



## Aplicaciones de *Klebsiella variicola* y uso potencial en la producción agrícola

Ana María Pancho-Márquez\*<sup>1</sup> , Jesús Muñoz-Rojas\*<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Licenciatura en Biotecnología, Facultad de Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio, Ciudad Universitaria, C. P. 72592, Colonia Jardines de San Manuel, Puebla, Puebla, México. <sup>2</sup>Grupo “Ecology and Survival of Microorganisms”, Laboratorio de Ecología Molecular Microbiana, Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

Email de autores para correspondencia: \*[ana.panchomarquez@viep.com.mx](mailto:ana.panchomarquez@viep.com.mx)  
\*\*[joymerre@yahoo.com.mx](mailto:joymerre@yahoo.com.mx)

**Recibido:** 24 noviembre 2022. **Aceptado:** 25 abril 2023

### RESUMEN

Las actividades humanas sobre el medio ambiente han sido el principal motor del cambio climático, debido a la quema de combustibles fósiles que producen gases de efecto invernadero que atrapan el calor en la atmósfera de la tierra con efectos directos a la diversidad biológica. Además, la contaminación con metales y efluentes industriales no tratados en los suelos, pone en peligro a los seres humanos y a la biosfera al reducir el rendimiento agrícola y afectar negativamente la salud del ecosistema. En este contexto, las bacterias promotoras del crecimiento vegetal cumplen funciones específicas en procesos biogeoquímicos, interactúan con las plantas promoviendo su crecimiento, establecen protección contra fitopatógenos, aumentan la disponibilidad de nutrientes, el nivel de fertilidad del suelo y se han introducido ampliamente en las plantas para mejorar la productividad agrícola o la eficiencia de la fitorremediación de suelos contaminados. Entre estas especies, se destaca el género *Klebsiella*, principalmente *K. variicola*, una bacteria que es capaz de colonizar diferentes hospederos, fijar nitrógeno en la rizósfera del suelo, incrementar el desarrollo de las plantas y puede remover algunos contaminantes; debido a esto, puede considerarse como una bacteria con potencial biotecnológico. En esta revisión se compiló literatura científica producida sobre las aplicaciones de *K. variicola* en la producción de fuentes de energía renovable, como agente activo o en consorcio para la biorremediación y la producción agrícola en diferentes cultivos.

**Palabras clave:** Biocombustible; biorremediación; contaminante; biofertilizante; *Klebsiella variicola*.

## ABSTRACT

Human activities on the environment have been the main driver of climate change, due to the burning of fossil fuels that produce greenhouse gases that trap heat in the earth's atmosphere with direct effects on biological diversity. Besides, contamination with metals and untreated industrial effluents in soils endangers humans and the biosphere by reducing agricultural yields and negatively affecting ecosystem health. In this context, plant growth promoting bacteria, fulfil specific functions in biogeochemical processes, interact with plants promoting their growth, establish protection against phytopathogens, increase nutrients availability, soil fertility level and have been widely introduced in plants to improve agricultural productivity or the efficiency of phytoremediation of contaminated soils. Among these species, the genus *Klebsiella* stands out, mainly *K. variicola*, a bacterium capable of colonizing different hosts, perform nitrogen fixation in the rhizosphere soil, increasing the development of plants and this bacterium can remove some pollutants; due to this, it can be considered as a bacterium with technological potential. In this review compile scientific literature produced on the applications of *K. variicola* in the production of renewable energy sources, as an active agent or in a consortium for bioremediation and agricultural production in different crops.

**Keywords:** biofuel; bioremediation; pollutant; biofertilizer; *Klebsiella variicola*.

## INTRODUCCIÓN

La especie *Klebsiella variicola* fue aislada y descrita por investigadores mexicanos comparando diferentes aislados clínicos y de plantas relacionados a *Klebsiella pneumoniae*; utilizando pruebas bioquímicas, técnicas moleculares y análisis filogenéticos [1]. *K. variicola* es un bacilo Gram-negativo, anaerobio facultativo, no móvil, de colonias circulares, convexas y lisas con márgenes enteros en medios sólidos con alto contenido de azúcar [2], puede crecer en el rango de pH 5.6 a 7 y temperatura entre 11 y 41 °C [1].

Debido a que *K. variicola*, *K. pneumoniae* y *K. quasipneumoniae* son difíciles de diferenciar

fenotípicamente, se han realizado estudios para identificar genomas mal clasificados en el GenBank y protocolos para su correcta identificación [3–5]. *K. variicola* se ha aislado principalmente de muestras humanas, seguido de plantas, animales, medio ambiente e insectos, la figura 1 muestra diversos aislados de *K. variicola* obtenidos de diferentes regiones del mundo, siendo México, el país que aportó la mayor cantidad de aislamientos obtenidos de plantas [6,7].

