

Biodegradación de compuestos aromáticos

Patricia B. Loera-Valenzuela, Salvador Pérez-Flores, Carlos E. López-Ortiz,
Nagamani Balagurusamy y Miriam P. Luévanos-Escareño

Facultad de Ciencias Biológicas
Universidad Autónoma de Coahuila
Torreón, Coah.; México
miriam_luevanos@uadec.edu.mx

Abstract— Aromatic compounds are among the most common pollutants and persistent in the environment, contain a mixture of polycyclic aromatic hydrocarbons and aromatic heterocyclic hydrocarbons. Various chemical/physical methods are employed for degradation of these compounds, but they fail to remove the total pollutants or generate a second pollution. However, biological methods using aerobic and/ or anaerobic microorganisms are potential technologies for degradation of aromatic compounds. Further, biological methods are practical and effective bioremediation mechanisms to clean up the contaminated sites. In this paper, we review the available physico-chemical and biological technologies for the treatment of aromatic compounds in order to explore the most appropriate, efficient and alternative method of treatment.

Keyword— *Aromatic compounds, pollution, physico-chemical, biological treatments, bioremediation*

Resumen— Los compuestos aromáticos se encuentran entre los contaminantes más frecuentes y persistentes en el medio ambiente, una mezcla de hidrocarburos aromáticos policíclicos y compuestos aromáticos heterocíclicos. Existen diversos métodos fisicoquímicos empleados para la degradación de estos compuestos, pero estos tratamientos no logran remover el total de contaminantes o generan una segunda contaminación, sin embargo existen microorganismos aerobios y anaerobios que han desarrollado la capacidad de degradar este tipo de compuestos, siendo éste un método práctico y eficaz para disminuir el problema en los sitios contaminados como biorremediación. En el presente trabajo se revisan las tecnologías fisicoquímicas y biológicas disponibles para el tratamiento de compuestos aromáticos, además, de explorar las alternativas más apropiadas y eficientes para su tratamiento.

Palabras claves— *Biorremediación, compuestos aromáticos, contaminación, medio ambiente, tratamientos fisicoquímicos.*

I. INTRODUCCIÓN

Debido al uso excesivo de combustibles y otros productos derivados del petróleo durante las dos últimas décadas, la cantidad de compuestos aromáticos liberados al medio ambiente han aumentado de forma considerable. Estos compuestos aromáticos también se encuentran naturalmente en el medio ambiente, tales como la lignina, los aminoácidos y taninos.

Otras fuentes de compuestos aromáticos incluyen los producidos por las actividades humanas como la agricultura (uso de insecticidas, herbicidas, etc.) y la industria (disolventes, conservadores de maderas, detergentes, etc.), las cuales conducen a aumentar la acumulación de estos compuestos en la naturaleza [1,2].

La presencia de estos compuestos en el ambiente genera algunos problemas importantes como: 1) la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales, por lo que los hidrocarburos aromáticos son el contaminante más común que se encuentra en el suelo y en la tierra, 2) la selección del adecuado tratamiento de las aguas residuales y 3) los diversos efectos tóxicos sobre los seres humanos, por ejemplo, los efectos carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos [1]. En el presente trabajo se revisan las tecnologías fisicoquímicas y biológicas disponibles para el tratamiento de compuestos aromáticos, además, de explorar las alternativas más apropiadas y eficientes para su tratamiento.

II. ANTECEDENTES

A. Compuestos aromáticos

En el siglo XIX la palabra “aromático” fue utilizada para describir las sustancias fragantes como benzaldehído (de las cerezas, los duraznos y las almendras), el tolueno (del Bálsamo de tolú) y el benceno (destilación del carbón), sin embargo; actualmente la asociación de aromaticidad con fragancia se ha perdido y se utiliza la palabra aromático para referirse a la clase de compuestos que contienen uno o más anillos de seis átomos de carbono, con tres enlaces dobles parecidos al benceno [3,4, y,5].

