

Potencial de *Stenotrophomonas maltophilia* para la biodegradación de hidrocarburos y metales pesados. Una revisión sistemática con meta-análisis

Potential of Stenotrophomonas maltophilia for the biodegradation of hydrocarbons and heavy metals. A systematic review with meta-analysis

Julian Rolando Fonseca Peralta  Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca
Ligia Consuelo Sánchez Leal  Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

RESUMEN

La contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos por sustancias tóxicas como hidrocarburos y metales pesados, manipulados en gran medida en actividades fundamentales para la economía mundial, actualmente, se constituye como una de las problemáticas ambientales crecientes más graves y peligrosas para la salud humana y ambiental. Los hidrocarburos se generan en grandes cantidades por la quema incompleta de materia orgánica, llegando inevitablemente al suelo y al agua para luego, debido a sus propiedades, bioacumularse causando graves daños a los seres vivos. Por otro lado, los metales pesados, muy útiles en la industria, especialmente en la minería, cuando se acumulan en el suelo y en el agua en altas concentraciones, causan diferentes daños tanto en plantas como en humanos y animales. El objetivo de esta revisión fue analizar cómo ha aumentado en los últimos años la utilización de *Stenotrophomonas maltophilia* en investigaciones relacionadas a la biorremediación de ecosistemas contaminados con estas sustancias. Materiales y métodos: Se realizó un meta-análisis en dos periodos de tiempo consecutivos de quince años, el primero comprendido entre 1990 y 2005, y el segundo entre 2006 y 2021; al aplicar unos criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron determinadas publicaciones con el objetivo de analizar la evolución en la investigación sobre la capacidad de *S. maltophilia* para la biodegradación de hidrocarburos y metales pesados. Resultados: Al seleccionar las publicaciones, se evidenció que el estudio del potencial de biodegradación de *S. maltophilia* aumentó notablemente en el segundo periodo de tiempo, muy probablemente, debido al crecimiento de la problemática ambiental y al creciente impacto del aprovechamiento de las características metabólicas de los microorganismos para diferentes fines en los últimos años.

Palabras clave: *Stenotrophomonas maltophilia*, biodegradación, hidrocarburos, metales pesados, contaminación.

ABSTRACT

Pollution of terrestrial and aquatic ecosystems by toxic substances such as hydrocarbons and heavy metals, manipulated to a great extent in activities

1. *Pregrado en bacteriología y laboratorio clínico (en curso), Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, estudiante, grupo Ceparium, Facultad Ciencias de la Salud, Carrera 11B este #65 A 15 sur, Bogotá, Colombia, teléfono: jrfonseca@unicolmayor.edu.co,*

 <https://orcid.org/0000-0001-8260-7372>

2. *Maestría en biología con énfasis en fitoprotección, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, docente de planta, grupo Ceparium, Facultad Ciencias de la Salud, Bogotá, Colombia,*

lconsuelosanchez@unicolmayor.edu.co,
 <https://orcid.org/0000-0001-7796-1326>

Fecha recepción:
Fecha aceptación:



© 2022 Universidad de Córdoba. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution License, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que el autor original y la fuente se acreditan.

fundamental to the world economy, is currently one of the most serious and dangerous growing environmental problems for human and environmental health. Hydrocarbons are generated in large quantities by the incomplete burning of organic matter, inevitably reaching the soil and water and then, due to their properties, bioaccumulate causing serious damage to living beings. On the other hand, heavy metals, very useful in industry, especially in mining, when they accumulate in the soil and in water in high concentrations, cause different damages both in plants and in humans and animals. The objective of this review was to analyze how the use of *Stenotrophomonas maltophilia* has increased in recent years in research related to the bioremediation of ecosystems contaminated with these substances. Materials and methods: A meta-analysis were carried out in two consecutive periods of fifteen years, the first between 1990 and 2005, and the second between 2006 and 2021; when applying inclusion and exclusion criteria, certain publications were selected in order to analyze the evolution in research on the capacity of *S. maltophilia* for the biodegradation of hydrocarbons and heavy metals. Results: When selecting the publications, it was evidenced that the study of the biodegradation potential of *S. maltophilia* increased notably in the second period of time, most likely due to the growth of environmental problems and the growing impact of taking advantage of the metabolic characteristics of microorganisms for different purposes in recent years.

Keywords: *Stenotrophomonas maltophilia*, biodegradation, hydrocarbons, heavy metals, contamination.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el medio ambiente se enfrenta a la grave problemática que supone la contaminación de suelos y cuerpos de agua debida principalmente a acciones antropogénicas, destacándose especialmente la extracción de recursos naturales, lo que ha desencadenado en la llegada fortuita y prevista de hidrocarburos y metales pesados a estos ecosistemas, sustancias que son utilizadas en todo el mundo para diversas actividades y se han convertido en pilares de la economía de varios países. Sin embargo, su creciente importancia está directamente relacionada con los riesgos que su manipulación representa para las fuentes hídricas, la flora y la fauna (Velásquez, 2017) (Pabón et al., 2020) (S. Chen et al., 2017).

