Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias

BUAP

www.rlac.buap.mx

Aplicaciones de la biorremediación

Applications of Biorremediation

Víctor Ángel Cuautle Hernández, Lizbeth Mendoza Patiño, Miguel Minto Rojas, Samuel Gil Mota, Norma Anacleto Jiménez, María Fernanda Vásquez Contreras, Pedro Ortíz Pacheco, Evelin Jazmín Cortes García, Paola Flores Marín, José Carlos Mendoza Hernández*, Gabriela Pérez Osorio.

Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad Universitaria, Av.San Claudio y Blvd. 18 Sur, Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue., México.

* josecarlos.mendozahdez@gmail.com

RESUMEN. En la actualidad, debido a las actividades humanas la emisión de contaminantes en todas sus formas es una de las problemáticas que ocasiona el cambio climático, para ello se buscan estrategias que eliminen o degraden los contaminantes. En el presente trabajo se presenta una revisión general sobre biorremediación que es una herramienta muy útil para lograr el objetivo, para ello se llevó a cabo un estudio sobre las diferentes formas donde la biorremediación degrada cierto tipo de contaminantes mediante el uso de microorganismos, así mismo de trabajos realizados en los cuales este proceso ha demostrado ser eficaz.

ABSTRACT. Currently, due to human activities, the emission of pollutants in all its forms is one of the problems caused by climate change, for this purpose strategies are sought to eliminate or degrade pollutants. In the present work a general review on bioremediation is presented that is a very useful tool to achieve the objective, for this a study was carried out on the different ways where bioremediation degrades certain types of contaminants through the use of microorganisms, as well as work carried out in which this process has proven to be effective.

Palabras clave
Biorremediación, Contaminación, bacterias, microorganismos.

Keywords
Bioremediation, Contamination, bacteria, microorganisms.

INTRODUCCIÓN

La biorremediación se considera una tecnología ecológica y de bajo costo basada en la degradación de contaminantes por procesos microbiológicos, como la bioacumulación, biomineralización, biosorción, biolixiviación o biotransformación. También se define como el proceso mediante el cual los desechos orgánicos pueden degradarse biológicamente en

condiciones controladas a un estado inocuo, o a niveles por debajo de los límites de concentración respectivos (Ferchichi, 2005).

Es un proceso gestionado o espontáneo en el que las reacciones químicas mediadas por organismos biológicos degradan o transforman los contaminantes en formas menos tóxicas o no tóxicas, remediando o eliminando así la contaminación ambiental. La biorremediación se puede realizar in situ, donde el material contaminado permanece en su ubicación original, o ex situ, después de retirar el material contaminado de la ubicación original para su tratamiento, almacenamiento a largo plazo o eliminación permanente.

Con relación a otras tecnologías, la biorremediación, suele tener costos más bajos, provoca una menor intrusión en el sitio contaminado y en consecuencia, un daño ecológico menos significativo en el proceso de destrucción de los productos contaminantes.

Diversos autores, coinciden en que a menudo, la biorremediación se puede hacer en el lugar, eliminando así los costos de transporte y pasivos, lo cual permite que el uso y fabricación industrial del sitio pueda continuar mientras el proceso de biorremediación se está aplicando (FAO, 2019).

Adicionalmente, la biorremediación puede ser integrada con otras tecnologías en cadena, favoreciendo el tratamiento de los residuos mezclados y complejos, además tiene la capacidad de reducir o descomponer de forma segura los contaminantes resultantes del proceso de recuperación.

La biorremediación también tiene sus limitaciones y desventajas. Algunos productos químicos, por ejemplo, compuestos altamente clorados y metales pesados, no son fácilmente susceptibles a la degradación biológica y la estabilización. Para algunos productos químicos, la degradación microbiana puede conducir a la producción de sustancias tóxicas o más volátiles que el compuesto de origen .

La biorremediación, se ha convertido en una alternativa atractiva y prometedora a las tradicionales técnicas físico-químicas para la remediación de los compuestos que contaminan un determinado lugar, ya que ha demostrado ser más rentable y puede degradar selectivamente los contaminantes sin dañar su flora y fauna autóctonas (Ferchichi, 2015).

El presente artículo se enfocará en estudiar la biorremediación en el medio ambiente, ya que debido a la variedad de contaminantes que existen se han provocado cambios ecológicos en el agua, suelo aire, etc. Estos cambios provocan grandes consecuencias como escasez de agua, inseguridad alimentaria, incremento del cambio climático y a nivel social puede aumentar la pobreza en el ser humano. Así, el presente trabajo permitirá mostrar los diferentes ámbitos en los que se emplea la biorremediación, y profundizar los conocimientos teóricos sobre cada uno de los procesos.

MARCO TEÓRICO

La biorremediación es una tecnología que implica elementos biológicos (microorganismos), su principal función es trasformar los desechos en productos menos tóxicos. En general los microorganismos más usados son: bacterias, algas y hongos. En el proceso de biorremediación (microorganismo-contaminante) puede resultar de la siguiente manera:

- Mineralización: Si el contaminante se degrada en su totalidad

- Biotransformación: Algunas sustancias no se degradan sino se transforman, en este proceso puede resultar nociva que en su forma original.
- Recalcitrantes: Son sustancias que no se degradan y pueden permanecer en el ambiente durante mucho tiempo por su resistencia fisicoquímicas como la radiación ultravioleta o la oxidación.