Los hidrocarburos son combinaciones de carbono (C) e Hidrógeno (H) y pueden considerarse, estructuralmente, como esqueletos fundamentales de las moléculas orgánicas, con todas sus valencias libres unidas al H. Cualquier estructura orgánica puede derivarse de hidrocarburos sustituyendo los hidrógenos por diversos grupos funcionales [1].

Los hidrocarburos alifáticos, reciben este nombre, debió a que son los que presentan enlaces sencillos, dobles o triples entre átomos de carbono, formando cadenas (lineales o ramificadas) ciclos. Estos a su vez se dividen en dos grupos, los acíclicos (formados por cadenas) y alicíclicos (formados por ciclos). La base importante de los hidrocarburos es el benceno. Los compuestos aromáticos o hidrocarburos aromáticos, también son conocidos como árenos y sus radicales, arilos [6].

Hidrocarburos aromáticos simples y policíclicos

Los hidrocarburos aromáticos simples o monocíclicos y los policíclicos, así como los clorados, son los contaminantes aromáticos que más han prevalecido en el medio ambiente [7].

Los compuestos aromáticos simples

Los compuestos aromáticos simples incluyen los hidrocarburos aromáticos o monocíclicos, tales como el benceno, tolueno, etil benceno y xileno (BTEX) y el fenol. Estos compuestos son sumamente tóxicos y producen efectos sensibles en la salud al exponerse a altas concentraciones [8]. En su estructura contienen al anillo de benceno solo con la alternancia de enlaces simples y dobles entre los átomos de carbono (Figura 1). Estos se encuentran como contaminantes en agua y tierra debido a los accidentes ambientales, como los derrames de gasolina o diésel [9].

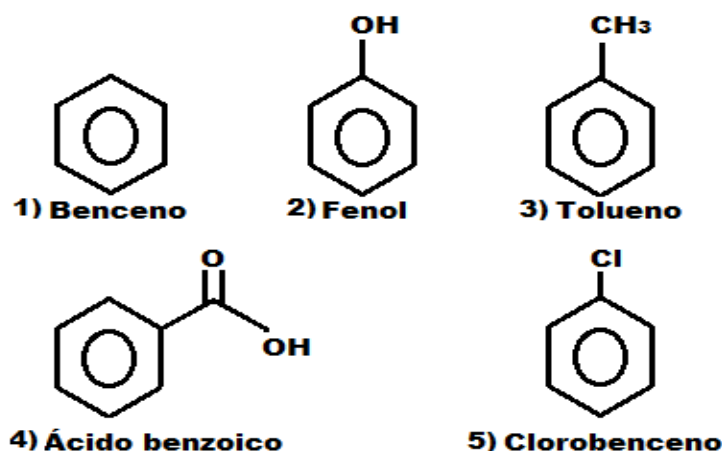


Fig. 1. Estructura química de compuestos aromáticos monocíclicos.

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos son una clase de agentes contaminantes tóxicos que se han acumulado en el medio ambiente debido a varias actividades naturales y antropogénicos. La mayor liberación de hidrocarburos aromáticos policíclicos es debido a la combustión incompleta de compuestos orgánicos durante el curso de procesos industriales y de otras actividades humanas [9].

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos, son un tipo de compuestos orgánicos que consisten en dos o más anillos de benceno fusionados y / o moléculas pentacíclicas que están dispuestos en diversas configuraciones estructurales (Figura 2). Se utilizan principalmente como intermediarios en productos farmacéuticos, productos agrícolas, productos fotográficos, plásticos termoestables, materiales lubricantes y otras industrias químicas [1].