En primer lugar, los hidrocarburos son combustibles fósiles utilizados

ampliamente para la generación de energía alrededor del mundo, cuya demanda mundial ha aumentado cerca del 50% en un lapso de 25 años desde 1990 y se proyecta un aumento del 28% desde entre 2015 y 2040 (Imam et al., 2019). El aumento del consumo de hidrocarburos en las últimas décadas los ha constituido en potenciales contaminantes ambientales, estos son generados tanto de fuentes naturales como por actividades humanas, como por ejemplo durante la quema incompleta de carbón, madera, basura y otras sustancias orgánicas (S. Chen et al., 2013). Debido a la alta hidrofobicidad y estabilidad que estos presentan, tienen la capacidad de unirse a sedimentos y partículas en el agua y en el suelo provocando su posible bioacumulación, que posteriormente puede provocar daños a la salud humana, animal y del medio ambiente (AbuBakr et al., 2015) (S. Chen et al., 2014). Algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos,

como el Benzo [a] pireno (BaP) son contaminantes con propiedades altamente mutagénicas y cancerígenas, representando un grave peligro para la salud humana en la actualidad de acuerdo a la Agencia Internacional de investigaciones sobre el cáncer de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (S. Chen et al., 2013) (S. Chen et al., 2014).

Algunas alternativas como la oxidación química o la fotólisis pueden afectar al BaP, sin embargo, varios estudios han informado que la transformación y degradación microbiana es el método más eficaz para eliminarlo del medio ambiente. Sin embargo, aunque puede ser degradado por varias cepas bacterianas, solo es posible cuando están presentes una o más fuentes de carbono alternativas (S. Chen et al., 2014).

Otras sustancias contaminantes muy peligrosas conocidas en todo el mundo son los metales pesados como el arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, entre otros, elementos muy importantes en la industria, e incluso esenciales para los seres humanos y animales (Çetinkaya Dönmez et al., 1999) (Ghosh & Saha, 2013). Sin embargo, debido a diferentes actividades industriales se ha incrementado la llegada de estos a las fuentes hídricas a causa de actividades mineras, erosión, combustión y descargas urbanas e industriales (Niane et al., 2019); está comprobado que altas concentraciones de estos tienen impactos negativos para el medio ambiente y la salud humana, su consumo conduce a irritaciones en mucosas, daños capilares, daños renales, hepáticos y gastrointestinales e incluso graves afectaciones al sistema nervioso central (Ghosh & Saha, 2013) (Niane et al., 2019) (Yao et al., 2010).

Para la eliminación de metales pesados se han utilizado diferentes procesos de tratamiento como la precipitación, intercambio iónico, oxidación, entre otras técnicas cuya aplicación se ha limitado debido a carencias económicas o técnicas (Şahan et al., 2010). De allí surge la necesidad de buscar nuevas tecnologías que sean efectivas y de viable implementación, como la utilización de microorganismos para la degradación de estos contaminantes; bacterias, hongos, etc. que se han adaptado al estrés y han desarrollado la capacidad de remediación de ecosistemas afectados por estos metales pesados (Ghosh & Saha, 2013) (Şahan et al., 2010).

La biodegradación de estas sustancias es de gran interés ambiental, pues se busca satisfacer la necesidad creciente de disminuir el impacto de estas afectaciones mediante la restauración de la calidad de estos ecosistemas. De acuerdo con lo anterior, estudios recientes revelan el creciente aprovechamiento de las características metabólicas de *Stenotrophomonas maltophilia*, una bacteria poseedora de una gran variedad de proteínas y enzimas extracelulares debido a la presencia de mecanismos y/o genes inherentes y adquiridos que son los principales responsables de su alta capacidad de adaptación y supervivencia en diferentes hostiles (Adegoké et al., 2011) (Alfonso-Gordillo et al., 2016) (Raman et al., 2017), por lo que ha mostrado habilidad para adsorber y transformar con efectividad metales pesados, hidrocarburos, insecticidas, herbicidas, entre otros contaminantes, adicionalmente por el buen desempeño que ha mostrado en la producción de biosurfactantes y lipasas (J. Gao et al., 2014) (Hemlata et al., 2015).

(Wang et al., 2015) (Zang et al., 2016) (Parapouli et al., 2018); por lo cual el aprovechamiento de las cualidades de esta podría establecerse como una solución significativamente viable para mitigar el efecto negativo de estas sustancias sobre los ecosistemas.