Las bacterias que colonizan eficientemente la rizósfera y estimulan el crecimiento de las plantas a través de mecanismos directos o indirectos se conocen como rizobacterias

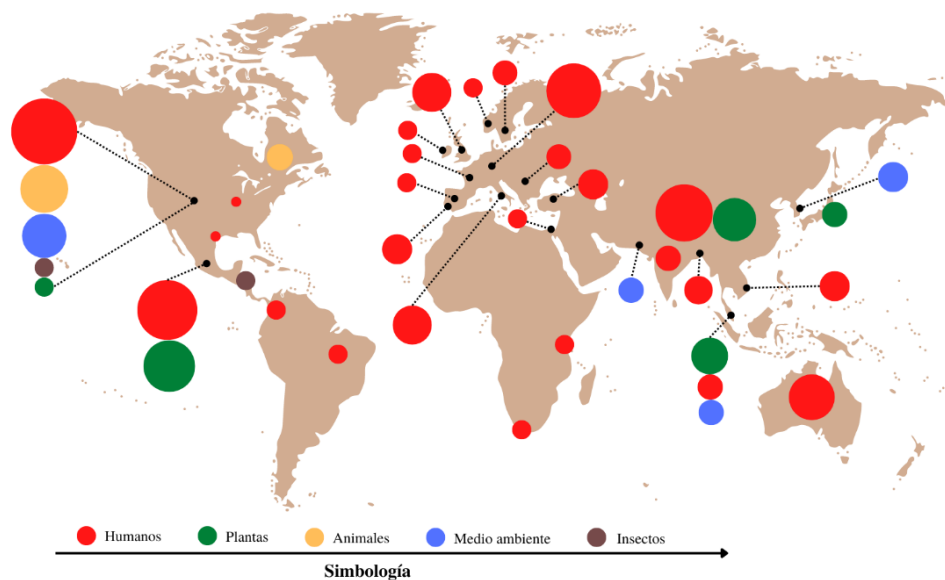


promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR). *K. variicola* juega un rol importante en la fijación de nitrógeno (N<sub>2</sub>), puede convertir fosfato (P) insoluble en formas solubles a través de la secreción de enzimas y ácidos orgánicos, mejorando así la disponibilidad de fósforo en la rizósfera bajo estrés metálico, y se han realizado esfuerzos para reportar genes que contribuyan a la actividad beneficiosa de PGPR, especialmente la tolerancia a la salinidad [8]. También promete mitigar el estrés por inundación y promover el crecimiento de plantas de soja, jitomate y maíz, cultivos de importancia a nivel mundial [9–11], por consiguiente, se ha notado su potencial biotecnológico en diferentes áreas. No obstante, se ha registrado que *K. variicola* causa infecciones en humanos y animales y se ha encontrado que es un reservorio de genes de resistencia a los antibióticos [5,12,13].

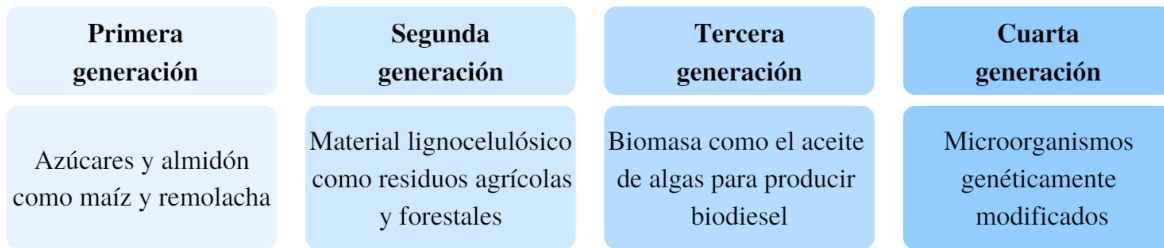
### Producción de biocombustibles

Los efectos del cambio climático en todo el mundo debido a los gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), producido principalmente por el sector transporte [EPA, 2022], así mismo las reservas limitadas de petróleo, han redundado en numerosos acuerdos y compromisos para contemplar la incorporación de energías renovables, es así que surgen los biocombustibles como posibles sustitutos de los combustibles fósiles.

La producción de biocombustibles tanto biodiesel como bioetanol a partir de diferentes fuentes como cultivos alimenticios, residuos, biomasa y microorganismos ha llevado a establecer una clasificación de acuerdo con el insumo de donde proviene y la tecnología empleada para producirlos (Figura 2).



**Figura 1.** Localización de aislados de *K. variicola*. El origen de los aislados se muestra en códigos de colores y el tamaño de los marcadores representa la cantidad de aislamientos descritos.



**Figura 2.** Generación de biocombustibles por tipo de insumos.

Los sistemas de producción de primera generación tienen considerables limitaciones económicas, ambientales y controversiales por la competencia con la producción de alimentos que puede radicar en el aumento global de la crisis alimentaria, mientras que los biocombustibles de segunda generación, aunque no compiten con la producción de alimentos, la biomasa lignocelulósica requiere pretratamiento, lo que incrementa los costos de producción [14]. Por lo tanto, los biocombustibles de tercera generación se consideran un recurso viable que carece de los principales inconvenientes asociados con los biocombustibles de primera y segunda generación, asimismo los desechos como materia prima han atrapado el interés de la comunidad científica para desarrollar tecnologías eficientes y económicamente viables. En cuanto a los biocombustibles de cuarta generación, se utilizan como fuentes microorganismos modificados genéticamente para aumentar la ingesta de CO<sub>2</sub> y a través de la fotosíntesis producir combustible [15,16].

Por ejemplo, durante la producción de biodiesel se obtiene aproximadamente 10% de glicerol crudo como subproducto [14,17] que puede ser utilizado como fuente de carbono para la

producción de productos de valor agregado a través de un proceso de fermentación utilizando microorganismos. De acuerdo a lo reportado por Rahman *et al.*, 2017 la cepa mutada *K. variicola* SW3 en cultivo de fed-batch, que se distingue por la introducción de nutrientes de forma sucesiva durante el cultivo hasta alcanzar un volumen final, puede producir 82.5 g/L o 64.93 g/L de 2,3-butanodiol utilizando glicerol puro o glicerol crudo respectivamente.

