



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 20/ Edición N.39
Enero-Junio de 2023
Reia3913 pp. 1-35

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /**

Rabelo Florez (Roger)
Bacterias y hongos utilizados en la
biodegradación de hidrocarburos:
Una Revisión de literatura y Análisis
Bibliométrico.
Revista EIA, 20(39), Reia3913.
pp. 1-35.
<https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.1622>

 **Autor de correspondencia:**

Rabelo Florez, R. (Roger)
Microbiólogo, Especialista en
Educación Superior a Distancia y
Maestrando en Biotecnología
Alimentaria - Universidad Nacional
Abierta y a Distancia
Correo electrónico:
roger.rabelo@unad.edu.co

Recibido: 20-07-2022

Aceptado: 12-09-2022

Disponible online: 01-01-2023

Bacterias y hongos utilizados en la biodegradación de hidrocarburos: Una Revisión de literatura y Análisis Bibliométrico.

 Roger Alberto Rabelo Florez

1

1. Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Resumen

Introducción: El uso de los hidrocarburos y sus derivados, han generado un problema de contaminación ambiental. Los estudios más actuales sugieren una solución a esta situación, basada en la degradación microbiológica o biotransformación, usando cultivos microbianos axénicos. **Objetivo:** Desarrollar un mapeo sistemático de la literatura científica sobre las investigaciones, acerca de las bacterias y hongos en la biodegradación de Hidrocarburos. **Metodología:** Se realizó la exploración, clasificación, verificación y estudio de los documentos con las respectivas directrices de indagación en relación al propósito de esta investigación. Los documentos obtenidos de WoS y Scopus se fusionaron y se eliminaron las réplicas, para esto se utilizó el software R studio. Posteriormente, se desarrolló un estudio de origen, referente teórico, estudio bibliométrico y de redes sobre bacterias y hongos en la biodegradación de Hidrocarburos. **Resultados:** La búsqueda arrojó un total de 424 registros. Se logró evidenciar que la temática ha tenido un aumento significativo a través de los años, principalmente a partir del año 2015, teniendo un incremento del 51.9% y con una tasa de aumento anual del 10.41%. El país con mayor producción científica es China con 67 publicaciones. Según los documentos científicos revisados hasta el 2021, este es el primer estudio de revisión sistémico sobre BHBH, que ha utilizado la aplicación R studio para analizar la productividad bibliográfica en este tema. **Conclusión:** Algunos de las bacterias nativos que biodegradan hidrocarburos son *Gordonia*, *Brevibacterium*, *Dietzia*, *Burkholderia*, *Pseudomonas aeruginosa*. Para hongos son *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*. Para levaduras son *Candida*, *Yarrowia* y *Pichia*.

Palabras claves: Bibliometría, Biorremediación, Bacteria, Hongo, Hidrocarburo.

Microorganismos biodegradadores de hidrocarburos: Un mapeo bibliométrico

Abstract

Introduction: The use of hydrocarbons and their derivatives, have generated a problem of environmental contamination. The most current studies suggest a solution to this situation, based on microbiological degradation or biotransformation, using axenic microbial cultures. **Objective:** To develop a systematic mapping of the scientific literature on research on bacteria and fungi in the biodegradation of hydrocarbons. **Methodology:** The exploration, classification, verification and study of the documents with the respective research guidelines in relation to the purpose of this research was carried out. The documents obtained from WoS and Scopus were merged and replicas were eliminated, using the R studio software. Subsequently, a study of origin, theoretical reference, bibliometric and network study on bacteria and fungi in the biodegradation of hydrocarbons was developed. **Results:** The search yielded a total of 424 records. It was evidenced that the subject has had a significant increase over the years, mainly from 2015, with an increase of 51.9% and an annual increase rate of 10.41%. The country with the highest scientific production is China with 67 publications. According to the scientific papers reviewed until 2021, this is the first systemic review study on BHBH, which has used the R studio application to analyze the bibliographic productivity on this topic. **Conclusion:** Some of the native bacteria that biodegrade hydrocarbons are *Gordonia*, *Brevibacterium*, *Dietzia*, *Burkholderia*, *Pseudomonas aeruginosa*. For fungi they are *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*. For yeasts they are *Candida*, *Yarrowia*, *Pichia*.

Keywords: Bibliometrics, Bioremediation, Bacteria, Fungi, Hydrocarbon.

1. Introducción

Los productos derivados del hidrocarburo (HC), son grupos de contaminantes al medio ambiente (Chin *et al.*, 2021). A nivel mundial la polución del medio ambiente provocada por los residuos sólidos tipo derivado fósil, son un problema creciente y genera impactos intergeneracionales (Lestari y Trihadiningrum, 2019; Li *et al.*, 2019). Se estima que entran en el océano cada año entre 6 y 8.1 millones de toneladas de basura, los polietilenos de baja y alta densidad constituyen más del 81% de las basuras (Rojo-Nieto y Montoto Martínez, 2017; Arduso *et al.*, 2021). Los hidrocarburos (HCs) son compuestos recalcitrantes o resistentes (petróleo, plásticos, polietileno alta - baja densidad y derivados del combustible fósil) a la degradación, originando acumulación en los diversos ecosistemas y transformándolos en un gran problema ambiental (Pérez Parrilla, 2020).

Como posible respuesta a esta problemática, recientes estudios sugieren una respuesta a esta situación basada en la biorremediación o biotransformación, utilizando para ello cultivos de microorganismos específicos (Martín Peraza, 2017). Algunos estudios han establecido que la biotransformación del plástico por bacterias y hongos, podría ser la respuesta para reducir la contaminación por polietileno (Gutiérrez Alvarez, 2019); existen especies de eubacterias y hongos cuya dinámica metabólica es muy extensa y son capaces de adecuarse y sobrevivir a medios agrestes; en este grupo se encontraron los géneros *Pseudomonas* y *Aspergillus* respectivamente (Butron Pinazo, 2020).

Los consorcios microbianos participan en la biodegradación del HC, investigaciones previas evidenciaron que el polietileno de baja densidad, un producto derivado de los HCs, es biodegradado aproximadamente por 63 géneros entre hongos y bacterias; se observó que las eubacterias que presentan el mayor grado de eficiencia biodegradadora son los *Streptomyces* sp, luego *Pseudomonas* sp, y entre los hongos están los *Aspergillus* sp, especialmente los *Aspergillus niger* (Acuña Molina, 2017; Amobonye *et al.*, 2021). El beneficio que brinda los microorganismos en la biodegradación del polietileno es muy significativo, ya que logran biodegradar el plástico en un porcentaje del 30% para la bacteria *P. aeruginosa* (Acuña Molina, 2017) y el 58.59% sobre el polietileno de alta densidad y 34.35% sobre el polietileno de baja densidad a través del hongo *Penicillium oxalicum* NS4 (Ojha *et al.*, 2017).

Es de gran relevancia el tema, sin embargo, todavía está en elaboración, por eso, es necesario un mapeo bibliográfico que contribuya y avance en su desarrollo, también, que facilite señalar las publicaciones, naciones, autores, las revistas que más impactan en el área, y las temáticas actuales de estudio. De igual manera, se hallaron pocos estudios relacionados con el objeto de este estudio. Por ejemplo, en la revisión de Fernández-Luqueño *et al.* (2017), aportaron los conocimientos más avanzados sobre las diferentes interrelaciones biológicas planta-microorganismos que se producen simultáneamente en un emplazamiento contaminado por HC, antes, durante y después de las estrategias de biorremediación, teniendo en cuenta y al mismo tiempo discutiendo los hallazgos experimentales a escala de laboratorio y de campo de destacados especialistas.

En la revisión realizada por Xue *et al.* (2015), presentan un importante método de remediación para el tratamiento de la contaminación marina por HC; en primer lugar, se discute la necesidad de la biorremediación para la contaminación marina por petróleo; en segundo lugar, se analizan las especies de microorganismos que degradan el petróleo, las vías y los mecanismos de degradación, la tasa de degradación y el modelo de reacción, así como los factores que afectan a la degradación; por último, se proponen varias sugerencias para seguir investigando en el campo de la biorremediación de los vertidos marinos de petróleo. En otra revisión bibliográfica, Abbasian *et al.* (2015), realizan una revisión completa de la biodegradación de HC alifáticos por bacterias, describe las bacterias en su capacidad de degradar los HC alifáticos saturados e insaturados por vías tanto aeróbicas como anaeróbicas. En otra investigación más reciente, se discuten intensamente las características del diésel, los efectos sobre el medio ambiente y la salud, la eficacia de la biodegradación por bacterias, las ventajas y las limitaciones de la biodegradación del diésel a partir de investigaciones pasadas y actuales (Imron *et al.*, 2020). En otra investigación más reciente Khalid *et al.* (2021), ofrecen una visión general actualizada de la degradación de los HC diésel, los efectos de los vertidos de petróleo en el medio ambiente y los organismos vivos, y el papel potencial de las bacterias de alta salinidad para descontaminar los contaminantes orgánicos en el medio acuático.

Con base en lo anterior, el presente estudio desarrolla un mapeo sistemático de estudios sobre las investigaciones, acerca de las bacterias y hongos en la biodegradación de HCs. Para cumplir este objetivo, se llevó a cabo la búsqueda de la temática, utilizando las fuentes de información Web of Science (WoS) y Scopus, en el periodo comprendido del año 2000 al 2021. La información resultante fue manejada y procesada a través de la herramienta R studio, luego se realizó el mapeo bibliométrico a través de un estudio de red, se organizó los documentos más importantes, para lograr esto, se utilizó la comparación del árbol, la cual, los segrega en tres partes; raíces, tallo y hojuelas, determinando así, las temáticas sobresalientes del estudio. Por último, se examinó los estudios sobresalientes de cada temática. Este trabajo bibliométrico se elaboró en 4 partes importantes. Primero, se desarrolló el protocolo usado en la selección, exploración, análisis y verificación de los documentos utilizando las directrices de búsqueda establecidas al propósito de esta investigación. Segundo, se desarrolló un estudio de inicio y

análisis de la teoría sobre bacterias y hongos en la biodegradación de HC. Tercero, se realizó el estudio bibliométrico y de relaciones. Por último, se anotan las palabras concluyentes, las limitaciones y sugerencias para posteriores estudios relacionados al tema de Bacterias y Hongos Biodegradadoras de Hidrocarburos (BHBH).

2. Metodología

La metodología realizada en este estudio se desarrolló en dos fases. La primera, es una exploración de documentos científicos del área, mediante una investigación bibliométrica de los documentos científicos registrados en Web of Science y Scopus, y segundo, un estudio de relación que ayuda la identificación de los documentos más importantes sobre BHBH, también determinar los conjuntos principales en los que se encuadran en la actualidad los estudios en el área.

Para el estudio y el revisión científico se utilizan 5 procesos bibliométricos: análisis de citas, co-ocurrencia de palabras, co-citaciones, de coautores y de acoplamiento bibliográfico (Zupic y Čater, 2015). Se utilizan conjuntamente en WoS y Scopus, porque facilita el acceso del conocimiento (Echchakoui, 2020) y, además, estas bases de datos son referentes a nivel internacional (Zhu y Liu, 2020; Pranckutė, 2021). Las directrices de búsqueda se enlistan en la Tabla 1.