Un factor a tener en cuenta es que la accesibilidad a la versatilidad e inmensa utilidad propias de la bacteria se ve limitada por la facilidad de contaminación con productos tóxicos de la misma bacteria y su implicación en infecciones resistentes a múltiples fármacos que amenazan la salud (Adegoke et al., 2011).

Dentro de la investigación sobre la biorremoción de hidrocarburos y metales pesados como contaminantes en ecosistemas hay una amplia variedad de estudios realizados por separado, pero es poco el énfasis que se ha hecho sobre la coexistencia de estos. De hecho, los seres vivos y el medio ambiente están expuestos de forma simultánea a una variedad enorme de contaminantes, por lo tanto las investigaciones que involucran a los contaminantes individualmente no son tan específicas para reflejar los efectos de la contaminación combinada en el medio ambiente (Ziagova et al., 2007) (Z. Chen et al., 2008). Debido a lo anterior, recientemente algunos pocos estudios han demostrado que *S. maltophilia* es muy hábil para la biodegradación de BaP y la biosorción de metales pesados como el cobre cuando estos coexisten en un ecosistema (S. Chen et al., 2016).

Con el propósito de analizar cómo ha aumentado en los últimos años la utilización de *S. maltophilia* en investigaciones relacionadas a la

biorremediación de ecosistemas contaminados con estas sustancias el objetivo de este estudio fue realizar una revisión sistemática de todos los estudios relevantes relacionados al tema, identificar los cambios evidenciados en los estudios a lo largo del tiempo y realizar un meta-análisis.

1. METODOLOGÍA

Esta revisión sistemática se realizó de acuerdo con los parámetros establecidos en la declaración de elementos de notificación preferidos para revisiones sistemáticas y metaanálisis (PRISMA). Se realizaron búsquedas en bases de datos como ScienceDirect, Springer, Google Scholar, Scielo y Pubmed a partir de la pregunta “¿Cuál es la actividad metabólica de *Stenotrophomonas maltophilia* para la biodegradación de sustancias contaminantes de ecosistemas acuáticos y terrestres?”, posteriormente se seleccionaron para su revisión publicaciones relacionadas con la bacteria en mención y su comportamiento en diferentes investigaciones relacionadas a la biorremediación. Adicionalmente durante esta revisión, se identificaron otras publicaciones que allí fueron tenidas en cuenta y se tomaron también como material para analizar debido al análisis que estas realizan a la actividad metabólica de *S. maltophilia*.

1.1. Criterios de inclusión

Elegibilidad: Se tuvieron en cuenta estudios publicados entre los años 1990 y 2021, en cualquier idioma y donde se aborde el potencial de biodegradación de *S.*

maltophilia frente a diferentes contaminantes, posteriormente se clasificaron en dos periodos de tiempo, el primer grupo de publicaciones realizadas entre los años 1990 y 2005, y el segundo en publicaciones realizadas del año 2006 hasta el 2021.

Palabras Clave: Búsqueda en las bases de datos con diferentes palabras clave como “*Stenotrophomonas maltophilia*”, “biorremediación”, “contaminación de suelos”, “contaminación de aguas”, “biodegradación”, “contaminación por hidrocarburos”, “degradación enzimática”, “metales pesados”.

Idioma y tipo de publicaciones: Artículos de revisión, artículos de investigación, reportes de casos publicados en inglés y en español.

Criterios de exclusión

Selección de estudios: Se realizó un filtro de las publicaciones con el objetivo de excluir:

- Publicaciones realizadas antes del año 1990.
- Publicaciones donde *S. maltophilia* fue

utilizada para otros fines diferentes a biorremediación.

-Publicaciones donde se utilizó a *S. maltophilia* y otros consorcios microbianos sin llegar a una biodegradación efectiva.

-Publicaciones donde los compuestos contaminantes degradados sean diferentes a hidrocarburos y metales pesados, como insecticidas y otros.

2. RESULTADOS

La búsqueda en la literatura científica, según los criterios establecidos inicialmente, dio un resultado preliminar de 100 artículos publicados a partir del año 1990, donde un 21% se clasificó en el primer periodo de tiempo y el 79% restante fue clasificado en el segundo periodo. Tras la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión dispuestos previamente, se llegó a seleccionar un total de 5 publicaciones realizadas entre 1990 y 2005 (Ver Fig. 1.), mientras que para el segundo periodo de tiempo entre 2006 y 2021, se seleccionaron 13 publicaciones incluidas en el metaanálisis (Ver Fig. 2.).