La Biorremediación in situ se refiere al tratamiento de compuestos tóxicos en el lugar donde se ha producido la contaminación. A su vez hay dos tipos de técnicas de biorremediación in situ.

- Bioaumento o biomagnificación: Adición de microorganismos naturales o modificados genéticamente al medio.
- Bioestimulación: Modificación del medio para reforzar el crecimiento de los microrganismos. Normalmente se adicionan nutrientes, oxigeno, etc.
- Fitorremediación: hace referencia a una serie de tecnologías que se basan en el uso de plantas para limpiar o restaurar ambientes contaminados, como aguas, suelos, e incluso aire.

Por otro lado, la biorremediación ex situ es el tratamiento de residuos tóxicos se realiza en biorreactores. Los biorreactores vía suspensión se utilizan para la biorrecuperación de terrenos contaminados.

Fases de la biorremediación

- Fase de latencia: las bacterias están en reposo, aclimatándose y esperando recibir nutrientes. En esta fase se producen las enzimas necesarias para poder crecer.
- Fase de crecimiento: esta fase es clave en el desarrollo del biofilm. Es el periodo de la curva del crecimiento en el cual los microorganismos crecen exponencialmente. Si se dan las condiciones adecuadas la velocidad de crecimiento es máxima.
- Fase de decrecimiento: La tasa de crecimiento disminuye como consecuencia del agotamiento de nutrientes. Esta fase se alcanza cuando las bacterias empiezan a agotar los recursos que están disponibles para ellas y se caracteriza por un valor constante del número de bacterias a medida que la tasa de crecimiento de las bacterias se iguala con la tasa de muerte bacteriana. La colonia alcanza el equilibrio.
- Fase endógena: Las bacterias utilizan sus reservas de nutrientes para mantenerse vivas hasta que se agotan. El agotamiento de las reservas provocaría la muerte de las bacterias y la destrucción del biofilm.

Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica, también denominada biometanización o producción de biogás, es un proceso biológico complejo y degradativo donde actúan en forma coordinada un grupo de microorganismos especializados en la degradación de diferentes sustratos orgánicos. Esta degradación se da en ausencia de oxígeno dentro de tanques totalmente herméticos llamados biodigestores (FAO, 2019).

Co-digestión Anaerobia

Si se aplica la modalidad de tratamiento simultáneo de varios residuos, se lleva a cabo el proceso denominado co-digestión anaerobia. La ventaja más relevante, es el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas al compensarse las carencias de la digestión por separado de cada uno de los sustratos. Como resultado, se incrementa el potencial de producción de biogás y se evitan problemas de inhibición. Además, se unifica la gestión de los residuos al compartir las instalaciones y se reducen costes de inversión y explotación (Mata, 2000).

Producción de biogás

Los procesos de digestión anaeróbica se han aplicado a menudo para la estabilización biológica de desechos sólidos y líquidos provenientes de la industria alimentaria principalmente. Estos procesos generan energía en forma de biogás, el cual es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas (FAO, 2011). El biogás como energía renovable no solo lleva a la producción de energía limpia, sino que también incluye el cuidado del medio ambiente reduciendo el efecto invernadero. Como subproducto de este proceso se genera un efluente con alto potencial fertilizante con excelentes propiedades agronómicas (García, 2019).

Hoy en día, la fermentación de hidrógeno y metano de alta velocidad a partir de biomasa renovable ha atraído mucha atención debido a los problemas ambientales actuales, particularmente relacionados con el calentamiento global por lo que la investigación a escala de laboratorio sobre este tema se ha acelerado significativamente.

Producción De Hidrógeno

La obtención de hidrógeno ha despertado interés como una nueva alternativa a los combustibles tradicionales debido a su elevado poder calorífico, 141.8 MJ/kg, casi tres veces superior que el del metano (Park, 2005). Asimismo, su obtención se distingue por el carácter limpio asociado a su combustión, con la generación exclusiva de agua y dióxido de carbono como productos.

BIORREMEDIACIÓN DE SUERO DE LECHE

Las industrias lácteas representan una parte integral de la industria de procesamiento de alimentos, produciendo cantidades considerables de descargas líquidas, principalmente suero de leche, el cual puede contener proteínas, sales, sustancias grasas, lactosa y diversos tipos de productos químicos de limpieza y su descarga continua sin previo tratamiento a los cuerpos de agua causa un rápido consumo de oxígeno, lo que produce eutrofización, formación de jabón, salinización, intoxicación de animales acuáticos, generación de malos olores y acidificación, entre otros elementos. En adición de que, en muchos países, incluyendo México, se producen grandes cantidades de suero en exceso que, sumados al vertimiento de aguas residuales de otros procesos, plantean un problema de eliminación considerable.

Por ello, la conversión de suero en metanol e hidrógeno significa un proceso beneficioso para la reutilización y biorremediación de este subproducto industrial altamente contaminante, también mitiga la necesidad de procesos de tratamiento de efluentes complejos

y costosos necesarios para la eliminación del suero. Además, el proceso se ve impulsado aún más por la creciente demanda de biogás como una alternativa a los combustibles fósiles, que son tanto altamente contaminantes como de oferta limitada.

La utilización del lactosuero en procesos de co-digestión se ha propuesto como una alternativa para evitar algunos de los posibles problemas derivados de su reducido contenido en alcalinidad o nutrientes. La mayoría de los trabajos publicados se han orientado a la co-digestión con residuos ganaderos lo cuales se caracterizan por su reducido contenido en materia orgánica frente al nitrógeno, favoreciendo reducidas relaciones C/N. Sin embargo, en su composición hay presencia tanto de micro como macronutrientes, necesarios para el crecimiento de los microorganismos anaerobios, así como suficiente alcalinidad para evitar problemas de acidificación (Rico, 2015).