Tabla. 1. Parámetros de Búsqueda. Criterios de búsqueda de la literatura científica en Web of Science y Scopus.

| Bases de Datos | Web of Science | Scopus |
|-----------------------|----------------|--------|
| Periodo de Consulta | 2000 - 2021 | |
| Fecha de Consulta | 1/19/2022 | |
| Criterios de Búsqueda | Título | |
| Tipo de Revista | Todas | |

| Bases de Datos | Web of Science | Scopus |
|-------------------------------|---|----------------|
| Palabras o frases de búsqueda | ("biodegradation" OR "biodegradable" OR "Bioremediation") AND ("bacteria" OR "fungos" OR "microorganism*") AND ("polyethylene" OR "plastic*" OR "hydrocarbon*" OR "polyethylene*" OR "low density* polyethylene*" OR "high density* polyethylene*" OR "foam*" OR "plastic*" OR "microplastic*" OR "LDPE" OR "PET" OR "polyester" OR "polyurethane" OR "styrene" OR "polystyrene" OR "hydrocarbon*" OR "oil" OR "petroleum" OR "diesel" OR "diesel oil" OR "gasoil") | |
| Resultados | 261 documentos | 387 documentos |
| Resultado Total | 424 | |

Fuente: Elaboración propia (2022)

Estas directrices arrojaron 261 documentos en WoS y 387 registros en Scopus, que posterior de la fusión y la eliminación de las réplicas, da un total de 424 registros, lo que representa entre las dos bases de datos una superposición del 52.8 %, demostrando la relevancia de usarlas juntas. Como resultado se encontró que el 88.1% de los estudios publicados en este campo, relacionadas con Web of Science y Scopus, están en inglés, y el 5%, 2% y 3% están en chino, ruso y otros, respectivamente. La razón de esto es porque, tanto las revistas y autores publican sus investigaciones en inglés, para incrementar el índice H de estas bases de datos (Vera-Baceta *et al.*, 2019). El instrumento usado para el análisis bibliográfico es Biblometrix (Aria y Cuccurullo, 2017), esta es una aplicación gratuita, que facilita el trabajo con distintas bases de datos (Scopus y Web of Science), sus funciones son diversas, además ha sido utilizada y comprobada por otros estudios (Tani *et al.*, 2018; Landínez Martínez *et al.*, 2019; Acevedo *et al.*, 2020; Duque-Hurtado *et al.*, 2020; Di Vaio *et al.*, 2021; Duque *et al.*, 2021b; Queiroz y Fosso Wamba, 2021; Secinaro *et al.*, 2021).

2.1 Análisis de Red

Web of Science y Scopus arrojaron trabajos científicos los cuales se unieron y se descartaron los documentos replicados, el anterior proceso se realizó utilizando el software R studio, posteriormente, se consolida las referencias bibliográficas en una malla de citas aplicando la teoría de grafos, esto es un procedimiento que facilita datos sobre la categoría y diferencias de la red, de igual forma, de todos los registros que la conforman (Wallis, 2007; Yang *et al.*, 2016).

Ulteriormente, se valoraron tres indicadores bibliométricos: el Indegree (número de citas de un artículo), el Outdegree (número de citas que un grupo específico cita a otros) (Wallis, 2007); y el Betweenness (grado de centralidad de las citas en la red) (Freeman, 1977) este último, se refiere a cuando el artículo es citado y cita a los demás (Zhang y Luo, 2017).

Como producto, se obtiene una malla de información de esta temática, conformada por los estudios obtenidos de las bases de datos mencionados anteriormente y de sus correspondientes referencias. Este mapa de cocitaciones, permite la observación de la conformación de un área de la ciencia, además, ayuda al reconocimiento de nuevas corrientes de investigación (Gurzki y Woisetschläger, 2017; Zuschke, 2020). Para posibilitar la observación gráfica de la malla de información del área de estudio sobre bacterias y hongos que biodegradan hidrocarburos, se emplea la herramienta Gephi (Bastian *et al.*, 2009).

Se calculó las métricas de los indicadores bibliométricos, para cada registro de red, lo que permite clasificar los trabajos utilizando metáforas de árbol (Robledo *et al.*, 2014; Valencia-Hernández *et al.*, 2020). A partir de esta comparación, aparecen tres categorías: primero, las bases o raíces (elevado indegree), aquí se encuentran los estudios más importantes dentro del campo de estudio y se observan artículos que son referenciados pero no referencian a otros (Wallis, 2007); segundo, está la columna o el tronco (elevado betweenness), donde se localizan documentos que citan, y también son referenciados por otros (Zhang y Luo, 2017), en este ítem se agrupan los estudios consolidados, los cuales enlazan la parte teórica de las bases o raíces, con las investigaciones actuales y tercero, las hojas (elevado outdegree), son estudios más recientes, y que citan a otros pero no son citados (Wallis, 2007), estos registros demuestran las tendencias actuales en el área. Este procedimiento metodológico, ha sido empleado y validado

en estudios anteriores (Duque y Cervantes-Cervantes, 2019; Buitrago *et al.*, 2020; Duque *et al.*, 2020; Clavijo-Tapia *et al.*, 2021; Duque *et al.*, 2021a; Duque *et al.*, 2021; Ramos-Enríquez *et al.*, 2021; Torres *et al.*, 2021; Trejos-Salazar *et al.*, 2021; Rubaceti *et al.*, 2022).

3. Resultados

Análisis Bibliométrico

El análisis de producción y análisis bibliométrico, se utilizó los procesos bibliométricos establecidos por Zupic y Čarter (2015) (modificado). Se aplicaron de forma conjunta en Web of Science y Scopus, ya que facilita tener un acceso más amplio al contenido bibliográfico (Echchakoui, 2020), estas dos bases de datos son las más importantes a nivel internacional (Bar-Ilan, 2010; Zhu y Liu, 2020). Las directrices de búsqueda se relacionan en la Tabla 1.

Análisis histórico de la producción científica.

En la figura 1 (A) se logra observar el número de producciones científicas, que se han publicado sobre el tema de BHBH, entre los años 2000 y 2021. En total se identificaron 424 documentos científicos. Con base en los resultados arrojados por las bases de datos WoS y Scopus, se logró evidenciar que la temática ha tenido un aumento significativo a través de los años, principalmente a partir del año 2015, teniendo un incremento del 51.9% y con una tasa de aumento anual del 10.41%. Estos datos evidencian el aumento del interés de la comunidad académica y científica en los últimos 10 años en este campo del conocimiento.

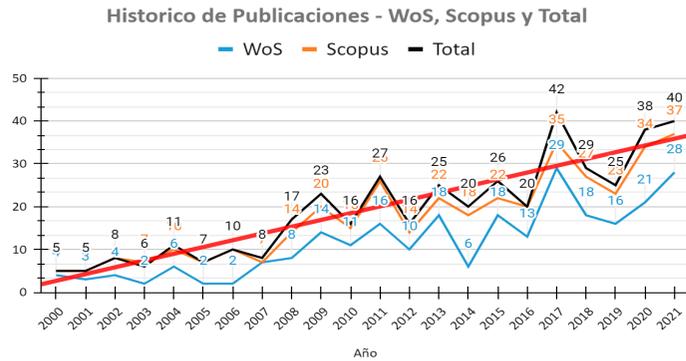
Análisis de países.

En la figura 1 (B), se muestra la producción científica por países, resaltando los 10 principales a nivel mundial. El primer lugar lo lidera China con 67 publicaciones (15.8%), seguido por India y Polonia con 31 (7.31%) y 22 (5.19%) publicaciones respectivamente. Se resalta a Brasil como país latinoamericano ocupando el quinto lugar con un total de 17 publicaciones. De los 10 países, 3 son asiáticos con un total de 94 publicaciones (22.17%), 2 son europeos con un total de

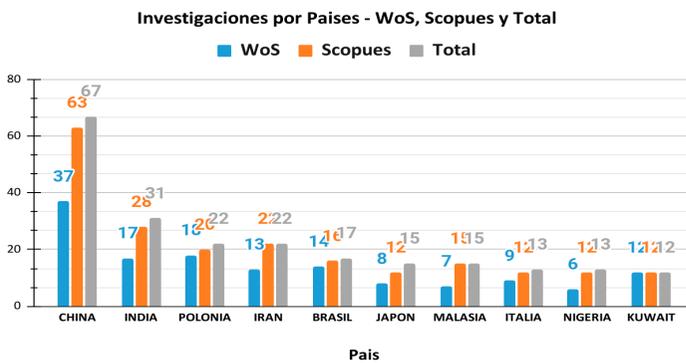
35 publicaciones (8.26%), 1 de América del sur con un total de 17 publicaciones (4.01%) y 1 de África occidental con un total de 13 publicaciones (2.83%). Los 10 primeros países representan el 53.5% de la producción mundial de publicaciones científicas referente al tema de BHBH.

Figura 1. Histórico de publicaciones.

A Histórico de publicaciones – WoS, Scopus y Total



B. Investigaciones por Países WoS, Scopus y Total



Producción científica por año (A) se describe el número de artículos publicados por año. Investigaciones por países (B), se describe el número de producción científica por país.

Fuente: Elaboración propia (2022)

Análisis de autores.

En la Tabla 2 se muestran los 10 escritores con mayor número de divulgaciones científicas en el tema de BHBH, clasificadas por el número de publicaciones registradas en WoS y Scopus, también se relaciona el número de citaciones y el Índice-H (Es un parámetro que mide la producción de cada autor, Hirsch, 2005). La lista es liderada por Radwan, Samir S.A., vinculado a la Universidad de Kuwait - Kuwait (13 publicaciones, 3300 citaciones y un índice H de 33). Seguido por Kaczorek, Ewa, vinculado al Politécnico de Poznanska, Poznan - Polonia (6 publicaciones, 1080 citaciones y un índice H de 20). Se advierte que Chen, Qingguo, vinculado a la Universidad de Ciencia y Tecnología de Harbin - China, se encuentra en el puesto número 10 de la lista, según WoS con un número de citas de 3357 y con un índice H de 32, pero solo tiene 5 publicaciones. También, se resalta a Banat, Ibrahim M., vinculado a la Universidad de Ulster - Reino Unido, se encuentra en el puesto número 8 de la lista, según Scopus con un número de citas de 20413 y con un índice H de 68. Se puede advertir que, pese a que algunos escritores tienen menos publicaciones que otros, su índice H es mayor, indicando que son escritores científicos con mayor impacto dentro de la colectividad científica.

Tabla 2. Autores más relevantes (A), según el número de publicaciones, citaciones y H-Index en WoS y Scopus y Revistas más relevantes (B), según la categorización, SJR y H-Index por país.

| A. Autores más relevantes | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|---------------|------------|---------|---------------|------------|---------|
| Autores | Total Publicaciones | WoS | | | Scopus | | |
| | | Publicaciones | Citaciones | H-Index | Publicaciones | Citaciones | H-Index |
| Radwan, Samir S.A. | 13 | 6 | 3170 | 31 | 13 | 3300 | 33 |
| Kaczorek, Ewa | 7 | 6 | 1024 | 20 | 6 | 1080 | 20 |
| Ali, Nedaa Yousef A | 6 | 5 | 181 | 8 | 6 | 399 | 13 |
| Eliyas, Mohamed | 6 | 8 | 554 | 17 | 6 | 614 | 17 |
| Khanafer, Majida M. | 6 | 5 | 351 | 10 | 6 | 574 | 14 |

| Autores | Total Publicaciones | WoS | | | Scopus | | |
|----------------------|---------------------|---------------|------------|---------|---------------|------------|---------|
| | | Publicaciones | Citaciones | H-Index | Publicaciones | Citaciones | H-Index |
| Sorkhoh, Nasser A. | 6 | 3 | 1332 | 20 | 3 | 1455 | 20 |
| Al-Awadhi, Husain A. | 5 | 5 | 323 | 11 | 5 | 783 | 17 |
| Banat, Ibrahim M. | 5 | 1 | 2623 | 28 | 5 | 20413 | 68 |
| Bao, Mutai | 5 | 4 | 2097 | 26 | 4 | 2473 | 28 |
| Chen, Qingguo | 5 | 3 | 3357 | 32 | 3 | 404 | 8 |