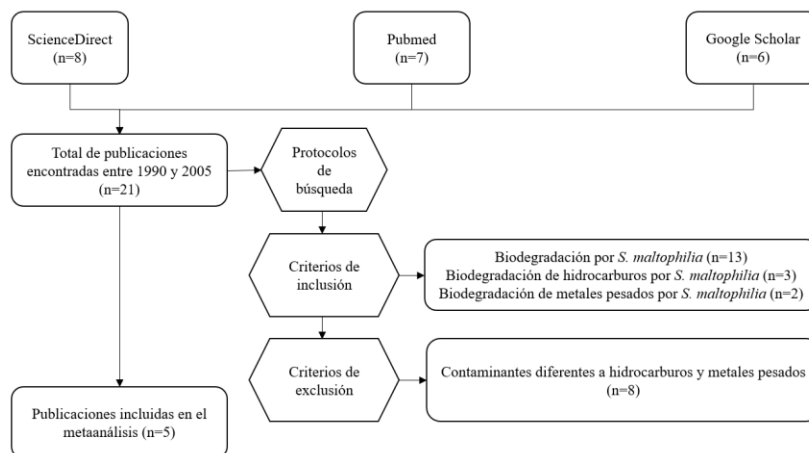


Figura 1. Esquema del protocolo de selección de publicaciones encontradas entre 1990 y 2005

Figure 1. Scheme of the protocol for selecting publications found between 1990 and 2005
Fuente: elaboración propia

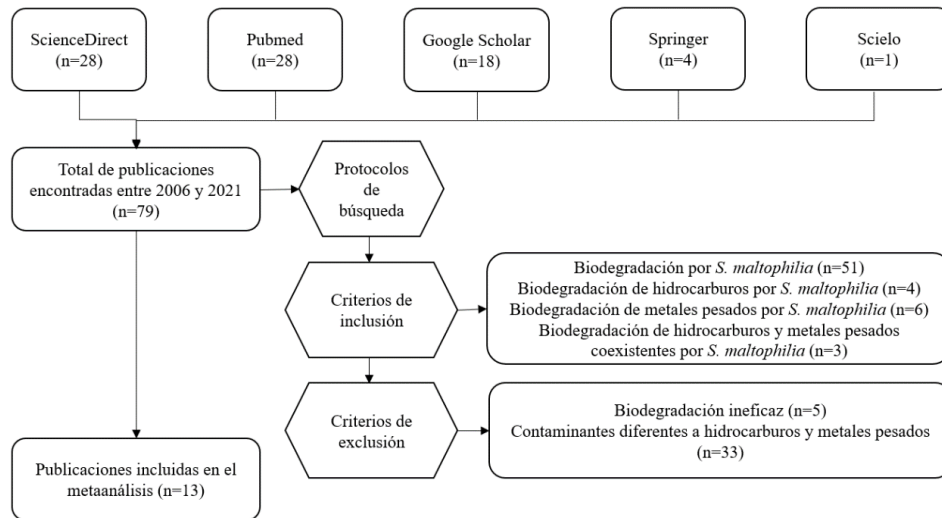


Figura 2. Esquema del protocolo de selección de publicaciones encontradas entre 2006 y 2021
Figure 1. Scheme of the protocol for selecting publications found between 2006 and 2021
Fuente: elaboración propia

DISCUSIÓN

En general, los resultados de este metaanálisis mostraron un notable avance en la comprensión de los mecanismos utilizados por *S. maltophilia* para la degradación y/o transformación de hidrocarburos y metales pesados, pues los estudios seleccionados en el primer periodo de tiempo en su mayoría concluyeron en la necesidad de realizar estudios a profundidad en el futuro con tecnologías más avanzadas a su época para comprender de mejor manera los procesos evidenciados en ese entonces. Por el contrario, los estudios seleccionados en el segundo periodo de tiempo, especialmente posteriores al año 2010 mostraron una descripción más detallada de los mecanismos evidenciados en los resultados de sus experimentos.

Antes del año 2000, *S. maltophilia* se

utilizaba en investigaciones aislada e identificada en sitios contaminados, utilizando como fuente de carbono compuestos antropogénicos, dándose por hecho que esta podía degradar hidrocarburos y sugiriéndose la utilización de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) para el monitoreo de bacterias utilizadas en biorremediación en derrames de petróleo y otros sitios contaminados con hidrocarburos (Wilson et al., 1999).

Anteriormente, desde la década de 1970s, investigaciones demostraban actividad de algunos microorganismos para remediar suelos contaminados con HAP de bajo peso molecular, pero para el año 2000 se informó del reciente aislamiento de algunas pocas bacterias, entre ellas *S. maltophilia* capaces de utilizar hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) de alto peso molecular

como el benzo(a)pireno (BaP) como única fuente de carbono y energía, esta poca actividad microbiana contra estas sustancias se atribuía principalmente a factores ambientales. Sin embargo, no se aseguraba pues se concluyó que se requería una mayor comprensión de los procesos involucrados que limitaban la degradación de HAP de alto peso molecular, entre ellos las vías enzimáticas y metabólicas y además que era esencial conocer el hábitat natural de estos microorganismos antes de establecer planes de biorremediación a gran escala (Juhász & Naidu, 2000) (Samanta et al., 2002).