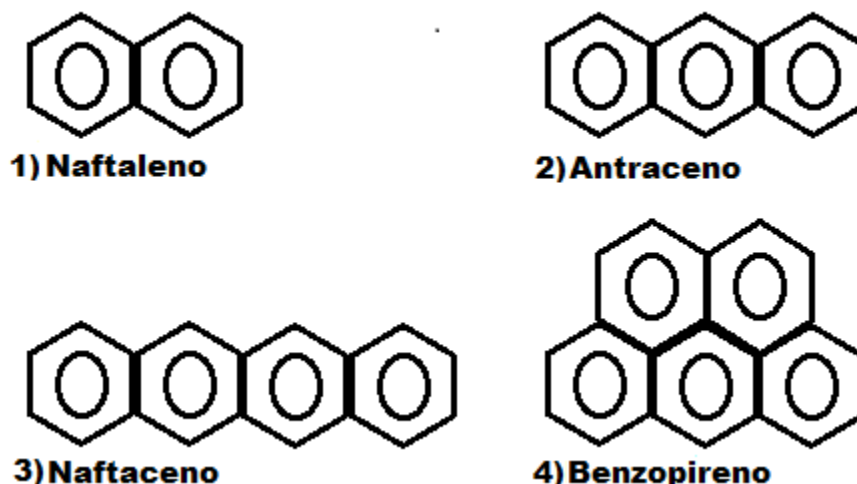


Fig. 2. Estructura química de compuestos aromáticos policíclicos.

El anillo de benceno es una de las unidades de estructura química más ampliamente distribuida en la naturaleza, siendo muchos de los compuestos aromáticos importantes contaminantes ambientales. Mediante diferentes vías catabólicas, los microorganismos pueden utilizar una gran variedad de compuestos aromáticos como única fuente de carbono y energía [4].

III. TIPOS DE TRATAMIENTO PARA LA DEGRADACIÓN DE COMPUESTOS AROMÁTICOS

El creciente uso de hidrocarburos en actividades cotidianas deriva en un constante problema de contaminación por estos compuestos. Existen diversas tecnologías de remediación que pueden ser utilizadas para lograr la recuperación de los ambientes contaminados por la incorporación de compuestos aromáticos, particularmente en suelos y aguas (tanto superficiales como subterráneas). Dependiendo del lugar en que se realiza el proceso, la estrategia de remediación empleada y además del tipo de tratamiento, éstas pueden ser clasificadas de diferentes maneras [10].

Como estrategias para la remediación, se han diseñado diferentes procesos para la remoción de compuestos aromáticos, como: métodos físicos (adsorción por carbono activado), químicos (extracción con solventes, oxidación química) y biológicos (utilizando microorganismos aerobios y/o anaerobios) [11, 12]. En la estrategia de remediación, se pueden utilizar diferentes técnicas por separado o en combinación para lograr una mayor eficiencia de remoción del contaminante, como lo son:

- Destrucción y modificación del hidrocarburo aromático: en este tipo de tecnologías se busca alterar la estructura química del contaminante.

- Extracción o separación: los contaminantes se extraen y se separan del medio contaminado, en base a sus propiedades físicas o químicas como lo es la volatilización, solubilidad, carga eléctrica, entre otros.
- Aislamiento e inmovilización: en este caso se trata de estabilizar o solidificar los contaminantes por métodos físicos o químicos.

El principio de remediación determina tres tipos distintos de tratamientos:

- Tratamientos Térmicos: por medio de la acción del calor se logra la volatilización (separación), quema, descomposición o fusión (inmovilización) de los contaminantes en un suelo [11].
- Tratamientos Físico-químicos: en base a las propiedades físicas y químicas de los contaminantes o del medio contaminado, se separa y destruye el contaminante [12].
- Tratamientos Biológicos (Biorremediación): esta metodología utiliza el metabolismo de diferentes microorganismos para utilizar diferentes hidrocarburos como única fuente de carbono y de energía, con el fin de degradar o transformar los contaminantes a productos metabólicos inocuos o de menor toxicidad [11, 13].

A. Tecnologías de remediación térmica

La mayoría de los métodos que se presentaran a continuación pueden aplicarse de manera *In situ* y *Ex situ*. Durante su aplicación se producen vapores, residuos sólidos (cenizas) y en ocasiones residuos líquidos que deben ser tratados posteriormente. Si bien, poseen la ventaja de ser procesos rápidos, tienen el inconveniente de ser los más costosos y en algunos casos pueden llegar a la destrucción del suelo o del ambiente contaminado. Dentro de las tecnologías térmicas más importantes se encuentran la incineración, vitrificación, pirólisis y desorción [13, 14].

