

DOI: <https://doi.org/10.56712//latam.v3i2.76>

Contaminación y hongos: resistencia a metales pesados

Pollution and Fungi: Resistance to Heavy Metals

Leticia Guadalupe Navarro Moreno

Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec
navarroleticia483@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-00019978-7605>
Oaxaca – México

Lucero Vázquez Velasco

Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec
lucerovelasco61@gmail.com
Oaxaca – México


Andrea Rangel Cordero

Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubiran
Arco2069@gmail.com
Ciudad de México

José M. González

Universidad César Vallejo
josemgonzalez@gmail.com
Piura – Perú

Artículo recibido: 29 de agosto de 2022. Aceptado para publicación: día mes 2022.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Todo el contenido de **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](#) 

Como citar: Navarro Moreno, L. G. ., Vázquez Velasco, L., Rangel Cordero, A., & González, J. M. (2022). Contaminación y hongos: resistencia a metales pesados. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 3(2), 215–232.
<https://doi.org/10.56712/latam.v3i2.76>

Resumen

Muchos organismos vivos poseen la capacidad de adaptarse a las condiciones adversas del ambiente. Lo anterior se realiza para poder sobrevivir y asegurar una continuidad en su especie. Uno de los ambientes más tóxicos que se ha generado es la contaminación del medio. Esta ha sido resultado de la sobreproducción y el mal manejo de materiales usados por el ser humano. El agua constituye un buen ejemplo de ambiente contaminado. La contaminación ambiental ha servido como un modo de selección de varias formas microbianas, las cuales han expresado diferentes mecanismos de acción para poder adaptarse y sobrevivir al medio ambiente en el cual se desarrollan. En la Ciudad de Tuxtepec, Oaxaca y sus poblados aledaños existe un grave problema de contaminación del agua debido al mal uso de los desechos generados en industrias y hogares. Se eligieron tres afluentes, el primero fue el río Papaloapan y dos más localizados en colonias cercanas a este. A partir de esas muestras se aislaron e identificaron, mediante diferentes metodologías (microbiológicas y de biología molecular) tres hongos microscópicos y una levadura, los cuales fueron sembrados de forma separada para su posterior estudio. Los hongos identificados fueron *Aspergillus* sección *flavi*, *Penicillium citrinum* y *Paecilomyces lilacinus*. La levadura fue *Cándida parapsilosis*. En este trabajo se muestran los resultados obtenidos de los aislamientos y las características microbiológicas de las cepas aisladas e identificadas. Es importante conocer y estudiar cepas microbianas (bacterias, levaduras y hongos) que sean capaces de tolerar concentraciones altas de agentes tóxicos diversos, como los metales pesados para, posteriormente, establecer protocolos de investigación que tengan como finalidad su uso como microorganismos capaces de llevar a cabo la biodegradación.

Palabras clave: contaminación, adaptación, microorganismos.

Abstract

Many living organisms have the ability to adapt to adverse environmental conditions. This is done in order to survive and ensure continuity in their species. One of the most toxic environments that has been generated is environmental pollution. This has been the result of overproduction and mishandling of materials used by human beings. Water is a good example of a polluted environment. Environmental contamination has served as a mode of selection for various microbial forms, which have expressed different mechanisms of action in order to adapt and survive the environment in which they develop. In the City of Tuxtepec, Oaxaca and its surrounding towns there is a serious problem of water contamination due to the misuse of waste generated in industries and homes. Three tributaries were chosen, the first was the Papaloapan River and two more located in neighborhoods near it. From these samples, three microscopic fungi and one yeast were isolated and identified using different methodologies (microbiological and molecular biology), which were seeded separately for further study. The identified fungi were *Aspergillus flavi* section, *Penicillium citrinum* and *Paecilomyces lilacinus*. The yeast was *Candida parapsilosis*. In this work, the results obtained from the isolates and the microbiological characteristics of the isolated and identified strains are shown. It is important to know and study microbial strains (bacteria, yeasts and fungi) that are capable of tolerating high concentrations of various toxic agents, such as heavy metals, in order to subsequently establish research protocols that aim to use them as microorganisms capable of carrying out biodegradation

Keywords: contamination, adaptation, microorganisms.

TÍTULO DEL ARTÍCULO

La vida en nuestro planeta requiere adaptarse a las condiciones cambiantes del medio para poder sobrevivir. Naturalmente este proceso de adaptación-evolución ha ocurrido desde que apareció la vida en nuestro planeta. La vida se sustenta en las relaciones que hay entre los seres vivos y su ambiente, generando un intercambio continuo de materia y energía. Por ello, ningún ser puede vivir aislado del ambiente que lo rodea. La luz solar, la temperatura, el agua, el aire y el suelo constituyen los ecosistemas (Marcano, 2016). Los seres vivos estamos, entonces, sujetos al cambio de los ecosistemas por lo que la vida dependerá de la capacidad de los seres vivos para soportar los cambios. Esta interesante teoría ha sido estudiada por muchos científicos desde hace muchos años y constituye el punto de partida para explicar lo que sucede a las especies que se ven sometidas a una presión evolutiva. A lo largo de la historia dos teorías, han explicado la evolución; cómo los organismos adquieren características nuevas o adaptan las constitutivas para sobrevivir y mantenerse en un ambiente determinado. La teoría de adaptación de Lamarck expuesta en 1809, indica que la evolución está dada por cambios fenotípicos y genotípicos a lo largo del tiempo, generados por variaciones ambientales, que le permiten al organismo adaptarse al medio modificado; y transmitir los cambios. La teoría de selección natural de Darwin proporciona una gran importancia a los cambios al azar, que proporcionan características de ventaja a ciertos organismos. Sobreviven los que ante una presión x presentan la característica que les permite adaptarse (aptos) y son seleccionados sobre aquellos que carecen de la característica (Celis-Bustos, 2017). Darwin habló de la lucha por la existencia y luego de la selección natural. De esta forma Darwin comenzó la argumentación de su teoría con estatutos que se parecen mucho a leyes y utilizó el mecanismo de cambio evolutivo y la selección natural, para explicar muchos fenómenos como la distribución geográfica, la geología, la clasificación, la anatomía comparada y la embriología entre otros. No obstante, Darwin pensó siempre que su teoría de la evolución estaba incompleta ya que le faltaba elaborar una teoría de la herencia para explicar los hechos de la nueva variación y la transmisión de una generación a la siguiente. Darwin descubrió el mecanismo del cambio evolutivo en otoño del 1838 llegando a la conclusión de la selección era el principio del cambio en la resistencia de las especies a los cambios en su medio ambiente (Darwin, 2004., Casadejesus, 2013., Darwin 2013 a, b., Lozano, 2016).