B. Revistas más relevantes

| Revistas | WoS | Scopus | Total | Porcentaje | Cuartil | SJR (2020) | H-index (SJR) | País |
|---|-----|--------|-------|------------|---------|------------|---------------|--------------|
| INTERNATIONAL BIODETERIORATION AND BIODEGRADATION | NA | 12 | 12 | 2.83% | Q1 | 1.1 | 103 | Reino Unido |
| BIORESOURCE TECHNOLOGY | 6 | 7 | 8 | 1.89% | Q1 | 2.49 | 294 | Reino Unido |
| BIOREMEDIATION JOURNAL | 7 | 6 | 7 | 1.65% | Q2 | 0.42 | 35 | Reino Unido |
| ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH | 7 | 7 | 7 | 1.65% | Q2 | 0.85 | 113 | Alemania |
| POLISH JOURNAL OF ENVIRONMENTAL STUDIES | 7 | 7 | 7 | 1.65% | Q3 | 0.37 | 54 | Polonia |
| CHEMOSPHERE | 5 | 6 | 7 | 1.65% | Q1 | 1.63 | 248 | Reino Unido |
| JOURNAL OF PURE AND APPLIED MICROBIOLOGY | 3 | 6 | 6 | 1.42% | Q4 | 0.15 | 16 | India |
| JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS | 5 | 5 | 5 | 1.18% | Q1 | 2.03 | 284 | Países Bajos |
| MARINE POLLUTION BULLETIN | 5 | 5 | 5 | 1.18% | Q1 | 1.55 | 179 | Reino Unido |
| SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT | 5 | 5 | 5 | 1.18% | Q1 | 1.8 | 244 | Países Bajos |

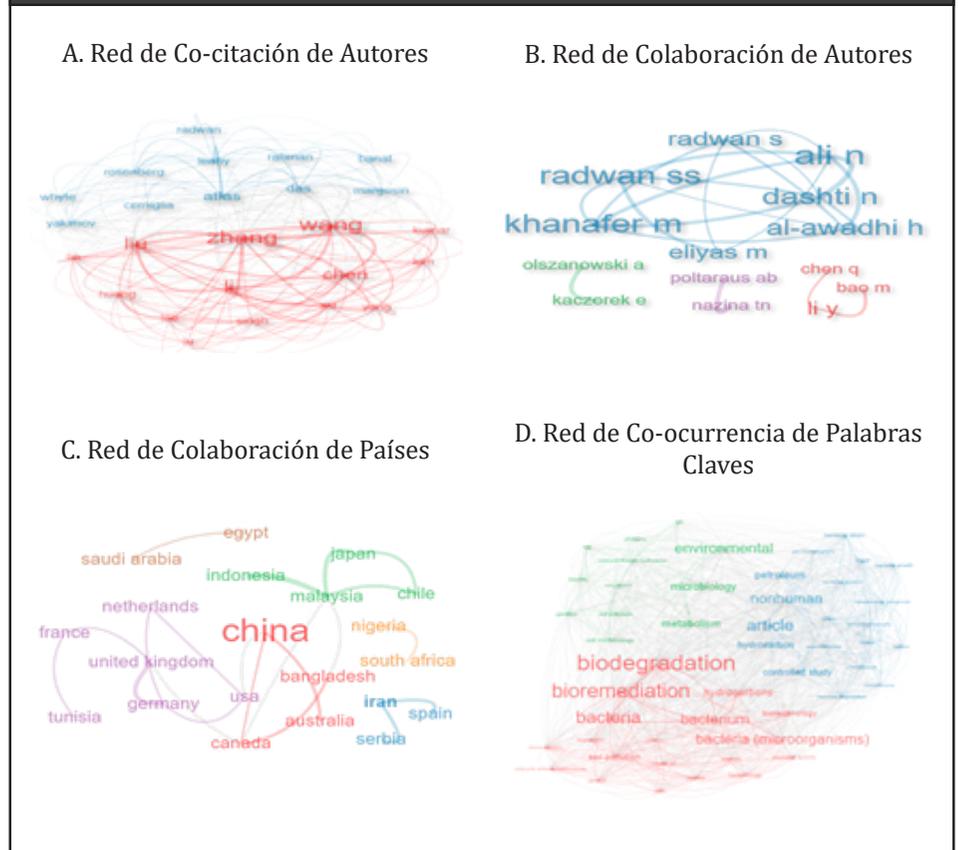
Fuente: Elaboración propia (2022)

Análisis de revistas.

La Tabla 2, relaciona las 10 revistas con mayor cantidad de publicaciones sobre el tema de BHBH. Se muestran los registros de las dos bases de datos más importantes (WoS y Scopus), además, relaciona el cuartil, el factor de impacto, el H-index, el país y el porcentaje de publicación. El 60% de las revistas están categorizadas en Q1. La revista que más publicaciones aporta al tema tratado, es la *International Biodeterioration and Biodegradation* del Reino Unido con 12 publicaciones en total, seguida de la *Bioresource Technology* también del Reino Unido con 8 publicaciones en total. En tercera posición, se ubica la revista *Bioremediation Journal* también del Reino Unido con 8 publicaciones en total. Según los datos anteriores, las tres primeras revistas se pueden considerar las más importantes en la temática de estudio, aportan el 6.4% de la producción total de la temática de estudio. De las 10 revistas principales, el 50% de estas son del Reino Unido, el 20% de los países bajos y el 30% de India, Polonia y Alemania. La revista con mejor H-index según *Scimago Journal and Country Rank (SJR)*, es la *Bioresource Technology* con un Índice H de 294. La revista que tiene mejor Índice SJR es también la *Bioresource Technology* con 2.49. En general, se puede observar que, pese a que algunas revistas tienen menos publicaciones que otras, su índice H (SJR) y el índice SJR es mayor, lo que implica que son revistas con mayor impacto dentro de la comunidad científica.

La Figura 2, muestra los 4 componentes importantes que integran el análisis bibliográfico. En el primer componente la red de co-citación de autores (A), esta permite resaltar los autores más citados, para este caso Liu Yuan, Zhang y Wang son los más referenciados. El segundo componente, la red de colaboración de autores (B), se evidencia el trabajo en 4 grupos, el primer grupo es el más grande integrado por 7 investigadores, se resaltan a Ali Nedaa Yousef A, Radwan Samir S. A, Khanafer Majida M y Narjes Dashti, puesto que tienen mayor vínculo literario. El segundo grupo está integrado por 3 autores, Li Yiming, Bao Mutai y Chen Qingguo, en este grupo la colaboración literaria solo es entre Li Yiming - Bao, Mutai y Li, Yiming - Chen Qingguo. El tercer y cuarto grupo está integrado por 2 científicos.

Figura 2. Redes Co-citación de autores (A), Colaboración de autores (B), Red de colaboración de países (C) y Red de Co-ocurrencia de palabras claves (D).

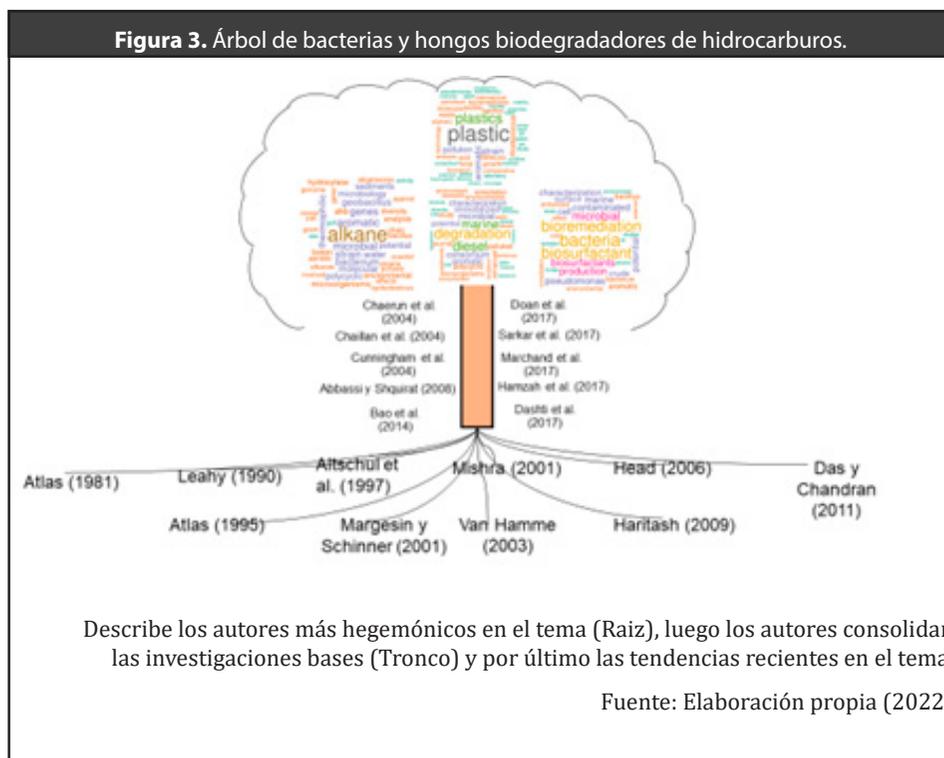


Se describen las diferentes redes de producción científica a nivel mundial, entendiendo la dinámica de cooperación entre países y autores. Fuente: Elaboración propia (2022)

El tercer componente, la red de colaboración entre países (C), se resalta a China como país principal en la producción científica del tema de BHBH, tiene una estrecha colaboración con los Estados Unidos y Canadá. En el cuarto y último componente, se encuentra la red de coocurrencia de palabras (D), en el cual se muestran 3 grandes grupos: el primer grupo (en rojo) resaltan las palabras de “biodegradación” y “biorremediación”; el segundo grupo (en azul), sobresalen las palabras “hidrocarburo”, “petróleo” y la palabra compuesta “estudio controlado” y en el tercer grupo, se distinguen las palabras “microbiología”, “ambiente” y “metabolismo”.

Análisis de red

En este punto, se pudieron identificar los trabajos más importantes en el tema. Se escogen para el análisis, los artículos con los parámetros más sobresalientes, se ordenó usando la comparación del árbol de la ciencia. Los 10 principales (raíz), 10 estructurales (tallo) y 40 actuales (hojuelas). Para determinar los tópicos similares de estudio, se empleó el algoritmo de clusterización según Blondel *et al.* (2008) Figura 3.



Raíz

Los documentos que forman la raíz de esta exploración bibliográfica se clasifican como los documentos de mayor indegree (grupo de artículos altamente citados), indicando su estatus canónico y predominante. En este tópic, se analizaron 10 estudios, referenciados como principales según lo anotado anteriormente. En este apartado, se describe la función de las bacterias y hongos en la degradación biológica de HCs, indicando los factores que intervienen en la degradación de los compuestos derivados fósiles y describen los diferentes bioelementos inorgánicos que son determinantes en el proceso de la biorremediación,

también nombran algunos microorganismos especializados en la biodegradación de HCs. A continuación, se describe:

Finalizando el siglo XX, Atlas (1981) resaltó el rol de las bacterias y hongos en la degradación microbiológica de los HCs, el cual, determinó que la biodegradación, depende en gran parte de los componentes ambientales. Concepto explicado por Leahy y Colwell (1990), en el que los factores físicos, químicos y biológicos, como pH, concentración de nutrientes, nitrógeno, fósforo, oxígeno, consorcios microbianos (bacterias y hongos) y la adaptabilidad al contaminante, inciden en la velocidad y cantidad de HC que biodegradan. Posteriormente, Atlas (1995) estableció que la biorremediación es una buena opción, porque utiliza microorganismos autóctonos y fertilizantes nitrogenados, esto redundaría en el incremento de las tasas de biodegradación, además es barato en comparación con los métodos físicos. Esto lo comprueban Mishra et al. (2001), en un estudio que consistió en evaluar la viabilidad de utilizar un consorcio bacteriano autóctono, para degradar lodos oleosos tóxicos; este estudio demostró que, el consorcio bacteriano nativo basado en portadores de bacterias autóctonas, biorremedia compuestos derivados del petróleo, siempre y cuando se mantengan las condiciones adecuadas para su proliferación.

Lo anterior, concuerda con el estudio realizado por Head et al. (2006), los cuales concluyeron que, la degradación de los HCs en el medio ambiente no solo depende de las propias bacterias, sino de las diferentes interacciones biológicas del ecosistema; también señaló que las bacterias *Alcanivorax* spp., *Cycloclasticus* spp., *Oleiphilus* spp., *Oleispira* spp. y *Thalassolituus* spp., consumen casi exclusivamente petróleo. Por su parte, Margesin y Schinner (2001), describieron la biodegradación de los microorganismos en ambientes extremos (halófilos, acidófilos, basófilos, termófilos, barófilos, extremófilos); resaltando las capacidades metabólicas de los microorganismos extremófilos. Estas capacidades bioquímicas, son gracias a la maquinaria enzimática que posee cada microorganismo, estas enzimas son identificadas gracias a la utilización del programa BLAST, (Basic Local Alignment Search Tool), traducido al español es Herramienta Básica de Búsqueda de Alineación Local (Altschul et al., 1997).