En ese entonces también se identificó a *S. maltophilia* haciendo parte de las comunidades bacterianas de suelos contaminados con metales pesados durante la investigación de las interacciones entre exudados de raíces y la microflora del suelo en la biorremediación con plantas de sitios contaminados y en investigaciones sobre la posible participación de microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con arsénico, llegando nuevamente a la conclusión de que eran necesarios estudios más precisos para evaluar su papel en la fitorremediación de estos suelos (Kozdrój & Van Elsas, 2000) (Köhler et al., 2001).

En la siguiente década, para el año 2013 se realizó una de las pocas investigaciones que estudia la biodegradación de hidrocarburos y metales pesados coexistentes por *S. maltophilia*, la cual, en presencia de iones de cobre fue capaz de lograr una alta eficacia en la biodegradación de BaP a una temperatura y pH determinados, descubriéndose mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas el mecanismo de eliminación del BaP, que

consistió en la secreción de una nueva enzima por parte de *S. maltophilia* inducida por la presencia de una concentración determinada de iones de cobre (S. Chen et al., 2013). Además, ese mismo año se lograron identificar los metabolitos producidos en la biodegradación de fenantreno por *S. maltophilia*, y se descubrió que este proceso ocurría mediante reacciones de dioxigenación (S. Gao et al., 2013). En este punto es evidente el impacto del avance tecnológico de una década, el cual permitió dilucidar de forma significativamente profunda un mecanismo de biodegradación que en anteriores investigaciones no pudo ser definido debido a las ya mencionadas diversas limitaciones técnicas.

Con respecto a los metales pesados, se investigó la biorremediación de cobre por parte de *S. maltophilia* utilizándose la metodología de superficie de respuesta para determinar los parámetros óptimos del proceso, encontrándose un pH, concentración, tiempo de contacto para lograr un índice prácticamente total de remoción del metal (Ghosh & Saha, 2013). Además, se estudió la remoción de cromo en efluentes de curtiembres mediante técnicas básicas como la concentración mínima inhibitoria (CMI), y mediante espectroscopía de absorción atómica se confirmó que *S. maltophilia* logró removerlo con éxito sin cambios intracelulares (Raman et al., 2017), reafirmando estudios anteriores y promoviendo a la bacteria como un agente prometedor para la eliminación de metales pesados de soluciones acuosas. Recientemente, en el año 2020 se analizó la eficiencia de la eliminación de cadmio de cultivos de arroz aprovechando las características de *S. maltophilia*, la cual,

entre varias bacterias mostró los mayores niveles de eficiencia, indicando que la inoculación de esta proporciona un punto de partida para aliviar la contaminación de cultivos por metales pesados (Zhou et al., 2020) (Yasir et al., 2021).

En el año 2021, se desarrolló un método de biorremediación simple, económico y efectivo para eliminar la contaminación de aguas por mercurio, donde *S. maltophilia* y otras dos cepas bacterianas fueron utilizadas para tal fin, evidenciando que esta efectividad era debida principalmente a la actividad del operón *mer*, y no únicamente frente al mercurio, sino que también mostraron efectividad frente al plomo, cromo, arsénico y cadmio, revelando un nuevo método para la biorremediación de aguas contaminadas con estos metales (Zhao et al., 2021) (Tripathi et al., 2021).

En los últimos años se retomó la investigación sobre la biodegradación de hidrocarburos y metales pesados coexistentes utilizando citometría de flujo para observar los cambios de actividad, estructura y permeabilidad de la célula, hallando que la presencia de estos contaminantes afectó la permeabilidad de la membrana celular y afectó su morfología, aun así manteniendo su estructura celular, además, que la actividad de la esterasa intracelular no se inhibió en ningún momento permitiendo a la célula descomponer/transformar dichos contaminantes (S. Chen et al., 2014) (S. Chen et al., 2017).

Dentro de los estudios que muestran directamente las utilidades agrícolas que puede proporcionar la biodegradación de hidrocarburos por *S. maltophilia* se encuentra una investigación publicada en el

año 2020 donde se evidenció que esta utilizó con éxito varios hidrocarburos como fuente de carbono reduciendo su toxicidad, esto validado mediante la capacidad que tuvo este proceso para promover el crecimiento de canola (*Brassica napus*) cultivada en suelos que previamente estuvieron contaminados con hidrocarburos, evidenciándose el éxito a través del aumento del contenido de clorofila, carbohidratos, proteínas y aminoácidos en las plantas (Bashandy et al., 2020).