Incineración

Durante el proceso de incineración se utilizan altas temperaturas de operación, que van desde los 870 a los 1200 °C, para lograr volatilizar y quemar compuestos orgánicos y halogenados en presencia de oxígeno. Puede llevarse a cabo *In situ* o *Ex situ* [15].

Vitrificación

Como en el caso anterior, este proceso puede llevarse a cabo *In situ* o *Ex situ* y se realiza mediante una corriente eléctrica que funde los suelos contaminados, con temperaturas que van de 1600 a 2000 °C. Este proceso estabiliza la mayoría de los contaminantes inorgánicos y destruye los orgánicos. Con esta tecnología se produce un material cristalino químicamente estable que no produce lixiviados, en el cual quedan incorporados los compuestos inorgánicos. Durante el proceso, las altas temperaturas provocan la destrucción o remoción de los materiales orgánicos [14, 16].

Pirólisis

Mediante este método se produce la descomposición química de materiales orgánicos inducida por calor en ausencia de oxígeno. Se realiza a presión y a temperaturas de operación mayores a 430 °C, en hornos y equipos similares a los utilizados para la incineración, pero se deben operar a temperaturas menores y en ausencia de aire [14][15].

Desorción térmica (DT)

La DT es un proceso de separación física no destructivo, que consiste en calentar el suelo contaminado por compuestos orgánicos hasta temperaturas entre 90 y 540 °C, con el fin de vaporizarlos y por consiguiente separarlos de éste. Los contaminantes liberados son dirigidos hasta un sistema de tratamiento de gases, con el uso de un acarreador de gases o un sistema de vacío [15, 16].

B. Tecnologías de remediación fisicoquímicas

La mayoría de estas tecnologías se aplican *In situ* y se basan en el aprovechamiento de las propiedades físicas y químicas de los contaminantes o del material contaminado para destruir, separar y contener la contaminación. Entre ellas se encuentran:

Extracción por solventes

Como su nombre lo indica, los contaminantes son disueltos en solventes orgánicos y así separados del suelo a través de la circulación del solvente. El líquido que resulta del lavado de suelo y de la extracción por solventes requiere de un tratamiento posterior para remover y destruir los contaminantes [17] [13].

Extracción de vapores (EV)

Esta tecnología, también conocida como ventilación del suelo, vaporización y volatilización, es una metodología en la que se aplica vacío para inducir un flujo controlado y continuo de aire, removiendo así contaminantes volátiles y semivolátiles del suelo [13,18].

Inundación del suelo

Se aplican grandes volúmenes de agua directamente al suelo contaminado para favorecer el paso de los contaminantes del suelo hacia el cuerpo de agua, después esta es extraída y tratada en forma separada [19].

Lavado de suelos

Los contaminantes son removidos mediante la circulación de soluciones acuosas. El suelo es realmente "lavado" y de esta manera se reduce el volumen del material contaminado, ya que las partículas finas con el contaminante sorbido en ellas son extraídas, quedando retenidas en la solución acuosa [19].

Remediación electrocinética (RE)

Esta tecnología está actualmente en desarrollo y se basa en el aprovechamiento de las propiedades conductivas del suelo, con el objetivo de separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico se remueven las especies cargadas (iones), implicando el uso de una corriente directa (de baja intensidad) entre un electrodo positivo y uno negativo [20].

Solidificación/Estabilización (S/E)

Es una técnica en la que el suelo contaminado es mezclado con aditivos para inmovilizar los contaminantes, con el objeto de disminuir el proceso de lixiviación. La solidificación se refiere a las técnicas que encapsulan al contaminante formando un material sólido.