A lo largo de la historia de las ciencias biológicas, los temas del origen de la vida y la evolución han sido muy importante en la vida de muchos científicos, quienes han postulado diferentes teorías relacionadas a los aspectos de las diferentes etapas de la vida y su cambio a través de las diferentes eras. Así se establecieron teorías como la de la endosimbiosis, la cual es un bello ejemplo de una idea para explicar la aparición de los diferentes organismos. El primero fue un organismo aparentemente simple, llamado procarionte, carente de organelos, el cual se unió con algunas pequeñas bacterias autótrofas dando lugar a los primeros seres fotosintéticos. Al pasar el tiempo o al mismo, no se sabe a ciencia cierta, otras bacterias no fotosintéticas se unieron para formar los organismos aerobios. A partir de ellos, sea como sea que se hayan formado, se originaron una gran diversidad de seres vivos hasta llegar al humano. Los humanos comenzaron a cambiar los ecosistemas al darse cuenta de que podían utilizar los recursos que la naturaleza poseía. Este hecho generó el inicio del fenómeno de la contaminación en sus diversas versiones. En este trabajo abordaremos la contaminación asociada a los metales pesados.

No todos los metales de la naturaleza son tóxicos ya que en la actualidad se sabe que los elementos químicos asociados con la vida en la Tierra son carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre (C, H, O, N, P y S), que representan 99%, mientras que el restante 1% lo conforman los bioelementos calcio (Ca), potasio (K), sodio (Na), cloro (Cl), magnesio (Mg), hierro (Fe), cobre (Cu), flúor (F), yodo (I), molibdeno (Mo), cobalto (Co), manganeso (Mn), zinc (Zn), aluminio (Al), boro (B), vanadio (V), silicio (Si), estaño (Sn), níquel (Ni) y cromo (Cr) (Santiago et, al, 2020).

Se les llama metales a los elementos químicos situados a la izquierda y centro de la tabla periódica. Ellos se clasifican en metales alcalinos y alcalinotérreos de los grupos I y II A, los metales de transición y los grupos III y IV A. Algunos elementos intermedios como el As del grupo VA se estudian habitualmente junto a los metales. En todos estos grupos se encuentran metales muy relevantes desde el punto de vista toxicológico (Ferrer, 2003). Retomando el hecho de que vivimos en un ecosistema se debe asumir que el contacto de los seres vivos con compuestos metálicos se produce a través del agua, el aire, la tierra y los alimentos, normalmente a dosis bajas. En relación con el humano su toxicidad se ha expresado sobre todo por una exposición profesional en las actividades mineras y, más anecdóticamente, al emplearse con fines homicidas. Los principales autores clásicos que se ocuparon de temas toxicológicos describieron ya intoxicaciones crónicas por metales relacionados con la minería de los elementos más tóxicos como el mercurio o el plomo. Por otra parte el semi-metal arsénico ha sido uno de los tóxicos más empleados con fines suicidas y homicidas. (Ferrer, 2003).

La contaminación ambiental se ha posicionado como uno de los problemas que más afectan a la sociedad del siglo XXI. La pérdida de calidad del aire, del recurso hídrico y de suelos disponibles para actividades agrícolas se ha incrementado exponencialmente. La tasa de contaminación del agua puede ser estimada en 2000 millones de metros cúbicos diarios. La contaminación del agua por metales pesados ocasionada por vía antrópica y natural, está afectando drásticamente la seguridad alimentaria y salud pública. Por su elevada toxicidad, el impacto causado en salud por exposición prolongada o por bio-acumulación de metales pesados resulta alarmante. Dependiendo del tipo de metal o metaloide, se producen afecciones que van desde daños en órganos vitales hasta desarrollos cancerígenos. En México, la población infantil de Torreón, Coahuila ubicada en Norte-centro de México se han reportado casos por envenenamiento principalmente por plomo (Pb) proveniente de actividades industriales que incorporan este metal a la cadena alimenticia y al agua. La distribución, movilidad, disponibilidad biológica y toxicidad de los elementos químicos dependen de la forma química en la que se encuentren por lo que se requiere conocer las especies químicas de los elementos para comprender las reacciones químicas y bioquímicas en las que intervienen, y por tanto, obtener información relativa al carácter esencial y tóxico de los elementos químicos. (Reyes et al, 2016). En México, existen reportes de la presencia de metales pesados en ríos, lagos, cultivos, suelos y aire de zonas urbanas, así como en ambientes costeros y marinos. La minería es una de las principales causas de la contaminación ambiental por metales pesados, debido principalmente al manejo inadecuado de sus residuos denominados "jales mineros". Varios reportes indican que en México podrían existir millones de toneladas de jales dispersos en el territorio nacional, de los que todavía se desconocen sus condiciones y su potencial de afectación al ambiente (Covarrubias, 2017., Marcano, 2016)).

Actualmente, el término "metal pesado" es utilizado para referirse de una manera amplia a aquellos metales o metaloides con potencial de causar problemas de toxicidad. Los principales mecanismos de toxicidad a nivel molecular son: a) Bloqueo de grupos funcionales esenciales en biomoléculas, debido a la alta afinidad de los cationes metálicos por los grupos sulfhidrilos de las proteínas, específicamente a los residuos de cisteína, lo que ocasiona su desnaturalización; b) Desplazamiento de centros catiónicos en enzimas importantes, provocando que pierdan su función; c) Formación de especies reactivas de oxígeno (ERO) como H₂O₂ y del radical . OH, siendo éste uno de los más reactivos que se conocen, por su capacidad de iniciar reacciones en cadena de radicales libres que ocasionan modificaciones y daño irreversible a compuestos celulares como carbohidratos, ácido desoxirribonucleico (ADN), proteínas y lípidos (Covarrubias, 2017).

A nivel mundial se ha incrementado la contaminación por metales pesados generando perjuicios a la salud y el ambiente. Muchos metales pesados son indestructibles y representan una amenaza ya que no pueden ser degradados ni química, ni biológicamente, es decir no son biodegradables, por lo que muchos de ellos pueden acumularse a lo largo de la cadena alimenticia. Por lo anterior y debido a los problemas que se han mencionado anteriormente es necesario desarrollar tecnologías como la biorremediación, En relación con ello, solo algunas especies de microorganismos y plantas portan sistemas genéticos especializados logran contrarrestar los efectos tóxicos de los metales y son capaces de sobrevivir en ambientes con elevadas concentraciones de estos elementos (Beltran, 2015).

Retomando la información del párrafo anterior, de igual forma se sabe que los microorganismos están sujetos a diferentes condiciones fisiológicas de estrés y variaciones del ambiente. Para contender con los efectos dañinos del estrés, las células han desarrollado respuestas moleculares rápidas para evitar los daños y protegerse. Entre ellos se pueden mencionar la síntesis de proteínas de estrés y otros mecanismos de resistencia (González-Hernández, 2002). Se sabe que los microbios son capaces de vivir en una gran diversidad de lugares, desde lugares helados hasta los más calurosos y bajo una gran variedad de condiciones. Por ejemplo, la bacteria *Deinococcus radiodurans*, capaz de sobrevivir a cargas de radiación extremadamente altas de radiación capaces de matar a un humano. Actualmente se sabe que un amplio número de microorganismos, incluidos los hongos poseen estas propiedades y que en relación con la resistencia a metales pesados cada vez se van sumando más especies de microorganismos. Para resistir a estas duras condiciones son capaces de producir diversos compuestos y enzimas que les permiten adaptarse a sus hábitats. Un ejemplo muy interesante es la resistencia bacteriana a los antibióticos y a muchos metales, compuestos orgánicos y aditivos alimenticios. (Rodríguez, 2017, Celis-Bustos, 2017).