De manera similar, Van Hamme et al. (2003), revisaron los avances de la microbiología del petróleo y el uso de los microorganismos en los bioprocesos del petróleo y como biosensores; concluyendo que, las bacterias con enzimas metabolizadoras de petróleo seleccionadas

y combinadas con sistemas susceptibles de monitoreo electrónico, pueden usarse como biosensores para monitorear contaminantes ambientales o toxicidad derivados del petróleo en aplicaciones de control de procesos. Posteriormente, Haritash y Kaushik (2009), investigaron la biodegradación de los HCs Aromáticos Policíclicos (HAP), teniendo en cuenta las condiciones ambientales, los microorganismos, la naturaleza y el tipo de contaminante, concluyeron que, la biorremediación de los HAPs se logra usando los microorganismos—algas, bacterias y hongos individualmente o en combinación; también demostraron que, el principal grupo de hongos responsables para la degradación de HAP es el hongo de podredumbre blanca; en este mismo estudio determinaron que muchas especies de algas y algunas plantas, tienen la propiedad de biotransformar los contaminantes a otros menos peligrosos. De manera complementaria, Das y Chandran (2011), en su estudio, presentaron una descripción de los mecanismos y enzimas que participan en la biodegradación de HC de petróleo, además, captación de HC por biosurfactantes, bacterias genéticamente modificadas en la biodegradación, entre otros.

Tronco

En esta categoría el programa R studio, arrojó 10 publicaciones como las más representativas sobre el tema de investigación. Los documentos en este apartado están clasificados como aquellos cuyo betweenness o intermediación sean los más altos (autores que citan a los de la raíz y también son citados por producción más reciente - clústers), incluyen investigaciones que vinculan lo dicho por los autores y la literatura clásica, con autores recientes y enfoques de aislamiento e identificación de microorganismos. En esta categoría los autores nombran los microorganismos nativos identificados en ambientes contaminados por petróleo o sus derivados, algunas incluyen condiciones con presencia o ausencia de oxígeno, el tipo de hidrocarburo que biodegrada, el nombre de microorganismo aislado, tanto bacterias como hongos, en otras investigaciones resaltan el porcentaje de degradación de HCs y hacen énfasis en el tiempo de la biodegradación. A continuación, se describe:

Chaillan et al. (2004), detectaron microorganismos aerobios que degradan HCs aislados de suelos contaminados con petróleo; se identificaron 6 géneros bacterianos (*Gordonia*, *Brevibacterium*,

Aeromicrobium, *Dietzia*, *Burkholderia* y *Mycobacterium*), 8 géneros de hongos (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Amorphoteca*, *Neosartorya*, *Paecilomyces*, *Talaromyces* y *Graphium*) y 3 géneros de levaduras (*Candida*, *Yarrowia* y *Pichia*). De manera similar, Abbassi y Shquirat (2008), realizaron un estudio, cuyo objetivo fue aislar una bacteria autóctona capaz de biorremediar suelo contaminado con petróleo y averiguar la constante cinética de primer orden del proceso de biodegradación; la especie aislada fue *Stenotrophomonas multophilia*; mostrando constantes cinéticas de primer orden a diferentes proporciones de alimentos y microorganismos, los cuales oscilaban entre 0.0071 y 0.041/día.

Chaerun et al. (2004), aislaron bacterias de las zonas costeras contaminadas por el vertido de petróleo de Nakhodka; las cepas bacterianas aisladas son capaces de utilizar alcanos, pero no aromáticos, con la excepción de *Pseudomonas aeruginosa*, con capacidad de utilizar ambos compuestos, la mayoría de las cepas aisladas están afiliadas a *P. aeruginosa*; en este estudio establecen que las bacterias son el microorganismo más predominante en los procesos de biorremediación in situ o ex situ. Luego, Doan et al. (2017), compararon las capacidades de degradación de los aislados bacterianos de las dos áreas de estudio (la isla Iriomote en Japón y la isla Con Dao en Vietnam), contaminadas por HCs a partir del petróleo crudo, n-alcanos y HAPs; se aislaron 45 cepas bacterianas (25 de Iriomote y 20 de Con Dao); en Iriomote, los géneros dominantes fueron *Achromobacter*, *Pseudomonas* y *Ochrobactrum*, mientras que para Con Dao, los géneros dominantes fueron *Pseudomonas* y *Microbacterium*; las cepas de Iriomote, biodegradaron entre el 25% y 50% del petróleo (3 cepas), n-alcanos (11 cepas) y HAPs (2 cepas), para el caso de Con Dao, petróleo (2 cepas), n-alcanos (4 cepas) y HAPs (1 cepa).

Cunningham et al. (2004), realizaron un estudio a pequeña escala de laboratorio, examinaron la capacidad de los microorganismos degradadores de HCs inmovilizados, para la limpieza de suelos contaminados con diésel, los resultados fueron positivos. Posteriormente, Bao et al. (2014), evaluaron la viabilidad de la aplicación práctica de *Acinetobacter* sp. D3-2, como biodegradadora de HCs, los resultados mostraron que más del 82% de los hidrocarburos alcanos fueron degradados por *Acinetobacter* sp. D3-2. Luego, Sarkar et al. (2017), demostraron que las bacterias metabólicamente eficientes residen naturalmente en los desechos de las refinerías de petróleo y

que pueden ser útiles para la biorremediación; es decir que, las cepas de *Burkholderia*, *Kocuria*, *Enterobacter* y *Pandoraea* con capacidades metabólicas versátiles de hidrocarburos se identificaron en los residuos de las refinerías de petróleo.

En otro escrito, investigaron la capacidad de biodegradar HCs a través de 255 cepas entre bacterias y hongos, aisladas de una planta antigua procesadora de petróleo y verificaron si el suelo, el medio de cultivo y el tipo de microorganismos influyeron en la degradación del petróleo; encontraron que la clase de suelo, el tipo medio de cultivo utilizados no afectaron de manera significativa a la biodegradación, sin embargo las mejores cepas degradadoras de HAP pertenecen a las clases *Sordariomycetes*, *Actinobacteria*, *Betaproteobacteria* y *Gammaproteobacteria* (Marchand *et al.*, 2017). En otra investigación, resaltan que el tiempo de la incubación juega un papel significativo al afectar el crecimiento bacteriano y el porcentaje de biodegradación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH), mientras que las concentraciones de petróleo crudo tienen un efecto insignificante en las respuestas (Hamzah *et al.*, 2017), por ejemplo, en este estudio utilizaron los residuos de paja de trigo, mazorcas de maíz y bagazo de caña de azúcar, junto con microorganismos propios de estos residuos, para biodegradar hidrocarburo de petróleo y demostraron que la biodegradación de los HCs fue del 24% al 47 %, se dio después de 8 meses (Dashti *et al.*, 2017).

Hojas (perspectivas)

Con la revisión bibliográfica realizada, se establecieron 4 grandes perspectivas (clúster), Figura 4, en esta área de investigación, que representan las líneas de investigación más relevantes de la temática. Cada uno de ellos se presenta a continuación.

Figura 4. Clúster. Perspectivas o líneas de investigación de la temática

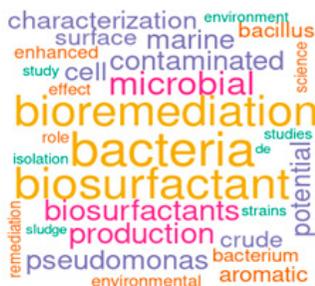
Clúster 1: Alcanos, Genes y Microorganismos



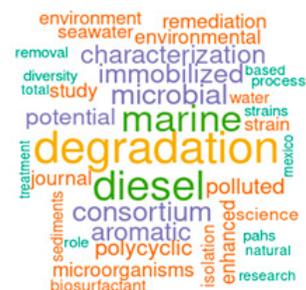
Clúster 2: Biorremediación y Plástico



Clúster 3: Biorremediación, Producción de Biosurfactante y Biosurfactante Bacteriano



Clúster 4: Consorcio, Degradación y Aromáticos



Describen las cuatro tendencias recientes en el tema investigación.

Fuente: Elaboración propia (2022)

Para explicar el clúster 1, se parte de los artículos clásicos (raíz). En estos documentos se destacan que el proceso de la biorremediación es complejo, que depende de la cantidad del HC derramado, factores ambientales, la composición de los microorganismos (Leahy y Colwell, 1990) y la estructura química del compuesto químico que se degrada (Haritash y Kaushik, 2009). Uno de estos compuestos químicos es el alcano, en la investigación realizada por (Díaz *et al.*, 2013), reportaron que *Pseudomonas luteola* PB6, degradó al menos los 20 alcanos más abundantes presentes en el combustible diésel y alcanzó un porcentaje de biodegradación de 87-89% luego de 96h de incubación.

Posteriormente, Meng et al. (2018), demostraron que las cepas de *Escherichia coli* manipuladas genéticamente, mostró la capacidad para degradar el petróleo crudo con alcanos de cadena larga y la velocidad de biodegradación mejoró considerablemente.

Rojo (2009), reportó que *Alcanivorax borkumensis*, es una bacteria marina que puede asimilar alcanos lineales y ramificados, pero que es incapaz de metabolizar hidrocarburos aromáticos, azúcares, aminoácidos, ácidos grasos y la mayoría de las otras fuentes de carbono comunes. Luego, Chen et al. (2017), aislaron la cepa del género *Dietzia*, a partir de sedimentos contaminados con petróleo en la bahía de Bohai en China, esta bacteria es capaz de utilizar una amplia gama de alcanos (C14-C31), compuestos aromáticos y petróleo crudo como únicas fuentes de carbono y energía, mostrando una alta tasa de degradación (>80%).

En cuanto a los genes implicados en la síntesis de enzimas que biodegradan alcanos, el estudio realizado por Wang y Shao (2012), identificaron los genes que codifican para alcano hidroxilasas, los cuales son *alkB1*, *alkB2*, *p450-1*, *p450-2*, *p450-3* y *almA*. Lo anterior, es similar a los resultados de Nie et al. (2014) reportaron que, *AlkB* y *CYP153* son importantes porque codifican para la enzima alcano hidroxilasas, responsables de la degradación aeróbica de alcanos en la biorremediación de ambientes contaminados por petróleo y la recuperación de petróleo mejorada por microbios.

En el estudio realizado por Tourova et al. (2016), encontraron nuevas cepas de bacilos hemofílicos a partir de yacimientos de petróleo y una fuente termal, que logran degradar *n*-alcanos del petróleo crudo, como *Geobacillus toebii* B-1024, *Geobacillus* sp. 1017 y *Aeribacillus pallidus* 8m3 a través de los genes *alkBgen* y *ladA*, que codifica para la enzima alcano monooxigenasa dependiente de rubredoxina y la enzima alcano monooxigenasa dependiente de flavina respectivamente. De manera coherente, los mismos autores Tourova et al. (2018), en una investigación posterior, realizaron el análisis de genomas completos de bacterias termófilas del género *Geobacillus*, las cuales biodegradan *n*-alcanos oxidantes y petróleo crudo identificando el gen *ladA*.

En el clúster 2, se abordan algunas investigaciones relacionadas con la biodegradación de plásticos, tanto en ambientes marinos como de suelos, usando diferentes microorganismos, indicando el porcentaje de biodegradación. Los residuos plásticos son uno de los problemas ambientales más difíciles de superar (Sitorus et al., 2019), una forma

particular de impacto humano que representa una gran amenaza para la vida marina y ambiental es la contaminación plástica (Derraik, 2002).

Para esta problemática, el uso de sistemas biológicos como los microorganismos, juegan un papel fundamental en la reducción de esta situación ambiental, un ejemplo de esto es la investigación realizada por Sudhakar et al. (2008), sometieron a biodegradación in vitro tratados y sin tratar térmicamente, polietilenos de baja y alta densidad (LDPE y HDPE); los microorganismos marinos aislados fueron *Bacillus sphaericus* y *Bacillus cereus*, obteniendo con tratamiento un porcentaje de biodegradación del 19 % LDPE y 9 % HDPE y sin tratar 10 % LDPE y 3,5 % HDPE con *B. sphaericus*, mientras que la pérdida de peso del LDPE mezclado con almidón sin tratar fue del 25% con *B. cereus*.