En la búsqueda de comprender más a fondo las bases genéticas de la actividad metabólica de *S. maltophilia* en los procesos de biodegradación, en el año 2021 se halló que un consorcio bacteriano aislado de suelo contaminado que la incluía, logró la degradación completa de cinco HAPs, donde esta cepa tuvo una muy destacada efectividad, a partir de esto, análisis moleculares demostraron que este proceso se debía a la expresión de un gen de dioxigenasa hidroxilante de anillo PAH (PAH-RHD α), codificante del primer paso en la vía de biodegradación (Lara-Moreno et al., 2021).

Actualmente, teniendo en cuenta la rapidez con la que ha evolucionado la industria, ha surgido la necesidad de remediar eficazmente los efluentes generados por la industria de energía nuclear, pues tienen altas concentraciones de metales pesados como el uranio. Una investigación reciente que emplea tecnología de última generación estudió la inmovilización de biomasa de una cepa de *S. maltophilia* en perlas de alginato biocompatibles y altamente porosas con el objetivo de superar las difíciles condiciones ambientales a las que se exponen las células, aplicando este biomaterial a aguas

de minería logrando una alta efectividad en la inmovilización y eliminación de este metal pesado (Sánchez-Castro et al., 2021). Estudios como este último, que proponen nuevas estrategias sacando provecho de los avances tecnológicos de nuestra época son los que proporcionan nuevos conocimientos sobre los parámetros que realmente intervienen en un proceso de biorremediación de alta complejidad y eficiencia abriendo la puerta a la implementación a gran escala de estos procesos que tienen ventajas especialmente de nivel económico en el desarrollo de métodos a escala real cuya prioridad sea el representar un beneficio para la salud humana, animal y del medio ambiente.

3. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta todas las publicaciones incluidas en los dos periodos de tiempo establecidos inicialmente, se evidencia a lo largo de los años un notable aumento en la cantidad de estudios publicados referentes al tema, especialmente en la última década, donde la preocupante situación ambiental y la creciente importancia del aprovechamiento de los microorganismos han abierto puertas a seguir investigando con el objetivo de estudiar a profundidad las características metabólicas que desde años atrás le han otorgado a *S. maltophilia* una gran importancia en el campo de la biorremediación de hidrocarburos y metales pesados.

Los estudios seleccionados en el primer periodo de tiempo (1990-2005) sentaron las bases fundamentales para la importancia que hoy en día tiene *S. maltophilia* en este ámbito. Sin embargo, es innegable que, al encontrarse con tantas limitaciones

técnicas, económicas y de diversa índole, estos dejaron un sinfín de interrogantes que afortunadamente se resolverían con el tiempo. Y así, los estudios seleccionados en el segundo periodo de tiempo (2006-2021), fundamentalmente los de los últimos años lograron describir con mucha mayor profundidad los mecanismos implicados en los procesos realizados por *S. maltophilia* frente a los contaminantes, evidentemente esto debido a las inmensas facilidades y avances tecnológicos que han surgido en el presente siglo en cuanto a técnicas analíticas respecta, lo que nos sugiere que en un futuro no muy lejano la comprensión de estos mecanismos permitirá la aplicación de estos procesos a escala real en todo el mundo en busca de satisfacer la necesidad de frenar y tratar de revertir el daño que las actividades antropogénicas le han causado a la propia salud humana, a los animales y al medio ambiente.

REFERENCIAS

- [1]. AbuBakr, S. M., Davidova, I. A., & Duncan, K. E. (2015). Test of Polyaromatic Hydrocarbon Degradation by Nitrate-reducing Microorganisms Isolated from Tallgrass Prairie Soils. *Proceedings of the Oklahoma Academy of Science*, 95, 161–180. <https://ojs.library.okstate.edu/osu/index.php/OAS/article/view/6888>
- [2]. Adegoke, A., Tom, M., & Okoh, A. (2011). *Stenotrophomonas maltophilia*, A Commensal of Importance to Biotechnology. *JOURNAL OF PURE AND APPLIED*