La historia de los hongos y su descubrimiento resulta igual de apasionante que muchas otras por lo que resulta muy interesante mencionarla, al ser estos nuestro sistema de estudio. Los hongos microscópicos tuvieron que esperar a la invención del microscopio para poder ser descubiertos. Y fue el holandés Antonie van Leewenhoek a quien le toco el honor de convertirse en el primero en observar y describir a las levaduras. Resulta impresionante que los sistemas de lentes de este gran hombre tuvieran mucho mayor resolución que los de Robert Hooke, quién fue el primero en describir los micelios y las hifas publicando sus observaciones en su obra *Micrographia* en 1665. Más adelante, en 1729 Pietro Antonio Micheli realizó una descripción de alrededor de hongos, sus esporas y varios detalles de su anatomía además de describir el ciclo vital de los hongos realizando cultivos de esporas de los hongos *Mucor*, *Aspergillus* y *Botrytis*. Todo lo anterior lo publicó en el libro *Nova genera plantarum*. Carl von Linné, taxónomo sueco, realizó una clasificación metodológica de los hongos con género y especie pero los posicionó en el grupo de las lombrices. Posteriormente, en 1788, el mexicano Don José Timoteo Arsinas dividió el reino vegetal en hongos, algas, musgos, helechos, palmas y plantas. Ya en los siglos XIX y XX varios científicos como C.H Person (sudafricano), E.M Fries (sueco), H.A De Bary (alemán) y P.A Saccardo (italiano) sentaron las bases taxonómicas y morfológicas de los hongos, las que aún prevalecen (Herrera, 2014).

Los hongos poseen una gran variedad de mecanismos para la unión y remoción de metales pesados. Estos incluyen interacciones fisicoquímicas a nivel de la superficie celular desde la adsorción, hasta procesos dependientes del metabolismo celular, como la acumulación intracelular o la precipitación extracelular del metal como consecuencia de la excreción de metabolitos. Estas interacciones permiten que los hongos sobrevivan a la toxicidad de los metales y los convierten en organismos resistentes y tolerantes. Los mecanismos biológicos implicados en la sobrevivencia de los hongos cuando son invadidos por metales pesados son: precipitación extracelular, formación de complejos y cristalización, transformación de especies de metales (mediante reacciones de oxidación, reducción, metilación y desalquilación), biosorción a paredes celulares, pigmentos y polisacáridos extracelulares, transporte disminuido o impermeabilidad, expulsión, compartimentalización intracelular y precipitación y/o atrapamiento por algunas moléculas con características especiales. Se han realizado muchos estudios sobre la tolerancia de algunos hongos a diversos metales pesados, y se han reportado hongos que muestran tolerancia algunos de ellos. Los hongos *Aspergillus terreus*, *Cladosporium cladosporioides*, *Fusarium oxysporum*, *Glicocladium roseum*, *Penicillium spp*, *Talaromyces helicus*, *Trichoderma koningii*, *Tetraselmis suecica* pueden tolerar concentraciones elevadas de cadmio; *Aspergillus niger* es tolerante a plomo y cadmio y la levadura *Saccharomyces cerevisiae* resiste la presencia de cadmio, plomo y cromo (Cervantes, 1999., Malik, 2004., Dhankhar, 2011., Castañe, et al., 2003).

La ciudad de Tuxtepec en el estado de Oaxaca también representa un alza en los niveles de contaminación por metales pesados en sus aguas. Existen varios reportes que así lo afirman. Uno de ellos lo constituye un trabajo realizado por el grupo de investigación de Bioquímica de la Universidad del Papaloapan, quienes encontraron niveles elevados de metales pesados en algunos afluentes que circundan la ciudad (Galicia 2013, Velázquez, 2022). Con esta información y tomando en cuenta las características de los hongos como posibles organismos biorremediadores de metales pesados se planteó como objetivo del trabajo aislar hongos de aguas contaminadas de la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca para identificarlos y realizar estudios de resistencia y tolerancia a cuatro de los metales más tóxicos: mercurio, cadmio, plomo y cromo. Los microorganismos aislados y caracterizados a partir de fuentes de agua contaminadas de la ciudad de Tuxtepec sentarán las bases de estudios relacionados con la sensibilidad a metales pesados y con la tolerancia a los mismos. Estos resultados podrán ayudar por un lado a establecer protocolos de investigación relacionados con los mecanismos bioquímicos implicados en ambos fenómenos los que darán información relevante para el conocimiento científico. Por otro lado los conocimientos generados podrán ayudar al estudio de su uso como posibles organismos biorremediadores.

MÉTODO

Se seleccionaron tres afluentes de la región de la cuenca del Papaloapan con indicios de contaminación en las orillas y el centro de cada afluente. Estos fueron el río Papaloapan, la laguna Lindavista y el río San Jacinto, localizados los tres dentro de la ciudad de Tuxtepec. Para cada uno de ellos se tomaron tres muestras de agua para realizar los aislamientos. Alícuotas de las muestras fueron sembradas en medio sólido de Agar Papa Dextrosa (PDA) mediante la técnica de estriado simple. Los medios fueron incubados a temperaturas de 25 y 35 grados centígrados y fueron revisadas cada 24 horas hasta observar colonias de microorganismos. Transcurrido el tiempo se seleccionaron los hongos que presentaban características morfológicas características a simple vista, tanto en coloración, tamaño y que no estuvieran contaminados por otros hongos, bacterias o levaduras.

Microscópicamente se evaluó la presencia de hifas, esporas y otras características específicas de cada especie en un microscopio óptico a un aumento de 40 y 100 X empleando azul de lactofenol como colorante; se utilizó el libro "Medical Important fungi: A guide to identification" 5ta Edición. Davise H. Larone y el "Atlas micológico" para la identificación de los hongos, tanto por sus características macroscópicas como microscópicas. La identificación de la especie de hongos y levaduras se llevó a cabo utilizando el equipo de diagnóstico in vitro VITEK2 BIOMÉRIEUX utilizando tarjetas AST YEAST, así como la técnica de MALDI TOF.

RESULTADOS

La figura 1 muestra los tres lugares seleccionados para tomar las muestras de agua: 1) río Papaloapan ($18^{\circ}07'6097''N$ $96^{\circ}11'77885.263''E$), 2) Laguna, Col. Linda Vista ($18^{\circ}03'04.6''N$ $96^{\circ}08'14.7''E$) y 3) Arroyo San Jacinto, Col. Moderna ($18^{\circ}03'44.5''N$ $96^{\circ}08'39.0''E$) todas ellas localizadas cerca de la ciudad San Juan Bautista, Tuxtepec, Oaxaca. Los cuerpos de agua Laguna Lindavista y Arroyo San Jacinto fueron elegidos debido a sus características físicas entre ellas la coloración oscura, el olor y los restos de basura observados. El río Papaloapan fue elegido debido a las determinaciones de contenido de metales pesados que fueron determinados con anterioridad por nuestro grupo de estudio mostrando la presencia de mercurio, plomo y cadmio. Los cuerpos de agua y las muestras recolectadas se muestran en la figura 1.