La estabilización limita la solubilidad o movilidad del contaminante, generalmente por la adición de materiales, como cemento Portland, cal o polímeros que aseguren que los constituyentes peligrosos se mantengan en su forma menos móvil o tóxica. La S/E puede realizarse tanto *In situ* como *Ex situ* [20].

Los métodos mencionados tienen la ventaja de hacer uso de equipos accesibles que pueden utilizarse en la degradación de hidrocarburos aromáticos y para otros tipos de contaminantes, pero presentan el inconveniente de generar residuos que a su vez necesitan tratamiento y disposición final lo que encarece el proceso, además los solventes utilizados pueden aumentar la movilidad del contaminante. Si bien la mayoría de las sustancias orgánicas son biodegradables, existen compuestos que resisten la degradación (recalcitrantes) o que se degradan muy lentamente (persistentes) [21, 20]. Sin embargo, la biodegradabilidad de un compuesto depende en gran medida de su estructura molecular.

A pesar de la estabilidad química de los hidrocarburos alifáticos y aromáticos, un gran número de microorganismos como bacterias (aerobias y/o anaerobias) (Tabla 1), hongos y levaduras, son capaces de utilizarlos como fuentes de carbono y para la obtención de energía. La velocidad a la que los microorganismos oxidan los hidrocarburos varía marcadamente, por ejemplo los alcanos saturados se degradan rápidamente, los alcanos ramificados son más resistentes a la biodegradación que los alcanos normales (la resistencia aumenta con el número de ramificaciones), los hidrocarburos aromáticos son más difíciles de degradar y los hidrocarburos aromáticos policíclicos se degradan en muy baja proporción [21, 22, 23].

Tabla I. Comparación del proceso aerobio y anaerobio en degradación de compuestos aromáticos [24].

	Aerobio	Anaerobio
Activación del anillo aromático	O ₂	H ₂ O
Aceptor final de electrones	O ₂	NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Fe (III) y CO ₃ ²⁻
Producción de biomasa	Mayor producción	Menor producción
Requerimientos nutricionales	Menos requerimiento	Más requerimientos
Productos intermediarios	Catecol, protocatecate	BenzoilCoA, floroglucinol, resorcinol
Enzimas	Mono, di-oxigenasas	CoAligasa, BenzoilCoA
Productos finales	CO ₂ , H ₂ O	CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S/N ₂

Los procesos microbiológicos, por su versatilidad bioquímica, molecular, ambiental, son la mejor alternativa para la remoción de los compuestos aromáticos, ya sea en condiciones aerobias o anaerobias [23, 24].

C. Biodegradación de los compuestos aromáticos

La eliminación de fenol de aguas residuales por métodos fisicoquímicos generalmente son limitados debido en parte a su complejidad y altos costos [25], por lo que el interés en una biodegradación resulta cada vez de mayor interés. Existen estudios como el de Haritash (2009) en donde se describen los diferentes mecanismos que utilizan bacterias, algas y hongos para la degradación del fenol [13].

A continuación se da una explicación de la biodegradación de compuestos aromáticos, los organismos implicados, factores fisicoquímicos, así como factores inhibitorios en el proceso.

D. Tratamientos biológicos

El tratamiento biológico o biorremediación, como se mencionó anteriormente, es el mejor proceso utilizado para la degradación hidrocarburos aromáticos mediante el empleo de organismos vivos, por ser un proceso de bajo costo y amigable con el ambiente. Ciertos organismos tienen la capacidad de degradar los hidrocarburos gracias a que contienen las enzimas degradativas involucradas en las rutas metabólicas de dichos compuestos [13, 26, 27].

En la degradación aromática, la clave es la ruptura del anillo bencénico [4]. Este mecanismo requiere en su mayoría la presencia de moléculas de oxígeno para iniciar el ataque enzimático al anillo aromático. La ruta típica para metabolizar fenol es hidrolizando el anillo benceno para formar catecol y después abrir el anillo por orto o meta oxidación y seguir rutas específicas de cada organismo (Figura 3) [25].