- MICROBIOLOGY.
https://www.researchgate.net/publication/257988886_Stenotrophomonas_maltophilia_A_Commensal_of_Importance_to_Biotechnology
- [3]. Alfonso-Gordillo, G., Cristiani-Urbina, E., Flores-Ortiz, C. M., Peralta, H., Cancino-Díaz, J. C., Cruz-Maya, J. A., & Jan-Roblero, J. (2016). *Stenotrophomonas maltophilia* isolated from gasoline-contaminated soil is capable of degrading methyl tert-butyl ether. *Electronic Journal of Biotechnology*, 23, 12–20. <https://doi.org/10.1016/J.EJBT.2016.06.006>
- [4]. Bashandy, S. R., Abd-Alla, M. H., & Dawood, M. F. A. (2020). Alleviation of the toxicity of oily wastewater to canola plants by the N₂-fixing, aromatic hydrocarbon biodegrading bacterium *Stenotrophomonas maltophilia*-SR1. *Applied Soil Ecology*, 154, 103654. <https://doi.org/10.1016/J.APSSOIL.2020.103654>
- [5]. Çetinkaya Dönmez, G., Aksu, Z., Öztürk, A., & Kutsal, T. (1999). A comparative study on heavy metal biosorption characteristics of some algae. *Process Biochemistry*, 34(9), 885–892. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00005-9)
- [6]. Chen, S., Yin, H., Chang, J., Peng, H., & Dang, Z. (2017). Physiology and bioprocess of single cell of *Stenotrophomonas maltophilia* in bioremediation of co-existed benzo[a]pyrene and copper. *Journal of Hazardous Materials*, 321, 9–17. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2016.09.002>
- [7]. Chen, S., Yin, H., Tang, S., Peng, H., Liu, Z., & Dang, Z. (2016). Metabolic biotransformation of copper-benzo[a]pyrene combined pollutant on the cellular interface of *Stenotrophomonas maltophilia*. *Bioresource Technology*, 204, 26–31. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.12.068>
- [8]. Chen, S., Yin, H., Ye, J., Peng, H., Liu, Z., Dang, Z., & Chang, J. (2014). Influence of co-existed benzo[a]pyrene and copper on the cellular characteristics of *Stenotrophomonas maltophilia* during biodegradation and transformation. *Bioresource Technology*, 158, 181–187. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.02.020>
- [9]. Chen, S., Yin, H., Ye, J., Peng, H., Zhang, N., & He, B. (2013). Effect of copper(II) on biodegradation of benzo[a]pyrene by *Stenotrophomonas maltophilia*. *Chemosphere*, 90(6), 1811–1820. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2012.09.009>
- [10]. Chen, Z., Ma, W., & Han, M. (2008). Biosorption of nickel and copper onto treated alga (*Undaria pinnatifida*): Application of isotherm and kinetic models. *Journal of Hazardous Materials*, 155(1–2), 327–333. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2007.11.064>
- [11]. Gao, J., Ye, J., Ma, J., Tang, L., & Huang, J. (2014). Biosorption and biodegradation of triphenyltin

- by *Stenotrophomonas maltophilia* and their influence on cellular metabolism. *Journal of Hazardous Materials*, 276, 112–119. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMA T.2014.05.023>
- [12]. Gao, S., Seo, J. S., Wang, J., Keum, Y. S., Li, J., & Li, Q. X. (2013). Multiple degradation pathways of phenanthrene by *Stenotrophomonas maltophilia* C6. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 79, 98–104. <https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2013.01.012>
- [13]. Ghosh, A., & Saha, P. Das. (2013). Optimization of copper bioremediation by *Stenotrophomonas maltophilia* PD2. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(3), 159–163. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2013.04.012>
- [14]. Hemlata, B., Selvin, J., & Tukaram, K. (2015). Optimization of iron chelating biosurfactant production by *Stenotrophomonas maltophilia* NBS-11. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 4(2), 135–143. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2015.02.002>
- [15]. Imam, A., Suman, S. K., Ghosh, D., & Kanaujia, P. K. (2019). Analytical approaches used in monitoring the bioremediation of hydrocarbons in petroleum-contaminated soil and sludge. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 118, 50–64. <https://doi.org/10.1016/J.TRAC.2019.05.023>
- [16]. Juhasz, A. L., & Naidu, R. (2000). Bioremediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons: a review of the microbial degradation of benzo[a]pyrene. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 45(1–2), 57–88. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(00\)00052-4](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00052-4)
- [17]. Köhler, M., Hofmann, K., Völsgen, F., Thurow, K., & Koch, A. (2001). Bacterial release of arsenic ions and organoarsenic compounds from soil contaminated by chemical warfare agents. *Chemosphere*, 42(4), 425–429. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00060-6)
- [18]. Kozdrój, J., & Van Elsas, J. D. (2000). Response of the bacterial community to root exudates in soil polluted with heavy metals assessed by molecular and cultural approaches. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(10), 1405–1417. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00058-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00058-4)
- [19]. Lara-Moreno, A., Morillo, E., Merchán, F., & Villaverde, J. (2021). A comprehensive feasibility study of effectiveness and environmental impact of PAH bioremediation using an indigenous microbial degrader consortium and a novel strain *Stenotrophomonas maltophilia* CPHE1 isolated from an industrial polluted soil. *Journal of Environmental Management*, 289, 112512. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMA N.2021.112512>
- [20]. Niane, B., Devarajan, N., Poté, J., & Moritz, R. (2019). Quantification and characterization