Luego, Dussud et al. (2018), demostraron que los plásticos con diferente composición, bajo condiciones marinas, son colonizados por comunidades bacterianas similares para constituir matrices de soporte para la formación de biopelícula; estas biopelículas se forman a través de 3 fases, la inicial (abundante y homogénea colonización bacteriana), de crecimiento (mayor incremento de biomasa) y de maduración (mayor abundancia de células). Seguidamente Sangeetha Devi et al. (2019), aislaron 248 bacterias con capacidad para biodegradar polietileno de alta densidad (HDPE), de las cuales *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp., fueron considerados como potentes biodegradadores marinos de HDPE, demostrando la capacidad de degradación de las bacterias marinas sin ningún tratamiento previo. Recientemente, Sarkhel et al. (2020), registraron que la tasa de degradación de la botella de plástico utilizando microorganismos marinos como la *Vibrio* sp. fue de 35 %, mientras que *Aspergillus* sp. fue de 22 %.

Zhang et al. (2018), utilizaron 3 cepas de *Bacillus amyloliquefaciens* (HK1, GSDM02 y GSDM15), a partir del mantillo agrícola, para comprobar su eficacia en la biodegradación de películas plásticas, como resultado obtuvieron que, las cepas HK1, GSDM02 y GSDM15 tenían la capacidad de degradar la película plástica, pero HK1 se desempeñó mejor, porque puede romper la película y hacer cambios químicos en la superficie dentro de los 30 días. Janczak et al. (2020), verificaron la efectividad de la cepa (*Serratia plymuthica*) de rizosfera seleccionadas, para acelerar la biodegradación de plásticos (Polilactida - PLA y Tereftalato de Polietileno - PET) en suelo cultivado. Sarker et al. (2021), demostraron que la bacteria del suelo *Enterobacter cloacae* AKS7, biodegrada polietileno de baja densidad, usando aceite mineral

para aumentar la colonización, lo cual redundó en la biodegradación del plástico. Kim et al. (2021), investigaron la biodegradación de poliestireno por cultivos de bacterias mesófilas obtenidas de varios suelos en ambientes comunes, se identificaron dos nuevas cepas, *Pseudomonas lini* JNU01 y *Acinetobacter johnsonii* JNU01, el crecimiento aumentó más de 3 veces, permitiendo la descomposición del poliestireno.

En el clúster 3, se abordan algunos estudios relacionados con la biorremediación, algunos biosurfactantes usados y sintetizados por algunos microorganismos. Los biosurfactantes son moléculas anfipáticas que reducen la tensión superficial (Dehghannoudeh *et al.* 2019), incrementando así la solubilidad en agua y disponibilidad de compuestos orgánicos, son producidos por bacterias, hongos y levaduras (Becerra Gutiérrez y Horna Acevedo, 2016). En un estudio, identifican a partir de suelo y aguas contaminadas por HCs, bacterias que utilizan petróleo como única fuente de carbono y energía; la bacteria identificada fue la *Pseudomonas aeruginosa*, y el biosurfactante utilizado por esta cepa bacteriana fue el glicolípido (Sun *et al.* 2019). En otro estudio, aislaron e identificaron a partir de suelo contaminado con hidrocarburos aromáticos policíclicos, dos cepas bacterianas, *Achromobacter* sp. (ACH01) y *Sphingomonas* sp. (SPH01), por su capacidad de utilizar una mezcla de antraceno, pireno, fenantreno y fluoreno como únicas fuentes de carbono y energía y por su capacidad de producir biosurfactantes (Ruffini Castiglione *et al.*, 2016). En otro trabajo, *Bacillus subtilis* fue aislado del vertedero de polímeros y es considerado como potencial para el tratamiento de derrames de petróleo, debido a su capacidad de biodegradación, por su alta adherencia, reducción de la tensión superficial, estabilidad y mayor producción de biosurfactantes en condiciones ambientales extremas (Sakthipriya *et al.*, 2015).

Las bacterias *Rhodococcus ruber*, *Alcaligenes faecalis* y *Cellulosimicrobium* sp. aisladas de los sedimentos del Wadi de Soummam contaminadas por HCs, sintetizaron biosurfactantes con características lipopeptídica (Yalaoui-Guellal *et al.*, 2020). En un estudio previo, demostraron que los biosurfactantes producidos por *Burkholderia* sp, también tienen un gran potencial para la aplicación de la biorremediación (hasta un 65%), debido a sus efectos emulsionantes y a su capacidad para reducir la tensión superficial (Arsyah *et al.*, 2018). En un estudio reciente, aislaron cepas bacterianas de suelos

contaminados por petróleo, la cepa identificada fue *Bacillus* sp. con capacidad de producir biosurfactantes de tipo lipopéptido (Dayamrita *et al.*, 2020). No solo bacterias son utilizadas para la biodegradación de hidrocarburos, en un estudio utilizaron dos cepas bacterianas (*Pseudomonas aeruginosa* y *Bacillus subtilis*) y dos cepas de levadura (*Candida maltosa*, *Yarrowia lipolytica*), el estudio demostró la capacidad que tienen de biodegradar hidrocarburo, utilizando los biosurfactantes tipo saponinas y ramnolípidos, desempeñándose mejor las saponinas (Kaczorek *et al.*, 2008).

En el clúster 4, se anotan algunas investigaciones relacionadas con la degradación de aromáticos utilizando consorcios microbianos. Como en el caso de (Dai *et al.*, 2020), evaluaron la biorremediación de contaminantes de petróleo pesado, en las zonas intermareales utilizando un sistema de consorcio de lacasa-bacteria, logrando biodegradar el 66.5% del petróleo después de 100 días de remediación. Un estudio previo de (Tao *et al.*, 2019), utilizaron un consorcio bacteriano para biorremediar un suelo contaminado con HCs, mostrando un porcentaje de eliminación del 51.7% después de 30 días, una de las bacterias más representativas de este consorcio es el género *Burkholderia*. Previamente, (Li *et al.*, 2016), construyeron un consorcio bacteriano eficiente para biodegradar el petróleo crudo derramado en el mar Bohai de China, las cepas seleccionadas fueron los géneros *Castellaniella* y *Bacillus*, tuvieron un porcentaje de biodegradación del 51.87 % del petróleo crudo después de una semana.

Por otro lado, existen cepas bacterianas que tienen la facilidad de poder biodegradar HAP, como en el estudio realizado por (Wang *et al.*, 2018), donde utilizaron la cepa *Cycloclasticus* obtenida de ambientes marinos, la cual tiene la capacidad de biodegradar naftaleno, fenantreno, pireno y otros hidrocarburos aromáticos, las enzimas utilizadas fueron dioxigenasas. Pero en el estudio realizado por (Cui *et al.*, 2008), identificaron diversidad de géneros bacterianos (*Pseudoalteromonas*, *Halomonas*, *Marinobacter*, *Thalassospira*, *Tistrella*, *Cycloclasticus*, *Alteromonas*, *Thalassospira*, *Alcanivorax* y *Rhodospirillaceae*) a partir de ambientes subterráneos de aguas profundas como biodegradadores de aromáticos. En cambio, la investigación realizada por (Zhang *et al.*, 2015), utilizaron *Pseudomonas fluorescens* y *Pseudomonas putida*, para determinar la capacidad para biodegradar compuestos aromáticos agregando carbono y hierro, como resultado obtuvieron la biodegradación de ácidos nafténicos aromáticos y redujo la toxicidad

en un 49,3 % en condiciones óptimas, las cepas bacterianas para romper los enlaces, utilizaron la enzima dioxigenasa hidroxilante del anillo HAP funcional.

En cuanto a los consorcios bacterianos que biodegradan HCs alifáticos y aromáticos, resalta la investigación realizada por (Pereira *et al.*, 2019), las bacterias seleccionadas (*Bacillus methylophilus* SSNPLPB5 y *Pseudomonas sihuiensis* SNPLPB7) autóctonas del Parque Nacional “Lagoa do Peixe” lugar recurrente de derrames de HCs, mostraron estabilidad en condiciones de salinidad, nutrición y pH del agua de mar; biodegradaron hasta el 92.1 % y el 42.4 % de la fracción contaminante alifática de cadena media (C8 a C19) y larga (C20 a C33), respectivamente, también 31,1% de isoprenoide (pristano) y 46% de antraceno, 33.9% de fenantreno y 35.3% de pireno, después de 46 días de incubación en agua de mar. En ese mismo año. obtuvieron bacterias nativas de suelos contaminados con HCs, las cepas identificadas se utilizaron para biodegradar petróleo crudo, las cepas identificadas fueron *Pseudomonas resinovorans*, *Plantibacter auratus*, *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus pasteurii* y *Bacillus atrophaeus*, estas bacterias fueron capaces de degradar el 86.0%, 61.3%, 81.1%, 55.0% y 76.2% de compuestos alifáticos y el 58.6%, 39.4%, 55.5%, 39.0% y 49.9% de hidrocarburos aromáticos en un medio que contenía petróleo crudo (1% v/v) durante 21 días, respectivamente (Kiamarsi *et al.*, 2019). (Kumari *et al.*, 2018), informaron que las cepas bacterianas “*Stenotrophomonas maltophilia*, *Ochrobactrum anthropi*, *Pseudomonas mendocina*, *Microbacterium esteraromaticum* y *Pseudomonas aeruginosa*; de manera individual mostraron una alta tasa de biodegradación de HAP específicos por *M. esteraromaticum* 81.4%-naftaleno; *P. aeruginosa* 67.1% de fenantreno y 61.0% de benzo(b)fluoranteno y *S. maltophilia* 47.9%-fluoreno en 45 días, pero el consorcio de estas bacterias mostró una biodegradación mejorada del 89.1 % de naftaleno, el 63.8 % de fluoreno, el 81 % de fenantreno y el 72.8 % de benzo(b)fluoranteno en el petróleo crudo”. (Perdigão *et al.*, 2021), desarrollaron un consorcio degradador de hidrocarburos autóctono con cepas bacterianas con alto potencial de degradación de hidrocarburos, las bacterias seleccionadas fueron *Pseudomonas*, *Rhodococcus* y *Acinetobacter*, mostrando después de 15 días la mayor degradación de hidrocarburos (66%).

4. Conclusiones

Desde el 2015 aumento el interés de la comunidad académica y científica en el tema de BHBH, esto es debido a la necesidad de prestarle más atención al problema ambiental. Esto se evidencia en la producción científica de diferentes países, en busca de una solución a la problemática de contaminación ambiental por HCs.

Uno de los países con mayor producción de petróleo es China, Irán, Kuwait y Brasil, esto es congruente, puesto que son las naciones con mayor número de publicaciones en el tema. Sin embargo, según los criterios de búsqueda de este estudio, territorios como Estados Unidos y Arabia Saudita, los cuales ocupan uno de los primeros puestos en producción de petróleo (Torroba *et al.*, 2022), no aparecen dentro de los 10 países con mayor producción científica del tema. De manera opuesta, otras naciones que no son grandes productores de petróleo, como son: India, Polonia, Japón, Malasia, Italia y Nigeria, se encuentran dentro de los 10 países que más publican estudios relacionados con BHBH.

Por otro lado, los factores ambientales, como pH, concentración de nutrientes, nitrógeno, fósforo, oxígeno, consorcios microbianos (bacterias y hongos), el tiempo y la adaptabilidad al contaminante, son determinantes para la velocidad y cantidad de HC que biodegrada. Las bacterias especializadas en biodegradar hidrocarburos son *Alcanivorax* spp., *Cycloclastic* spp., *Oleiphilus* spp., *Oleispira* spp. y *Thalassolituus* spp., sin embargo, hay otras bacterias que han adquirido la capacidad metabólica para biodegradar tanto hidrocarburos alifáticos como aromáticos como la *Pseudomonas aeruginosa*.