Figura 1

Sitios de recolección de afluentes contaminados, en la ciudad de San Juan Bautista, Tuxtepec, Oaxaca. (Acervo personal, Lucero Vázquez Velasco).



H2:

Recolección: Río Papaloapan.

Crecimiento en toda la caja: 4 días.

Descripción macroscópica: Coloración verde limón. Crecimiento en la mayor parte de la caja, de aspecto polvoriento.

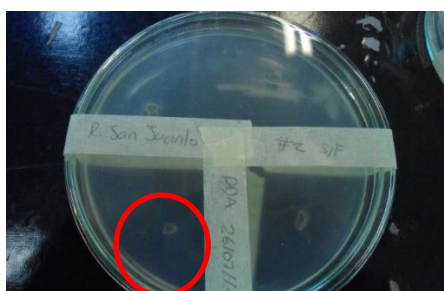


L3:

Recolección: Orillas de la Laguna Lindavista.

Crecimiento en toda la caja: 1 día.

Descripción macroscópica: Colonia de color blanco a crema, brillante a la luz, de un aspecto húmedo. Creció dispersa por estriado en la placa.

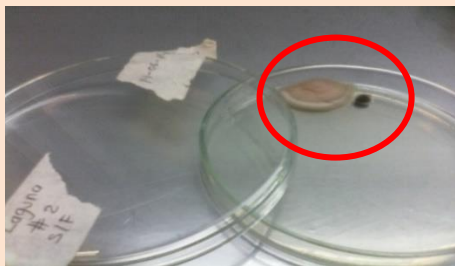


H5:

Recolección: Orillas del arroyo San Jacinto.

Crecimiento en toda la caja: 6 días

Descripción macroscópica: Coloración blanca al inicio y con el pasar de los días alcanza una tonalidad verde con bordes blancos y hendiduras.



H6:

Recolección: Centro de la Laguna Lindavista.
Crecimiento en toda la caja: 6 días.
Descripción macroscópica: Coloración rosa pálido, algodonosa, es uno de los dos hongos que crecieron en la placa y quien tuvo un crecimiento más rápido. Sin mezcla entre ambos.

Después de realizar los procedimientos microbiológicos comentados en la sección anterior, fueron seleccionadas cuatro colonias de microorganismos que presentaron alto grado de pureza y que estaban etiquetadas como: H2, H5, H6 y L3. Las primeras correspondieron a tres hongos y la última a una levadura. Observando sus características micro y macroscópicas y comparando con el manual, se llegó a una primera conclusión identificando el género de los microorganismos aislados. La figura 2 muestra los resultados obtenidos junto con la descripción colonial de los microorganismos.

Figura 2

Descripción macroscópica de las colonias de los hongos y la levadura aislada (Acervo personal, Lucero Vázquez Velasco).



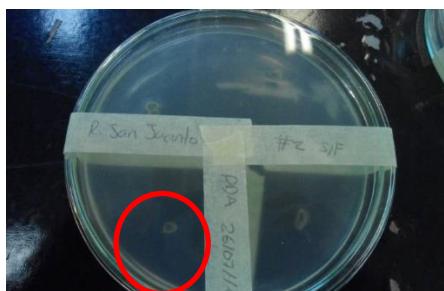
H2:

Recolección: Rio Papaloapan.
Crecimiento en toda la caja: 4 días.
Descripción macroscópica: Coloración verde limón. Crecimiento en la mayor parte de la caja, de aspecto polvoriento.



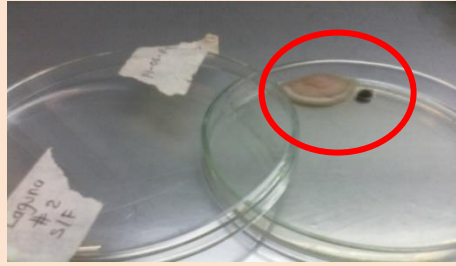
L3:

Recolección: Orillas de la Laguna Lindavista.
Crecimiento en toda la caja: 1 día.
Descripción macroscópica: Colonia de color blanco a crema, brillante a la luz, de un aspecto húmedo. Creció dispersa por estriado en la placa.



H5:

Recolección: Orillas del arroyo San Jacinto.
Crecimiento en toda la caja: 6 días
Descripción macroscópica: Coloración blanca al inicio y con el pasar de los días alcanza una tonalidad verde con bordes blancos y hendiduras.



H6:

Recolección: Centro de la Laguna Lindavista.
Crecimiento en toda la caja: 6 días.

Descripción macroscópica: Coloración rosa pálido, algodonosa, es uno de los dos hongos que crecieron en la placa y quien tuvo un crecimiento más rápido. Sin mezcla entre ambos.

El siguiente análisis correspondió al microscópico. Este, junto con el análisis macroscópico sirvió para realizar una primera identificación. Microscópicamente las cepas mostraron las siguientes características. Cepa H2: Conidióforo compuesto por una vesícula en el extremo de una hifa, con fiálides y esporas globosas. Tipo de hifa hialina septada. Cepa L3: Pseudomicelio unicelular presente, en su mayoría abundante, que consiste en cadenas ramificadas de células ovales o alargadas. Cepa H5: Hifa tabicada hialina. Conidios en ramificación y esporas en hilera. Cepa H6: hifas septadas hialinas, fiálides en forma de frasco y conidios globulosos. Con estos resultados se llegó a establecer que H2 podría corresponder a *Aspergillus* sp, L3 a *Cándida* sp, H5 y H6 a *Penicillium* sp. Las figuras 3 a 6 muestran las observaciones macro y microscópicas de cada una de las colonias aisladas.

Figura 3

Micro y macro morfología de la cepa H2 correspondiente a un posible Aspergillus sp