La influencia del pH debido a su importancia en la actividad de los microorganismos ha sido estudiada por varios autores intentando establecer un valor que optimice el rendimiento de producción. Ferchichi et al. (2005), realizaron pruebas de fermentación de lactosuero con C.saccharoperbutylacetonicum evaluando la influencia del pH inicial sobre el potencial de producción de hidrógeno, los tiempos de retención y la duración de la fermentación. En el estudio mencionado se obtuvieron los mejores resultados para un pH inicial de 6. Davila Vazquez et al. (2008), aplicaron un cultivo mixto como inóculo y realizaron un diseño de experimentos analizando el efecto del pH y la concentración inicial de sustrato. De igual modo, obtuvieron resultados satisfactorios para pH 6. Yang et al. (Yang, 2007), también optaron por esta opción de inóculo en los ensayos que realizaron aplicando diferentes relaciones de concentración inóculo/sustrato inicial.

La importancia de la microbiología de la fermentación ha suscitado el interés en varias investigaciones. Rai et al. (2012), mejoraron los rendimientos de producción a partir de lactosuero a través de la inmovilización de Enterobacter aerogenes, Rosales Colunga et al. (2010), plantearon la posibilidad de manipular genéticamente cepas de Escherichia coli con esta misma finalidad. Por otro lado, también se han probado nuevas técnicas de pretratamiento como la denominada cavitación hidrodinámica para favorecer a las especies productoras de H_2. La posibilidad de mejorar el rendimiento de producción mediante la realización de la fermentación de una mezcla de varios substratos resulta una alternativa de interés. Recientemente, se han llevado a cabo pruebas de co-fermentación de lactosuero con restos de fruta que han permitido producir 449.8 mLH_2/gDQO (Gómez, 2014).

BIORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS

Los hidrocarburos son compuestos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno, considerados compuestos básicos de la química orgánica. Su empleo se ha constituido en un propulsor importante para el desarrollo de la humanidad, a pesar de que ha contribuido a eventos catastróficos a nivel ambiental por la contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos producto del derrame de estos compuestos de petróleo y sus derivados. En el caso de los suelos, las principales consecuencias ambientales que se presentan son: la reducción o inhibición del desarrollo de la cobertura vegetal, cambios en la dinámica poblacional de la fauna, de la biota microbiana y contaminación por infiltración a cuerpos de agua subterráneos.

Los derrames de hidrocarburos también causan problemas de tipo económico, social y de salud pública en las zonas aledañas al lugar afectado. Así, la biorremediación surge como

una alternativa ecotecnológica para mitigar el daño causado en el suelo y agua por los derrames de estos compuestos. Esta tecnología usa microorganismos, plantas o enzimas de manera estratégica, con el fin de restaurar la calidad ambiental de acuerdo con las necesidades y dimensiones del problema.

En la biorremediación se presentan como unas de sus principales estrategias, la bioestimulación y la bioaumentación, siendo la primera definida como la adición de nutrientes, principalmente fuentes de nitrógeno y fósforo, para favorecer el crecimiento y desarrollo microbiano, al igual que la estimulación por medio de adición de agua, oxígeno y otros elementos que mejoren el desarrollo de los microorganismos. La bioaumentación se entiende como la adición de microorganismos endógenos o exógenos a un lugar específico (para este caso, degradadores de hidrocarburos), con el fin de fomentar la degradación y disminuir el tiempo de reducción del contaminante.

En 2019 las autoras Reyes y Yislen realizaron un trabajo de investigacion el cual tuvo como objetivo la comparación de tres meto..dos de biorremediación usando como campo de estudio el suelo afectado por un derrame de diesel ubicado en una celda de almacenamiento en la planta San Benito en Nicaragua. Los metodos de biorremediación empleados fueron biorremediación natural (BDN), biorremediación con activadores enzimaticos (BDAE) y biorremediación con lactosuero (BLS).

Para llevar a cabo el experimento se implementaron celdas para mantener aisladas y protegidas las muestras de suelo contaminado, posteriormente se separaron en tres grupos cada uno fue tratado por un metodo de biorremediación, al primer grupo se le realizaron aplicaciones semanales de activador enzimatico comercial, al segundo se le realizaron aplicaciones semanales de lacto suero y al tercero se le adiciono agua tratada para mantener la humedad, estas aplicaciones se realizaron un vez por semana. Los resultados obtenidos mostraron porcentajes de remocion similares para la biorremediacion con lactosuero y la biorremediacion con activadores enzimaticos, esto supone que la mejor opción es la biorremediacion con lactosuero debido al bajo costo que esto supone al ser un producto derivado de la industria lactea.

BIORREMEDIACIÓN DE PESTICIDAS

Los plaguicidas son compuestos químicos que se emplean para aplicar y controlar a los parásitos y enfermedades que atacan a los diferentes cultivos. Pueden ser tóxicos para el ser humano y causar efectos tanto agudos como crónicos sobre la salud, en función de la cantidad y del modo de exposición. Según el tipo de organismo que se desee controlar y la etapa del ciclo de vida se pueden clasificar en: Insecticidas, Herbicidas, garrapaticidas,Nematicidas, Molusquicidas, Rodenticidas, Bacteriostático, Bactericidas y fungicidas.