En otro estudio, a partir de muestras de suelo de Tsukuba, Japón, se logró aislar la cepa *K. variicola* TB-83D, microorganismo asimilador de glicerol y productor de etanol a pH alcalino [19]. Posteriores trabajos han examinado el efecto de la fuente de nutrientes orgánicos para el reemplazo del extracto de levadura por el licor de maíz fermentado, que contiene altas concentraciones de vitaminas, aminoácidos, minerales y proteínas a un bajo costo comparado con el extracto de levadura, no obstante, la combinación de ambos nutrientes radica en el incremento de la producción de etanol (34g/L) utilizando la cepa de *K. variicola* TB-83D mutada [20]. Asimismo, se ha investigado el uso del subproducto de la fermentación de metano (MFDS), ya que contiene potasio, nitrógeno, fósforo y minerales

como fuente de nutrientes, permitiendo a *K. variicola* TB-83D producir 14.6 g/L de etanol a partir de glicerol crudo [21].

### **Biorremediación de plomo, colorante RR198 y atrazina**

El desarrollo industrial, la ineficiente disposición de desechos, entre otros, incrementan los niveles de contaminación en el suelo, aire y agua. Uno de los mayores contaminantes son los metales pesados, entre estos el plomo (Pb), el cual puede ser liberado al medioambiente por actividades mineras e industriales, pintura, cerámica, materiales de plomería y soldaduras [EPA, 2022]. Debido a que el Pb es altamente persistente, se acumula en altas concentraciones en el suelo lo que afecta la actividad microbiana, productividad y rendimiento de éste, asimismo presenta una amenaza a la salud humana, animal y calidad ambiental [22,23].

Análisis en laboratorio han demostrado a *K. variicola* VITMVCJ1 como una cepa resistente y con el potencial de remediar suelos contaminados con este elemento. Además, se ha descrito que esta misma cepa puede disminuir la pérdida de microflora, daños histopatológicos y de ADN de la lombriz de tierra *Lumbricus terrestris* al ser aplicados en consorcio en suelo contaminado con Pb, es decir, combate el estrés a la exposición del contaminante permitiendo la sobrevivencia de la lombriz y facilita la acumulación de Pb que pueden adquirir de los suelos contaminados [24]. Asimismo, la asociación entre la planta

*Pennisetum purpureum*, *L. terrestris* y *K. variicola* indican que puede ser otra estrategia más eficiente en la captación y remoción de Pb en suelos contaminados [25].

La mayoría de los colorantes textiles son compuestos recalcitrantes y tóxicos que comúnmente se descargan en efluentes industriales no tratados, comprometiendo significativamente la calidad estética, química y biológica de los cuerpos de agua. El colorante azoico rojo 198 (RR198) es ampliamente utilizado en diversas industrias para el teñido textil, curtidurías e impresión, se ha encontrado que es mutagénico, cancerígeno y causa contaminación ambiental debido a su no degradabilidad. Resultados entre el consorcio bacteriano de *Enterococcus faecalis* y *K. variicola* mostraron que las mejores condiciones para la remoción de este colorante, se puede lograr a las 72 h con una concentración bacteriana de  $3.5 \times 10^5$  células/mL, pH 8 y 30°C, eliminando más de 98% de RR198 a concentración inicial de 25 mg/L [26].

Otro de los contaminantes que se ha extendido mundialmente es la atrazina, un herbicida que se aplica al suelo para controlar la maleza. La moderada persistencia en los diferentes tipos de suelo puede modificar la estructura funcional microbiana y a su vez la capacidad de adsorción/desorción de contaminantes en el suelo [27]. En México, aunque se ha clasificado como plaguicida altamente peligroso no se ha prohibido su uso y en 2017 se encontraba dentro de los plaguicidas con mayor número de registros autorizados de usos como ingrediente [28]. Análisis teóricos sobre la suspensión de *K.*



*variicola* FH-1 y *Arthrobacter* NJ-1 prometen ser agentes biológicos en la biorremediación de este contaminante, reduciendo aproximadamente 97% de atrazina en condiciones neutras o débilmente alcalinas [29].

### Secreción de promotores del crecimiento vegetal

La agricultura intensiva está asociada a múltiples problemáticas ambientales que incluyen sequía, deficiencia de nutrientes, erosión, salinidad y pérdida de diversidad microbiana. Adicionalmente, el uso masivo de compuestos químicos para subsanar esta problemática conlleva un incremento en los costos de producción para el agricultor y deterioro ambiental [30,31].

En este contexto, la aplicación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR), puede reducir los efectos adversos y lograr una agricultura sostenible. Antecedentes evidencian la participación de las PGPR mediante mecanismos directos como la fijación de nitrógeno (N<sub>2</sub>), la solubilización de minerales como el hierro (Fe), potasio (K) y fósforo (P), producción de fitohormonas como el ácido indolacético (AIA) involucrada en la diferenciación y elongación del tallo, así como secreción de polisacáridos extracelulares (EPS), mientras que los mecanismos indirectos se asocian con la producción de metabolitos antimicrobianos para la disminución o eliminación de microorganismos fitopatógenos

[31–34].

Las PGPRs pueden clasificarse como inoculantes o biofertilizantes formulados, que contienen PGPRs como ingredientes activos que, al ser aplicados de manera foliar, en riego o al suelo, favorecen el aprovechamiento de los nutrientes en asociación con la planta y/o su rizósfera [35].

