Nanobubbles.	Mitigación de la producción de metilmercurio en aguas eutróficas mediante nanoburbujas de oxígeno interfaciales.	Ji et al., 2020
	Interfacial Oxygen Nanobubbles Reduce Methylmercury Production Ability of Sediments in Eutrophic Waters.	Las nanoburbujas de oxígeno interfaciales reducen la capacidad de producción de metilmercurio de los sedimentos en aguas eutróficas.	Ji, Liu, & Pan, 2020
	Getting More with Less: Supplemental Aeration Using Oxygen Nanobubbles to Improve MBR Performance.	Obtener más con menos: aireación suplementaria utilizando nanoburbujas de oxígeno para mejorar el rendimiento del MBR.	White et al., 2019
	High Temperature and Pressure Inside a Dissolving Oxygen Nanobubble.	Alta temperatura y presión dentro de una nanoburbuja de oxígeno disolviéndose.	Yasui et al., 2019
	Generation of Nanobubbles by Ceramic Membrane Filters: The Dependence of Bubble Size and Zeta Potential on Surface Coating, Pore Size and Injected Gas Pressure.	Generación de nanoburbujas por filtros de membrana cerámica: la dependencia del tamaño de la burbuja y el potencial zeta en el recubrimiento de la superficie, el tamaño del poro y la presión de gas inyectado.	Ahmed et al., 2018
Nanoburbujas de Dióxido de Carbono.	Hypoxia Remediation and Methane Emission Manipulation Using Surface Oxygen Nanobubbles.	Remediación de hipoxia y manipulación de emisiones de metano utilizando nanoburbujas de oxígeno superficiales.	Shi et al., 2018
	Synergistic Roles of Carbon Dioxide Nanobubbles and Biochar for Promoting Direct CO ₂ Assimilation by Plants and Optimizing Nutrient Uptake Efficiency.	Roles sinérgicos de las nanoburbujas de dióxido de carbono y el biochar para promover la asimilación directa de CO ₂ por las plantas y optimizar la eficiencia de absorción de nutrientes.	Singh et al., 2024

Nanoburbujas de Dióxido de Carbono.	Generation and Influence of Carbon Dioxide Nanobubbles on Physicochemical Properties Including the Surface Tension of Clarified Apple Juice.	Generación e influencia de las nanoburbujas de dióxido de carbono en las propiedades fisicoquímicas, incluida la tensión superficial del jugo de manzana clarificado.	Phan et al., 2024
	Synthesis of Carbon Quantum Dots via Electrochemically-Induced Carbon Dioxide Nanobubbles Exfoliation of Graphite for Heavy Metal Detection in Wastewater.	Síntesis de puntos cuánticos de carbono con NB de dióxido de carbono inducidas electroquímicamente para la exfoliación de grafito en la detección de metales pesados en aguas residuales.	Yat et al., 2024
	Impact of Carbon Dioxide Nanobubbles on Crystallising Properties of Palm Oil.	Impacto de las nanoburbujas de dióxido de carbono en las propiedades de cristalización del aceite de palma.	Phan et al., 2024
	CO ₂ Nanobubbles Utility for Enhanced Plant Growth and Productivity: Recent Advances in Agriculture.	Utilidad de las nanoburbujas de CO ₂ para el crecimiento y la productividad mejorados de las plantas: avances recientes en la agricultura.	Pal & Anantharaman, 2022
	Nanobubbles Promote Nutrient Utilization and Plant Growth in Rice by Upregulating Nutrient Uptake Genes and Stimulating Growth Hormone Production.	Las nanoburbujas promueven la utilización de nutrientes y el crecimiento de las plantas en el arroz mediante la regulación al alza de los genes de absorción de nutrientes y la estimulación de la producción de hormonas de crecimiento.	Wang et al., 2021
	Magnesium-Promoted Rapid Nucleation of Carbon Dioxide Hydrates.	Nucleación rápida de hidratos de dióxido de carbono promovida por magnesio.	Kar et al., 2021
	Effect of Electrolytes and Surfactants on Generation and Longevity of Carbon Dioxide Nanobubbles.	Efecto de los electrolitos y los surfactantes en la generación y longevidad de las nanoburbujas de dióxido de carbono.	Phan et al., 2021
	Using Nanobubbled Carbon Dioxide for Effective Microextraction of Heavy Metals.	Uso de dióxido de carbono nanoburbujado para la microextracción efectiva de metales pesados.	J. H. Lee et al., 2020
	Nanobubbles Effect on Heavy Metal Ions Adsorption by Activated Carbon.	Efecto de las nanoburbujas en la adsorción de iones de metales pesados por carbón activado.	Kyzas et al., 2019
	Enhancement of Tomato Plant Growth and Productivity in Organic Farming by Agri-Nanotechnology Using Nanobubble Oxygenation.	Mejora del crecimiento y la productividad de las plantas de tomate en la agricultura orgánica mediante la agri-nanotecnología utilizando oxigenación con nanoburbujas.	Wu et al., 2019
Water Crystallisation of Model Sugar Solutions with Nanobubbles Produced from Dissolved Carbon Dioxide.	Cristalización del agua de soluciones de azúcar modelo con nanoburbujas producidas a partir de dióxido de carbono disuelto.	Adhikari et al., 2019	

Nanoburbujas de Dióxido de Carbono.	Influences of Air, Oxygen, Nitrogen, and Carbon Dioxide Nanobubbles on Seed Germination and Plant Growth.	Influencias del aire, el oxígeno, el nitrógeno y las nanoburbujas de dióxido de carbono en la germinación de semillas y el crecimiento de las plantas.	Ahmed, Shi, et al., 2018
	Effect of pH on Heavy Metal Removal in Contaminated Soil Using Nanobubble.	Efecto del pH en la eliminación de metales pesados en suelos contaminados utilizando nanoburbujas.	Kim et al., 2018
	The Combination of Nanobubble Aeration and Iron-Based Multi-Carbon Source Composites Achieves Efficient Aquaculture Wastewater Nitrogen Removal.	La combinación de aireación con nanoburbujas y compuestos de múltiples fuentes de carbono a base de hierro logra una eficiente eliminación de nitrógeno en aguas residuales de acuicultura.	Lu et al., 2024
	Oxidation Capacity Evaluation of Oxygen Nanobubbles for Dye Wastewater Treatment.	Evaluación de la capacidad de oxidación de las nanoburbujas de oxígeno para el tratamiento de aguas residuales con tintes.	Nguyen et al., 2024
	The Effect of Using Nano and Microbubbles as Aeration Strategies on the Nitrification Process, Microbial Community Composition, and Growth of <i>Penaeus Vannamei</i> in a Super-Intensive Biofloc System.	El efecto del uso de nanoburbujas y microburbujas como estrategias de aireación en el proceso de nitrificación, la composición de la comunidad microbiana y el crecimiento de <i>Penaeus vannamei</i> en un sistema de biofloc superintensivo.	Ramiro et al., 2024
Tratamiento del Agua.	Nanobubble Applications in Aquaculture Industry for Improving Harvest Yield, Wastewater Treatment, and Disease Control.	Aplicaciones de nanoburbujas en la industria de la acuicultura para mejorar el rendimiento de la cosecha, el tratamiento de aguas residuales y el control de enfermedades.	Yaparathne et al., 2024
	Development of Urban Wastewater Treatment Model Using Nano Bubbles with an Emphasis on Increasing the Efficiency of Wastewater Treatment.	Desarrollo de un modelo de tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando nanoburbujas con énfasis en aumentar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales.	Yarahmadi et al., 2023
	Advancing Aerobic Digestion Efficiency Using Ultrafine Bubbles in Wastewater Treatment.	Avanzando en la eficiencia de la digestión aeróbica utilizando burbujas ultrafinas en el tratamiento de aguas residuales.	Temesgen & Han, 2023
	Nanobubbles in Water and Wastewater Treatment Systems: Small Bubbles Making Big Difference.	Nanoburbujas en sistemas de tratamiento de agua y aguas residuales: pequeñas burbujas que marcan una gran diferencia.	Jia et al., 2023
	Strategies to Overcome Mass Transfer Limitations of Hydrogen During Anaerobic Gaseous Fermentations: A Review.	Estrategias para las limitaciones de transferencia de masa de hidrógeno durante fermentaciones anaeróbicas gaseosas: una revisión exhaustiva.	Ale Enriquez & Ahring, 2023

Tratamiento del Agua.	Nanofluids as a Coolant for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Recent Trends, Challenges, and Future Perspectives.	Nanofluidos como refrigerante para celdas de combustible de membrana de electrolito de polímero: tendencias recientes, desafíos y perspectivas futuras.	Madheswaran et al., 2023
	Nanobubble Aeration Enhanced Wastewater Treatment and Bioenergy Generation in Constructed Wetlands Coupled with Microbial Fuel Cells.	Aireación con nanoburbujas mejorada para el tratamiento de aguas residuales y la generación de bioenergía en humedales construidos acoplados con celdas de combustible microbianas.	Lyu et al., 2023
	Effect of Nanobubbles (Oxygen, Ozone) on the Pacific White Shrimp (<i>Penaeus Vannamei</i>), <i>Vibrio Parahaemolyticus</i> and Water Quality Under Lab Conditions.	Efecto de las nanoburbujas (oxígeno, ozono) en el camarón blanco del Pacífico (<i>Penaeus vannamei</i>), <i>Vibrio parahaemolyticus</i> y la calidad del agua bajo condiciones de laboratorio.	Nghia et al., 2022
	Micro and Nanobubbles in Water and Wastewater Treatment: A State-of-the-Art Review.	Micro y nanoburbujas en el tratamiento de agua y aguas residuales: una revisión del estado del arte.	Levitsky et al., 2022
	Hybrid Nanobubble-Forward Osmosis System for Aquaculture Wastewater Treatment and Reuse.	Sistema híbrido de nanoburbujas-osmosis directa para el tratamiento y reutilización de aguas residuales de acuicultura.	Farid et al., 2022
	Untapped Potential: Applying Microbubble and Nanobubble Technology in Water and Wastewater Treatment and Ecological Restoration.	Potencial no aprovechado: aplicación de la tecnología de microburbujas y nanoburbujas en el tratamiento de agua y aguas residuales y la restauración ecológica.	(Zhou et al., 2022
	A Review on Future Wastewater Treatment Technologies: Micro-Nanobubbles, Hybrid Electro-Fenton Processes, Photocatalytic Fuel Cells, and Microbial Fuel Cells.	Una revisión sobre tecnologías futuras de tratamiento de aguas residuales: micro-nanoburbujas, procesos híbridos electro-Fenton, celdas de combustible fotocatalíticas y celdas de combustible microbianas.	Selihin & Tay, 2022
	Microbubble and Nanobubble-Based Gas Flotation for Oily Wastewater Treatment: A Review.	Flotación de gas basada en microburbujas y nanoburbujas para el tratamiento de aguas residuales oleosas: una revisión.	Shen et al., 2022
Alternative Methods for Cleaning Membranes in Water and Wastewater Treatment.	Métodos alternativos para limpiar membranas en el tratamiento de agua y aguas residuales.	Terán Hilaes et al., 2022	

1) Tendencia 1: Nanoburbujas de oxígeno y dióxido de carbono en la Optimización Agrícola.