Los plaguicidas suelen acumularse en el ambiente y ser transportados a través del suelo llegando a contaminar aguas subterráneas, lo que implica un alto riesgo al ambiente y a la salud del ser humano, debido a la exposición a estas sustancias a través de los alimentos y el consumo de agua, al ser ingresado en el cuerpo produce daños irreversibles a los órganos vitales, es especialmente peligroso o significativamente alergénico para el hombre. En el suelo la persistencia de este contaminante es de años a meses, dañando la actividad biológica del suelo y el pH, las plantas suelen absorber el insecticida, por lo que provoca daños en humanos al ser ingeridos, en suelos arcillosos y limosos suelen retener más sustancias toxicas. En el aire suelen volatilizarse, contaminando la atmosfera, provocando daños en la

salud. En el agua pueden incorporarse por infiltración a los mantos acuíferos, por descargas de aguas residuales de industrias productoras de plaguicidas, por aplicación aérea sobre el terreno y por arrojo de residuos liquido de los envases de productos químicos. Factores como sus propiedades físicas y químicas, el clima, las condiciones geomorfológicas de los suelos y las condiciones hidrogeológicas y meteorológicas de las zonas, definen la ruta que siguen los mismos en el ambiente, también dependen de otras variables, como humedad, temperatura, materia orgánica, tipo de arcilla, pH, intercambio iónico del suelo, así como de las características fisicoquímicas del compuesto de que se trate.

BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON PESTICIDAS MEDIANTE HONGOS

Los plaguicidas pueden desplazarse fuera de su objetivo, lo que provoca la contaminación de masas de agua sensibles y causa efectos adversos en las especies que las habitan. Mediante las mejores prácticas de gestión, como la implantación de franjas vegetales de protección, se puede reducir el desplazamiento de los plaguicidas fuera del objetivo y aumentar la degradación de los compuestos mediante la fitorremediación. En este estudio, se plantaron lirios azules (*Iris versicolor*), juncos (*Andropogon virginicus*) y pasto varilla *(Panicum virgatum*) en suelos tratados con uno de los tres pesticidas más utilizados. A los 28, 56 y 112 días después del tratamiento (DAT), las plantas se cosecharon de forma destructiva y se analizaron los residuos de pesticidas en el suelo y en la vegetación aérea y subterránea mediante cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC). En relación con la cantidad de plaguicida encontrada en las macetas plantadas en comparación con las no plantadas, se encontró que *I. versicolor* redujo en un 58,7% la atrazina en el suelo en comparación con las macetas no plantadas a los 112 DAT. *I. versicolor* también fue la más capaz de reducir la azoxistrobina, en un 86,9% en comparación con las macetas no plantadas, del suelo a los 112 DAT. En el mismo momento de muestreo, *I. versicolor y P. virgatum* redujeron más imidacloprid del suelo en un 62,5% y un 64,3% en comparación con las macetas no plantadas, respectivamente. Esta información apoya la recomendación de establecer diversas especies de plantas especies vegetales para optimizar las capacidades de fitorremediación. (Jaramillo B. 2021)

BIORREMEDIACIÓN DE PESTICIDAS MEDIANTE BACTERIAS

Otra técnica de biorremediación puede ser por medio de acción microbiana, en un estudio aislaron bacterias degradables de imidacloprid, en un medio salinizado por una duración de 25 días, las cepas fueron caracterizadas en base a su bioquímica y características moleculares. Entre 5º aislamientos del suelo bacterianos del suelo *Bacillus sp., Brevibacteriumsp., Pseudomonas putida F1, Bacillus subtilis y Rhizobium sp*. Fueron capaces de degradar entre un 25,36% y un 45,48%de la cantidad inicial de imidacloprid a la concentración

Biorremediación de suelos contaminados con fertilizantes nitrogenados

El nitrógeno es una de las moléculas químicas esenciales para la vida, ya que forma parte de la estructura de moléculas tan importantes como ácidos nucleicos, aminoácidos, proteínas, o alcaloides, pues las funciones del nitrógeno son de tipo estructural y osmótico.

Este elemento es el más abundante de los gases que conforman la atmosfera ya que representa el 78% de la mezcla. No obstante, se encuentra en forma de óxidos de nitrógeno

o N_2 principalmente y de esta manera no puede ser asimilado por las plantas ya que sus raíces lo absorben en forma de ion amonio y nitrato.

Sin embargo, aumento de la producción agrícola ha impulsado al implemento de fertilizantes nitrogenados. En la década 1990-2000, los países no desarrollados y en vías de desarrollo incrementaron el consumo de fertilizantes nitrogenados en un 4.5% año (Millarium, 2004).

El principal objetivo es nutrir los cultivos para un mejor desarrollo y producción de los mismos, sin embargo, el uso desmedido de los fertilizantes nitrogenados ha traído consigo daños que han generado un impacto ambiental negativo pues exceso de N disponible en suelos genera movimiento de nitrógeno inorgánico (N-nitrato) descendente más allá de la zona radicular, generándose una elevada pérdida de éste vía lixiviación de NO^{3-} hacia aguas subterráneas y posterior recirculación en aguas superficiales.

Los nitratos se encuentran de manera natural en extensos ecosistemas acuáticos en concentraciones moderas. Sin embargo, los niveles de nitratos en el agua han aumentado debido a actividades antrópicas como excretas de animales o la agricultura.