Kusale *et al.*, 2021 probaron el potencial de *K. variicola* SURYA6 para secretar múltiples metabolitos promotores del crecimiento de las plantas en varias concentraciones (0-200 mM) de cloruro de sodio (NaCl). El aislado produjo niveles elevados de la enzima fitasa con el aumento de la concentración de sal, inhibiéndose a una concentración de 100 mM de NaCl, mientras que la producción de sideróforos y enzimas antioxidantes como la catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD) y glutatión reductasa (GSH) se ven afectadas negativamente por encima de una concentración de 100 mM de NaCl. Contrario a esto, concentraciones mayores a 100 mM de NaCl mejoran la producción de AIA, EPS y 1-aminociclopropano-1-carboxílico desaminasa (ACCD).

Resultados similares fueron obtenidos por Yang *et al.*, 2020 al inocular diferentes concentraciones de *K. variicola* con plántulas de maíz en suelo alcalino-salino. Demostrando que a medida que avanzaba el tiempo, la colonización de *K. variicola* aumentó gradualmente en la rizósfera, favoreciendo el contenido de materia orgánica, nitrógeno, amoníaco, acetoína, P y K disponible,



incrementando la actividad de las enzimas ureasa, catalasa y sacarasa. Además, *K. variicola* puede producir AIA promoviendo el crecimiento (altura y longitud de la raíz) de las plántulas de maíz.

Para mitigar el estrés por sequía, también se ha probado el consorcio entre *K. variicola* F2, *Pseudomonas fluorescens* YX2 y *Raoultella planticola* YL2 en el maíz, lo que resulta en la acumulación de colina, precursor de glicina betaína, mejorando así el contenido relativo de agua de la hoja y el peso de la materia seca [38]. En cuanto a la capacidad antagonista a fitopatógenos, Guato-Molina *et al.*, 2019 mencionan que *K. variicola* BO3-4 produce metabolitos antagónicos a los hongos *Moniliophthora roreri* (causante de moniliasis del cacao) y *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* responsable de la marchitez en el tomate [40].

Dadas las propiedades que muestra *K. variicola* puede ser considerada como una bacteria con aplicaciones biotecnológicas prometedoras, en la tabla 1 se destacan algunos efectos benéficos en la aplicación de *K. variicola* a diferentes cultivos.

Recientemente se ha propuesto desarrollar un producto comercializable en polvo de *K. variicola* mediante su microencapsulación en una matriz de alginato y secado por pulverización, principalmente para la aplicación en semillas de maíz [41], sin embargo, ya se ha puesto de manifiesto el valor de *K. variicola* o en consorcio con otras bacterias como inoculante en el registro de

patentes de Espacenet (<https://worldwide.espacenet.com/>). En la tabla 2 se resumen algunas patentes de la última década, a pesar de que *K. variicola* fue descubierta en México, la única patente (WO2021177812A1) proveniente de este país pertenece a la empresa Biorganix Mexicana S.A de C.V. y el resto son provenientes de China.

### Consideraciones para la aplicación de *K. variicola*

Aunado a lo mencionado, las consideraciones para el uso exitoso de biofertilizantes en el sector agrícola incluyen la selección en base a la cepa microbiana, el cultivo de interés, condiciones edafoclimáticas y las prácticas agrícolas empleadas, por lo que en futuros estudios se necesitan realizar ensayos de campo bajo diferentes condiciones agroclimáticas, mejorar la viabilidad de la aplicación y distribución para confirmar el uso de *K. variicola* [35,56].

Recientemente se ha sugerido el término plantanosis para designar la infección en humanos por bacterias simbióticas transmitidas por plantas, paralelo al término zoonosis (bacteria patógena transmitida por animales), característica que puede tener el microorganismo para “saltar” y superar las barreras entre los reinos vegetal y animal [57]. En este contexto, cabe citar el estudio de la secuenciación del genoma completo de *K. variicola* DX120E (fijador endófito de nitrógeno) aislada de la caña de azúcar en

China, que indica un alto grado de similitud del genoma completo y plásmidos entre DX120E y aislados fitopatógenos y clínicos de *Klebsiella*,

poniendo en evidencia el potencial riesgo de su uso como biofertilizante [2].

**Tabla 1.** Estudios sobre los efectos benéficos de la aplicación de *K. variicola* en diferentes cultivos.

Cepa	Cultivo	Condición experimental	Efecto	Referencia
<i>K. variicola</i> XF11	Tabaco ( <i>Nicotiana tabacum</i> L.)	Maceta en invernadero	Plántulas: mayor altura y peso seco e incremento significativo en la absorción de N, P y K. Suelo: Disminución de pH y aumento de K disponible en la rizósfera.	[42]
<i>K. variicola</i> DX120E	Caña de azúcar ( <i>Saccharum officinarum</i> L.) ROC22 y GT21	Cuadrantes en invernadero	Colonización de raíces, aumento en peso seco y contenidos de N, P y K.	[43]
<i>K. variicola</i> RCA26 modificada	Arroz ( <i>O. sativa</i> L. cv. Volano)	Maceta en invernadero	Sobreproducción de AIA muestra un efecto positivo en la fijación de nitrógeno.	[44]
<i>K. variicola</i> UC4115	Tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) HEINZ 1301	Cuadrantes en invernadero	Incremento en la longitud de la raíz, densidad y diámetro cuando es aplicado a la semilla.	[45]
<i>K. variicola</i> SURYA6	Maíz ( <i>Zea mays</i> L.) y trigo ( <i>Triticum aestivum</i> L.)	Maceta en invernadero	Mejora la germinación de semillas y el crecimiento de las plantas, así como los nutrientes del suelo bajo estrés por salinidad en comparación con condiciones normales.	[46]
Consortio entre <i>K. variicola</i> y <i>Rhizophagus intraradices</i>	Alcachofa de Jerusalén ( <i>Helianthus tuberosus</i> L.)	Maceta en invernadero	Aumento en el crecimiento de la planta y el contenido de inulina en el tubérculo debido a la solubilización de P y secreción de AIA.	[47]
<i>K. variicola</i> R3J3HD7	Maíz ( <i>Zea mays</i> var. Conejo)	Maceta en invernadero	Incremento de la longitud de las raíces, hojas y peso seco. Control de <i>Fusarium</i> sp. 50.	[48]