Este clúster agrupa investigaciones centradas en la aplicación de nanoburbujas para mejorar prácticas agrícolas, incluyendo la germinación de semillas, el crecimiento de plantas, la mejora de la estructura del suelo. Los estudios destacan el uso de nanoburbujas de diferentes gases para optimizar la producción agrícola y reducir los impactos ambientales negativos.

La aplicación de nanoburbujas de oxígeno y dióxido de carbono en la agricultura puede ofrecer múltiples beneficios que optimizan tanto la calidad del agua como la salud del suelo y los cultivos. La mitigación de arsénico en el cultivo de arroz es crucial para mejorar la seguridad alimentaria y la calidad del producto final, especialmente en regiones con suelos contaminados por este elemento. Además, la mejora de la calidad del agua tratada mediante nanoburbujas permite su reutilización en el riego agrícola, promoviendo prácticas más sostenibles. En la acuicultura, la salud y el crecimiento de peces de cultivo se ven favorecidos, incrementando la eficiencia y sostenibilidad del sector. Las técnicas basadas en nanoburbujas también pueden rehabilitar suelos contaminados y aumentar la productividad de los cultivos. La mejora de la estructura del suelo y la actividad microbiana conduce a suelos más saludables y productivos, beneficiando a la agricultura a largo plazo. Además, el riego por goteo con aguas residuales tratadas con nanoburbujas optimiza el uso del agua y mejora las condiciones del suelo, favoreciendo un crecimiento más saludable de los cultivos.

2) Tendencia 2: El Impacto de las nanoburbujas en el agua, la calidad nutricional y la resistencia a enfermedades en cultivos.

La tendencia de utilizar nanoburbujas de dióxido de carbono y oxígeno en el tratamiento del agua para mejorar la calidad nutricional y la resistencia a enfermedades de los cultivos ha ganado interés significativo en la investigación agrícola.

Las nanoburbujas de dióxido de carbono juegan un papel crucial en la promoción del crecimiento y la salud de las plantas, según estudios recientes, estas nanoburbujas pueden

mejorar la asimilación directa de CO₂ por las plantas y optimizar la eficiencia de absorción de nutrientes, como se menciona en "Synergistic Roles of Carbon Dioxide Nanobubbles and Biochar for Promoting Direct CO₂ Assimilation by Plants and Optimizing Nutrient Uptake Efficiency". En el contexto agrícola además la investigación ha destacado que las nanoburbujas de CO₂ pueden aumentar la productividad de los cultivos y promover un crecimiento saludable, como se señala en "CO₂ Nanobubbles Utility for Enhanced Plant Growth and Productivity: Recent Advances in Agriculture".

Por otro lado, las nanoburbujas de oxígeno han mostrado efectos significativos en el tratamiento del agua, mejorando su calidad y promoviendo la resistencia a enfermedades en los cultivos, artículos como "Enhancement of Tomato Plant Growth and Productivity in Organic Farming by Agri-Nanotechnology Using Nanobubble Oxygenation" demuestran cómo la oxigenación con nanoburbujas puede mejorar el crecimiento y la productividad de las plantas de tomate en la agricultura orgánica. Asimismo, estudios han evidenciado que el uso de nanoburbujas puede optimizar procesos de tratamiento de aguas residuales, incrementando su eficiencia y sostenibilidad ("Development of Urban Wastewater Treatment Model Using Nano Bubbles with an Emphasis on Increasing the Efficiency of Wastewater Treatment").

Tendencia 3: La digestión anaerobia y la eficiencia del uso sostenible de los recursos en la agricultura.

Este clúster agrupa investigaciones que abordan el uso de nanoburbujas para mejorar la producción de metano en procesos de digestión anaeróbica. Los estudios incluyen el uso de diferentes tipos de nanoburbujas (como hidrógeno, oxígeno y CO₂) y su impacto en la eficiencia de la producción de metano. Los mecanismos incluyen la mejora de la hidrólisis y acidificación de la biomasa, la co-digestión con residuos agrícolas y la mitigación de la inhibición por salinidad y otros factores adversos.

En el contexto agrícola, la mejora de la producción de metano puede proporcionar una fuente de energía renovable a partir de residuos agrícolas, esto no solo reduce los residuos, sino que también ofrece una alternativa sostenible para la gestión de desechos y la

producción de energía en granjas. Además, el uso de nanoburbujas puede mejorar la estabilidad y eficiencia del proceso de digestión anaeróbica, permitiendo una gestión más efectiva de los desechos agrícolas y contribuyendo a la economía circular en el sector agrícola.

CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

En base al análisis bibliométrico de 635 metadatos, se observa que la frecuencia de citas y la calidad de los documentos están correlacionadas, los estudios del primer cuartil, con mayor frecuencia de citas, destacan por su integridad de datos y son fundamentales para comprender el impacto de las nanoburbujas en la agricultura, mientras que los estudios en cuartiles inferiores son menos citados, también proporcionan información valiosa y complementan los hallazgos de los documentos más influyentes, ofreciendo una visión integral del campo y destacando tanto estudios consolidados como áreas emergentes de investigación.

Los resultados muestran que el primer cuartil tiene los valores más altos en cantidad de documentos, tasa de crecimiento anual, promedio de citas por documento y colaboración internacional, además, los trabajos más citados son recientes, altamente impactantes y resultado de amplia colaboración.

El análisis de producción científica anual muestra estabilidad inicial en los primeros y segundos cuartiles, con un incremento notable en los últimos años. Todos los cuartiles experimentan un crecimiento exponencial hacia 2022, seguido de una disminución en 2023.

El análisis de los autores más relevantes revela que Zhang Z. lidera con 28 publicaciones, en las que se incluye los términos más frecuentes en todos los cuartiles como tratamiento del agua y oxígeno disuelto, reflejando un enfoque significativo en aplicaciones ambientales y purificación de agua.

Los mapas temáticos destacan que la investigación se centra en aplicaciones ambientales y tratamiento de agua, con áreas activas en producción de biogás, irrigación y remediación de sedimentos. Los principales países en colaboraciones internacionales son China, Estados Unidos, Alemania, Reino Unido y Japón, formando el núcleo de la red global

de investigación sobre nanoburbujas en la agricultura.

En cuanto a las tendencias identificadas tenemos que las investigaciones revisadas demuestran que las nanoburbujas de oxígeno y dióxido de carbono pueden tener un impacto significativo en la productividad agrícola, siendo que estas mejoran la germinación de semillas y el crecimiento de las plantas, optimizan la estructura del suelo y la actividad microbiana, y permiten una mejor utilización de nutrientes, además de rehabilitar suelos contaminados y mejorar la eficiencia de la acuicultura, incrementando así la productividad en diversas áreas agrícolas.

A su vez estas nanoburbujas han mostrado beneficios considerables en la calidad nutricional y la resistencia a enfermedades de los cultivos, ya que las mismas mejoran la asimilación de dióxido de carbono por las plantas y optimizan la eficiencia de absorción de nutrientes, lo que se traduce en una mayor productividad y un crecimiento más saludable. Por otro lado, las nanoburbujas de oxígeno mejoran la calidad del agua utilizada para riego y aumentan la resistencia de los cultivos a enfermedades, lo cual es crucial para la agricultura orgánica y sostenible.

Finalmente concluimos que el uso de nanoburbujas promueve la sostenibilidad de los recursos, optimizando los procesos de tratamiento de aguas residuales, permitiendo su reutilización en riego agrícola y otras aplicaciones, fomentando así prácticas más sostenibles, siendo también que la aplicación de nanoburbujas en la digestión anaerobia para la producción de metano a partir de residuos agrícolas ofrece una fuente renovable de energía y una gestión más eficiente de los desechos, contribuyendo a una economía circular en la agricultura.

5.2. Recomendaciones futuras

La investigación futura debería enfocarse en la aplicación de nanoburbujas en una variedad más amplia de cultivos, esto no solo confirmará los resultados positivos obtenidos hasta ahora, sino que también permitirá explorar su impacto en diferentes condiciones agrícolas, optimizando el uso de nanoburbujas para maximizar el rendimiento y la calidad de

una mayor variedad de productos agrícolas, esta ampliación es esencial para validar la efectividad de las nanoburbujas en contextos diversos y para descubrir nuevas aplicaciones potenciales.

Promover el uso de nanoburbujas en la gestión del agua agrícola se perfila como una tendencia clave debido a su capacidad para mejorar la eficiencia del riego y reducir la contaminación, la instalación de sistemas de generación de nanoburbujas en las fuentes de agua utilizadas para riego puede aumentar significativamente la sostenibilidad agrícola al optimizar el uso del agua y mejorar la calidad del agua utilizada, lo que a su vez puede tener un impacto positivo en la salud del suelo y de los cultivos.

Fomentar la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de generación y aplicación de nanoburbujas es una tendencia crucial para el futuro, optimizar las características y métodos de producción de las nanoburbujas incrementará su eficacia y reducirá costos, haciendo esta tecnología más accesible y eficiente para los agricultores, este desarrollo es fundamental para superar las limitaciones actuales y mejorar la implementación práctica de las nanoburbujas en la agricultura y otras industrias.

Bibliografía

- Adhikari, B. M., Tung, V. P., Truong, T., Bansal, N., & Bhandari, B. (2019). 147 Water Crystallisation of Model Sugar Solutions with Nanobubbles Produced from Dissolved Carbon Dioxide. *Food Biophysics*, 14(4), 403-414. <https://doi.org/10.1007/s11483-019-09590-2>
- Ahmed, A. K. A., Shalaby, M., Negim, O., & Abdel-Wahed, T. (2023). 501 Eco-Friendly Enhancement of Secondary Effluent Characteristics with Air and Oxygen Nanobubbles Generated by Ceramic Membrane Filters. *Environmental Processes*, 10(1). <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00628-9>
- Ahmed, A. K. A., Shi, X., Hua, L., Manzueta, L., Qing, W., Marhaba, T., & Zhang, W. (2018). 125 Influences of Air, Oxygen, Nitrogen, and Carbon Dioxide Nanobubbles on Seed Germination and Plant Growth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(20), 5117-5124. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00333>
- Ahmed, A. K. A., Sun, C., Hua, L., Zhang, Z., Zhang, Y., Marhaba, T., & Zhang, W. (2018). 121 Colloidal Properties of Air, Oxygen, and Nitrogen Nanobubbles in Water: Effects of Ionic Strength, Natural Organic Matters, and Surfactants. *Environmental Engineering Science*, 35(7), 720-727. <https://doi.org/10.1089/ees.2017.0377>
- Ahmed, A. K. A., Sun, C., Hua, L., Zhang, Z., Zhang, Y., Zhang, W., & Marhaba, T. (2018). 122 Generation of nanobubbles by ceramic membrane filters: The dependence of bubble size and zeta potential on surface coating, pore size and injected gas pressure. *Chemosphere*, 203, 327-335. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.157>
- Ale Enriquez, F., & Ahring, B. K. (2023). 485 Strategies to overcome mass transfer limitations of hydrogen during anaerobic gaseous fermentations: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 377. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128948>
- An, H., Tan, B. H., Zeng, Q., & Ohi, C.-D. (2016). Stability of Nanobubbles Formed at the Interface between Cold Water and Hot Highly Oriented Pyrolytic Graphite. *Langmuir*,

32(43), 11212-11220. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b01531>

Angarita Becerra, L. D. (2014). Estudio bibliométrico sobre uso de métodos y técnicas cualitativas en investigación publicada en bases de datos de uso común entre el 2011-2013. *Revista Iberoamericana de Psicología*, 7(2), 67-76.