Por otro lado, Benavides et. al. señalan que otro problema causado por el exceso de fertilizantes nitrogenados en el suelo es la salinización, cuyos efectos pueden provocar perdida de fertilidad, elevación osmótica de la solución del suelo, reducción del potencial hídrico, además, puede afectar la estabilidad estructural por la dispersión de arcillas dando problemas de infiltración del agua en el suelo.

BIORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO CON EXCESO DE NITROGENO MEDIANTE BACTERIAS DESNITRIFICANTES

Una manera de biorremediación de suelos contaminados por fertilizantes nitrogenados es mediante la adición de microorganismos autóctonos capaces de realizar el proceso de desnitrificación, el cual es un proceso biológico que juega un papel importante en el ciclo del nitrógeno.

La desnitrificación se lleva a cabo en condiciones anóxicas, donde previamente el nitrato es reducido a nitrito, y posteriormente a óxidos de nitrógeno o N_2, mediante la acción de bacterias heterótrofas facultativas, las cuales utilizan el carbono de la materia orgánica para la síntesis celular y fuente de energía, y en ausencia de oxígeno utilizan el nitrato como aceptor de electrones.

Benavides et. al., 2017 demostraron mediante un estudio que la disminución de la concentración de nitratos en el suelo se llevó a cabo por bacterias aisladas de un suelo contaminado con fertilizantes nitrogenados ya que estas tenían la capacidad de desnitrificar el suelo. La biorremediación se realizó con un consorcio nativo de bacterias desnitrificantes, lo que permite combinar y complementar las funciones metabólicas de diferentes microorganismos, para que colectivamente desnitrifiquen el suelo.

BIORREMEDIACIÓN DE N AMONIACAL y NOx a BASE DE MICROALGAS

Las algas son un grupo de organismos fotosintéticos y necesitan una fuente de luz solar, nitrógeno y carbono para su desarrollo. Las microalgas requieren de un suministro suficiente de nitrógeno ya que constituye una parte importante de su biomasa. Sin embargo, como todos los organismos, su desarrollo está en función de ciertas condiciones, entre ellas, altas concentraciones de esta fuente de N.

El nitrito o los NOx son tóxicos para estos organismos. Altas concentraciones de este contaminante presentan una toxicidad alterando el aparato fotosintético e inhibe los procesos de fotosíntesis. De igual manera, altas concentraciones de nitrógeno amoniacal pueden inhibir el desarrollo de las algas, aunque el NH3 es una forma más toxica. Sin embargo, el grado de inhibición va a depender de las diferentes especies de algas.

Muchos estudios han evaluado el desempeño de especies de algas para la eliminación de los NOx y N amoniacal. En cuanto al N amoniacal se han empleados cepas como Chlorella vulgaris, Chlamydomonas sp. SW15aRL y Chlorella FACHB-1563 demostrando que la cepa Chlorella FACHB-1563 es más tolerante a mayores concentraciones del contaminante y más eficiente para la eliminación de N amoniacal. Por otro lado, para la eliminación de NOx se han empleado cepas como Dunaliella tertiolecta, dunaliella salina, Scenedesmus sp., Scenedesmus dimorphus y Chlorella sp. C2 siendo esta ultima la que demostró más eficiencia para la eliminación del contaminante (Chen et. al.)

La biorremediación de contaminación por nitrógeno a base de microalgas demuestra ser una técnica prometedora para la eliminación de estos contaminantes, sin embargo, esta tecnología aún se encuentra en desarrollo dadas las limitaciones que aun presenta, aunque el desarrollo de esta estrategia ha progresado de una manera importante.

BIORREMEDIACIÓN DE ZONAS CONTAMINADAS CON METALES PESADOS

La contaminación por metales pesados en sitios postindustriales, como los suelos de las minas, es un problema ambiental mundial que merece ser considerado. Cómo resolver este problema es un gran desafío. El destino y el comportamiento de los metales pesados en los suelos se rigen por varias reacciones, que incluyen precipitación, adsorción, complejación, metilación, desmetilación, oxidación, reducción, etc. (Chen, 2015).

Los microorganismos no pueden degradar o destruir los metales pesados, pero tienen la capacidad de afectar la migración y transformación, estos factores generan cambios en sus caracterizaciones físicas y químicas. Una de las principales ventajas de la biorremediación para el tratamiento de metales pesados es su bajo costo, se calcula que es entre 60-70% menos costoso que otros tratamientos, además su implementación no supone ninguna afectación en el medio ambiente. Por otro lado, la biorremediación presenta algunas desventajas como ser vulnerable a la temperatura, oxigeno, pH y humedad, estos procesos suelen necesitar meses de tratamiento para obtener buenos resultados en algunos casos el tiempo es mucho mayor que otros tipos de tratamientos (Derakhshan, 2017).

En 2004 los autores Katsoyiannis y Zouboulis llevaron a cabo un trabajo de investigación donde hicieron uso de las bacterias Leptothrix ochracea y Gallionella ferruginea, para el tratamiento de aguas subterráneas que presentaban altos niveles de concentración de Manganeso (Mn (II)) y Hierro (Fe (II)). Para ello hicieron uso de aguas recuperadas de la Agencia Federal del Medio Ambiente, Berlín, Alemania. Estas muestras presentaron una concentración inicial sustancial de hierro (2.8 mgL-1) y de manganeso (0,6 mgL-1). Es importante aclarar que este proceso no busca la eliminación de estos metales, el propósito es oxidarlos, debido a que ambos se vuelven insolubles cuando presentan oxidación, es en estas condiciones donde su remoción del agua es más sencilla de realizar.