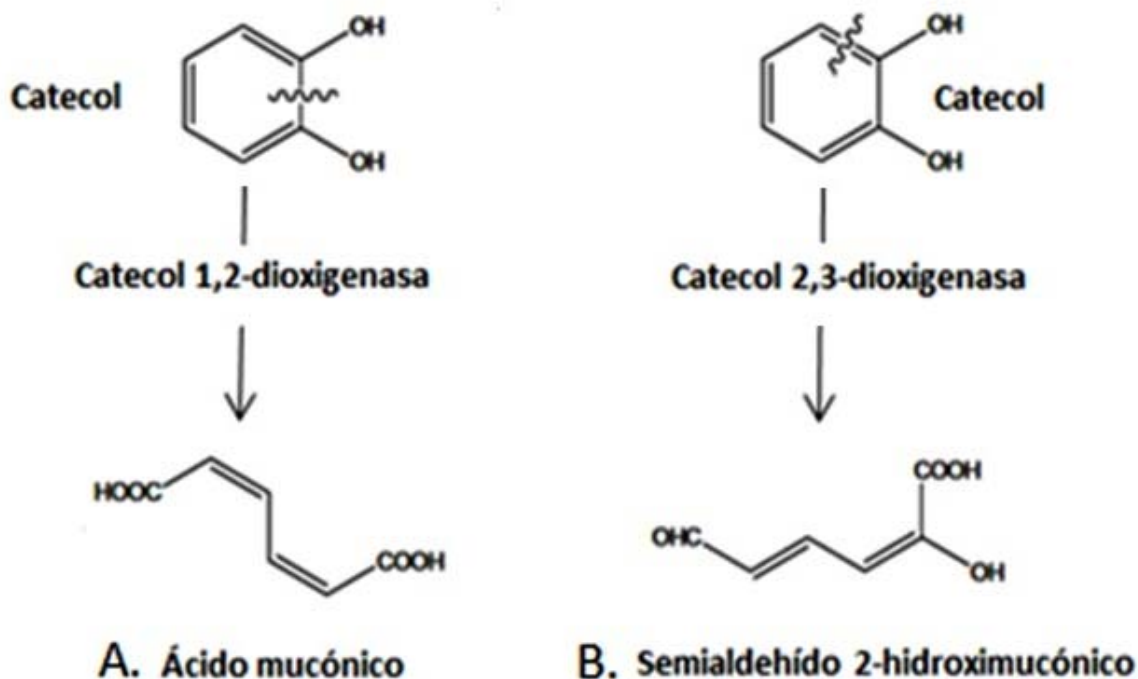


Fig. 3. Ruptura del anillo bencénico en forma A. orto y B. meta [30]

Los hidrocarburos aromáticos son biotransformados en metabolitos menos complejos, y a través de la mineralización, son transformados en H_2O y CO_2 (procesos aeróbicos) o en CH_4 (procesos anaerobios). En estudios realizados anteriormente, sugieren que compuestos con menor peso molecular tienden a ser degradados en mayor cantidad en comparación con aquellos de mayor peso molecular [20,13].

Por otro lado, la capacidad del organismo para la degradación de compuestos es caracterizado por diferentes variables del medio [13].

- Naturaleza química y concentración del compuesto degradado: Grado de toxicidad que influencia en el crecimiento de la cepa.
- Condiciones del cultivo: Concentración inicial de células, oxígeno disuelto, temperatura y demás factores fisicoquímicos.
- Cambios en: pH, temperatura, concentración de sustrato y adición de otras fuentes de carbono [20].
- Características cinéticas de crecimiento microbiano: Grado específico de crecimiento (μ), constante de inhibición (K_s), coeficiente de rendimiento (Y), rango de degradación (Q) etc. [28].

E. Inhibición de la degradación de compuestos aromáticos

Debido a la formación de complejos enzimáticos inactivadores, Haldane y Levenspiel [29], enfatizaron el efecto inhibitorio en el grado de crecimiento microbiano.