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>

Azevedo, A., Etchepare, R., Calgaroto, S., & Rubio, J. (2016). 86 Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and features. *Minerals Engineering*, 94, 29-37.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.05.001>

Azevedo, A., Etchepare, R., & Rubio, J. (2017). 105 Raw water clarification by flotation with microbubbles and nanobubbles generated with a multiphase pump. *Water Science and Technology*, 75(10), 2342-2349. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.113>

Bai, M., Liu, Z., Liu, Z., He, C., Fan, Z., & Yuan, M. (2024). 580 Effect of surfactant frequently used in soil flushing on oxygen mass transfer in micro-nano-bubble aeration system. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 67, 174-181.
<https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.11.009>

Baram, S., Evans, J. F., Berezkin, A., & Ben-Hur, M. (2021). 294 Irrigation with treated wastewater containing nanobubbles to aerate soils and reduce nitrous oxide emissions. *Journal of Cleaner Production*, 280.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124509>

Baram, S., Weinstein, M., Evans, J. F., Berezkin, A., Sade, Y., Ben-Hur, M., Bernstein, N., & Mamane, H. (2022). 398 Drip irrigation with nanobubble oxygenated treated wastewater improves soil aeration. *Scientia Horticulturae*, 291.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110550>

Barkova, O. Y., Larkina, T. A., Krutikova, A. A., Polteva, E. A., Shcherbakov, Y. S., Peglivanyan, G. K., & Pozovnikova, M. V. (2022). 376 Innovative Approaches to

- Genome Editing in Chickens. *Cytology and Genetics*, 56(2), 196-207.
<https://doi.org/10.3103/S0095452722020037>
- Batagoda, J. H., Hewage, S. D. A., & Meegoda, J. N. (2018). 113 Nano-ozone bubbles for drinking water treatment. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 14(2), 57-66. <https://doi.org/10.1680/jenes.18.00015>
- Batagoda, J. H., Meegoda, J. N., & Hewage, S. A. (2018). 142 In Situ Remediation of Passaic River Sediments Using Ultrasound and Ozone Nanobubbles. En K. S (Ed.), *World Environmental and Water Resources Congress 2018: Groundwater, Sustainability, and Hydro-Climate/Climate Change—Selected Papers from the World Environmental and Water Resources Congress 2018* (pp. 49-63). American Society of Civil Engineers (ASCE). <https://doi.org/10.1061/9780784481417.005>
- Becerra, L. D. A. (2014). Estudio bibliométrico sobre uso de métodos y técnicas cualitativas en investigación publicada en bases de datos de uso común entre el 2011-2013. *Revista iberoamericana de psicología*, 7(2), Article 2. <https://doi.org/10.33881/2027-1786.rip.7207>
- Bhandari, P., Wang, X., & Irudayaraj, J. (2017). Oxygen Nanobubble Tracking by Light Scattering in Single Cells and Tissues. *ACS Nano*, 11(3), 2682-2688.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.6b07478>
- Borkent, B. M., Dammer, S. M., Schonherr, H., Vancso, G. J., & Lohse, D. (2011). 30 Superstability of surface nanobubbles. *SOCAR Proceedings*, 2011(1), 64-68.
<https://doi.org/10.5510/OGP20110100059>
- Bu, X., Zhang, T., Chen, Y., Peng, Y., Xie, G., & Wu, E. (2018). 140 Comparison of mechanical flotation cell and cyclonic microbubble flotation column in terms of separation performance for fine graphite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 54(3), 732-740. <https://doi.org/10.5277/ppmp1873>
- Cai, C., Sun, W., He, S., Zhang, Y., & Wang, X. (2023). 458 Ceramic membrane fouling mechanisms and control for water treatment. *Frontiers of Environmental Science and*

Engineering, 17(10). <https://doi.org/10.1007/s11783-023-1726-9>

Cai, C., Zhao, Z., Zhang, Y., Li, M., Li, L., Cheng, P., & Shen, W. (2022a). 319 Molecular Hydrogen Improves Rice Storage Quality via Alleviating Lipid Deterioration and Maintaining Nutritional Values. *Plants*, 11(19).

<https://doi.org/10.3390/plants11192588>

Cai, C., Zhao, Z., Zhang, Y., Li, M., Li, L., Cheng, P., & Shen, W. (2022b). Molecular Hydrogen Improves Rice Storage Quality via Alleviating Lipid Deterioration and Maintaining Nutritional Values. *Plants*, 11(19), Article 19.

<https://doi.org/10.3390/plants11192588>

Camps, D. (2007). Estudio bibliométrico general de colaboración y consumo de la información en artículos originales de la revista *Universitas Médica*, período 2002 a 2006. *Universitas Medica*, 48, 358-365.

Chae, S. H., Kim, M. S., Kim, J.-H., & Fortner, J. D. (2023). 449 Nanobubble Reactivity: Evaluating Hydroxyl Radical Generation (or Lack Thereof) under Ambient Conditions. *ACS ES and T Engineering*, 3(10), 1504-1510.

<https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00124>

Chen, W., Bastida, F., Liu, Y., Zhou, Y., He, J., Song, P., Kuang, N., & Li, Y. (2023). 488 Nanobubble oxygenated increases crop production via soil structure improvement: The perspective of microbially mediated effects. *Agricultural Water Management*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108263>

Chen, Z., Fu, M., Yuan, C., Hu, X., Bai, J., Pan, R., Lu, P., & Tang, M. (2022). 419 Study on the degradation of tetracycline in wastewater by micro-nano bubbles activated hydrogen peroxide. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 43(23), 3580-3590. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1928292>

Cheng, P., Wang, J., Zhao, Z., Kong, L., Lou, W., Zhang, T., Jing, D., Yu, J., Shu, Z., Huang, L., Zhu, W., Yang, Q., & Shen, W. (2021). Molecular Hydrogen Increases Quantitative and Qualitative Traits of Rice Grain in Field Trials. *Plants*, 10(11), Article

11. <https://doi.org/10.3390/plants10112331>
- Chu, Q., Sha, Z., Li, D., Feng, Y., Xue, L., Zhou, D., & Xing, B. (2023). 493 Oxygen Nanobubble-Loaded Biochars Mitigate Copper Transfer from Copper-Contaminated Soil to Rice and Improve Rice Growth. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 11(13), 5032-5044. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c06776>
- Chuenchart, W., Karki, R., Shitanaka, T., Marcelino, K. R., Lu, H., & Khanal, S. K. (2021). 268 Nanobubble technology in anaerobic digestion: A review. *Bioresource Technology*, 329. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124916>
- Chung, Y. K., Cho, A. R., Shim, M. S., & Kim, Y. J. (2022). 405 Nanobubble and Ozone Nanobubble Treatments Increase the Vase Life of Cut Cymbidium 'Spring Pearl'. *Horticultural Science and Technology*, 40(3), 296-306. <https://doi.org/10.7235/HORT.20220028>
- Coss, S. L., Salvador, A. P., & Salazar, A. L. (2017). CALENTAMIENTO GLOBAL, POBLACIÓN, ALIMENTACIÓN Y SUSTENTABILIDAD: LÍMITES EN EL CONTEXTO ECONÓMICO Y SOCIAL DEL SECTOR AGROPECUARIO EN MÉXICO. *Creceer Empresarial Journal of Management and Development*, 1, Article 1. <https://journalusco.edu.co/index.php/cempresarial/article/view/1567>
- Deckers, S. M., Lorgouilloux, Y., Gebruers, K., Baggerman, G., Verachtert, H., Neven, H., Michiels, C., Derdelinckx, G., Delcour, J. A., & Martens, J. (2011). 28 Dynamic light scattering (DLS) as a tool to detect CO₂-hydrophobin structures and study the primary gushing potential of beer. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 69(3), 144-149. <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-2011-0524-01>
- Deckers, S. M., Vissers, L., Khalesi, M., Shokribousjein, Z., Verachtert, H., Gebruers, K., Pirlot, X., Rock, J.-M., Ilberg, V., Titze, J., Neven, H., & Derdelinckx, G. (2013). 46 Thermodynamic view of primary gushing. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 71(3), 149-152. <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-2013-0606-01>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a

- bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285-296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Escorcía Otálora, T. A. (2008). *Análisis bibliométrico como herramienta para el seguimiento de publicaciones científicas, tesis y trabajos de grado*.
<http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/8212>
- Etchepare, R., Oliveira, H., Nicknig, M., Azevedo, A., & Rubio, J. (2017). 98 Nanobubbles: Generation using a multiphase pump, properties and features in flotation. *Minerals Engineering*, 112, 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.020>
- Fan, M., Tao, D., Honaker, R., & Luo, Z. (2010). 20 Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part III): Specially designed laboratory scale column flotation of phosphate. *Mining Science and Technology*, 20(3), 317-338.
[https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60205-2](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60205-2)
- Fan, W., Cui, J., Li, Q., Huo, Y., Xiao, D., Yang, X., Yu, H., Wang, C., Jarvis, P., Lyu, T., & Huo, M. (2021). 248 Bactericidal efficiency and photochemical mechanisms of micro/nano bubble-enhanced visible light photocatalytic water disinfection. *Water Research*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117531>
- Fan, W., Zhang, Y., Liu, S., Li, X., & Li, J. (2020). 206 Alleviation of copper toxicity in *Daphnia magna* by hydrogen nanobubble water. *Journal of Hazardous Materials*, 389. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122155>
- Fan, Y., Lei, Z., Yang, X., Kobayashi, M., Adachi, Y., Zhang, Z., & Shimizu, K. (2020). 185 Effect of nano-bubble water on high solid anaerobic digestion of pig manure: Focus on digestion stability, methanogenesis performance and related mechanisms. *Bioresource Technology*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123793>
- Fan, Y., Liang, W., GAO, K.-X., LIU, J.-J., CHAI, D.-P., & ZHANG, Y.-J. (2018). Applications of Modular Microfluidics Technology. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 46, 1863-1871. [https://doi.org/10.1016/S1872-2040\(18\)61126-0](https://doi.org/10.1016/S1872-2040(18)61126-0)
- Fan, Y., Yang, X., Lei, Z., Adachi, Y., Kobayashi, M., Zhang, Z., & Shimizu, K. (2021). 280