Para la elaboración del experimento se ideo un sistema de tubos, con el que se simularon las condiciones en las que están sometidas las aguas subterráneas, a las cuales se les adiciono el agua contaminada con MN (II) y Fe (II) y posteriormente se agregó una solución donde

estaban contenidas las bacterias Leptothrix ochracea y Gallionella ferruginea, se administró aire para permitir que las bacterias crecieran y lograran llevar a cabo la oxidación del hierro y manganeso.

Los resultados de esta investigación mostraron que la eliminación de hierro y manganeso por métodos de biorremediación seguía una velocidad de reacción de primer orden, presentando una vida media de 3,98 y 0,9 min, respectivamente. Las rápidas velocidades de reacción hicieron que el método de tratamiento fuera bastante económico y respetuoso con el medio ambiente, porque no se requiere el uso adicional de reactivos químicos (Katsoyiannis, 2004).

En 2010 Padmavathiamma y Li, abordaron esta problemática utilizando como zona de estudio la zona minera La Unión en Murcia, España. Para el estudio se usó la técnica de biorremediación de compostaje, la cual consiste en la adición y mezcla de componentes primarios de una composta con el suelo contaminado de manera que conforme la composta madura, los contaminantes son degradados por la microflora activa dentro de la mezcla. El suelo se encontraba contaminado con Plomo (Pb), Manganeso (Mn), Zinc (Zn) y Cobre (Cu), los resultados obtenidos mostraron una reducción en la fito-disponibilidad de Pb y Mn, la composta administrada al suelo mostro un impacto positivo en la inmovilización de Zn y Pb. pero mejoró la solubilidad del Cu debido a la quelación de la materia orgánica.

La investigación realizada en 2001 por Groudev, Spasova y Georgiev, realizaron un proceso de biorremediación en tierras agrícolas ubicadas en Bulgaria, las cuales presentaban contaminación por elementos radiactivos, Uranio, Radio y Torio, así como metales pesados, Zinc, Cadmio y Cobre. Para este proceso se inyectaron soluciones de agua que contenían disueltos compuestos orgánicos y fosfato de amonio, esto se llevó a cabo a través de perforaciones verticales en las capas profundas del suelo.

Al término del experimento se encontró que se eliminaron porciones considerables de los contaminantes del suelo y sus concentraciones residuales fueron menores o, al menos, muy cerca de los niveles permisibles relevantes. El tratamiento provocó algunos cambios en la composición de la microflora del suelo aumentando el número de bacterias quimolitotróficas acidófilas y disminuyendo ligeramente el número de heterótrofos. La composición química, la estructura y las principales propiedades físicas e hídricas del suelo se alteraron en pequeña medida.

BIORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO CON ACEITE DE MOTOR USADO

La composición química de los aceites de motor varía de acuerdo con el tipo aditivos utilizados en su formulación (aproximadamente el 20% en peso del producto final, pueden presentar cadenas hidrocarbonadas de más de 15 átomos de carbono, con puntos de ebullición entre 300 y 600 °C. Muchos de los compuestos presentes en los aditivos, son conocidos por su alto grado de ecotoxicidad; entre los más utilizados se encuentra el alquil ditiosulfato de zinc, disulfuro de molibdeno, jabones con metales pesados, y compuestos organometálicos (Ziolo, 2015).

El aceite usado contiene altas concentraciones de metales pesados como: Pb, Zn, Ca, Ba y Mg, menores concentraciones de Na, Cu, Al, Cr, Mn, K, Ni, Sn, Si, B y Mo, factor que los hace potencialmente peligrosos para la vida de los organismos.

Una vez el aceite es adicionado al suelo, altera las características fisicoquímicas y biológicas del medio, entre estas el contenido de materia orgánica, densidad aparente,

porosidad, permeabilidad, tasa de respiración y relación C:N, debido a la alta hidrofobicidad de los hidrocarburos.

En 2015 los autores Ziolo, Cadavid, Robayo y Cardona realizaron un trabajo de investigación donde se estudió la posibilidad de corregir la contaminación en suelos provocada por aceite de motor usado para esto se llevaron a cabo dos procesos de biorremediación. El primero consistió en la atenuación natural, para este proceso solo se realizaron tratamientos al suelo para promover el crecimiento de los microorganismos ya presentes en el suelo contaminado. El segundo método es la bioestimulación, a diferencia del método anterior en este método se adicionaron nutrientes externos además del tratamiento al suelo para estimular el crecimiento de microorganismos, los compuestos adicionados fueron la urea y tripolifosfato de sodio, lo que proporciono Nitrógeno y Fosforo al medio.

Los resultados obtenidos mostraron que la atenuación natural presento el mayor porcentaje de remoción del contaminante con un 20%, la bioestimulación logró remover un 10% esta información fue obtenida después de 12 semanas de tratamiento. En termino económicos y de eficiencia el método de biorremediación por atenuación natural supone la mejor opción.