Los microorganismos autóctonos en consorcio (bacterias y hongos) en condiciones adecuadas de pH, temperatura, oxígeno y demás nutrientes tienen un mayor porcentaje de biodegradación de HCs, en comparación de aquellos microorganismos que biodegradan de manera independiente el petróleo y sus derivados.

Las bacterias nativas más representativas que biodegradan HCs son *Gordonia*, *Brevibacterium*, *Aeromicrobium*, *Dietzia*, *Burkholderia*, *Stenotrophomonas multophila*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Mycobacterium*. Los hongos nativos más representativas que biodegradan HCs son *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Amorphoteca*, *Neosartorya*, *Paecilomyces*, *Talaromyces* y *Graphium*. Las levaduras

nativas más representativas que biodegradan HCs son *Candida*, *Yarrowia* y *Pichia*. En cuanto a las bacterias nativas que residen en desechos de refinerías de petróleo, son metabólicamente eficientes y se destacan porque son utilizadas en la biorremediación, tales como *Burkholderia*, *Kocuria*, *Enterobacter* y *Pandoraea*.

Los genes involucrados en la biodegradación aerobia de alcanos son *alkB1*, *alkB2*, *p450-1*, *p450-2*, *p450-3*, *almA* y CYP153 los cuales sintetizan alcano hidroxilasas. Otros genes *alkBgen* y *ladA*, codifican para la enzima alcano monooxigenasa dependiente de rubredoxina y la enzima alcano monooxigenasa dependiente de flavina respectivamente.

Según los documentos científicos revisados hasta el 2021, este es el primer estudio de revisión sistémico sobre BHBH, que ha utilizado la aplicación R studio para analizar la productividad bibliográfica en este tema. Esta investigación, facilitó la observación de una malla que describe la relación de 424 documentos científicos durante 22 años, logrando seleccionar los artículos hegemónicas, estructurales y publicaciones actuales, estas son de gran importancia porque permitió identificar las tendencias de estudio en este tema; convirtiéndose en referente para el estudio de la evolución y la actualidad sobre BHBH.

Por último, la revisión bibliográfica presentada en este documento muestra algunas limitaciones; primero, la búsqueda se ejecutó en Web of Science y Scopus, como resultado los artículos que no se encuentren en estas bases de datos no son tenidas en cuenta para este esta investigación. Segundo, los criterios de búsqueda para Bacterias y Hongos Biodegradadores de Hidrocarburos, tal vez implica algunas restricciones, ya que puede exceptuar términos claves referenciados a BHBH. Para posteriores estudios se propone desarrollar un metaanálisis en este tema, además, de ahondar en las diferentes perspectivas propuestas. A continuación, se recomiendan temas para futuras investigaciones relacionadas a BHBH:

| Perspectiva | Tema | Referencia |
|---|---|------------------------|
| Alcanos, Genes y Microorganismos | Mayor investigación del componente plasmídico de los genomas de diferentes cepas de <i>Geobacillus</i> | Tourova et al. (2018) |
| | La simulación y evaluación de las cepas de <i>E. coli</i> modificadas genéticamente y la respuesta de co-biodegradación a la biorremediación mejorada, pueden facilitar una mejor gestión de la contaminación por vertidos de petróleo en el futuro. | Meng et al. (2018) |
| | Revelar las funciones de la bacteria <i>Dietzia</i> podría proporcionar información importante sobre las cepas bacterianas autóctonas en los sitios contaminados en la bahía de Bohai. | Chen et al. (2017) |
| Biorremediación y Plástico | Profundizar en los mecanismos detallados que subyacen a la biodegradación del poliestireno, mediante la secuenciación del genoma y el análisis del transcriptoma. | Kim et al. (2021) |
| | <i>Vibrio</i> sp de Bakkhali (número de acceso de GenBank: KY941137.1, cepa PD6) y cepas fúngicas de <i>Aspergillus</i> sp (número de acceso de GenBank: MH119104.1), tienen el potencial de usarse para procesar desechos plásticos en el futuro para reducir el daño ambiental. | Sarkhel et al. (2020) |
| | Los microorganismos de la rizosfera permitirán en el futuro desarrollar un biofertilizante que acelere la descomposición de materiales poliméricos y, a la larga, desarrollar un método efectivo de fitorremediación de áreas contaminadas con plásticos. | Janczak et al. (2020) |
| Biorremediación, Producción de Biosurfactante y Biosurfactante Bacteriano | Realizar trabajos futuros para investigar la estructura química y la toxicidad celular de estos biosurfactantes tipo lipopéptidos. | Yalaoui et al. (2020) |
| Consortio, Degradación y Aromáticos | Se deben realizar más investigaciones detalladas acerca del diseño de la biorremediación a escala piloto de suelos impactados por el petróleo utilizando las cepas <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Staphylococcus pasteurii</i> , <i>Plantibacter auratus</i> y <i>Bacillus atrophaeus</i> debe ser dirigido individualmente y también por el consorcio bacteriano funcional. | Kiamarsi et al. (2019) |

5. Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, por el apoyo otorgado en el desarrollo del presente documento.

6. Referencias Bibliográficas

- Abbasian, F., Lockington, R., Mallavarapu, M. and Naidu, R. (2015) 'A Comprehensive Review of Aliphatic Hydrocarbon Biodegradation by Bacteria', *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 176(3), 670-699 <http://dx.doi.org/10.1007/s12010-015-1603-5>.
- Abbassi, B.E. and Shquirat, W.D. (2008) 'Kinetics of indigenous isolated bacteria used for ex-situ bioremediation of petroleum contaminated soil', *Water, Air, and Soil Pollution*, 192(1-4), 221-226 <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-008-9649-4>.
- Acevedo, J., Robledo, S. and Sepúlveda Angarita, M.Z. (2020) *Subáreas de internacionalización de emprendimientos: una revisión bibliográfica*. Universidad Francisco Paula de Santander. <http://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/669>.
- Acuña Molina, N.R. (2017) *Revisión Bibliográfica sobre los Microorganismos Biodegradadores de Polietileno de Baja Densidad LDPE y sus Efectos en el Material*, Tesis (Licenciado en Química), Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/5608>.
- Altschul, S.F., Madden, T.L., Schäffer, A.A., Zhang, J., Zhang, Z., Miller, W. and Lipman, D.J. (1997) 'Gapped BLAST and PSI-BLAST: A new generation of protein database search programs', *Nucleic Acids Research*, 25(17), 3389 <http://dx.doi.org/10.1093/nar/25.17.3389>.
- Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S. and Pillai, S. (2021) 'Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes', *Science of The Total Environment*, 759, 143536 <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536>.
- Arduoso, M., Forero-Lopez, A.D., Buzzi, N.S., Spetter, C.V. and Fernandez-Severini, M.D. (2021) 'COVID-19 pandemic repercussions on plastic and antiviral polymeric textile causing pollution on beaches and coasts of South America', *Science of the Total Environment*, 763 <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144365>.
- Aria, M. and 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>.
- Arsyah, D.M., Kardena, E. and Helmy, Q. (2018) 'Characterization of biosurfactant produced by petrofilic bacteria isolated from hydrocarbon impacted soil and its potential application in bioremediation', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 106, 012101 <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/106/1/012101>.
- Atlas, R.M. (1981) 'Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: An environmental perspective', *Microbiological Reviews*, 45(1), 180-209 <http://dx.doi.org/10.1128/mmr.45.1.180-209.1981>.
- Atlas, R.M. (1995) 'Petroleum biodegradation and oil spill bioremediation', *Marine Pollution Bulletin*, 31(4-12), 178-182 [http://dx.doi.org/10.1016/0025-326X\(95\)00113-2](http://dx.doi.org/10.1016/0025-326X(95)00113-2).
- Bao, M., Pi, Y., Wang, L., Sun, P., Li, Y. and Cao, L. (2014) 'Lipopeptide biosurfactant production bacteria *Acinetobacter* sp. D3-2 and its biodegradation of crude oil', *Environmental Sciences: Processes and Impacts*, 16(4), 897-903 <http://dx.doi.org/10.1039/c3em00600j>.
- Bar-Ilan, J. (2010) 'Citations to the "Introduction to informetrics" indexed by WOS, Scopus and Google Scholar', *Scientometrics*, 82(3), 495-506 <http://dx.doi.org/10.1007/s11192-010-0185-9>.

- Bastian, M., Heymann, S. and Jacomy, M. (2009) 'Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks', *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*, 3(1), 361-362. <https://ojs.aaai.org/index.php/ICWSM/article/view/13937>
- Becerra Gutiérrez, L.K. and Horna Acevedo, M.V. (2016) 'Aislamiento de microorganismos productores de biosurfactantes y lipasas a partir de efluentes residuales de camales y suelos contaminados con hidrocarburos', *Scientia Agropecuaria*, 7, 23-31. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.01.03>
- Blondel, V.D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R. and Lefebvre, E. (2008) 'Fast unfolding of communities in large networks', *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008(10), P10008 <http://dx.doi.org/10.1088/1742-5468/2008/10/p10008>.
- Buitrago, S., Duque, P.L. and Robledo, S. (2020) 'Branding Corporativo: una revisión bibliográfica', *Económicas cuc*, 41(1), 143-162-143-162 <https://doi.org/10.17981/econcuc.41.1.2020.Org.1>
- Butron Pinazo, S.B. (2020) 'Capacidad de biodegradación de *Pseudomonas aeruginosa* frente al polietileno de baja densidad', *Revista de Investigaciones de la Escuela de Posgrado de la UNA PUNO*, 9(3), 1671 - 1684 <http://dx.doi.org/10.26788/epg.v9i3.2027>.
- Chaerun, S.K., Tazaki, K., Asada, R. and Kogure, K. (2004) 'Bioremediation of coastal areas 5 years after the Nakhodka oil spill in the Sea of Japan: Isolation and characterization of hydrocarbon-degrading bacteria', *Environment International*, 30(7), 911-922 <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.007>.
- Chaillan, F., Le Flèche, A., Bury, E., Phantavong, Y.H., Grimont, P., Saliot, A. and Oudot, J. (2004) 'Identification and biodegradation potential of tropical aerobic hydrocarbon-degrading microorganisms', *Research in Microbiology*, 155(7), 587-595 <http://dx.doi.org/10.1016/j.resmic.2004.04.006>.
- Chen, W., Li, J., Sun, X., Min, J. and Hu, X. (2017) 'High efficiency degradation of alkanes and crude oil by a salt-tolerant bacterium *Dietzia* species CN-3', *International Biodeterioration and Biodegradation*, 118, 110-118 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.01.029>.
- Chin, H.H., Varbanov, S.P. and Klemeš, J.J. (2021) 'Plastic Waste Categorisation using Machine Learning Methods-Metals Contaminations', *2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, 1-6 <http://dx.doi.org/10.23919/SpliTech52315.2021.9566351>.
- Clavijo-Tapia, F.J., Duque-Hurtado, P.L., Arias-Cerquera, G. and Tolosa-Castañeda, M.A. (2021) 'Organizational communication: a bibliometric analysis from 2005 to 2020', *Clío América*, 15(29) <http://dx.doi.org/10.21676/23897848.4311>.
- Cui, Z., Lai, Q., Dong, C. and Shao, Z. (2008) 'Biodiversity of polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria from deep sea sediments of the Middle Atlantic Ridge', *Environmental Microbiology*, 10(8), 2138-2149 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1462-2920.2008.01637.x>.
- Cunningham, C.J., Ivshina, I.B., Lozinsky, V.I., Kuyukina, M.S. and Philp, J.C. (2004) 'Bioremediation of diesel-contaminated soil by microorganisms immobilised in polyvinyl alcohol', in *International Biodeterioration and Biodegradation*, 167-174 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2004.03.005>.
- Dai, X., Lv, J., Yan, G., Chen, C., Guo, S. and Fu, P. (2020) 'Bioremediation of intertidal zones polluted by heavy oil spilling using immobilized laccase-bacteria consortium', *Bioresource Technology*, 309, 123305 <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123305>.
- Das, N. and Chandran, P. (2011) 'Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants: An Overview', *Biotechnology Research International*, 2011, 941810 <http://dx.doi.org/10.4061/2011/941810>.
- Dashti, N., Ali, N., Khanafer, M. and Radwan, S.S. (2017) 'Oil uptake by plant-based sorbents and its biodegradation by their naturally associated microorganisms', *Environmental Pollution*, 227, 468-475 <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.089>.
- Dayamrita, K.K., Divya, K.K., Sreelakshmi, R., Arjun, E.J. and John, F. (2020) 'Isolation and characterization of hydrocarbon degrading bacteria from oil contaminated soil - Potential for biosurfactant assisted bioremediation', *AIP Conference Proceedings*, 2263(1), 020009 <http://dx.doi.org/10.1063/5.0017395>.