**Tabla 2.** Patentes registradas de la última década en Espacenet que utilizan a *K. variicola*.

Cepa	Descripción	Patente
<i>K. variicola</i> 13-2	Producción de AIA y promotor del crecimiento de <i>Salvia miltiorrhiza</i> .	CN112852661A [49]
<i>K. variicola</i> SH-1	Agente de biocontrol sobre la mancha marrón del tabaco, la mancha negra de la col y el tizón temprano del tomate al inhibir <i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissler, <i>Alternaria oleracea</i> M. Ibrath y <i>Alternaria solani</i> .	CN103484399A [50]
<i>K. variicola</i> SH-1	Promueve el crecimiento del tallo de la orquídea <i>Dendrobium nobile</i> , ocupada en la medicina tradicional China.	CN104351255A [51]
<i>K. variicola</i> Trb33	Promueve el crecimiento de tabaco a través de la liberación de K disponible en el suelo.	CN103031260A [52]
<i>K. variicola</i> , <i>Bacillus tequilensis</i> , <i>Enterobacter cloacae</i> y <i>E. xiangfangensis</i>	La composición microbiana mejora la proporción de microorganismos benéficos en el suelo, aumenta el rendimiento y la proporción superior del tabaco.	CN106434471A [53]
<i>K. variicola</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>B. velezensis</i> , <i>Enterococcus faecium</i> y <i>B. amyloliquefaciens</i>	Obtención de AIA a partir de las cepas o combinación de éstas por fermentación en un medio con triptófano.	WO2021177812A1 [54]
<i>K. variicola</i>	Método para mejorar la tolerancia salina-alkalina, así como las propiedades físicas y químicas de la rizósfera del suelo de plántulas de maíz.	AU2020104315A4 [55]

Similares resultados se obtuvieron al evaluar el genoma de *K. variicola* X39, ya que a pesar de poseer un alto número de genes que estaban involucrados en la colonización de plantas, la fijación de nitrógeno y la defensa contra el estrés oxidativo, comparte muchos factores de virulencia con *K. pneumoniae* F1, además posee resistencia a antibióticos, principalmente a las quinolonas y  $\beta$ -lactámicos. Los autores concluyen que esta cepa es capaz de cruzar reinos y no debe usarse como fertilizante biológico debido a su potencial patogenicidad [58].

## CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Esta revisión ha abordado las aplicaciones que tiene *K. variicola* en la producción de productos de valor agregado a partir de desechos, así como la función en respuesta a la disponibilidad y toxicidad de metales pesados y colorantes, promoviendo el crecimiento de las plantas por la secreción de AIA y solubilización de nutrientes, además, mejora la resistencia a estrés biótico y abiótico. Esto tiene implicaciones prácticas significativas para el uso de *K. variicola* en la biorremediación de suelos contaminados, procesos industriales y



producción agrícola de cultivos de interés que puede aplicarse en México.

Sin embargo, gran parte de la investigación carece de información sobre la dinámica del comportamiento de *K. variicola* bajo tensiones ambientales *in vivo*, debido a lo cual necesitamos mejorar nuestra comprensión de los procesos microecológicos de la rizósfera a nivel molecular y elegir el mejor par de planta/microorganismo o consorcio para proporcionar una dirección de biorremediación a largo plazo y aprovechar al máximo sus características para la producción agrícola.

Así mismo, deben considerarse las características patogénicas potenciales, los registros de epidemiología molecular y la gran similitud entre cepas aisladas de plantas e infecciones humanas para respaldar cualquier uso, dado que existen pocos casos de infecciones humanas relacionadas con especies de PGPR de origen agrícola. El uso potencial de cada cepa como biofertilizante, inoculante o antagonista, debe evaluarse caso por caso a través de un análisis comparativo del genoma completo para identificar factores de virulencia putativos.

## CONFLICTO DE INTERESES

Se declara no tener ningún conflicto de interés.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la VIEP y al Comité de Internacionalización de la Investigación, ambos de la Benemérita Universidad Autónoma de

Puebla, por el apoyo otorgado para el desarrollo de proyectos del grupo “Ecology and Survival of Microorganisms”.

## REFERENCIAS

- [1]. Rosenblueth M, Martínez L, Silva J, Martínez-Romero E. *Klebsiella variicola*, A Novel Species with Clinical and Plant-Associated Isolates. *Systematic and Applied Microbiology*. 2004;27(1):27–35. Disponible en: <https://doi.org/10.1078/0723-2020-00261>
- [2]. Lin L, Wei C, Chen M, Wang H, Li Y, Yang L, An Q. Complete genome sequence of endophytic nitrogen-fixing *Klebsiella variicola* strain DX120E. *Standards in Genomic Sciences*. 2015;10:22. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s40793-015-0004-2>
- [3]. Fonseca EL, Ramos N da V, Andrade BG, Morais LL, Marin MF, Vicente AC. A one-step multiplex PCR to identify *Klebsiella pneumoniae*, *Klebsiella variicola*, and *Klebsiella quasipneumoniae* in the clinical routine. *Diagnostic Microbiology and Infectious Disease*. 2017;87(4):315–317. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.diagmicrobio.2017.01.005>
- [4]. Brisse S, Passet V, Grimont PAD. Description of *Klebsiella quasipneumoniae* sp. nov., Isolated from human infections, With two subspecies, *Klebsiella quasipneumoniae* subsp. *quasipneumoniae* subsp. nov. and *Klebsiella quasipneumoniae* subsp. *similipneumoniae* subsp. nov., and demonstration that *Klebsiella singaporensis* is a junior heterotypic synonym of *Klebsiella variicola*. *International Journal of*