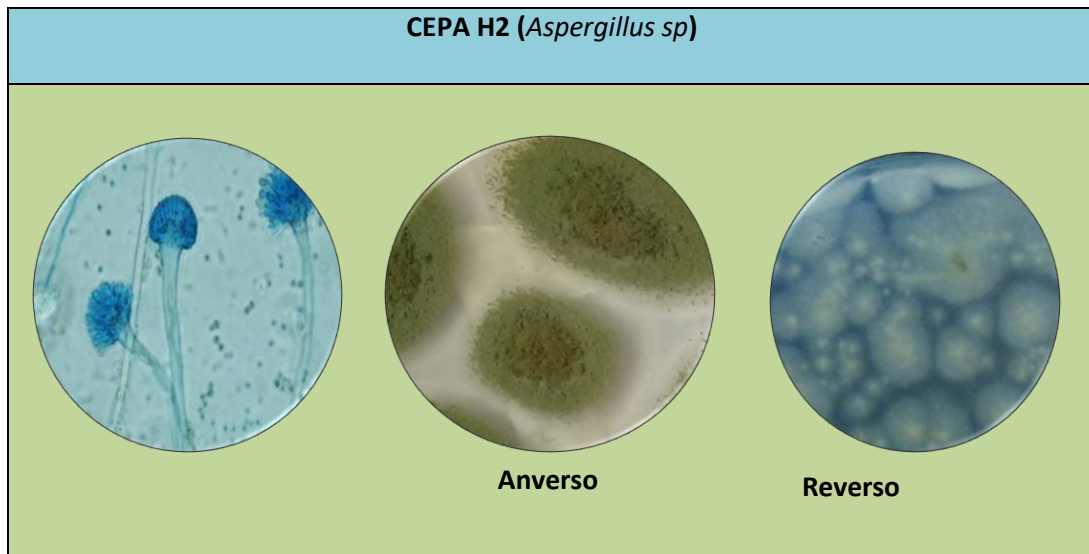


Figura 4

Micro y macro morfología de la cepa L3 correspondiente a una cepa posible de *Cándida s*

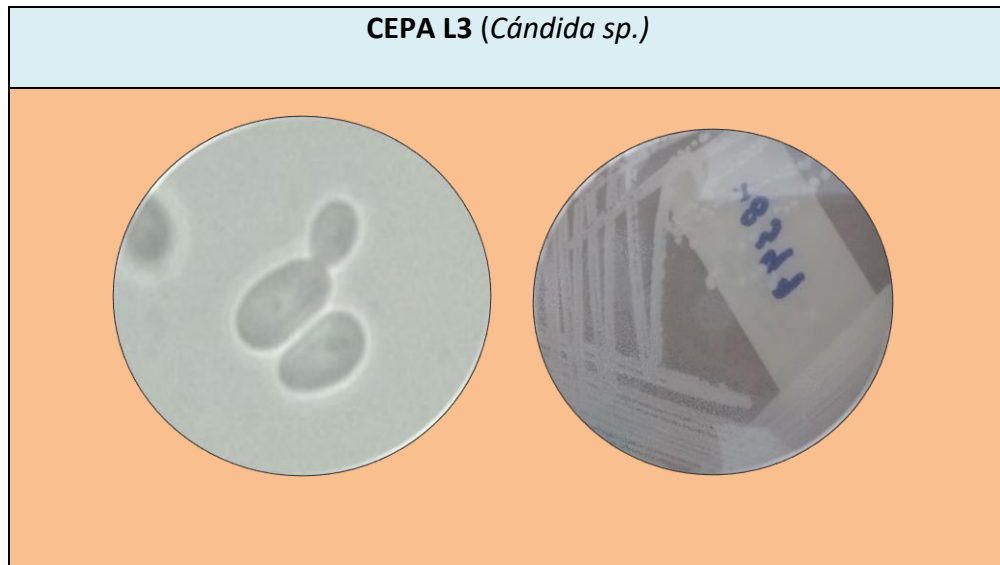


Figura 5

Micro y macro morfología de la cepa H5 correspondiente a posible *Penicillium sp*

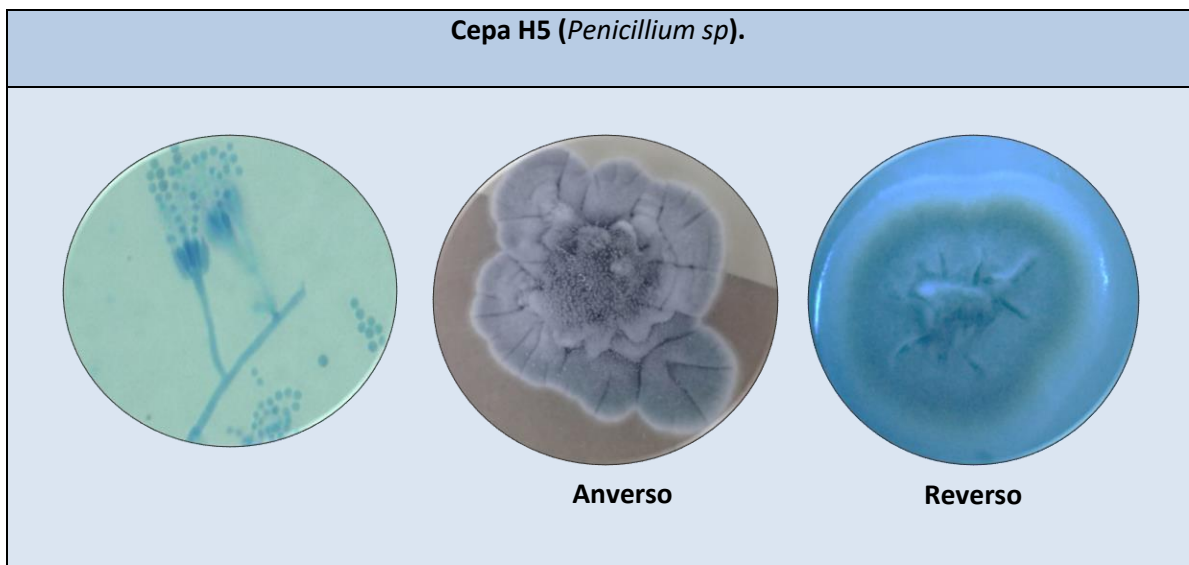
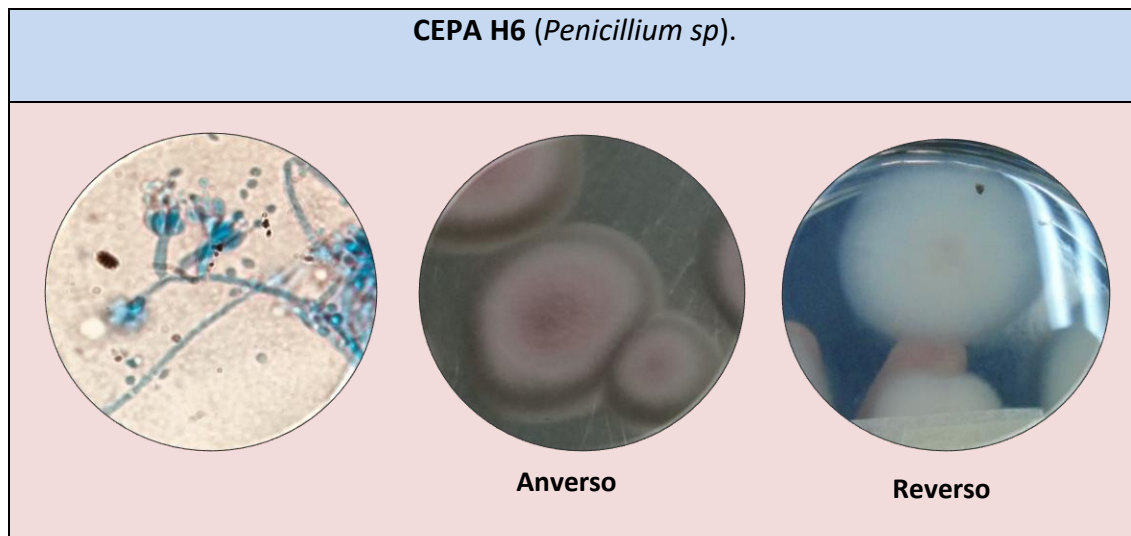