- Dehghannoudeh, G., Kiani, K., Moshafi, M.H., Dehghannoudeh, N., Rajaei, M., Salarpour, S. and Ohadi, M. (2019) 'Optimizing the immobilization of biosurfactant-producing *Pseudomonas aeruginosa* in alginate beads', *JOURNAL OF PHARMACY & PHARMACOGNOSY RESEARCH*, 7(6), 413-420. https://jppres.com/jppres/pdf/vol7/jppres19.628_7.6.413.pdf
- Derraik, J.G.B. (2002) 'The pollution of the marine environment by plastic debris: A review', *Marine Pollution Bulletin*, 44(9), 842-852 [http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5).
- Di Vaio, A., Palladino, R., Pezzi, A. and Kalisz, D.E. (2021) 'The role of digital innovation in knowledge management systems: A systematic literature review', 123, 220-231 <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.042>.
- Doan, C.D.P., Sano, A., Tamaki, H., Pham, H.N.D., Duong, X.H. and Terashima, Y. (2017) 'Identification and biodegradation characteristics of oil-degrading bacteria from subtropical Iriomote Island, Japan, and tropical Con Dao Island, Vietnam', *TROPICS*, 25(4), 147-159 <http://dx.doi.org/10.3759/tropics.MS16-01>.
- Duque, P. and Cervantes-Cervantes, L.-S. (2019) 'Responsabilidad Social Universitaria: una revisión sistemática y análisis bibliométrico', *Estudios Gerenciales*, 35(153) <http://dx.doi.org/10.18046/j.estger.2019.153.3389>.
- Duque, P., Meza, O.E., Giraldo, D. and Barreto, K. (2021a) 'Economía Social y Economía Solidaria: un análisis bibliométrico y revisión de literatura', *REVESCO: revista de estudios cooperativos*, (138), 187-212 <https://dx.doi.org/10.5209/REVE.75566>.
- Duque, P., Trejos, D., Hoyos, O. and Chica Mesa, J.C. (2021b) *Finanzas corporativas y sostenibilidad: un análisis bibliométrico e identificación de tendencias*. Universidad de Medellín <https://doi.org/10.22395/seec.v23n55a13>
- Duque, P.H., Cardona, A.T., Ramírez, D.R. and Henao, M.C. (2020) 'Marketing viral:: Aplicación y tendencias', *Clío América*, 14(27), 454-468 <http://dx.doi.org/10.21676/23897848.3759>.
- Duque, P.L.H., Aguirre, O.E.M., Lesmes, G.A.Z. and Castellanos, J.D.G. (2021) 'Internacionalización de empresas latinas: evolución y tendencias', *Económicas Cuc*, 42(1), 122-152 <http://dx.doi.org/10.17981/econcuc.42.1.2021.Org.1>.
- Duque-Hurtado, P., Samboni-Rodríguez, V., Castro-García, M., Montoya-Restrepo, L.A. and Montoya-Restrepo, I.A. (2020) 'Neuromarketing: su estado actual y perspectivas de investigación', *Estudios Gerenciales*, 36(157) <http://dx.doi.org/10.18046/j.estger.2020.157.3890>.
- Dussud, C., Hudec, C., George, M., Fabre, P., Higgs, P., Bruzard, S., Delort, A.M., Eyheraguibel, B., Meistertzheim, A.L., Jacquin, J., Cheng, J., Callac, N., Odobel, C., Rabouille, S. and Ghiglione, J.F. (2018) 'Colonization of non-biodegradable and biodegradable plastics by marine microorganisms', *Frontiers in Microbiology*, 9(JUL) <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2018.01571>.
- Díaz, J., Ricoy, C., Moreno, C., Ricoy, V., Pérez, V. and Valbuena, O. (2013) 'Alkane incorporation by hydrocarbon degrading bacteria mediated by a 70kda protein attached to membranes during the fuel diesel biodegradation', *Interciencia*, 38(6), 437-442. <https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2017/12/437-c-VALBUENA-6.pdf>
- Echchakoui, S. (2020) 'Why and how to merge Scopus and Web of Science during bibliometric analysis: the case of sales force literature from 1912 to 2019', *Journal of Marketing Analytics*, 8(3), 165-184 <http://dx.doi.org/10.1057/s41270-020-00081-9>.
- Fernández-Luqueño, F., López-Valdez, F., Sarabia-Castillo, C.R., García-Mayagoitia, S. and Pérez-Ríos, S.R. (2017) 'Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons-Polluted Soils at Laboratory and Field Scale: A Review of the Literature on Plants and Microorganisms' in Anjum, N. A., Gill, S. S. and Tuteja, N., eds., *Enhancing Cleanup of Environmental Pollutants: Volume 1: Biological Approaches*, Cham: Springer International Publishing, 43-64. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55426-6_4
- Freeman, L.C. (1977) 'A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness', *Sociometry*, 40(1), 35-41 <http://dx.doi.org/10.2307/3033543>.

- Gurzki, H. and Woisetschläger, D.M. (2017) 'Mapping the luxury research landscape: A bibliometric citation analysis', *Journal of Business Research*, 77, 147-166 <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.11.009>.
- Gutiérrez Alvarez, A.I. (2019) *Biodegradación de Polietileno de Baja Densidad Utilizando Hongos, Bacterias y Consorcios Microbianos Aislados del Botadero Municipal de Tacna*, Tesis (Ingeniería Ambiental), Universidad Privada de Tacna. <http://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/1269>.
- Hamzah, A., Manikan, V. and Abd Aziz, N.A.F. (2017) 'Biodegradation of tapis crude oil using consortium of bacteria and fungi: Optimization of crude oil concentration and duration of incubation by response surface methodology', *Sains Malaysiana*, 46(1), 43-50 <http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2017-4601-06>.
- Haritash, A.K. and Kaushik, C.P. (2009) 'Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review', *Journal of Hazardous Materials*, 169(1), 1-15 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137>.
- Head, I.M., Jones, D.M. and Röling, W.F. (2006) 'Marine microorganisms make a meal of oil', *Nature reviews. Microbiology*, 4(3), 173-182 <http://dx.doi.org/10.1038/nrmicro1348>.
- Hirsch, J. E. (2005) An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(46), pp. 16569-16572. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507655102>.
- Imron, M.F., Kurniawan, S.B., Ismail, N.I. and Abdullah, S.R.S. (2020) 'Future challenges in diesel biodegradation by bacteria isolates: A review', *Journal of Cleaner Production*, 251, 119716 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119716>.
- Janczak, K., Dąbrowska, G.B., Raszewska-Kaczor, A., Kaczor, D., Hryniewicz, K. and Richert, A. (2020) 'Biodegradation of the plastics PLA and PET in cultivated soil with the participation of microorganisms and plants', *International Biodeterioration and Biodegradation*, 155 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105087>.
- Kaczorek, E., Chrzanowski, Ł., Pijanowska, A. and Olszanowski, A. (2008) 'Yeast and bacteria cell hydrophobicity and hydrocarbon biodegradation in the presence of natural surfactants: Rhamnolipides and saponins', *Bioresource Technology*, 99(10), 4285-4291 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.049>.
- Khalid, F.E., Lim, Z.S., Sabri, S., Gomez-Fuentes, C., Zulkharnain, A. and Ahmad, S.A. (2021) 'Bioremediation of Diesel Contaminated Marine Water by Bacteria: A Review and Bibliometric Analysis', *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2) <http://dx.doi.org/10.3390/jmse9020155>.
- Kiamarsi, Z., Soleimani, M., Nezami, A. and Kafi, M. (2019) 'Biodegradation of n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons using novel indigenous bacteria isolated from contaminated soils', *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(11), 6805-6816 <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-018-2087-y>.
- Kim, H.W., Jo, J.H., Kim, Y.B., Le, T.K., Cho, C.W., Yun, C.H., Chi, W.S. and Yeom, S.J. (2021) 'Biodegradation of polystyrene by bacteria from the soil in common environments', *Journal of Hazardous Materials*, 416 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126239>.
- Kumari, S., Regar, R.K. and Manickam, N. (2018) 'Improved polycyclic aromatic hydrocarbon degradation in a crude oil by individual and a consortium of bacteria', *Bioresource Technology*, 254, 174-179 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.075>.
- Landínez Martínez, D.A., Robledo Giraldo, S. and Montoya Londoño, D.M. (2019) 'Executive Function performance in patients with obesity: A systematic review', *Psychologia. Avances de la Disciplina*, 13(2), 121-134 <https://doi.org/10.21500/19002386.4230>.
- Leahy, J.G. and Colwell, R.R. (1990) 'Microbial degradation of hydrocarbons in the environment', *Microbiological Reviews*, 54(3), 305-315 <http://dx.doi.org/10.1128/mmbr.54.3.305-315.1990>.
- Lestari, P. and Trihadiningrum, Y. (2019) 'The impact of improper solid waste management to plastic pollution in Indonesian coast and marine environment', *Marine Pollution Bulletin*, 149, 9 <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110505>.

- Li, X., Zhao, L. and Adam, M. (2016) 'Biodegradation of marine crude oil pollution using a salt-tolerant bacterial consortium isolated from Bohai Bay, China', *Marine Pollution Bulletin*, 105(1), 43-50 <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.02.073>.
- Li, X.F., Tian, Y., Xu, C. and Cheng, B.D. (2019) 'The Impact of Marine Pollution Control on the Output Value of Marine Fisheries Based on the Spatial Econometric Model', *Journal of Coastal Research*, 381-384 <http://dx.doi.org/10.2112/si98-088.1>.
- Marchand, C., St-Arnaud, M., Hogland, W., Bell, T.H. and Hijri, M. (2017) 'Petroleum biodegradation capacity of bacteria and fungi isolated from petroleum-contaminated soil', *International Biodeterioration and Biodegradation*, 116, 48-57 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.030>.
- Margesin, R. and Schinner, F. (2001) 'Bioremediation (natural attenuation and biostimulation) of diesel-oil-contaminated soil in an alpine glacier skiing area', *Applied and environmental microbiology*, 67(7), 3127-3133 <http://dx.doi.org/10.1128/AEM.67.7.3127-3133.2001>.
- Martín Peraza, A. (2017) *Estudio preliminar de la biodegradación de plásticos por bacterias marinas*, Tesis (Biología), Universidad de la Laguna. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/5762>.
- Meng, L., Bao, M. and Sun, P. (2018) 'Construction of long-chain alkane degrading bacteria and its application in bioremediation of crude oil pollution', *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 524-532 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.137>.
- Mishra, S., Jyot, J., Kuhad, R.C. and Lal, B. (2001) 'In situ bioremediation potential of an oily sludge-degrading bacterial consortium', *Current Microbiology*, 43(5), 328-335 <http://dx.doi.org/10.1007/s002840010311>.
- Nie, Y., Chi, C.Q., Fang, H., Liang, J.L., Lu, S.L., Lai, G.L., Tang, Y.Q. and Wu, X.L. (2014) 'Diverse alkane hydroxylase genes in microorganisms and environments', *Scientific Reports*, 4 <http://dx.doi.org/10.1038/srep04968>.
- Ojha, N., Pradhan, N., Singh, S., Barla, A., Shrivastava, A., Khatua, P., Rai, V. and Bose, S. (2017) 'Evaluation of HDPE and LDPE degradation by fungus, implemented by statistical optimization', *Scientific Reports*, 7(1), 39515 <http://dx.doi.org/10.1038/srep39515>.
- Perdigão, R., Almeida, C.M.R., Santos, F., Carvalho, M.F. and Mucha, A.P. (2021) 'Optimization of an Autochthonous Bacterial Consortium Obtained from Beach Sediments for Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons', *Water*, 13(1) <http://dx.doi.org/10.3390/w13010066>.
- Pereira, E., Napp, A.P., Allebrandt, S., Barbosa, R., Reuwsaat, J., Lopes, W., Kmetzsch, L., Staats, C.C., Schrank, A., Dallegre, A., Peralba, M.d.C.R., Passaglia, L.M.P., Bento, F.M. and Vainstein, M.H. (2019) 'Biodegradation of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in seawater by autochthonous microorganisms', *International Biodeterioration & Biodegradation*, 145, 104789 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104789>.
- Pranckutė, R. (2021) 'Web of Science (WoS) and Scopus: The Titans of Bibliographic Information in Today's Academic World', *Publications*, 9(1), 12 <http://dx.doi.org/10.3390/publications9010012>.
- Pérez Parrilla, J. (2020) *Biodegradación de tereftalato de polietileno: microorganismos, enzimas y perspectivas futuras*, Tesis (Biología), Universidad de la Laguna. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/20671>.
- Queiroz, M.M. and Fosso Wamba, S. (2021) 'A structured literature review on the interplay between emerging technologies and COVID-19 – insights and directions to operations fields', *Annals of Operations Research* <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-021-04107-y>.
- Ramos-Enríquez, V., Duque, P. and Vieira Salazar, J.A. (2021) 'Responsabilidad Social Corporativa y Emprendimiento: evolución y tendencias de investigación', *Desarrollo Gerencial*, 13(1), 1-34 <http://dx.doi.org/0000-0002-0772-5878>.
- Robledo, S., Osorio, G. and Lopez, C. (2014) 'Networking en pequeña empresa: una revisión bibliográfica utilizando la teoría de grafos', *Revista vínculos*, 11(2), 6-16, available: <http://dx.doi.org/10.14483/2322939X.9664>.
- Rojo, F. (2009) 'Degradation of alkanes by bacteria: Minireview', *Environmental Microbiology*, 11(10), 2477-2490 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1462-2920.2009.01948.x>.