Systematic and Evolutionary Microbiology. 2014; 64(Part 9):3146–3152. Disponible en: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.062737-0>

[5]. Rodríguez-Medina N, Barrios-Camacho H, Duran-Bedolla J, Garza-Ramos U. *Klebsiella variicola*: an emerging pathogen in humans. Emerging Microbes and Infections. 2019;8(1):973–988. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/22221751.2019.1634981>

[6]. Barrios-Camacho H, Aguilar-Vera A, Beltran-Rojel M, Aguilar-Vera E, Duran-Bedolla J, Rodríguez-Medina N, *et al.* Molecular epidemiology of *Klebsiella variicola* obtained from different sources. Scientific Reports. 2019;9(1),10610. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46998-9>

[7]. Martínez-Romero E, Rodríguez-Medina N, Beltrán-Rojel M, Silva-Sánchez J, Barrios-Camacho H, Pérez-Rueda E, *et al.* Genome misclassification of *Klebsiella variicola* and *Klebsiella quasipneumoniae* isolated from plants, animals and humans. Salud Publica de Mexico. 2018;60(1):56–62. Disponible en: <https://doi.org/10.21149/8149>

[8]. Liu W, Wang Q, Hou J, Tu C, Luo Y, Christie P. Whole genome analysis of halotolerant and alkalotolerant plant growth-promoting rhizobacterium *Klebsiella* sp. D5A. Scientific Reports. 2016;6:26710. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/srep26710>

[9]. Kim AY, Shahzad R, Kang SM, Seo CW, Park YG, Park HJ, *et al.* IAA-producing *Klebsiella variicola* AY13 reprograms soybean growth during flooding stress. Journal of Crop

Science and Biotechnology. 2017;20(4):235–242. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12892-017-0041-0>

[10]. Marag PS, Suman A. Growth stage and tissue specific colonization of endophytic bacteria having plant growth promoting traits in hybrid and composite maize (*Zea mays* L.). Microbiological Research. 2018;214:101–113. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.05.016>

[11]. Nava-Faustino G, Ramírez-Rojas S, Palemón-Alberto F, Orbe Díaz D, Forero-Forero ÁV, Toribio-Jiménez J. In vivo translocation of *Klebsiella variicola* PB02 and *Klebsiella quasipneumoniae* HPA43 in fruits of *Solanum lycopersicum* cultivar DT-22. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 2022;13(5):799–811. Disponible en: <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i5.2880>

[12]. Potter RF, Lainhart W, Twentyman J, Wallace MA, Wang B, Burnham CAD, *et al.* Population structure, antibiotic resistance, and uropathogenicity of *Klebsiella variicola*. mBio. 2018;9(6):2481-2518. Disponible en: <https://doi.org/10.1128/mBio.02481-18>

[13]. Imai K, Ishibashi N, Kodana M, Tarumoto N, Sakai J, Kawamura T, *et al.* Clinical characteristics in blood stream infections caused by *Klebsiella pneumoniae*, *Klebsiella variicola*, and *Klebsiella quasipneumoniae*: a comparative study, Japan, 2014-2017. BMC Infectious Diseases. 2019;19(1):946. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12879-019-4498-x>

[14]. Chilakamarry CR, Sakinah AM, Zularisam AW, Pandey A, Vo DVN. Technological

perspectives for utilisation of waste glycerol for the production of biofuels: A review. *Environmental Technology and Innovation*. 2021;24:101902. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101902>

[15]. Alalwan HA, Alminshid AH, Aljaafari HAS. Promising evolution of biofuel generations. Subject review. *Renewable Energy Focus*. 2019;28:127–139. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.12.006>

[16]. Mat Aron NS, Khoo KS, Chew KW, Show PL, Chen WH, Nguyen THP. Sustainability of the four generations of biofuels – A review. *International Journal of Energy Research*. 2020;44(12):9266–9282. Disponible en:

<https://doi.org/10.1002/er.5557>

[17]. Chilakamarry CR, Sakinah AMM, Zularisam AW, Pandey A. Glycerol waste to value added products and its potential applications. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*. 2021;1(4):378–396. Disponible en:

<https://doi.org/10.1007/s43393-021-00036-w>

[18]. Rahman MS, Xu C, Ma K, Guo H, Qin W. Utilization of by-product glycerol from biodiesel plants as feedstock for 2,3-butanediol accumulation and biosynthesis genes response of *Klebsiella variicola* SW3. *Renewable Energy*. 2017;114(Part B):1272–1280. Disponible en:

<https://doi.org/10.1099/ijs.0.062737-0>

[19]. Suzuki T, Nishikawa C, Seta K, Shigeno T, Nakajima-Kambe T. Ethanol production from glycerol-containing biodiesel waste by *Klebsiella variicola* shows maximum

productivity under alkaline conditions. *New Biotechnology*. 2014;31(3):246–253. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2014.03.005>

<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2014.03.005>

[20]. Suzuki T, Seta K, Nishikawa C, Hara E, Shigeno T, Nakajima-Kambe T. Improved ethanol tolerance and ethanol production from glycerol in a streptomycin-resistant *Klebsiella variicola* mutant obtained by ribosome engineering. *Bioresource Technology*. 2015;176:156–162. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.153>