- of mercury resistant bacteria in sediments contaminated by artisanal small-scale gold mining activities, Kedougou region, Senegal. *Journal of Geochemical Exploration*, 205, 106353. <https://doi.org/10.1016/J.GEXPLO.2019.106353>
- [21]. Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., Gallo, J. A., Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- [22]. Parapouli, M., Foukis, A., Panagiota-Yiolanda, S., Koukouritaki, M., Magklaras, P., Gkini, O., Papamichael, E., Afendra, A., & Hatziloukas, E. (2018). Molecular, biochemical and kinetic analysis of a novel, thermostable lipase (LipSm) from *Stenotrophomonas maltophilia* Psi-1, the first member of a new bacterial lipase family (XVIII). *Journal of Biological Research (Thessalonike, Greece)*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/S40709-018-0074-6>
- [23]. Raman, N., Asokan, S., Shobana Sundari, N., & Ramasamy, S. (2017). Bioremediation of chromium(VI) by *Stenotrophomonas maltophilia* isolated from tannery effluent. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2017 15:1, 15(1), 207–216. <https://doi.org/10.1007/S13762-017-1378-Z>
- [24]. Şahan, T., Ceylan, H., Şahiner, N., & Aktaş, N. (2010). Optimization of removal conditions of copper ions from aqueous solutions by *Trametes versicolor*. *Bioresource Technology*, 101(12), 4520–4526. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.01.105>
- [25]. Samanta, S. K., Singh, O. V., & Jain, R. K. (2002). Polycyclic aromatic hydrocarbons: environmental pollution and bioremediation. *Trends in Biotechnology*, 20(6), 243–248. [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(02\)01943-1](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(02)01943-1)
- [26]. Sánchez-Castro, I., Martínez-Rodríguez, P., Abad, M. M., Descostes, M., & Merroun, M. L. (2021). Uranium removal from complex mining waters by alginate beads doped with cells of *Stenotrophomonas* sp. Br8: Novel perspectives for metal bioremediation. *Journal of Environmental Management*, 296, 113411. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMA.2021.113411>
- [27]. Tripathi, S., Sharma, P., Purchase, D., Tiwari, M., Chakrabarty, D., & Chandra, R. (2021). Biodegradation of organo-metallic pollutants in distillery wastewater employing a bioaugmentation process. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101774. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101774>
- [28]. Velásquez, J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas

- por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 151–167. <https://doi.org/10.22490/21456453.1846>
- [29]. Wang, Y. S., Zheng, X. C., Hu, Q. W., & Zheng, Y. G. (2015). Degradation of abamectin by newly isolated *Stenotrophomonas maltophilia* ZJB-14120 and characterization of its abamectin-tolerance mechanism. *Research in Microbiology*, 166(5), 408–418. <https://doi.org/10.1016/J.RESMIC.2015.04.002>
- [30]. Wilson, V. L., Tatford, B. C., Yin, X., Rajki, S. C., Walsh, M. M., & Larock, P. (1999). Species-specific detection of hydrocarbon-utilizing bacteria. *Journal of Microbiological Methods*, 39(1), 59–78. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(99\)00098-6](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(99)00098-6)
- [31]. Yao, Z. Y., Qi, J. H., & Wang, L. H. (2010). Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on the biosorption of Cu(II) onto chestnut shell. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1–3), 137–143. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2009.09.027>
- [32]. Yasir, M. W., Capozzi, S. L., Kjellerup, B. V., Mahmood, S., Mahmood, T., & Khalid, A. (2021). Simultaneous biotreatment of hexavalent chromium Cr(VI) and polychlorinated biphenyls (PCBs) by indigenous bacteria of Co-polluted wastewater. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 161, 105249. <https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2021.105249>
- [33]. Zang, H., Yu, Q., Lv, T., Cheng, Y., Feng, L., Cheng, X., & Li, C. (2016). Insights into the degradation of chlorimuron-ethyl by *Stenotrophomonas maltophilia* D310-3. *Chemosphere*, 144, 176–184. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2015.08.073>
- [34]. Zhao, M. M., Kou, J. bin, Chen, Y. ping, Xue, L. gui, Fan, T. T., & Wang, S. mei. (2021). Bioremediation of wastewater containing mercury using three newly isolated bacterial strains. *Journal of Cleaner Production*, 299, 126869. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126869>
- [35]. Zhou, J., Li, P., Meng, D., Gu, Y., Zheng, Z., Yin, H., Zhou, Q., & Li, J. (2020). Isolation, characterization and inoculation of Cd tolerant rice endophytes and their impacts on rice under Cd contaminated environment. *Environmental Pollution*, 260, 113990. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.113990>
- [36]. Ziagova, M., Dimitriadis, G., Aslanidou, D., Papaioannou, X., Litopoulou Tzannetaki, E., & Liakopoulou-Kyriakides, M. (2007). Comparative study of Cd(II) and Cr(VI) biosorption on *Staphylococcus xylosus* and *Pseudomonas* sp. in single and binary mixtures. *Bioresource Technology*, 98(15), 2859–2865. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTE>

CH.2006.09.043