Un modelo genérico que describe la biodegradación de sistemas sostiene que existen tres inhibidores básicos en la degradación de cualquier mezcla: 1) inhibición individual de sustrato, 2) inhibición interactiva que puede o no competir entre hidrocarburos aromáticos de naturaleza similar y 3) la inhibición entre hidrocarburos aromáticos desiguales en naturaleza (cuadro 2) [30].

F. Degradación aerobia y anaerobia

La degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos por bacterias ocurre principalmente bajo condiciones aerobias que implican la oxidación del anillo aromático y la formación de catabolitos, posteriormente la fisión del anillo y el metabolismo [31]. Sin embargo, los microorganismos pueden mineralizar moléculas aromáticas en condiciones anaerobias. Dicha transformación depende principalmente de las características químicas y estructurales del compuesto, del microorganismo involucrado y de los factores ambientales, siendo el oxígeno el determinante en la vía metabólica empleada. Como el oxígeno no puede incorporarse al anillo bencénico en condiciones anaerobias, se usa un mecanismo diferentes, empleado otros compuestos NO^{-3} , Mn^{+4} , Fe^{+3} , SO^{-4} o CO_2 , modificando de esta manera los primeros paso en la degradación [32, 33], convirtiéndolo en un proceso lento; estudios han mostrado que dos o tres anillos aromáticos pueden ser degradados anaeróbicamente, sin embargo, existe poca evidencia de la degradación de compuestos con más anillos aromáticos.

Tabla II. Factores de inhibición degradativa de compuestos aromáticos.

Factor	Efecto	Referencia
Presencia de hidrocarburos aromáticos (HA) específicos.	La presencia de ciertos compuestos aromáticos puede afectar el consumo de otros presentes en la mezcla	[13, 30]
Concentración de sustrato	Altas concentraciones de compuestos aromáticos afecta la actividad degradativa debido a una parcial inhibición en la actividad del organismo	[13,30]
Limitación de cosustrato	Resulta un factor de confusión en la relación entre la degradación de HA y la secreción de enzimas degradativas	[13, 30]
Presencia de glucosa	Se presenta una competencia por sustrato entre glucosa y el compuesto aromático	[25]
Oxígeno	Factor determinante en la ruta degradativa; un proceso anaerobio resulta lento en comparación de uno aerobio.	[32, 33]

Los procesos anaerobios son llevados a cabo específicamente por consorcios bacterianos formados por bacterias fermentativas (ácidogénicas y acetogénicas), sulfato reductoras (BSR) (Figura 4), desnitrificantes y metagénicas [9]. Aunque el proceso es lento y limitado por muchos factores, tiene la ventaja de ser adoptado en ambientes naturales.

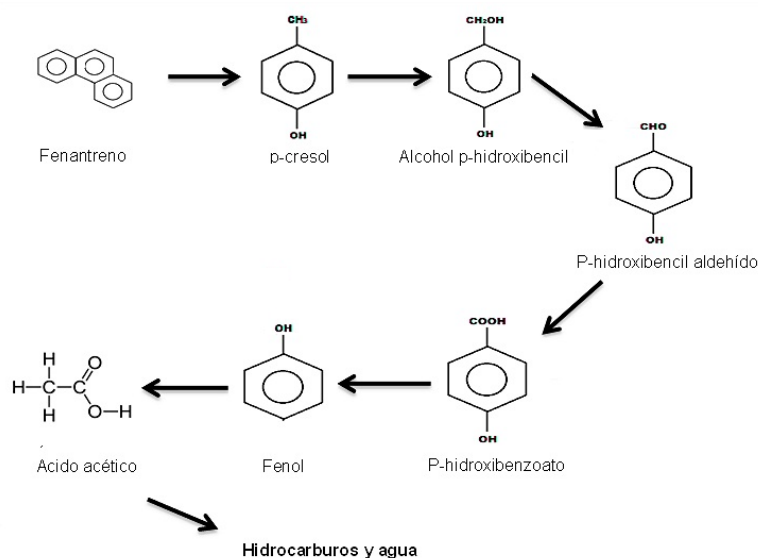


Fig. 4. Ruta anaerobia propuesta en degradación de fenantreno por bacterias sulfato reductoras [9].