Figura 6

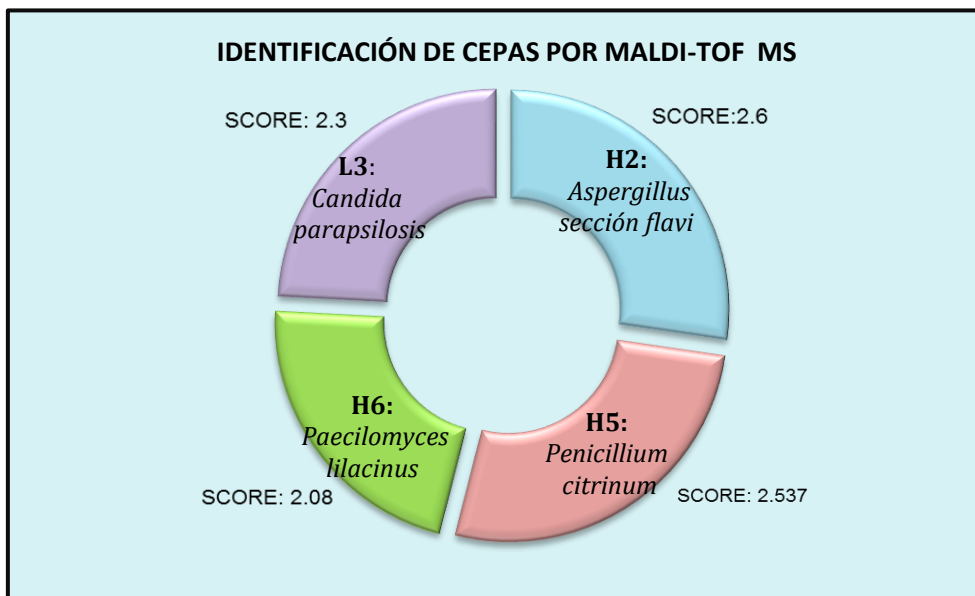
Micro y macro morfología de la cepa H5 correspondiente a posible *Penicillium sp*



Para identificar la especie de las primeras dos cepas de microorganismos y poder distinguir las dos últimas, que por los métodos microbiológicos indicaron una misma especie se llevaron a cabo las técnicas MALDI-TOF y VITEK del equipo Bruker®, con la librería (BK) (MBT_DB_5627_MSP list, Filamentous Fungi Library 1.0, Bruker Daltonics), los resultados indicaron una buena identificación, ya que el fabricante menciona dentro de su técnica que scores mayores a 1.9 resultan muy confiables en la identificación del género y especie en hongos y en levaduras. La figura 7 muestra los resultados de la identificación.

Figura 7

Identificación del género de las especies de estudio mediante la metodología MALDI-TOF MS



Por lo tanto, las cepas aisladas de los afluentes estudiados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1

Microorganismos aislados de cuerpos de agua de la ciudad de Tuxtepec

Muestra	Efluente	Microorganismo aislado
H2	Rio Papaloapan	<i>Aspergillus sección flavi</i>
L3	Laguna Lindavista	<i>Cándida parapsilosis</i>
H5	Arroyo San Jacinto	<i>Penicillium citrinum</i>
H6	Laguna Lindavista	<i>Paecilomyces lilacinus</i>

En relación con los hongos y la levadura aislada e identificada se ha reportado lo siguiente.

Aspergillus sección flavi es un hongo saprófito que presenta micelio macrosifonado, septado y hialino con microconidios redondos y con una cabeza formada por conidióforos largos y vesícula redonda de donde nacen en prácticamente un ángulo de 360° dos series de fiáldes o esterigmas. Es un microorganismo que solo produce esporas asexuales, conidios y cuerpos fructíferos asexuales que hibernan en formas conocidas como esclerosios que son estructuras que les permiten sobrevivir a condiciones desfavorables. Este hongo crece en el suelo en forma de conidios o esclerocios y en tejidos vegetales como micelios. Se encuentra en mayor frecuencia entre las latitudes 16° y 35°, en zonas de clima cálido y no es común por encima de 45°. Es patógeno oportunista en humanos y animales (Amaik y Keller, 2011., Bonifaz, 2012., Cary et al., 2018., Frisvad et al., 2019). Se ha reportado que se han aislado cepas de hongos, incluido *Aspergillus*, de ambientes contaminados y se ha observado que la mayoría de los hongos aislados fueron capaces de tolerar concentraciones de plomo, cadmio, cromo y níquel de hasta 400 ppm. En medios sintéticos el hongo ha demostrado tolerancia y acumulación de los metales níquel, zinc, cadmio, plomo, cromo y cobre (Thippeswamy et al., 2012).

Cándida parapsilosis es una especie de hongo levaduriforme diploide morfológicamente caracterizado por células redondeadas, ovals o alargadas y producen pseudohifas sin llegar a formar hifas verdaderas. Sus colonias son de color blanco, cremoso y de aspecto brillante, lisas o rugosas. Se considera como patógeno emergente y es un microorganismo muy resistente a fármacos (Treviño et al., 2013). En relación con los metales pesados se ha observado que ha mostrado resistencia hasta de 12 mM de sales de los metales zinc, cobre, plomo, mercurio, níquel y cromo. La tolerancia a los diferentes metales se encuentra asociada a la concentración y al tiempo de exposición (Pal y Paul 2008).

Penicillium citrinum es un hongo filamentoso común de distribución mundial y bien puede ser una de las formas de vida más comunes en la tierra. Tiene micelo macrosifonado, septado y hialino, presenta microconidios, conidióforos y esterigmas. Algunas veces este hongo se puede aislar de muestras clínicas y se ha relacionado con algunas afecciones asociadas a una enfermedad subyacente adicional. Son cepas halotolerantes (Lu et al., 2008., Houbraken et al., 2010., Bonifaz, 2012., Fun, 2015). Este microorganismo puede usar compuestos llamados organofosfonatos (que son compuestos contaminantes resistentes a la degradación química, hidrolítica, térmica o fotoquímica) como fuente de carbono. De la misma forma puede crecer en presencia de crudo o hidrocarburos y en residuos de uranio (Zboinsk et al., 1992., Pang et al., 2011).

Paecilomyces lilacinus es un hongo filamentoso, produce un espeso micelio de donde se forman los conidióforos que producen las conidias y se caracterizan por tener conidióforos complejos. Sus hifas poseen una estructura lisa y un espesor de 3 a 5 micras. A partir de estas estructuras se levantan sus conidióforos que producen conidios con carácter fusiforme. Se encuentra en el suelo como saprófito, el aire y las plantas en descomposición, presentándose en una mayor concentración en suelos subtropicales y tropicales. Se encuentra también en alimentos como los granos. Es muy adaptable por lo que puede llegar a ser entomopatógeno, micoparásito, saprófito o nematófago (Samaniego, 2015). Se ha reportado que este hongo es tolerante a los metales cadmio y cromo y que estos metales pueden estimular la actividad de algunas de las enzimas que forman parte del metabolismo antioxidante (que se encarga de disminuir las especies reactivas de oxígeno generadas por los metales pesados) como la superóxido dismutasa (SOD) y la catalasa (CAT) y con ello protegerse de los efectos de los metales mencionados (Zeng et al., 2012., Xu et al., 2017).