- Novel insight into enhanced recoverability of acidic inhibition to anaerobic digestion with nano-bubble water supplementation. *Bioresource Technology*, 326.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124782>
- Fang, Z., Wang, L., Wang, X., Zhou, L., Wang, S., Zou, Z., Tai, R., Zhang, L., & Hu, J. (2018). Formation and Stability of Surface/Bulk Nanobubbles Produced by Decompression at Lower Gas Concentration. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(39), 22418-22423. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b05688>
- Farid, M. U., Choi, P. J., Kharraz, J. A., Lao, J.-Y., St-Hilaire, S., Ruan, Y., Lam, P. K. S., & An, A. K. (2022). 374 Hybrid nanobubble-forward osmosis system for aquaculture wastewater treatment and reuse. *Chemical Engineering Journal*, 435.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135164>
- Farrera, I., I. C., Martínez González, E. G., Santoyo Cortés, V. H., Aguilar-Gallegos, N., & Luna-Olea, R. A. (2023). La innovación agrícola: Su desarrollo analítico a partir de un estudio bibliométrico: La innovación agrícola. *Current Topics in Agronomic Science*, 3(2), Article 2. <https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2023.03.05>
- Fengyi, M., Zhongjin, H., Guosheng, J., & Fulong, N. (2023). 472 Molecular insights into the effects of lignin on methane hydrate formation in clay nanopores. *Energy*, 276.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127496>
- French, Montiel y Palmieri. (2014). *La innovación en la agricultura: Un proceso clave para el desarrollo sostenible* [Red Social Agropecuaria]. Engormix.
https://www.engormix.com/agricultura/miscellaneous/innovacion-agricultura-proceso-clave_a31215/
- Gómez Ulloa, I. R., Mero Velasco, K. A., & Soriano Idrovo, P. (2021). *Aplicación compuesta de abono orgánico y fertilizantes para reducir costos de producción en los cultivos de arroz de la provincia del Guayas* [Thesis, ESPOL. FCSH.].
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/53188>
- Guo, C., Wang, H., Wei, Y., Li, J., Peng, B., & Shu, X. (2022). 346 Experimental Study of Al-

- Modified Zeolite with Oxygen Nanobubbles in Repairing Black Odorous Sediments in River Channels. *Water (Switzerland)*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/w14142194>
- Guo, Z., Hu, B., Wang, H., Kong, L., Han, H., Li, K., Sun, S., Lei, Z., Shimizu, K., & Zhang, Z. (2020). 211 Supplementation with nanobubble water alleviates obesity-associated markers through modulation of gut microbiota in high-fat diet fed mice. *Journal of Functional Foods*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103820>
- Gurung, A., Dahl, O., & Jansson, K. (2016). 87 The fundamental phenomena of nanobubbles and their behavior in wastewater treatment technologies. *Geosystem Engineering*, 19(3), 133-142. <https://doi.org/10.1080/12269328.2016.1153987>
- He, C., Song, H., Hou, T., Jiao, Y., Li, G., Litt, Y. V., Zhang, Q., & Liu, L. (2023). 484 Simultaneous addition of CO₂-nanobubble water and iron nanoparticles to enhance methane production from anaerobic digestion of corn straw. *Bioresource Technology*, 377. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128947>
- He, C., Song, H., Liu, L., Li, P., Kumar Awasthi, M., Xu, G., Zhang, Q., Jiao, Y., Chang, C., & Yang, Y. (2022). 416 Enhancement of methane production by anaerobic digestion of corn straw with hydrogen-nanobubble water. *Bioresource Technology*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126220>
- He, J., Zhou, Y., Geilfus, C.-M., Cao, J., Fu, D., Baram, S., Liu, Y., & Li, Y. (2024). Enhancing Tomato Fruit Antioxidant Potential Through Hydrogen Nanobubble Irrigation. *Horticulture Research*, uhae111. <https://doi.org/10.1093/hr/uhae111>
- He, Z., Mi, F., Ning, F., Pang, J., & Jiang, G. (2022). 366 Methane Hydrate Formation in the Salty Water Confined in Clay Nanopores: A Molecular Simulation Study. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 10(18), 6128-6140. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c01985>
- Ho, W.-S., Lin, W.-H., Verpoort, F., Hong, K.-L., Ou, J.-H., & Kao, C.-M. (2023). 431 Application of novel nanobubble-contained electrolyzed catalytic water to cleanup petroleum-hydrocarbon contaminated soils and groundwater: A pilot-scale and

- performance evaluation study. *Journal of Environmental Management*, 347.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119058>
- Hou, T., Song, H., Cui, Z., He, C., Liu, L., Li, P., Li, G., Zhang, Q., Zhang, Z., Lei, Z., Litt, Y. V., & Jiao, Y. (2024). 553 Nanobubble technology to enhance energy recovery from anaerobic digestion of organic solid wastes: Potential mechanisms and recent advancements. *Science of the Total Environment*, 931.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172885>
- Hou, T., Zhao, J., Lei, Z., Shimizu, K., & Zhang, Z. (2021a). 249 Addition of air-nanobubble water to mitigate the inhibition of high salinity on co-production of hydrogen and methane from two-stage anaerobic digestion of food waste. *Journal of Cleaner Production*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127942>
- Hou, T., Zhao, J., Lei, Z., Shimizu, K., & Zhang, Z. (2021b). 283 Enhanced energy recovery via separate hydrogen and methane production from two-stage anaerobic digestion of food waste with nanobubble water supplementation. *Science of the Total Environment*, 761. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143234>
- Hou, T., Zhao, J., Lei, Z., Shimizu, K., & Zhang, Z. (2022). 393 Supplementation of KOH to improve salt tolerance of methanogenesis in the two-stage anaerobic digestion of food waste using pre-acclimated anaerobically digested sludge by air-nanobubble water. *Bioresource Technology*, 346. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126360>
- Hu, L., & Xia, Z. (2018). 146 Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 342, 446-453.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.030>
- Huang, M., Nhung, N. T. H., Dodbiba, G., & Fujita, T. (2023a). 426 Mitigation of arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by oxygen nanobubbles in hydroponic cultures. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 268.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115700>
- Huang, M., Nhung, N. T. H., Dodbiba, G., & Fujita, T. (2023b). Mitigation of arsenic

- accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by oxygen nanobubbles in hydroponic cultures. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 268, 115700. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115700>
- Huang, M., Nhung, N. T. H., Wu, Y., He, C., Wang, K., Yang, S., Kurokawa, H., Matsui, H., Dodbiba, G., & Fujita, T. (2023). Different nanobubbles mitigate cadmium toxicity and accumulation of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings in hydroponic cultures. *Chemosphere*, 312, 137250. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137250>
- J, Q., Z, Z., S, W., X, W., L, W., Y, D., H, Z., L, Z., & J, H. (2017). Formation and Stability of Bulk Nanobubbles Generated by Ethanol-Water Exchange. *Chemphyschem : A European Journal of Chemical Physics and Physical Chemistry*, 18(10). <https://doi.org/10.1002/cphc.201700010>
- Jadhav, A. J., & Barigou, M. (2020). Bulk Nanobubbles or Not Nanobubbles: That is the Question. *Langmuir*, 36(7), 1699-1708. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03532>
- Jadhav, A. J., Ferraro, G., & Barigou, M. (2021). Generation of Bulk Nanobubbles Using a High-Shear Rotor–Stator Device. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(23), 8597-8606. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01233>
- Ji, X., Liu, C., & Pan, G. (2020). 220 Interfacial oxygen nanobubbles reduce methylmercury production ability of sediments in eutrophic waters. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109888>
- Ji, X., Liu, C., Zhang, M., Yin, Y., & Pan, G. (2020). 208 Mitigation of methylmercury production in eutrophic waters by interfacial oxygen nanobubbles. *Water Research*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115563>
- Jia, M., Farid, M. U., Kharraz, J. A., Kumar, N. M., Chopra, S. S., Jang, A., Chew, J., Khanal, S. K., Chen, G., & An, A. K. (2023). 445 Nanobubbles in water and wastewater treatment systems: Small bubbles making big difference. *Water Research*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120613>
- Jia, M., M., Farid, M. U., Kharraz, J. A., Kumar, N. M., Chopra, S. S., Jang, A., Chew, J.,

- Khanal, S. K., Chen, G., & An, A. K. (2023). Nanobubbles in water and wastewater treatment systems: Small bubbles making big difference. *Water Research*, 245, 120613. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120613>
- Jin, Z., Liu, Z., Chen, G., Li, L., Zeng, Y., Cheng, X., Pathier, D., Xu, G., & Shen, W. (2023). 433 Molecular hydrogen-based irrigation extends strawberry shelf life by improving the synthesis of cell wall components in fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112551>
- Joy, N., Senthilkumar, G., Logesh, P. G., & Hariharan, R. (2023). 487 Investigation on physical properties of nanobubbled water using gas water circulation method: Environmental perspective. *Environmental Quality Management*, 32(4), 161-165. <https://doi.org/10.1002/tqem.21956>
- Kar, A., Acharya, P. V., Bhati, A., Mhadeshwar, A., Venkataraman, P., Barckholtz, T. A., Celio, H., Mangolini, F., & Bahadur, V. (2021). 259 Magnesium-Promoted Rapid Nucleation of Carbon Dioxide Hydrates. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 9(33), 11137-11146. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c03041>
- Khalesi, M., Deckers, S., Riveros-Galan, D., Gebruers, K., & Derdelinckx, G. (2015). 80 Upgraded model of primary gushing: From nanobubble formation until liquid expulsion. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 73(4), 343-346. <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-2015-0929-01>
- Kim, M. J., Kim, H. Y., Park, Y. S., Han, J. G., & Jeong, S. H. (2018). 135 Effect of pH on heavy metal removal in contaminated soil using nanobubble. *11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018*, 1, 838-842. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85099663320&partnerID=40&md5=1aa7760fd429bf8ced831a58ec7370fb>
- Kondrat'ev, S. A., & Moshkin, N. P. (2015). 78 Foam separation selectivity conditioned by the chemically attached agent. *Journal of Mining Science*, 50(4), 780-787. <https://doi.org/10.1134/S1062739114040188>

- Kyzas, G. Z., Bomis, G., Kosheleva, R. I., Efthimiadou, E. K., Favvas, E. P., Kostoglou, M., & Mitropoulos, A. C. (2019). 171 Nanobubbles effect on heavy metal ions adsorption by activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 356, 91-97.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.019>
- Lawal, T., Wang, H., Mirzaei-Paiaman, A., & Okuno, R. (2024). 611 Aqueous Nanobubble Dispersion of CO₂ for Enhanced Oil Recovery—Coreflooding and Huff-n-Puff Experiments. *Proceedings - SPE Symposium on Improved Oil Recovery, 2024-April*.
<https://doi.org/10.2118/218179-MS>
- Le, Q. T., & Sritontip, C. (2021). Effects of nano-bubbles on seed germination of muskmelon. *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*, 63(3), Article 3.
[https://doi.org/10.31276/VJSTE.63\(3\).42-47](https://doi.org/10.31276/VJSTE.63(3).42-47)
- Lee, J. H., Lee, S. H., & Suh, D. H. (2020). 200 Using nanobubbled carbon dioxide for effective microextraction of heavy metals. *Journal of CO₂ Utilization*, 39.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101163>
- Lee, S., Sutomo, W., Liu, C., & Loth, E. (2005). Micro-fabricated electrolytic micro-bubblers. *International Journal of Multiphase Flow*, 31(6), 706-722.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.02.002>
- Lee, S. Y., Jung, S. H., Cho, A. R., Shim, M. S., Chung, Y. K., & Kim, Y. J. (2021). 295 Germination and Seedling Growth Response of Sprouts and Leafy Vegetables after Applying Oxygen Nanobubble Water. *Journal of People, Plants, and Environment*, 24(6), 609-617. <https://doi.org/10.11628/KSPPE.2021.24.6.609>
- Levitsky, I., Tavor, D., & Gitis, V. (2022). 362 Micro and nanobubbles in water and wastewater treatment: A state-of-the-art review. *Journal of Water Process Engineering*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102688>
- Li, L., Wang, J., Jiang, K., Kuang, Y., Zeng, Y., Cheng, X., Liu, Y., Wang, S., & Shen, W. (2022). 365 Preharvest application of hydrogen nanobubble water enhances strawberry flavor and consumer preferences. *Food Chemistry*, 377.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131953>