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.153>

[21]. Seta K, Suzuki T, Kiyoshi K, Shigeno T, Nakajima-Kambe T. Potential use of methane fermentation digested slurry as a low-cost, environmentally-friendly nutrient for bioethanol production from crude glycerol by *Klebsiella variicola* TB-83D. *New Biotechnology*. 2018;44:1–5. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.02.014>

[22]. Baghaie AH, Aghili F. Health risk assessment of Pb and Cd in soil, wheat, and barley in Shazand County, central of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2019;17(1):467–477. Disponible en:

<https://doi.org/10.1007/s40201-019-00365-y>

[23]. Wani AL, Ara A, Usmani JA. Lead toxicity: A review. *Interdisciplinary Toxicology*. 2015;8(2):55–64. Disponible en:

<https://doi.org/10.1515/intox-2015-0009>

[24]. Das A, Osborne JW. Enhanced bioremoval of lead by earthworm–*Lumbricus terrestris* co-cultivated with bacteria–*Klebsiella variicola*. *Journal of Photochemistry and Photobiology. B, Biology*. 2017;175:65–72. Disponible en:



<https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.08.031>

[25]. Das A, Osborne JW. Enhanced Lead Uptake by an Association of Plant and Earthworm Bioaugmented with Bacteria. *Pedosphere*. 2018;28(2):311–322. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60021-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60021-9)

[26]. Eslami H, Shariatifar A, Rafiee E, Shiranian M, Salehi F, Hosseini SS, *et al.* Decolorization and biodegradation of reactive Red 198 Azo dye by a new *Enterococcus faecalis*–*Klebsiella variicola* bacterial consortium isolated from textile wastewater sludge. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 35(3): 38. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2608-y>

[27]. Salazar-Ledesma M, Mora L, Chávez B, Gómez D, Zamor O, Prado B. Susceptibilidad del suelo al impacto humano: Caso del herbicida atrazina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 2018;70(1):95–119. Disponible en: <https://doi.org/10.18268/bsgm2018v70n1a6>

[28]. Bejarano GF, Aguilera MD, Álvarez SJD, Arámbula ME, Arellano AO, *et al.* Los Plaguicidas Altamente Peligrosos en México. 2017. Disponible en: [https://conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/Documentos-recopilatorios-relevantes/Los\\_PAP\\_en\\_Mxico.pdf](https://conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/Documentos-recopilatorios-relevantes/Los_PAP_en_Mxico.pdf)

[29]. Gao N, Zhang J, Pan Z, Zhao X, Ma X, Zhang H. Biodegradation of Atrazine by Mixed Bacteria of *Klebsiella variicola* Strain FH-1 and *Arthrobacter* sp. NJ-1. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*.

2020;105(3):481–489. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02966-y>

[30]. Santoyo de la Cruz MF, Flores Magdalena H, Khalil-Gardezi A, Mancilla-Villa ÓR, Rubiños-Panta JE. Composición iónica y comparación de índices de salinidad de suelo agrícola de Texcoco, México. *Nova Scientia*. 2021;13(27). Disponible en: <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2789>

[31]. Ahluwalia O, Singh PC, Bhatia R. A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*. 2021;5:100032. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032>

[32]. Moreno RA, García MV, Reyes CJL, Vásquez AJ, Cano RP. Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 20(1), 68-83. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>

[33]. Posada Castaño AM, Mejía Durango DP, Polanco-Echeverry D, Cardona-Arias JA. Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR): una revisión sistemática 1990-2019. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 2021;12(2):161–178. Disponible en: <https://doi.org/10.22490/21456453.4040>

[34]. Mahmood S, Daur I, Al-Solaimani SG, Ahmad S, Madkour MH, Yasir M, *et al.* Plant growth promoting rhizobacteria and silicon synergistically enhance salinity tolerance of



mung bean. *Frontiers in plant science*. 2016; 7:876. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00876>

[35]. Chávez-Díaz IF, Zelaya Molina LX, Cruz Cárdenas IC, Rojas Anaya E, Ruíz Ramírez S, de los Santos Villalobos S. Consideraciones sobre el uso de biofertilizantes como alternativa agro-biotecnológica sostenible para la seguridad alimentaria en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2020;11(6):1423-1436. Disponible en: <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2492>

[36]. Kusale SP, Attar YC, Sayyed RZ, Malek RA, Ilyas N, Suriani NL, *et al.* Production of plant beneficial and antioxidants metabolites by *Klebsiella variicola* under salinity stress. *Molecules*. 2021;26(7) 1894. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/molecules26071894>

[37]. Yang L, Yang K. Biological function of *Klebsiella variicola* and its effect on the rhizosphere soil of maize seedlings. *PeerJ*. 2020;8: 9894. Disponible en: <https://doi.org/10.7717/peerj.9894>

[38]. Gou W, Tian LI, Ruan Z, Zheng P, Chen F, Zhang L, *et al.* Accumulation of choline and glycinebetaine and drought stress tolerance induced in maize (*Zea mays*) by three plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) strains. *Pakistan Journal of Botany*. 2015;47(2): 581-586. Disponible en: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:46056657](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:46056657)

[39]. Guato-Molina JJ, Auhing-Arcos JA, Crespo-Ávila JA, Esmeraldas-García GA, Mendoza-León AF, Canchignia-Martínez HF.