DEGRADACIÓN DE COLORANTES INDUSTRIALES CON HONGOS LIGNINOLÍTICOS

Se usaron siete cepas de hongos de la podredumbre Blanca, Phanerochaete chrysosporium, Phanerochaete sordida, Polyporus ciliatus, Phlebia radiata, Lentinus tigrinus, Stereum hirsutum, Anthracophyllum discolor cedidos por el profesor Gumersindo Feijoo del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Santiago de Compostela (España). Se conservaron a 4oC en tubos inclinados con el siguiente medio de cultivo: agar (15 gL^{-1}); glucosa (20 gL-1); peptona (5 gL^{-1}); extracto de levadura (2 gL^{-1}); KH_2PO_4 (1 gL^{-1}); $MgSO_4$. $5H_2O$ (0,5 gL^{-1}), serrín de madera (2 gL^{-1}). De los cultivos de conservación se tomó micelio de cada hongo y se transfirió a cajas de Petri con el siguiente medio de mantenimiento: agar (15 gL^{-1}); glucosa (10 gL-1); extracto de malta (3,5 gL-1) y pH de 5,5. Las cajas se incubaron durante 8 días a 30ºC y posteriormente se mantuvieron a 4°C hasta su uso.

Se utilizaron cuatro colorantes industriales: Rojo Cibacrón, Rojo Erionyl, Turquesa Erionyl y Azul Terasil, los cuales son ampliamente utilizados en la industria del jean y teñido de algodón. Hacen parte del grupo de colorantes ácidos, reactivos y dispersos, y por su estructura química son azoicos y ftalocianina. La capacidad ligninolítica se evaluó con el colorante Orange II.

Las siete cepas de hongos se emplearon para evaluar su tasa de crecimiento y potencial ligninolítico. Para evaluar la tasa de crecimiento de los hongos, los ensayos se realizaron tomando del cultivo de mantenimiento de cada hongo, un trozo circular de agar colonizado de aproximadamente 8 mm de diámetro y se sembró en el centro de una caja de Petri con medio de mantenimiento y se incubaron a 30oC, durante 8 días. Cada 12 h se midió el diámetro del halo de colonización del micelio y finalmente se calculó la velocidad de crecimiento de cada hongo en cm/d. El potencial ligninolítico se determinó con ensayos similares a los anteriores, pero incluyendo en el medio de mantenimiento el colorante Orange II a una concentración de 100 mgL^{-1}. Cada 12 h se midió el halo de decoloración del tinte en la Caja y se determinó la velocidad de decoloración en cm/d. Luego se seleccionaron los dos hongos con mayor capacidad ligninolítica y se realizaron experimentos similares cultivándolos en cajas de Petri sobre medios conteniendo los colorantes industriales individuales a una concentración de 100 mgL-1; esto con el fin de evaluar de manera

cualitativa su capacidad para la degradación de estos. Todos los ensayos se hicieron durante 12 días por triplicado y se prepararon cajas controles con el tinte y sin el hongo con el fin de observar alguna posible decoloración abiótica.

Estos ensayos se realizaron con las cepas de P. chrysosporium y P. sordida seleccionadas de acuerdo con los resultados de crecimiento y decoloración del tinte Orange II. muestran los resultados de crecimiento y degradación de los colorantes individuales en Cajas Petri sobre los colorantes industriales Rojo Erionil, Azul Terasil, Rojo Cibacrón y Turquesa Erionil a 100 mgL^{-1}. El crecimiento de los hongos sobre cada uno de estos colorantes alcanzó una velocidad de colonización alrededor de 6,4 cm.d-1, que es un valor similar al encontrado sobre placas sin colorante . Esto indica que el crecimiento no fue inhibido por ninguno de los colorantes a la concentración aplicada. Los hongos mostraron gran capacidad para degradar los colorantes industriales formando halos de decoloración en las placas Petri a una velocidad entre 2 y 2,5 cm.d-1. En esta se observa que el comportamiento para la degradación de todos los colorantes industriales es similar, debido a que se utilizan hongos del mismo género, por lo cual se espera un comportamiento de velocidad de degradación similar, además para estos hongos, con base en los resultados, se puede inferir que las estructuras de los colorantes no afectan la degradación de estos.

CONCLUSIONES

Como se sabe el ser humano a lo largo de la historia ha hecho mucho daño al medio ambiente, sin embargo se busca generar soluciones a diferentes problemas ambientales, por lo que la biorremediación es una estrategia adecuada que otorga grandes beneficios al medio ambiente que en comparación con otros métodos es una herramienta muy viable económicamente y fácil de aplicar, dependiendo de la situación del ecosistema contaminado está técnica generalmente puede eliminar los contaminantes sin la necesidad de tratamientos posteriores, aprovechando las capacidades de los microorganismos autóctonos; cabe destacar que a pesar de ser una herramienta que demora algo de tiempo en presentar resultados efectivos, la convierte en una de las mejores estrategias para restaurar los ecosistemas dañados. En base a los resultados presentados previamente es indiscutible que el uso de la biorremediación a lo largo de los años presenta múltiples beneficios, presentando alta eficiencia en la eliminación de contaminantes. Sin embargo, en un futuro cercano el uso de microorganismos modificados genéticamente podría aumentar el potencial de disminución de ciertos contaminantes y la restauración de ecosistemas, pero esto aún no es fácil de aplicar ya que aún falta más por investigar y corroborar que su uso será el adecuado, para no generar más problemas y daños tanto al medio ambiente como a la sociedad.

BIBLIOGRAFÍA

Chen, H. Wang, Q. (2020). Microalgae-based nitrogen bioremediation, de Algal Research.

Chen, M. Et all. (2015) Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatichydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: Applications, microbes and future research needs; 745-755. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.05.003

Davila-Vazquez, G., Alatriste, F., León, A., Razo, E. (2008): Fermentative hydrogen production in batch experiments using lactose, cheese whey and glucose: Influence of initial substrate concentration and pH. Int. J. Hydrogen Energy. 33(19):4989-97.