- Li, L., Yin, Q., Zhang, T., Cheng, P., Xu, S., & Shen, W. (2021). 261 Hydrogen nanobubble water delays petal senescence and prolongs the vase life of cut carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) flowers. *Plants*, *10*(8). <https://doi.org/10.3390/plants10081662>
- Li, M., Zhu, G., Liu, Z., Li, L., Wang, S., Liu, Y., Lu, W., Zeng, Y., Cheng, X., & Shen, W. (2024). 598 Hydrogen Fertilization with Hydrogen Nanobubble Water Improves Yield and Quality of Cherry Tomatoes Compared to the Conventional Fertilizers. *Plants*, *13*(3). <https://doi.org/10.3390/plants13030443>
- Linh, N. V., Dien, L. T., Sangpo, P., Senapin, S., Thapinta, A., Panphut, W., St-Hilaire, S., Rodkhum, C., & Dong, H. T. (2022). 380 Pre-treatment of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with ozone nanobubbles improve efficacy of heat-killed *Streptococcus agalactiae* immersion vaccine. *Fish and Shellfish Immunology*, *123*, 229-237. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2022.03.007>
- Linh, N. V., Khongcharoen, N., Nguyen, D.-H., Dien, L. T., Rungrueng, N., Jhunkeaw, C., Sangpo, P., Senapin, S., Uttarotai, T., Panphut, W., St-Hilaire, S., Van Doan, H., & Dong, H. T. (2023). 427 Effects of hyperoxia during oxygen nanobubble treatment on innate immunity, growth performance, gill histology, and gut microbiome in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Fish and Shellfish Immunology*, *143*. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2023.109191>
- Liu, L., Liu, Y., Gao, B., Ji, R., Li, C., & Wang, S. (2020). 182 Removal of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) from water by carbonaceous nanomaterials: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *50*(22), 2379-2414. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1700751>
- Liu, S., Li, J., Oshita, S., Kamruzzaman, M., Cui, M., & Fan, W. (2021). 260 Formation of a Hydrogen Radical in Hydrogen Nanobubble Water and Its Effect on Copper Toxicity in *Chlorella*. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *9*(33), 11100-11109. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02936>

- Liu, S., Wang, Q., Ma, H., Huang, P., Li, J., & Kikuchi, T. (2010). Effect of micro-bubbles on coagulation flotation process of dyeing wastewater. *Separation and Purification Technology*, 71(3), 337-346. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.12.021>
- Liu, S., Wang, Q., Sun, T., Wu, C., & Shi, Y. (2012). The effect of different types of micro-bubbles on the performance of the coagulation flotation process for coke wastewater. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 87(2), 206-215. <https://doi.org/10.1002/jctb.2698>
- Liu, W., Lin, T., Zhang, X., Jiang, F., Yan, X., & Chen, H. (2022). 306 Adsorption of perfluoroalkyl acids on granular activated carbon supported chitosan: Role of nanobubbles. *Chemosphere*, 309. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136733>
- Long, L., Guo, H., Zhang, L., Gan, Q., Wu, C., Zhou, S., Peng, L. E., & Tang, C. Y. (2024). 568 Engraving Polyamide Layers by In Situ Self-Etchable CaCO₃ Nanoparticles Enhances Separation Properties and Antifouling Performance of Reverse Osmosis Membranes. *Environmental Science and Technology*, 58(14), 6435-6443. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c00164>
- Lu, J., Huang, X., Zhang, Z., Pang, H., Chen, K., Xia, H., Sui, Y., Chen, R., & Zhao, Z. (2022). 314 Co-coagulation of micro-nano bubbles (MNBs) for enhanced drinking water treatment: A study on the efficiency and mechanism of a novel cleaning process. *Water Research*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119245>
- Lu, Z., Xie, J., Zhu, D., Li, X., Jiang, X., & Cheng, X. (2024). 549 The combination of nanobubble aeration and iron-based multi-carbon source composites achieves efficient aquaculture wastewater nitrogen removal. *Chemical Engineering Journal*, 491. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152093>
- Lyu, T., Wu, Y., Zhang, Y., Fan, W., Wu, S., Mortimer, R. J. G., & Pan, G. (2023). 448 Nanobubble aeration enhanced wastewater treatment and bioenergy generation in constructed wetlands coupled with microbial fuel cells. *Science of the Total*

Environment, 895. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165131>

Madheswaran, D. K., Vengatesan, S., Varuvel, E. G., Praveenkumar, T., Jegadheeswaran, S., Pugazhendhi, A., & Arulmozhivarman, J. (2023). 444 Nanofluids as a coolant for polymer electrolyte membrane fuel cells: Recent trends, challenges, and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 424.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138763>

Maruyama, K., Suzuki, R., Oda, Y., Endo-Takahashi, Y., & Negishi, Y. (2013). 51

Ultrasound-Mediated Delivery Systems: Using Nano/Microbubbles or Bubble Liposomes. En *Bio-Nanotechnology: A Revolution in Food, Biomedical and Health Sciences*. Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118451915.ch12>

Mendes, J., J. A. J., Bueno, L. O., Oliveira, A. Y., & Gerolamo, M. C. (2022).

AGRICULTURE STARTUPS (AGTECHS): A BIBLIOMETRIC STUDY/STARTUPS DA AGRICULTURA (AGTECHS): UM ESTUDO BIBLIOMETRICO/STARTUPS AGRICOLAS (AGTECHS): UN ESTUDIO BIBLIOMETRICO. *International Journal of Professional Business Review*, 7(2), NA-NA.

Mi, F., He, Z., Jiang, G., & Ning, F. (2022). 302 Effects of marine environments on methane hydrate formation in clay nanopores: A molecular dynamics study. *Science of the Total Environment*, 852. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158454>

Minamikawa, K., & Makino, T. (2020). 212 Oxidation of flooded paddy soil through irrigation with water containing bulk oxygen nanobubbles. *Science of the Total Environment*, 709. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136323>

Minamikawa, K., Takahashi, M., Makino, T., Tago, K., & Hayatsu, M. (2015a). 70 Irrigation with oxygen-nanobubble water can reduce methane emission and arsenic dissolution in a flooded rice paddy. *Environmental Research Letters*, 10(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084012>

Minamikawa, K., Takahashi, M., Makino, T., Tago, K., & Hayatsu, M. (2015b). Irrigation with oxygen-nanobubble water can reduce methane emission and arsenic dissolution in a

- flooded rice paddy. *Environmental Research Letters*, 10(8), 084012.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084012>
- Moral-Muñoz, J. A., Herrera-Viedma, E., Santisteban-Espejo, A., & Cobo, M. J. (2020). Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review. *Profesional de La Información*, 29(1), Article 1.
<https://doi.org/10.3145/epi.2020.ene.03>
- Morgado, M., M. R., Pires, R. F., & Dantas, S. C. (2024). Análise bibliométrica sobre nanomateriais aplicados à indústria de fertilizantes. *Research, Society and Development*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i1.44827>
- Movahed, S. M. A., S., A. K., & Sarmah, A. K. (2021). Global trends and characteristics of nano- and micro-bubbles research in environmental engineering over the past two decades: A scientometric analysis. *Science of The Total Environment*, 785, 147362.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147362>
- Movahed, S. M. A., & Sarmah, A. K. (2021). 256 Global trends and characteristics of nano- and micro-bubbles research in environmental engineering over the past two decades: A scientometric analysis. *Science of the Total Environment*, 785.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147362>
- Muñoz, D. A. F., & Medina, M. Y. M. (2024). Adaptación de la seguridad alimentaria frente al fenómeno del niño en Ecuador durante el 2023. *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores*. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v11i3.4214>
- Nappini, S., Matruglio, A., Naumenko, D., Zilio, S. D., Bondino, F., Lazzarino, M., & Magnano, E. (2017). Graphene nanobubbles on TiO₂ for in-operando electron spectroscopy of liquid-phase chemistry. *Nanoscale*, 9(13), 4456-4466.
<https://doi.org/10.1039/C6NR09061C>
- Nazari, S., Gholami, A., Khoshdast, H., Li, J., He, Y., & Hassanzadeh, A. (2023). 533 Advanced Simulation of Quartz Flotation Using Micro-Nanobubbles by Hybrid Serving of Historical Data (HD) and Deep Learning (DL) Methods. *Minerals*, 13(1).

<https://doi.org/10.3390/min13010128>

Nazari, S., Shafaei, S. Z., Hassanzadeh, A., Azizi, A., Gharabaghi, M., Ahmadi, R., & Shahbazi, B. (2020). 223 Study of effective parameters on generating submicron (nano)-bubbles using the hydrodynamic cavitation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 56(5), 884-904. <https://doi.org/10.37190/PPMP/126628>

Ng, P. H., Huang, Q., Huang, L., Cheng, T. H., Man, K. Y., Cheng, K. P., Rita, P. M. A., Zhang, J., & St-Hilaire, S. (2023). 527 Assessment of Ozone Nanobubble Technology to Reduce Freshwater Algae. *Aquaculture Research*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/9539102>

Nghia, N. H., Nguyen, N. T., Binh, P. T., May, L. T., Huy, T. T., Giang, P. T., St-Hilaire, S., & Van, P. T. (2022). 402 Effect of nanobubbles (oxygen, ozone) on the Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*), *Vibrio parahaemolyticus* and water quality under lab conditions. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 25(8), 429-440. <https://doi.org/10.47853/FAS.2022.e39>

Nguyen, H.-H. T., Jeong, Y.-H., Choi, Y.-H., & Kwak, D.-H. (2024). 563 Oxidation capacity evaluation of oxygen nanobubbles for dye wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105344>

Niwano, M., Ma, T., Iwata, K., Tadaki, D., Yamamoto, H., Kimura, Y., & Hirano-Iwata, A. (2023). Two-dimensional water-molecule-cluster layers at nanobubble interfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 652, 1775-1783. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.08.173>

Oh, S. H., & Kim, J.-M. (2017). Generation and Stability of Bulk Nanobubbles. *Langmuir*, 33(15), 3818-3823. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b00510>

Oshita, S., & Uchida, T. (2013). 52 Basic Characterization of Nanobubbles and their Potential Applications. En *Bio-Nanotechnology: A Revolution in Food, Biomedical and Health Sciences*. Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118451915.ch29>

- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, *74*(9), 790-799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Pal, P., & Anantharaman, H. (2022). 348 CO₂nanobubbles utility for enhanced plant growth and productivity: Recent advances in agriculture. *Journal of CO₂ Utilization*, *61*. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102008>
- Patel, A. K., Singhanian, R. R., Chen, C.-W., Tseng, Y.-S., Kuo, C.-H., Wu, C.-H., & Dong, C. D. (2021). Advances in micro- and nano bubbles technology for application in biochemical processes. *Environmental Technology & Innovation*, *23*, 101729. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101729>
- Pei, L., Song, Y., Chen, G., Mu, L., Yan, B., & Zhou, T. (2024). 572 Enhancement of methane production from anaerobic digestion of *Erigeron canadensis* via O₂-nanobubble water supplementation. *Chemosphere*, *354*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141732>
- Phan, K., Truong, T., Wang, Y., & Bhandari, B. (2021). 237 Effect of electrolytes and surfactants on generation and longevity of carbon dioxide nanobubbles. *Food Chemistry*, *363*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130299>
- Phan, K., Truong, T., Wang, Y., & Bhandari, B. (2024a). 589 Generation and Influence of Carbon Dioxide Nanobubbles on Physicochemical Properties Including the Surface Tension of Clarified Apple Juice. *Food Biophysics*, *19*(1), 131-142. <https://doi.org/10.1007/s11483-023-09810-w>
- Phan, K., Truong, T., Wang, Y., & Bhandari, B. (2024b). 615 Impact of Carbon Dioxide Nanobubbles on Crystallising Properties of Palm Oil. *Food and Bioprocess Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03395-z>