DISCUSIÓN

Dentro del área de la microbiología existe una división general de los microorganismos. Aquellos que no poseen organelos se conocen como procariontes (incluidas las bacterias y las arqueobacterias) y los eucariontes (aquellos que poseen núcleo verdadero y organelos membranosos). Al segundo grupo corresponden los hongos, microorganismos que tuvieron que pasar por muchos estudios antes de ser designados dentro de un reino propio. Al igual que muchos microorganismos, plantas o algas; los hongos poseen un metabolismo característico y complicado que muchas veces varía de género en género. Esta diversidad origina un número igual de mecanismos de daño o de resistencia de los y hacia los agentes tóxicos. Se debe entender como agente tóxico a todo aquel compuesto químico que dañe los procesos metabólicos normales de los microorganismos. Estos agentes se clasifican en dos: los naturales y los sintéticos. El problema radica en que a lo largo del desarrollo de la humanidad, la capacidad de uso de los recursos naturales ha rebasado los límites permitidos y como consecuencia se ha originado la contaminación ambiental. Esta resulta de la producción sin medida de desechos y el nulo tratamiento que se hace con ellos. Debido a ello, los organismos que se encuentran en lugares contaminados pueden ser afectados de diversas maneras al entrar en contacto con los contaminantes.

Los hongos pueden crecer en una diversidad de ambientes, entre ellos los contaminados, cuando no son destruidos por los mismos. Para ello desarrollan diversos mecanismos de defensa que les ayudan a sobrevivir. En el caso contrario, los tóxicos podrán inhibir muchos pasos vitales de su metabolismo e interrumpir su ciclo vital originando cambios contrastantes o muerte.

En este trabajo se aislaron tres especies de hongos y una levadura a partir de efluentes de agua contaminada en diferentes grados. Dos de los hongos, *Aspergillus* sección *flavi* y *Paecilomyces lilacinus* podrían tener la capacidad de resistir altas concentraciones de metales pesados bajo condiciones diferentes (pH, salinidad, temperatura, humedad, etc). El hongo restante *Penicillium citrinum* y la levadura *Cándida parapsilosis* resultan microorganismos con amplio margen de análisis experimental que abren un amplio panorama de ideas y preguntas por responder. Para llevar a cabo los siguientes estudios se deberá tomar en cuenta lo publicado en la bibliografía y en base a ello diseñar metodologías experimentales dirigidas a encontrar respuestas y poder formular nuevas preguntas.

Los microorganismos aislados e identificados se encuentran en el medio ambiente y se han clasificado como saprófitos, además de que los cuatro resultan patógenos para diferentes organismos vivos. Este hecho resulta importante y alarmante ya que si estos microorganismos resultan ser tolerantes a metales, muy posiblemente, serán también tolerantes a diferentes agentes antimicrobianos. Tomando en cuenta lo anterior el panorama se torna alarmante ya que si los microorganismos aislados pueden ser tolerantes a metales pesados y a su vez a los antimicrobianos, cuando parasiten a los seres vivos, será más difícil atacarlos y se convertirán en "súper bacterias" muy difíciles de combatir.

Por otro lado cualquier resultado que se pueda obtener abrirá un amplio panorama de estudio dentro del campo de la bioquímica microbiana, la medicina, la toxicología, la farmacéutica, la ecología, la teoría evolutiva y la genética entre otras. Una vez que se obtengan resultados importantes el siguiente paso deberá ser la comunicación de los nuevos conocimientos a la población general ya que la ciencia debe ser comunicada y apropiada por todos los humanos de cualquier edad y sexo. Para ello se deberán establecer participaciones en eventos de difusión de la ciencia o publicar los resultados en medios que lleguen a todos los pobladores, escritos de forma clara y amena con un lenguaje apropiado para poder ser comprendidos.

Lo anterior nos lleva a la conclusión de que todas las ramas de la ciencia confluyen en algún punto ya que parten del interés de estudiar y comprender diversos fenómenos relacionados con la vida en nuestro planeta. Sea cual sea la rama que se elija, el fin común será la comprensión de algún fenómeno relacionado directa o indirectamente con los fenómenos biológicos. De esta manera la comprensión de los mecanismos de toxicidad y tolerancia de muchas especies vivas hacia diversos agentes contaminantes es un área de estudio de la ciencia que se relaciona con muchas otras más. Si se lleva a cabo la interacción correcta entre ellas se podrá lograr un conocimiento más integral de los fenómenos que han sido objeto de estudio de muchas personas a lo largo de la historia.

REFERENCIAS

- Amaike, S., & Keller, N. P. (2011). *Aspergillus flavus*. Annual Review of Phytopathology. 49, 107-133. doi: 10.1146/annurev-phyto-072910-095221
- Bonifaz, A. (2012). *Micología Médica Básica*. McGraw-Hill
- Beltrán, P. M. E., & Gómez, R. A. M. (2015). Metales pesados (Cd, Cr, Hg): su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación. *Investigación, innovación, Ingeniería*. 82(29), 1-32
file:///C:/Users/UNPA%20INT%2001612/Downloads/ojsub,+Metales+pesados+(Cd,+Cr+y+Hg)-+su+impacto+en+el+ambiente+y+posibles+estrategias+biotecnolo%CC%81gicas+para+su+remediacio%CC%81n.pdf
- Cary, J. W., Gilbert, M. K., Lebar, M. D., & Majumdar, R. (2018). *Aspergillus flavus* Secondary Metabolites: More than Just Aflatoxins. *Food Safety*. 6(1), 7-32 doi: 10.14252/foodsafetyfscj.2017024
- Casadejesus. R. (2013). Bases Filosóficas de la Teoría de la Evolución. *Pensamiento*. 69(261), 701-715
file:///C:/Users/UNPA%20INT%2001612/Downloads/4669-Texto%20del%20art%C3%ADculo-10583-1-10-20141127.pdf
- Castañe, P. M., Topalián, M. L., Cordero, R. R., & Salibian, A. (2003). Influencia de la especiación de los metales pesados en medio acuático como determinante de su toxicidad. *Revista de Toxicología*. 20(1), 13-18 <https://www.redalyc.org/pdf/919/91920103.pdf>
- Celis-Bustos, Y. A., Rubio, V. V., & Camacho-Navarro. M. M. (2017). Perspectiva histórica del origen evolutivo de la resistencia a antibióticos. *Revista Colombiana de Biotecnología*. 19(2), 105-117 <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v19n2/0123-3475-biote-19-02-00105.pdf>
- Cervantes, C., & Moreno-Sánchez, R. (1999). *Contaminación ambiental por metales pesados. Impacto en los seres vivos*. AGT Editor.
- Covarrubias. S. A., & Peña, C. J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitoremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 33, 7-21 DOI: 10.20937/RICA.2017.33.esp01.01
- Dhankhar, R., & Hooda, A. (2011). Fungal biosorption: an alternative to meet the challenges of heavy metal pollution in aqueous solutions. *Environmental Technology*. 32(5-6):463-491 doi: 10.1080/09593330.2011.572922.
- Darwin, C. (1982). *El origen de las especies*. "Colección Sepan Cuantos". Editorial Porrúa.
- Darwin, C. (2013). *Viaje de un naturalista alrededor del mundo (I)*. Serie Biblioteca Científica. AKAL Básica de Bolsillo.
- Darwin, C. (2013). *Viaje de un naturalista alrededor del mundo (II)*. Serie Biblioteca Científica. AKAL Básica de Bolsillo.
- Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. *ANALES Sis San Navarra*. 26(1), 141-153 <https://scielo.isciii.es/pdf/asisna/v26s1/ocho.pdf>
- Frisvad, J. C., Hubka, V., Ezekiel, C. N., Hong, S. B., Novakova, A., Chen, A. J., Arzanlou, M., Larsen, T. O., Sklenar, F., Nohakamchanakul, W., Samson, R. A., & Houbraken, J. (2019). Taxonomy of *Aspergillus* section *flavi* and their production of aflatoxins, ochratoxins and other mycotoxins. *Studies in Mucology*, 93, 1-63 doi: 10.1016/j.simyco.208.06.001
- Fun. (2015). *Penicillium citrinum*. Fun with Microbiology (What is Beggin you?). <http://thunderhouse4-yuri.blogspot.com/2015/08/>