Derakhshan, Z. Chae, M. Kim, K (2017) Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology; DOI: 10.1007/s10653-017-9964-z

Ferchichi, M., Crabbe, E., Gil, G., Hintz, W., Almadidy, A. (2005): Influence of initial pH on hydrogen production from cheese whey. J Biotechnol. 120(4):402-9

Fernández, C., Cuetos, J., Martínez, E., Gómez, X. (2015): Thermophilic anaerobic digestion of cheese whey: Coupling H_2 and CH_4 production. Biomass Bioenergy. 81:55-62.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2011). Manual de Biogás. Disponible en: https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf. Acceso en octubre de 2021.

García-Galindo, A. Capera-Rivas, J. P. Melendez, N. Mayorquín. (2020). Alternativas microbiológicas para la remediación de suelos y aguas contaminados con fertilizantes nitrogenados, de Universidad Tecnológica de Pereira.

Garcia, V. (2019): Manual De Biogás. Conceptos Básicos. Beneficios De Su Producción Y La Aplicación De Sus Sub-productos. Direccion de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático, Provincia de Buenos Aires

Groudev, S. Spasova, I. Georgiev, P. (2001) In situ bioremediation of soils contaminated with radioactive elements and toxic heavy metals. DOI: https://doi.org/10.1016/S0301-7516(00)00061-2

Jaramillo B., Bermudez A., Tirado, M. (2016) Bacterias degradadoras de pesticidas organofosforados presentes en suelos contaminados. DOI: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20023.73126

Katsoyiannis, I. Zouboullis, A. (2004) Biological treatment of Mn(II) and Fe(II) containing groundwater: kinetic considerations and product characterization; DOI: 10.1016/j.watres.2004.01.014

Kosseva, M., Kent, C. (2002): Thermophilic bioremediation strategies for a dairy waste. Biochemical Engineering Journal 15 125–130. Elsevier.

López, L. Quintero, G. Ostos, O. (2017). Aislamiento e identificación de diez cepas bacterianas desnitrificantes a partir de un suelo agrícola contaminado con abonos nitrogenados proveniente de una finca productora de cebolla en la Laguna de Tota, Boyacá, Colombia, de Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Mata, J., Mace, S., Llabres, P. (2000): Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. Bioresour. Technol. 74(1):3-16.

McKnight, A. M., Gannon, T. W., & Yelverton, F. (2021). Phytoremediation potential of three terrestrial plant species for removal of atrazine, azoxystrobin, and imidacloprid. International Journal of Phytoremediation, 1–9. https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1932724

M. Durán, N. Retamal, R. Montiel, "El papel del nitrógeno en la agricultura y la contaminación por nitrato". Departamento de Producción Vegetal (Fitotecnia) de la ETSIA (Universidad Politécnica de Madrid).

Padmavathiamma P., Li L.(2007) Phytoremediation Technology: Hyperaccumulation Metals in Plants. Water, Air, & Soil Pollution. 184, 105. Doi: http://dx.doi.org/10.1007/s11270-007-9401-5

Park, W., Hyun, S., Logan, B., Kim, I. (2005): Removal Of Headspace CO2 Increases Biological Hydrogen Production. Environ Sci Technol. 39(12):4416-20.

Rai, P., Singh S., Asthana, K. (2012): Biohydrogen Production from Cheese Whey Wastewater in a Two-Step Anaerobic Process. Appl. Biochem. Biotechnol. 167(6):1540-9.

Reyes B., Sánchez J. (2019) Evaluación de la bioestimulación frente a la atenuación natural y la bioaumentación en un suelo contaminado con una mezcla de gasolina – diesel. Nicaragua.

Rico, C., Muñoz, N., Fernández, J. (2015): Highload Anaerobic Co-digestion Of Cheese Whey And Liquid Fraction Of Dairy Manure In A Onestage UASB Process: Limits In Co-substrates Ratio And Organic Loading Rate. Chem. Eng. J. 262:794-802.

Roberto Aurelio Núñez López, Yunny Meas Vong, Raúl Ortega Borges y Eugenia J. Olguín, septiembre 2004, "Fitorremediación:fundamentos y aplicaciones"

Rosales-Colunga LM, Razo-Flores E, Ordoñez LG, Alatriste-Mondragón F, De León-Rodríguez A. Hydrogen production by Escherichia coli ΔhycA ΔlacI using cheese whey as substrate. Int. J. Hydrogen Energy. 2010;35(2):491-9.

Saddoud, A., Hassairi, I., Sayadi, S. (2007): Anaerobic membrane reactor with phase separation for the treatment of cheese whey. In Elsevier: Vol. 98. P. 2102-2108.

Sepúlveda, E. González, C. Inostroza, Remediación de la contaminación por nitratos en el suelo: Antecedentes generales y pertinencia e n zona sur de Chile, Gestión Ambiental, Vol. 21, pp. 13-32, 2011

Yang, K, Yu, Y, Hwang, S. (2003): Selective Optimization In Thermophilic Acidogenesis Of Cheese-whey Wastewater To Acetic And Butyric Acids: Partial Acidification And Methanation. Water Res. 2003;37(10):2467-77.

Ziolo L., Robayo J., Prieto S., Cardona S. (2015) Biorremediación de Suelos Contaminados con Aceites Usados de Motor. 20, 69. ISSN: 2422-2208