- PRISMA statement*. (2024). PRISMA Statement. <https://www.prisma-statement.org>
- Purwono, Hadiyanto, H., & Budihardjo, M. A. (2024). 621 Harvesting of *Dunaliella salina* using electrocoagulation with helix electrode and producing HHO gas as promising Hydrogen fuel. *Global Nest Journal*, 26(1). <https://doi.org/10.30955/gnj.005289>
- Ramiro, B. D. O., Wasielesky, J. W., Pimentel, O. A. L. F., Poersch, L. H. D. S., Advent, B., Gonçalves Júnior, G. F., & Krummenauer, D. (2024). 551 The effect of using nano and microbubbles as aeration strategies on the nitrification process, microbial community composition, and growth of *Penaeus vannamei* in a super-intensive biofloc system. *Aquaculture*, 587. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.740842>
- Ramos, R., Rita, P., & Vong, C. (2023). Mapping research in marketing: Trends, influential papers, and agenda for future research. *Spanish Journal of Marketing - ESIC*, 28, in press. <https://doi.org/10.1108/SJME-10-2022-0221>
- Rezvani Mahmouee, A., Saghravani, S. F., & Dahrazma, B. (2023). 495 Evaluation of the Anti-Fouling Effects of Micro-Nano Bubbles on the Performance of Reverse Osmosis Membrane. *Journal of Environmental Engineering (United States)*, 149(4). <https://doi.org/10.1061/JOEEDU.EEENG-7072>
- Robinson, H. & Vélez, M. (2023). Caolín en el Control de Plagas Agrícolas: Un Estudio Bibliométrico Global de Tendencias, Colaboraciones y Aplicaciones en la Agricultura Sostenible. *Código Científico Revista de Investigación*, 4, 88-114. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v4/n2/233>
- Sakr, M., Mohamed, M. M., Maraqa, M. A., Hamouda, M. A., Aly Hassan, A., Ali, J., & Jung, J. (2022). A critical review of the recent developments in micro–nano bubbles applications for domestic and industrial wastewater treatment. *Alexandria Engineering Journal*, 61(8), 6591-6612. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.041>
- Sang, H., Jiao, X., Wang, S., Guo, W., Salahou, M. K., & Liu, K. (2018). Effects of micro-nano bubble aerated irrigation and nitrogen fertilizer level on tillering, nitrogen uptake and utilization of early rice. *Plant, Soil and Environment*, 64(7), 297-302.

<https://doi.org/10.17221/240/2018-PSE>

- Selihin, N. M., & Tay, M. G. (2022). 410 A review on future wastewater treatment technologies: Micro-nanobubbles, hybrid electro-Fenton processes, photocatalytic fuel cells, and microbial fuel cells. *Water Science and Technology*, 85(1), 319-341. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.618>
- Senthilkumar, G., & Sankar, S. L. (2023). 534 Implementation of Micro-Nanobubbles Technology for the Treatment of Domestic Wastewater: Experimental Study. *Water, Air, and Soil Pollution*, 234(1). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06071-8>
- Seridou, P., Monogyiou, S., Syranidou, E., & Kalogerakis, N. (2023). 535 Capacity of Nerium oleander to Phytoremediate Sb-Contaminated Soils Assisted by Organic Acids and Oxygen Nanobubbles. *Plants*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/plants12010091>
- Sha, J., Yuan, S., Chen, X., Chen, W., Wang, J., Alheshibri, M., & Bu, X. (2024). 608 Effect of bulk nanobubbles on flocculation of kaolin in the presence of cationic polyacrylamide. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 60(2). <https://doi.org/10.37190/ppmp/186729>
- Sha, Z., Chen, Z., Feng, Y., Xue, L., Yang, L., Cao, L., & Chu, Q. (2020a). 183 Minerals loaded with oxygen nanobubbles mitigate arsenic translocation from paddy soils to rice. *Journal of Hazardous Materials*, 398. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122818>
- Sha, Z., Chen, Z., Feng, Y., Xue, L., Yang, L., Cao, L., & Chu, Q. (2020b). Minerals loaded with oxygen nanobubbles mitigate arsenic translocation from paddy soils to rice. *Journal of Hazardous Materials*, 398, 122818. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122818>
- Shen, D., Li, L., Luo, J., Jia, J., Tang, L., Long, Y., Shentu, J., Lu, L., Liu, W., & Qi, S. (2024). 567 Enhanced removal of toluene in heterogeneous aquifers through injecting encapsulated ozone micro-nano bubble water. *Journal of Hazardous Materials*, 468. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133810>

- Shen, W., Mukherjee, D., Koirala, N., Hu, G., Lee, K., Zhao, M., & Li, J. (2022). 327 Microbubble and nanobubble-based gas flotation for oily wastewater treatment: A review. *Environmental Reviews*, 30(3), 359-379. <https://doi.org/10.1139/er-2021-0127>
- Shi, W., Pan, G., Chen, Q., Song, L., Zhu, L., & Ji, X. (2018). 119 Hypoxia Remediation and Methane Emission Manipulation Using Surface Oxygen Nanobubbles. *Environmental Science and Technology*, 52(15), 8712-8717. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02320>
- Silva, R. D. R., Rodrigues, R. T., Azevedo, A. C., & Rubio, J. (2020). 198 Calcium and magnesium ion removal from water feeding a steam generator by chemical precipitation and flotation with micro and nanobubbles. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 41(17), 2210-2218. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1558288>
- Singh, E., Kumar, A., & Lo, S.-L. (2024). 588 Synergistic roles of carbon dioxide nanobubbles and biochar for promoting direct CO₂ assimilation by plants and optimizing nutrient uptake efficiency. *Environmental Research*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117918>
- Sobhy, A., & Tao, D. (2013). 47 Nanobubble column flotation of fine coal particles and associated fundamentals. *International Journal of Mineral Processing*, 124, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.04.016>
- Sobhy, A., & Tao, D. (2019). 160 Effects of Nanobubbles on Froth Stability in Flotation Column. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 39(4), 183-198. <https://doi.org/10.1080/19392699.2018.1459582>
- Solano López, E., Castellanos Quintero, S., López Rodríguez del Rey, M., & Hernández Fernández, J. (2009). La bibliometría: Una herramienta eficaz para evaluar la actividad científica postgraduada. *MediSur*, 7(4), 59-62.
- Song, H., Hou, T., Jiao, Y., Liu, L., Pan, X., Li, G., Zhang, Q., Zeng, Y., Cui, Z., Li, P.,

- Awasthi, M. K., & He, C. (2023). 507 Supplementation of CO₂-nanobubble water to enhance the methane production from anaerobic digestion of corn straw. *Chemosphere*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137613>
- Song, H., Li, N., Cui, H., & Wang, C. (2014). Enhanced storage capability and kinetic processes by pores- and hetero-atoms- riched carbon nanobubbles for lithium-ion and sodium-ion batteries anodes. *Nano Energy*, 4, 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2013.12.017>
- Soyluoglu, M., Kim, D., Zaker, Y., & Karanfil, T. (2021). 241 Stability of Oxygen Nanobubbles under Freshwater Conditions. *Water Research*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117749>
- Soyluoglu, M., Kim, D., Zaker, Y., & Karanfil, T. (2022). 332 Removal mechanisms of geosmin and MIB by oxygen nanobubbles during water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 443. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136535>
- Sun, Y., Wang, S., & Niu, J. (2018). 124 Microbial community evolution of black and stinking rivers during in situ remediation through micro-nano bubble and submerged resin floating bed technology. *Bioresource Technology*, 258, 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.008>
- Sun, Z., Liu, S., Bhatia, S., Sapkota, S., & Sofkova-Bobchevaa, S. (2023). 518 Effect of oxygen-nanobubbles on the growth of lettuce in hydroponics. *Acta Horticulturae*, 1377, 703-708. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1377.86>
- Takahara, K., & Suzuki, S. (2021). In situ water radiolysis in a scanning electron microscope and observation of micro- and nanobubbles formation. *Journal of Applied Physics*, 130(2), 025302. <https://doi.org/10.1063/5.0052182>
- Takahashi, M. (2009). Base and technological application of micro-bubble and nano-bubble. *Mater. Integr.*, 22, 2-19.
- Takarina, N. D., Utomo, S. W., Susanti, L., Rochman, N. T., Cahyadi, D., Junaedi, H., Saputra, H. K. H., & Saputra, R. N. (2020). 222 Phytoplankton biodiversity trends in

- nanobubble aerated shrimp farming at probolinggo coast, East Java, Indonesia. *Biodiversitas*, 21(12), 5906-5914. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d211256>
- Tan, S., Shen, Y., Liu, Y., Wang, X., Xiao, Y., & Li, Y. (2022). 345 Effects and mechanism of using Nanobubble to inhibit biofouling and scaling in biogas slurry drip irrigation emitters [纳米气泡对沼液滴灌系统灌水器的防堵塞效应与机理]. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(14), 79-87. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2022.14.010>
- Tang, Y., Zhang, M., Zhang, J., Lyu, T., Cooper, M., & Pan, G. (2021). 243 Reducing arsenic toxicity using the interfacial oxygen nanobubble technology for sediment remediation. *Water Research*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117657>
- Temesgen, T., & Han, M. (2021). 230 Ultrafine bubbles as an augmenting agent for ozone-based advanced oxidation. *Water Science and Technology*, 84(12), 3705-3715. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.475>
- Temesgen, T., & Han, M. (2023). 455 Advancing aerobic digestion efficiency using ultrafine bubbles in wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104072>
- Terán Hilaes, R., Singh, I., Tejada Meza, K., Colina Andrade, G. J., & Pacheco Tanaka, D. A. (2022). 375 Alternative methods for cleaning membranes in water and wastewater treatment. *Water Environment Research*, 94(4). <https://doi.org/10.1002/wer.10708>
- Thant, M. M. M., Faizal Che Daud, M., Shaffee, S. N. A., & Faizal Sedaralit, M. (2022). 400 Sustainability Driven Produced Water Treatment Technology Solution at Nano-Scale. *Society of Petroleum Engineers - ADIPEC 2022*. <https://doi.org/10.2118/211170-MS>
- Trujillo, J., L., C., & Limaymanta, C. (2023). Estudio bibliométrico sobre nanociencia y nanotecnología en México basado en la Web of Science. *Revista General de Información y Documentación*, 33, 175-201. <https://doi.org/10.5209/rgid.83866>
- Uchida, T., Oshita, S., Ohmori, M., Tsuno, T., Soejima, K., Shinozaki, S., Take, Y., & Mitsuda, K. (2011). Transmission electron microscopic observations of nanobubbles