Galicia, A. J. A. (2013). Efecto de la exposición a plomo en bacterias aisladas de efluentes contaminados. Tesis de Licenciatura. Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec, Oaxaca. México.

Gallardo, N. M. (2017). Evolución. El curso de la vida. (2017). Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias. Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas. <http://sitiosciencias.uach.cl/EvolucionElCursodeLaVida2017.pdf>

González-Hernández, J. C., & Peña, Antonio. (2022). Estrategias de adaptación de microorganismos halófitos y *Debaromyces hansenii* (Levadura halófila). *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 44(3-4), 137-156 https://www.medigraphic.com/pdfs/lamico/mi-2002/mi02-3_4g.pdf

Herrera, J. L. (2014). Viaje al asombroso mundo de los hongos. Colección la Ciencia para Todos. Fondo de Cultura Económica.

Houbraken, J. A. M. P., Frisvad, J. C., & Samson, R. A. (2010). Taxonomy of *penicillium citrinum* and related species. *Fungal Diversity*. 44, 117-130 doi: 10.1007/513225-010-0047-2

Malik, A. (2004). Metal bioremediation through growing cells. *Environment International*. 30, 261-278 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.08.001>

Marcano, G. K. A., & Delvasto, A. P. L. (2016). Contaminación en suelos por metales pesados debido a la presencia de pilas gastadas. *Revista de Investigación*. 88(140), 78-104 <http://ve.scielo.org/pdf/ri/v40n88/art05.pdf>

Pang, C., Liva, Y. H., Cao, X. H., Li, M., Huang, G. L., Hua, R., Wang, C. X., Liu, Y. T., & An, X. F. (2011). Biosorción of uranium (VI) from aqueous solution by dead fungal biomass of *Penicillium citrinum*. doi: 10.1016/j.cej.2010.10.068

Pal, A., & Paul, A. (2008). Microbial extracellular polymeric substances: central elements in heavy metal bioremediation. *Indian Journal of Microbiology*. 48(1), 49-64 doi: 10.1007/s12088-008-0006-5

Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintanar, C., & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la Industria Minera. *Ecología Aplicada*. 5(1-2), 1-7 <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v5n1-2/a20v5n1-2.pdf>

RBA. (2016). La evolución. El fenómeno más complejo del universo. Colección Un paseo por el Cosmos. Rodesa, Villahuerta.

Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en la salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*. 16(2), 66-77 <file:///C:/Users/UNPA%20INT%2001612/Downloads/DialnetContaminacionPorMetalesPesados-6096110.pdf>

Rodríguez, E. M., Mc Laughlin, M., & Pennock, D. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura <https://www.fao.org/3/i9183es/i9183es.pdf>

Rodríguez Peña Carol. (2017). El hábitat de los microbios. *Revista Ciencia de la Academia Mexicana de Ciencias*, 68(2), 19-25 https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/68_2/PDF/HabitatMicrobios.pdf

Samaniego, B. J. C. (2015). Efectos de la concentración de carbono y la relación carbono/nitrógeno sobre la producción de conidios de *Paecilomyces lilacinus*. Tesis de Licenciatura. Universidad de San Francisco de Quito. USFQ. Quito. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/5593>

Sánchez-Fresneda, P. R. (2013). Caracterización del gen ATC1 de *Cándida parapsilosis*. Clonación, estudio fenotípico e interacción con el sistema inmunitario. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. Proyecto de Investigación. <http://hd1.handte.net/102011/30337>

Santiago, A. D., Ojeda, F. R., & Suzan, G. A. (2020). La vida, sus propiedades, orígenes y búsqueda. *Revista Ciencia de la Academia Mexicana de Ciencias*. 71(1), 72-79. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/71_1/PDF/11_71_1_1142_LaVida.pdf

Thippeswamy, B., Shivakumar, C. K., & Krishnappa, M. (2021). Bioaccumulation potential of *Aspergillus niger* and *Aspergillus flavus* for removal of heavy metals from paper effluents. *Journal of Environmental Biology*. 33(6), 1063-1068. <https://imsear.searo.who.int/handle/123456789/148471>

Velázquez, V. R. M. (2022). Microorganismos aislados de efluentes contaminados de la región de Tuxtepec, Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec, Oaxaca.

Xu, X.; Xia, L.; Chen, W.; Huang, Q. (2017). Detoxification of hexavalent chromate by growing *Paecilomyces lilacinus* XLA. *Environmental Pollution*, 225, 47-54. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.039>

Zboinska, E., et al. (1992). Degradation of organophosphonates by *Penicillium citrinum*. *Letters in Applied Microbiology*. 15: 269-272.

Zeng, Xiao-xi; Chai, Li-yuan; Tang, Jian-xin; Liu, Zhi-hui; Yang, Xue-duan. (2013). Taxonomy characterization and cadmium biosorption of fungus strain. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 2759-2765. doi: 10.1016/S1003-6326(13)62794-6

Zhen-Yu, L., Zhang-Jian, Li., Wen-Zhang, W., Du, L., Tian-Jiao, Z., Yu.Chin, F., Qian-Qun, G., & Wei-Ming, Z. (2008). Citrinin Dimers from the Halotolerant Fungus *Penicillium citrinum* B-57. *Journal of Nature Products*. 71, 543-546. doi: 10.1021/np0704708.