Plant growth promoting bacteria with potential biocontrol agent of *Fusarium oxysporum* f. Sp. *lycopersici*, and *Moniliophthora roreri*. *Scientia Agropecuaria*. 2019;10(3):393–402. Disponible en: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.03.10>

[40]. Huarhua M, Aragón L, Flores J, Tsuzuki R, Arie T. Primer reporte de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* raza 1 aislada de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) proveniente de la Costa central del Perú. *Scientia Fungorum*. 2020;50:1257. Disponible en: <https://doi.org/10.33885/sf.2020.50.1257>

[41]. Arbaugh BM, Rezaei F, Mohiti-Asli M, Pena S, Scher HB, Jeoh T. A Strategy for Stable, On-Seed Application of a Nitrogen-Fixing Microbial Inoculant by Microencapsulation in Spray-Dried Cross-linked Alginates. *ACS Agricultural Science and Technology*. 2022; 2(5), 950-959. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acsagascitech.2c00107>

[42]. Zhang C, Kong F. Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants. *Applied Soil Ecology*. 2014;82:18–25. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.05.002>

[43]. Wei CY, Lin L, Luo LJ, Xing YX, Hu CJ, Yang LT, *et al.* Endophytic nitrogen-fixing *Klebsiella variicola* strain DX120E promotes sugarcane growth. *Biology and Fertility of soils*. 2014; 50: 657-666. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00374-013-0878-3>

[44]. Defez R, Andreozzi A, Bianco C. The



Overproduction of Indole-3-Acetic Acid (IAA) in Endophytes Upregulates Nitrogen Fixation in Both Bacterial Cultures and Inoculated Rice Plants *Microbial Ecology*. 2017;74(2): 441-452. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00248-017-0948-4>

[45]. Guerrieri MC, Fiorini A, Fanfoni E, Tabaglio V, Cocconcelli PS, Trevisan M, *et al.* Integrated Genomic and Greenhouse Assessment of a Novel Plant Growth-Promoting Rhizobacterium for Tomato Plant. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12: 660620. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.660620>

[46]. Kusale SP, Attar YC, Sayyed RZ, el Enshasy H, Hanapi SZ, Ilyas N, *et al.* Inoculation of *Klebsiella variicola* alleviated salt stress and improved growth and nutrients in wheat and maize. *Agronomy*. 2021;11(5):927. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy11050927>

[47]. Nacoon S, Jogloy S, Riddech N, Mongkolthananuk W, Kuyper TW, Boonlue S. Interaction between Phosphate Solubilizing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth Promotion and Tuber Inulin Content of *Helianthus tuberosus* L. *Scientific reports*. 2020;10(1): 4916. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61846-x>

[48]. Rios-Galicia B, Villagómez-Garfias C, de la Vega-Camarillo E, Guerra-Camacho JE, Medina-Jaritz N, Arteaga-Garibay RI, *et al.* The Mexican giant maize of Jala landrace harbour plant-growth-promoting rhizospheric and endophytic bacteria. *3 Biotech*. 2021;11(10):447. Disponible en:

<https://doi.org/10.1007/s13205-021-02983-6>

[49]. Yi W, Jin Y, Fei W, Yanhong Q, Xuemeng L, Chuantao Lu, *et al.* *Klebsiella variicola* capable of generating IAA and promoting growth of salvia miltiorrhiza and application thereof. CN112852661A. 2021.

[50]. Zuhong L, Rong Z, Guosong W, Mingfu Z, Xuanzhi L, Ruiqin Z. Plant endophytic bacterium SH-1 and application thereof. CN103484399A. 2014.

[51]. Mingfu Z, Guosong W, Shaozhong X, Mengjiao L. Application of *Klebsiella variicola* SH-1 strain. CN104351255A. 2015.

[52]. Zhongfeng Z, Guoming S, Bingqiao Z, Qingcheng L, Lin G, Yuqin Z, *et al.* *Klebsiella variicola* with potassium release function, and culture method and application thereof. CN103031260A. 2012.

[53]. Xiang W, Bingcheng G, Zhongqian H, Liyuan X, Weihong P, Hao T, *et al.* Microbial composition for promoting tobacco growth and use. CN106434471A. 2017.

[54]. Herrera Rodríguez L. N., Mora Cura Y. N., Cortes Salas R. A. Method for obtaining indole acetic acid by means of microbial fermentation. WO2021177812A1. 2021.

[55]. Lijuan Y., Kejun Y., Yufeng W. A method for improving saline-alkali tolerance of maize seedlings and improving physical and chemical properties of rhizosphere soil of maize seedlings. AU2020104315A4. 2021.

[56]. Mushtaq Z. PGPR: present role, mechanism of action and future prospects along bottlenecks in commercialization. EQA-



International Journal of Environmental Quality.  
2020;41:9-15. Disponible en:  
<https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/11103>

[57]. Martínez-Romero E, Rodríguez-Medina N, Beltrán-Rojel M, Toribio-Jiménez J, Garza-Ramos U. *Klebsiella variicola* and *Klebsiella quasipneumoniae* with capacity to adapt to clinical and plant settings. *Salud Pública de México*. 2018;60(1):29–40. Disponible en: <https://doi.org/10.21149/8156>

[58]. Guo Y, Zhai Y, Zhang Z, Li D, Wang Z, Li J, *et al.* Complete genomic analysis of a kingdom-crossing *Klebsiella variicola* isolate. *Frontiers in Microbiology*. 2018;9:2428.

Disponible en:  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02428>

### Sitio Web

Environmental Protection Agency (EPA). Sources of Greenhouse Gas Emissions. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions> [Recuperado el 30 Agosto 2022]

Environmental Protection Agency. Lead. <https://www.epa.gov/lead/learn-about-lead> [Recuperado el 30 Agosto 2022]