- and their capture of impurities in wastewater. *Nanoscale Research Letters*, 6(1), 295.
<https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-295>
- Ulatowski, K., & Sobieszuk, P. (2018). Influence of liquid flowrate on size of nanobubbles generated by porous-membrane modules. *Chemical and Process Engineering - Inzynieria Chemiczna i Procesowa*, 39, 335-345. <https://doi.org/10.24425/122954>
- Universidad de Puerto Rico, F. (2024). *LibGuides: Bibliometría: Herramientas Bibliométricas*. <https://uprrp.libguides.com/c.php?g=898494&p=6464179>
- Vu, T.-P.-T., Tran, D.-T., & Pham, Q.-T. (2022). 301 Novel CdS/MIL-88A heterojunction coupled with H₂O₂/air-nanobubbles for enhanced visible-light driven photocatalytic performance. *Journal of Cleaner Production*, 380.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135007>
- Walczyk, W., & Schönherr, H. (2014). Dimensions and the Profile of Surface Nanobubbles: Tip–Nanobubble Interactions and Nanobubble Deformation in Atomic Force Microscopy. *Langmuir*, 30(40), 11955-11965. <https://doi.org/10.1021/la502918u>
- Wang, B., Lu, X., Tao, S., Ren, Y., Gao, W., Liu, X., & Yang, B. (2021). Preparation and Properties of CO₂ Micro-Nanobubble Water Based on Response Surface Methodology. *Applied Sciences*, 11(24), Article 24.
<https://doi.org/10.3390/app112411638>
- Wang, E., Sun, H., Chen, P., Zheng, Y., Guo, J., & Dong, R. (2023). 490 Two-step anaerobic digestion of rice straw with nanobubble water. *Bioresource Technology*, 376.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128928>
- Wang, J., Chen, J., Yu, P., Yang, X., Zhang, L., Geng, Z., & He, K. (2020). 199 Oxygenation and synchronous control of nitrogen and phosphorus release at the sediment-water interface using oxygen nano-bubble modified material. *Science of the Total Environment*, 725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138258>
- Wang, J., Cui, Y., Wu, K., Wu, S., Wu, K., Li, Y., & Niu, W. (2024a). 561 Micro/nanobubble-aerated drip irrigation affects saline soil microenvironments and tomato growth by

- altering bacterial communities. *Soil and Tillage Research*, 239.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106034>
- Wang, J., Cui, Y., Wu, K., Wu, S., Wu, K., Li, Y., & Niu, W. (2024b). 561 Micro/nanobubble-aerated drip irrigation affects saline soil microenvironments and tomato growth by altering bacterial communities. *Soil and Tillage Research*, 239.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106034>
- Wang, L., Ali, J., Wang, Z., Oladoja, N. A., Cheng, R., Zhang, C., Mailhot, G., & Pan, G. (2020). 205 Oxygen nanobubbles enhanced photodegradation of oxytetracycline under visible light: Synergistic effect and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 388. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124227>
- Wang, Q., Zhao, H., Qi, N., Qin, Y., Zhang, X., & Li, Y. (2019). Generation and Stability of Size-Adjustable Bulk Nanobubbles Based on Periodic Pressure Change. *Scientific Reports*, 9(1), 1118. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38066-5>
- Wang, T., Wang, J., Niu, J., Guo, P., Peng, C., He, R., Hui, Z., Gao, W., & Zhang, Q. (2024). 557 Synchronous improvement of methane production and digestate dewaterability in sludge anaerobic digestion by nanobubble. *Bioresource Technology*, 402.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130791>
- Wang, X., Lei, Z., Shimizu, K., Zhang, Z., & Lee, D.-J. (2020). 193 Improved methane production from corn straw using anaerobically digested sludge pre-augmented by nanobubble water. *Bioresource Technology*, 311.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123479>
- Wang, X., Lei, Z., Zhang, Z., Shimizu, K., Lee, D.-J., & Khanal, S. K. (2023). 500 Use of nanobubble water bioaugmented anaerobically digested sludge for high-efficacy energy production from high-solids anaerobic digestion of corn straw. *Science of the Total Environment*, 863. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160825>
- Wang, X., Yuan, T., Guo, Z., Han, H., Lei, Z., Shimizu, K., Zhang, Z., & Lee, D.-J. (2020). 218 Enhanced hydrolysis and acidification of cellulose at high loading for methane

- production via anaerobic digestion supplemented with high mobility nanobubble water. *Bioresource Technology*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122499>
- Wang, X., Yuan, T., Lei, Z., Kobayashi, M., Adachi, Y., Shimizu, K., Lee, D.-J., & Zhang, Z. (2020). 186 Supplementation of O₂-containing gas nanobubble water to enhance methane production from anaerobic digestion of cellulose. *Chemical Engineering Journal*, 398. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125652>
- Wang, Y., Wang, S., Sun, J., Dai, H., Zhang, B., Xiang, W., Hu, Z., Li, P., Yang, J., & Zhang, W. (2021a). 232 Nanobubbles promote nutrient utilization and plant growth in rice by upregulating nutrient uptake genes and stimulating growth hormone production. *Science of the Total Environment*, 800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149627>
- Wang, Y., Wang, S., Sun, J., Dai, H., Zhang, B., Xiang, W., Hu, Z., Li, P., Yang, J., & Zhang, W. (2021b). Nanobubbles promote nutrient utilization and plant growth in rice by upregulating nutrient uptake genes and stimulating growth hormone production. *Science of The Total Environment*, 800, 149627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149627>
- Wang, Y., & Wang, T. (2023). Preparation Method and Application of Nanobubbles: A Review. *Coatings*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/coatings13091510>
- Wang, Y., Wei, J., Hu, J., Guo, Z., & Bai, W. (2024). 632 Research on the kinetics and degradation pathways of gaseous acetic acid ester organics. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 45(14), 2721-2734. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2185819>
- Waters, S., Hamilton, D., Pan, G., Michener, S., & Ogilvie, S. (2022). 347 Oxygen Nanobubbles for Lake Restoration—Where Are We at? A Review of a New-Generation Approach to Managing Lake Eutrophication. *Water (Switzerland)*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/w14131989>
- Wei, J., Sha, H., & Wang, R. (2023). 457 Study on Treatment of Basic Yellow 28 dye

- Wastewater by Micro-nano Bubble Ozone Catalytic Oxidation. *Environmental Engineering Research*, 28(5). <https://doi.org/10.4491/eer.2022.606>
- White, A. T., Ference, C., & Higgins, A. (2019). 175 Getting more with less: Supplemental aeration using oxygen nanobubbles to improve MBR performance. *WEFTEC 2019 - 92nd Annual Water Environment Federation's Technical Exhibition and Conference*, 4819-4835. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074990210&partnerID=40&md5=b077bcbe3f1c4afbe67d45df270aa31d>
- Wu, Y., Lyu, T., Yue, B., Tonoli, E., Verderio, E. A. M., Ma, Y., & Pan, G. (2019). 150 Enhancement of Tomato Plant Growth and Productivity in Organic Farming by Agri-Nanotechnology Using Nanobubble Oxygenation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(39), 10823-10831. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b04117>
- Xia, Z., & Hu, L. (2019). Treatment of Organics Contaminated Wastewater by Ozone Micro-Nano-Bubbles. *Water*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/w11010055>
- Xiao, L., Sun, S., Li, K., Lei, Z., Shimizu, K., Zhang, Z., & Adachi, Y. (2020). 179 Effects of nanobubble water supplementation on biomass accumulation during mycelium cultivation of *Cordyceps militaris* and the antioxidant activities of extracted polysaccharides. *Bioresource Technology Reports*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100600>
- Xiao, Y., Jiang, S. C., Wang, X., Muhammad, T., Song, P., Zhou, B., Zhou, Y., & Li, Y. (2020). 197 Mitigation of biofouling in agricultural water distribution systems with nanobubbles. *Environment International*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105787>
- Xu, J., Salari, A., Wang, Y., He, X., Kerr, L., Darbandi, A., de Leon, A. C., Exner, A. A., Kolios, M. C., Yuen, D., & Tsai, S. S. H. (2021). Microfluidic Generation of Monodisperse Nanobubbles by Selective Gas Dissolution. *Small (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, 17(20), e2100345. <https://doi.org/10.1002/sml.202100345>
- Xue, S., Gao, J., Liu, C., Marhaba, T., & Zhang, W. (2023). 424 Unveiling the potential of

- nanobubbles in water: Impacts on tomato's early growth and soil properties. *Science of the Total Environment*, 903. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166499>
- Yan, D., Xue, S., Zhang, Z., Xu, G., Zhang, Y., Gao, J., & Zhang, W. (2023). 437 Air nanobubble water improves plant uptake and tolerance toward cadmium in phytoremediation. *Environmental Pollution*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122577>
- Yan, T., Hua, Z., Deng, Y., Guo, H., Xu, W., Xu, E., Wang, W., Ding, T., Cao, Y., Liu, Y., & Liu, D. (2022). 307 Air nanobubbles induced reversible self-assembly of 7S globulins isolated from pea (*Pisum Sativum* L.). *Food Hydrocolloids*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107847>
- Yang, X., Nie, J., Wang, D., Zhao, Z., Kobayashi, M., Adachi, Y., Shimizu, K., Lei, Z., & Zhang, Z. (2019). 148 Enhanced hydrolysis of waste activated sludge for methane production via anaerobic digestion under N₂-nanobubble water addition. *Science of the Total Environment*, 693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.330>
- Yang, X., Nie, J., Wei, Y., Zhao, Z., Shimizu, K., Lei, Z., & Zhang, Z. (2020). 192 Simultaneous enhancement on lignin degradation and methane production from anaerobic co-digestion of waste activated sludge and alkaline lignin supplemented with N₂-nanobubble water. *Bioresource Technology Reports*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100470>
- Yang, X., Yang, Q., Zhou, L., Zhang, L., & Hu, J. (2022). Nanobubbles produced by hydraulic air compression technique. *Chinese Physics B*, 31(5), 054702. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ac464c>
- Yaparathne, S., Doherty, Z. E., Magdaleno, A. L., Matula, E. E., MacRae, J. D., Garcia-Segura, S., & Apul, O. G. (2022). 371 Effect of air nanobubbles on oxygen transfer, oxygen uptake, and diversity of aerobic microbial consortium in activated sludge reactors. *Bioresource Technology*, 351. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127090>

- Yaparathne, S., Morón-López, J., Bouchard, D., Garcia-Segura, S., & Apul, O. G. (2024). 552 Nanobubble applications in aquaculture industry for improving harvest yield, wastewater treatment, and disease control. *Science of the Total Environment*, 931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172687>
- Yarahmadi, N., Mehrdadi, N., & Baghdadi, M. (2023). 466 Development of Urban Wastewater Treatment Model Using Nano Bubbles with an Emphasis on Increasing the Efficiency of Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Studies*, 49(2), 203-220. <https://doi.org/10.22059/JES.2023.355942.1008391>
- Yasui, K., Tuziuti, T., & Kanematsu, W. (2019). 156 High temperature and pressure inside a dissolving oxygen nanobubble. *Ultrasonics Sonochemistry*, 55, 308-312. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.013>
- Yat, Y. D., Foo, H. C. Y., Tan, I. S., Lam, M. K., Show, P. L., & Ng, B. W. L. (2024). 560 Synthesis of carbon quantum dots via electrochemically-induced carbon dioxide nanobubbles exfoliation of graphite for heavy metal detection in wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112715>
- Ye, J., Chen, X., Chen, C., & Bate, B. (2019). 155 Emerging sustainable technologies for remediation of soils and groundwater in a municipal solid waste landfill site – A review. *Chemosphere*, 227, 681-702. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.053>
- Yinfei Q., Jin C., Caihong S., Xianjiao G., Caifei Q. I. U., Xianmao C., Xihuan L., Jiang X. I. E., Guoqiang D., & Chunrui P. (2021). Effect of micro-nano bubbles on the yield of different rice types. *中国生态农业学报(中英文)*, 29(11), 1893-1901. <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210194>
- Yuan, K., Zhou, L., Wang, J., Geng, Z., Qi, J., Wang, X., Zhang, L., & Hu, J. (2022). Formation of Bulk Nanobubbles Induced by Accelerated Electrons Irradiation: Dependences on Dose Rates and Doses of Irradiation. *Langmuir*, 38(26), 7938-7944.