- Rojo-Nieto, E. and Montoto Martínez, T. (2017) *Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global*, España. <https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/56275/2/informe-basuras-marinas.pdf>
- Rubaceti, N.A.B., Giraldo, S.R. and Sepulveda, M.Z. (2022) 'Una revisión bibliográfica del Fintech y sus principales subáreas de estudio', *ECONÓMICAS CUC*, 43(1) <http://dx.doi.org/10.17981/econcuc.43.1.2022.Econ.4>.
- Ruffini Castiglione, M., Giorgetti, L., Becarelli, S., Siracusa, G., Lorenzi, R. and Di Gregorio, S. (2016) 'Polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soils: bioaugmentation of autochthonous bacteria and toxicological assessment of the bioremediation process by means of *Vicia faba* L', *Environmental Science and Pollution Research*, 23(8), 7930-7941 <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-6049-y>.
- Sakthipriya, N., Doble, M. and Sangwai, J.S. (2015) 'Bioremediation of Coastal and Marine Pollution due to Crude Oil Using a Microorganism *Bacillus subtilis*', *Procedia Engineering*, 116, 213-220 <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.284>.
- Sangeetha Devi, R., Ramya, R., Kannan, K., Robert Antony, A. and Rajesh Kannan, V. (2019) 'Corrigendum to "Investigation of biodegradation potentials of high density polyethylene degrading marine bacteria isolated from the coastal regions of Tamil Nadu, India" (Marine Pollution Bulletin (2019) 138 (549–560), (S0025326X1830852X), (10.1016/j.marpolbul.2018.12.001))', *Marine Pollution Bulletin*, 144, 351-354 <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.058>.
- Sarkar, P., Roy, A., Pal, S., Mohapatra, B., Kazy, S.K., Maiti, M.K. and Sar, P. (2017) 'Enrichment and characterization of hydrocarbon-degrading bacteria from petroleum refinery waste as potent bioaugmentation agent for in situ bioremediation', *Bioresource Technology*, 242, 15-27 <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.010>.
- Sarker, R.K., Paul, P., Das, S., Chatterjee, S., Chakraborty, P. and Tribedi, P. (2021) 'Exploration of Strategies for the Enhanced Biodegradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) by A Soil Bacterium *Enterobacter Cloacae* AkS7', *JOURNAL OF PURE AND APPLIED MICROBIOLOGY*, 15(3), 1266-1278 <http://dx.doi.org/10.22207/JJAM.15.3.16>.
- Sarkhel, R., Sengupta, S., Das, P. and Bhowal, A. (2020) 'Comparative biodegradation study of polymer from plastic bottle waste using novel isolated bacteria and fungi from marine source', *Journal of Polymer Research*, 27(1) <http://dx.doi.org/10.1007/s10965-019-1973-4>.
- Secinaro, S., Dal Mas, F., Brescia, V. and Calandra, D. (2021) 'Blockchain in the accounting, auditing and accountability fields: a bibliometric and coding analysis', *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, ahead-of-print(ahead-of-print) <http://dx.doi.org/10.1108/AAAJ-10-2020-4987>.
- Sitorus, A.A.M., Rahayu, T., Khiftiyah, A.M., Salamun, Nurhariyati, T., Fatimah and Ni'matuzahroh (2019) 'Biodegradation of plastic waste by bacteria isolated from surabaya landfills', *Pollution Research*, 38, S21-S25. <https://scholar.unair.ac.id/en/publications/biodegradation-of-plastic-waste-by-bacteria-isolated-from-surabay>
- Sudhakar, M., Doble, M., Murthy, P.S. and Venkatesan, R. (2008) 'Marine microbe-mediated biodegradation of low- and high-density polyethylenes', *International Biodeterioration and Biodegradation*, 61(3), 203-213 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2007.07.011>.
- Sun, S., Wang, Y., Zang, T., Wei, J., Wu, H., Wei, C., Qiu, G. and Li, F. (2019) 'A biosurfactant-producing *Pseudomonas aeruginosa* S5 isolated from coking wastewater and its application for bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons', *Bioresource Technology*, 281, 421-428 <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.087>.
- Tani, M., Papaluca, O. and Sasso, P. (2018) 'The System Thinking Perspective in the Open-Innovation Research: A Systematic Review', *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 4(3) <http://dx.doi.org/10.3390/joitmc4030038>.
- Tao, K., Zhang, X., Chen, X., Liu, X., Hu, X. and Yuan, X. (2019) 'Response of soil bacterial community to bioaugmentation with a plant residue-immobilized bacterial consortium for crude oil removal', *Chemosphere*, 222, 831-838 <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.133>.

- Torres, G., Robledo, S. and Berrio, S.P.R. (2021) 'Orientación al mercado: Importancia, evolución y enfoques emergentes usando análisis cuantitativo', *Criterio Libre*, 19(35), 326-340 <http://dx.doi.org/10.18041/1900-0642/criteriolibre.2021v19n35.8371>.
- Torroba, A., de Bioeconomía, P.H. and Productivo, D. (2022) *La importancia geopolítica del sector agropecuario en la seguridad energética*. pp. 3. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/19926>
- Tourova, T.P., Sokolova, D.S., Semenova, E.M., Poltarau, A.B. and Nazina, T.N. (2018) 'Diversity of the alkB genes of n-alkane biodegradation in thermophilic hydrocarbon-oxidizing bacteria of the genera Geobacillus, Parageobacillus, and Aeribacillus', *Microbiology (Russian Federation)*, 87(3), 301-307 <http://dx.doi.org/10.1134/S002626171803013X>.
- Tourova, T.P., Sokolova, D.S., Semenova, E.M., Shumkova, E.S., Korshunova, A.V., Babich, T.L., Poltarau, A.B. and Nazina, T.N. (2016) 'Detection of n-alkane biodegradation genes alkB and ladA in thermophilic hydrocarbon-oxidizing bacteria of the genera Aeribacillus and Geobacillus', *Microbiology (Russian Federation)*, 85(6), 693-707 <http://dx.doi.org/10.1134/S0026261716060199>.
- Trejos-Salazar, D.F., Duque-Hurtado, P.L., Montoya-Restrepo, L.A. and Montoya-Restrepo, I.A. (2021) 'Neuroeconomía: una revisión basada en técnicas de mapeo científico', *REVISTA DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN*, 11(2), 243-260 <http://dx.doi.org/10.19053/20278306.v11.n2.2021.12754>.
- Valencia-Hernández, D.-S., Robledo, S., Pinilla, R., Duque-Méndez, N.D. and Olivar-Tost, G. (2020) 'SAP Algorithm for Citation Analysis: An improvement to Tree of Science', *Ingeniería e Investigación*, 40(1), 45-49 <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v40n1.77718>.
- Van Hamme, J.D., Singh, A. and Ward, O.P. (2003) 'Recent Advances in Petroleum Microbiology', *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 67(4), 503-549, available: <http://dx.doi.org/10.1128/MMBR.67.4.503-549.2003>.
- Vera-Baceta, M.-A., Thelwall, M. and Kousha, K. (2019) 'Web of Science and Scopus language coverage', *Scientometrics*, 121(3), 1803-1813 <http://dx.doi.org/10.1007/s11192-019-03264-z>.
- Wallis, W.D. (2007) 'A beginner's guide to graph theory' <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-8176-4580-9>.
- Wang, W. and Shao, Z. (2012) 'Genes involved in alkane degradation in the alcanivorax hongdengensis strain A-11-3', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94(2), 437-448 <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-011-3818-x>.
- Wang, W., Wang, L., Shao, Z. and Liu, S.-J. (2018) 'Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Degradation Pathways of the Obligate Marine PAH Degrader Cycloclasticus sp. Strain P1', *Applied and Environmental Microbiology*, 84(21), e01261-18 <http://dx.doi.org/10.1128/AEM.01261-18>.
- Xue, J., Yu, Y., Bai, Y., Wang, L. and Wu, Y. (2015) 'Marine Oil-Degrading Microorganisms and Biodegradation Process of Petroleum Hydrocarbon in Marine Environments: A Review', *Current Microbiology*, 71(2), 220-228 <http://dx.doi.org/10.1007/s00284-015-0825-7>.
- Yalaoui-Guellal, D., Fella-Temzi, S., Djafri-Dib, S., Brahmi, F., Banat, I.M. and Madani, K. (2020) 'Biodegradation potential of crude petroleum by hydrocarbonoclastic bacteria isolated from Soummam wadi sediment and chemical-biological properties of their biosurfactants', *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 184, 106554 <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106554>.
- Yang, S., Keller, F.B. and Zheng, L. (2016) *Social network analysis: Methods and examples*, Sage Publications. pp. 10-18.
- Zhang, J., Chen, J., Jia, R., Dun, Z., Wang, B., Hu, X. and Wang, Y. (2018) 'Selection and evaluation of microorganisms for biodegradation of agricultural plastic film', *3 Biotech*, 8(7) <http://dx.doi.org/10.1007/s13205-018-1329-5>.
- Zhang, J. and Luo, Y. (2017) 'Degree centrality, betweenness centrality, and closeness centrality in social network', in *Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2017)*, 300-303 <http://dx.doi.org/10.2991/msam-17.2017.68>.

- Zhang, Y., McPhedran, K.N. and Gamal El-Din, M. (2015) 'Pseudomonads biodegradation of aromatic compounds in oil sands process-affected water', *Science of The Total Environment*, 521-522, 59-67 <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.068>.
- Zhu, J. and Liu, W. (2020) 'A tale of two databases: the use of Web of Science and Scopus in academic papers', *Scientometrics*, 123(1), 321-335 <http://dx.doi.org/10.1007/s11192-020-03387-8>.
- Zupic, I. and Čater, T. (2015) 'Bibliometric Methods in Management and Organization', *Organizational Research Methods*, 18(3), 429-472 <http://dx.doi.org/10.1177/1094428114562629>.
- Zuschke, N. (2020) 'An analysis of process-tracing research on consumer decision-making', *Journal of Business Research*, 111, 305-320 <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.028>