<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c00515>

Yuan, S., Wang, X., Jiang, Z., Zhang, H., & Yuan, S. (2023). 483 Contribution of air-water interface in removing PFAS from drinking water: Adsorption, stability, interaction and machine learning studies. *Water Research*, 236.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119947>

Yujia Z., Shuhan X. U., Detian L. I., Limin C., Yuanhong Z. H. U., Feng W., Linkui C. a. O., & Zhimin S. H. A. (2023). Progress in research on preparation and application of oxygen nanobubbles in agriculture. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 31(11), 1780-1791. <https://doi.org/10.12357/cjea.20230066>

Yujia, Z. Z., Shuhan X. U., Detian L. I., Limin C., Yuanhong Z. H. U., Feng W., Linkui C. a. O., & Zhimin S. H. A. (2023). Progress in research on preparation and application of oxygen nanobubbles in agriculture. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 31(11), 1780-1791. <https://doi.org/10.12357/cjea.20230066>

Zhang, H., Chen, J., Han, M., An, W., & Yu, J. (2020). 207 Anoxia remediation and internal loading modulation in eutrophic lakes using geoengineering method based on oxygen nanobubbles. *Science of the Total Environment*, 714.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136766>

Zhang, J., Wei, L., & Zhao, Y. (2020). 225 Synthesis of nanobubbles for improved ultrasound tumor-imaging applications. *3 Biotech*, 10(1). <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1992-1>

Zhang, Q., Wu, R., Xu, Z., Feng, Y., Peng, C., Shi, H., Zhang, Y., Yang, L., Luo, D., Dong, P., Gao, W., & Wang, T. (2024). 554 Nanobubble water promotes anaerobic digestion of high-solids cattle manure under mesophilic and thermophilic conditions. *Environmental Research*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118721>

Zhang, Y., Chen, L., Wang, M., Lu, J., Zhang, H., Héroux, P., Wang, G., Tang, L., & Liu, Y. (2024). Evaluating micro-nano bubbles coupled with rice-crayfish co-culture systems: A field study promoting sustainable rice production intensification. *Science of The*

- Total Environment*, 933, 173162. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173162>
- Zhang, Y., Leppinen, D. M., & Dalziel, S. B. (2009). 14 A new nozzle for dissolved air flotation. *Water Science and Technology: Water Supply*, 9(6), 611-617. <https://doi.org/10.2166/ws.2009.229>
- Zhang, Y., Lu, S., Li, D., Duan, H., Duan, C., Zhang, J., & Liu, S. (2023). 452 Inhibition mechanism of air nanobubbles on brass corrosion in circulating cooling water systems. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 62, 168-181. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.03.014>
- Zhao, L., Teng, M., Zhou, L., Li, Y., Sun, J., Zhang, Z., & Wu, F. (2023). 464 Hydrogen Nanobubble Water: A Good Assistant for Improving the Water Environment and Agricultural Production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(33), 12369-12371. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04582>
- Zhao, M., Cui, H., Wang, C., & Song, Q. (2024). 617 Development of a 10-litre pilot scale micro-nano bubble (MNB)-enhanced photocatalytic system for wastewater treatment. *Environmental Technology (United Kingdom)*. <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2328660>
- Zhao, M., Yang, L., Chen, F., & Zhuang, J. (2024). 548 Bacterial transport mediated by micro-nanobubbles in porous media. *Water Research*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121771>
- Zhao, Q., Dong, J., Li, S., Lei, W., & Liu, A. (2024). 609 Effects of micro/nano-ozone bubble nutrient solutions on growth promotion and rhizosphere microbial community diversity in soilless cultivated lettuces. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1393905>
- Zheng, H., Zheng, Y., & Zhu, J. (2022). Recent Developments in Hydrodynamic Cavitation Reactors: Cavitation Mechanism, Reactor Design, and Applications. *Engineering*, 19, 180-198. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.027>
- Zheng, T., T., Wang, J., Wang, Q., Nie, C., Shi, Z., Wang, X., & Gao, Z. (2016). A

- bibliometric analysis of micro/nano-bubble related research: Current trends, present application, and future prospects. *Scientometrics*, 109(1), 53-71.
<https://doi.org/10.1007/s11192-016-2004-4>
- Zhou, S., Li, Y., Nazari, S., Bu, X., Hassanzadeh, A., Ni, C., He, Y., & Xie, G. (2022). 334 An Assessment of the Role of Combined Bulk Micro- and Nano-Bubbles in Quartz Flotation. *Minerals*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/min12080944>
- Zhou, S., Liu, M., Chen, B., Sun, L., & Lu, H. (2022). 320 Microbubble- and nanobubble-aeration for upgrading conventional activated sludge process: A review. *Bioresource Technology*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127826>
- Zhou, S., Marcelino, K. R., Wongkiew, S., Sun, L., Guo, W., Khanal, S. K., & Lu, H. (2022). 324 Untapped Potential: Applying Microbubble and Nanobubble Technology in Water and Wastewater Treatment and Ecological Restoration. *ACS ES and T Engineering*, 2(9), 1558-1573. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.2c00117>
- Zhou, S., S., Marcelino, K. R., Wongkiew, S., Sun, L., Guo, W., Khanal, S. K., & Lu, H. (2022). Untapped Potential: Applying Microbubble and Nanobubble Technology in Water and Wastewater Treatment and Ecological Restoration. *ACS ES&T Engineering*, 2(9), 1558-1573. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.2c00117>
- Zhou, W., Ou, L., Shi, Q., Feng, Q., & Chen, H. (2018). 120 Different flotation performance of ultrafine scheelite under two hydrodynamic cavitation modes. *Minerals*, 8(7).
<https://doi.org/10.3390/min8070264>
- Zhou, Y., Bastida, F., Liu, Y., Liu, Y., Xiao, Y., Song, P., Wang, T., & Li, Y. (2022). 390 Selenium fertigation with nanobubbles influences soil selenium residual and plant performance by modulation of bacterial community. *Journal of Hazardous Materials*, 423. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127114>
- Zhu, Y., Lyu, T., Li, D., Zhang, Z., Guo, J., Li, X., Xiong, W., Dong, R., & Wang, S. (2024). 606 Process mechanisms of nanobubble technology enhanced hydrolytic acidification of anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. *Chemical Engineering*

Journal, 480. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147956>

UNEMI

Anexos

Ítems y Subítems de la lista de verificación PRISMA.

Sección	Ítem	Descripción	Localización
1. Título	1. Título	Identificar el informe como un meta-análisis.	Portada del Informe de Investigación, pag.1
2. Resumen	2. Resumen estructurado	Proveer un resumen que incluya objetivos, métodos, resultados y conclusiones.	Resumen, pag. 6.
3. Introducción	3. Racionalidad	Explicar el contexto y la importancia de la revisión.	Introducción, pag. 13. Capítulo 1, Planteamiento del problema, pag. 15. Justificación, pag. 18
	4. Objetivos	Indicar claramente los objetivos de la revisión, incluyendo preguntas específicas y marcos conceptuales.	Capítulo 1, Objetivos General y específicos, pag. 16 y 17.
4. Métodos	5. Criterios de elegibilidad	Describir los criterios de inclusión y exclusión de los estudios.	Capítulo 3, pag. 44 y 45.
	6. Fuentes de información	Listar todas las bases de datos y otras fuentes de información.	Capítulo 3, pag. 44.
	7. Estrategia de búsqueda	Proveer detalles completos de las estrategias de búsqueda utilizadas.	Capítulo 3, pag. 45.
	8. Selección de estudios	Explicar el proceso de selección de estudios, desde la búsqueda inicial hasta la inclusión final.	Capítulo 3, pag. 45.
	9. Proceso de recolección de datos	Describir los métodos de recolección de datos de los estudios incluidos.	Capítulo 3, pag. 45.
	10. Ítems de datos	Listar los datos extraídos de cada estudio.	Anexos, pag. 132
	11. Evaluación del riesgo de sesgo en estudios individuales	Explicar cómo se evaluó el riesgo de sesgo en los estudios incluidos.	Capítulo 3, pag. 45.
	12. Medidas de resumen	Indicar las medidas estadísticas utilizadas para resumir los resultados de los estudios.	Capítulo 3, pag. 46.
	13. Métodos de síntesis	Describir los métodos utilizados para sintetizar los datos.	Capítulo 3, pag. 46.
	14. Evaluación del riesgo de sesgo	Explicar cualquier evaluación del riesgo de	Capítulo 3, pag. 46.

	entre los estudios	sesgo entre los estudios.	
	15. Análisis adicionales	Describir cualquier análisis adicional realizado (por ejemplo, análisis de subgrupos, sensibilidad).	Capítulo 3, pag. 45.
	16. Selección de estudios	Proveer un diagrama de flujo que ilustre el proceso de selección de estudios.	Capítulo 4, pag. 47
	17. Características de los estudios	Resumir las características de los estudios incluidos.	Capítulo 4, tablas de información principal de los documentos.
	18. Resultados de los estudios individuales	Presentar los resultados de cada estudio incluido.	Capítulo 4, Análisis de Resultados.
5. Resultados	19. Síntesis de los resultados	Resumir los resultados principales de la síntesis de datos.	Capítulo 4, Análisis de Resultados
	20. Riesgo de sesgo entre los estudios	Describir los resultados de cualquier evaluación del riesgo de sesgo entre los estudios.	Capítulo 4, Análisis de Resultados
	21. Análisis adicionales	Reportar los resultados de cualquier análisis adicional realizado.	Capítulo 4, Análisis de Resultados
	22. Resumen de la evidencia	Resumir los hallazgos principales de la revisión.	Capítulo 4, Interpretación de Resultados
6. Discusión	23. Limitaciones	Discutir las limitaciones de la evidencia incluida y de la revisión en sí.	Capítulo 4, Interpretación de Resultados
	24. Conclusiones	Proveer una interpretación general de los resultados en el contexto de la evidencia disponible.	Capítulo 5, pag. 108
	25. Financiación	Describir las fuentes de financiación y otros apoyos para la revisión.	No existe financiación.
7. Otros ítems	26. Conflictos de interés	Declarar cualquier conflicto de interés potencial.	Capítulo 1, pag. 19.
	27. Disponibilidad de datos	Proveer información sobre la disponibilidad de los datos utilizados en la revisión.	Capítulo 1, pag. 19.

Fuente: (PRISMA Statement, 2024)

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

¡Evolución académica!

@UNEMIEcuador