La degradación anaerobia es enriquecida por la adición de acetato, lactato, piruvato, cloruro de sodio, celulosa. De forma hipotética, inicialmente altas concentraciones de hidrocarburos aromáticos son parcialmente degradados bajo condiciones de nitrato/sulfato reducciones formando ácidos orgánicos de bajo peso molecular como intermediarios metabólicos [13]. Dicho proceso dependerá de la capacidad que tengan los microorganismos para usar aceptores finales de electrones diferentes al O₂; aceptores finales con alto potencial REDOX proveerá a las bacterias de más energía [32].

La biodegradación anaerobia de hidrocarburos aromáticos policíclicos es un proceso que implica varios pasos comenzando con la activación inicial adicionando fumarato al compuesto aromático para producir un aromático sustituido con succinato (Figura 5).

Concluido este proceso de activación, son reducidos mediante dos vías: a) vía del fumarato y b) vía del Benzil CoA. Posterior a esto se formara acetil CoA, ácidos grasos y pimelil CoA, que serán convertidos a CO₂, H₂ y CH₄ [9].

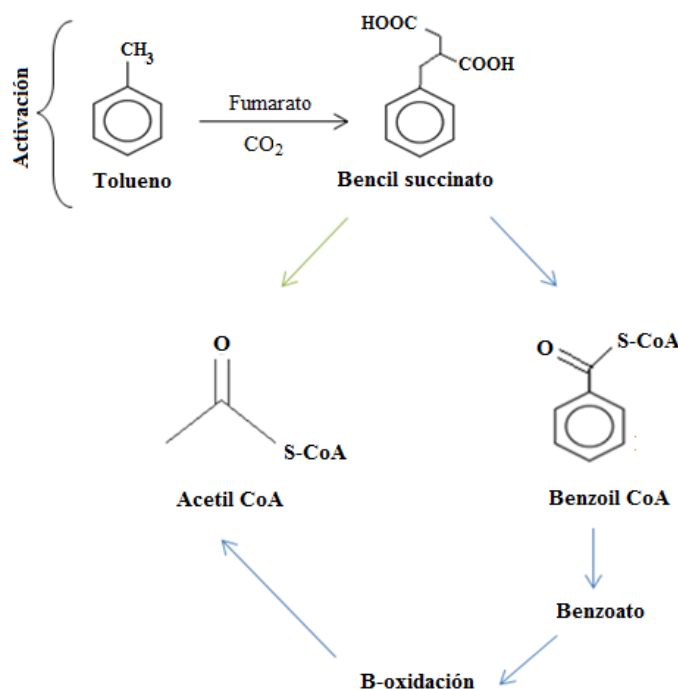


Fig. 5. Ejemplificación de vía del fumarato y benzoil CoA en biodegradación anaerobia [9].

G. Degradación por bacterias, hongos y algas

Cuando se habla de biodegradación, se habla de la remoción de compuestos tóxicos empleando una diversidad de organismos vivos, principalmente algas, bacterias y hongos, cada uno de estos con la capacidad de llevar a cabo el rompimiento de estructuras moleculares de compuestos orgánicos a través de la biotransformación en metabolitos menos complejos y la mineralización de los mismos [13]. Por primer orden del sistema de reacción, el ritmo de cambio en concentraciones de contaminantes es proporcional a la concentración de contaminante en el suelo y la herramienta de predicción del tiempo es dependiendo del microorganismo, del tipo de contaminante y su concentración.

H. Degradación por Bacterias

La mayoría de los microorganismos capaces de degradar estos compuestos son aislados de suelos o sedimentos contaminados [32]. Existen microorganismos, entre ellos tres especies de *Pseudomonas*, conocidas por su habilidad de emplear compuestos aromáticos como única fuente de carbono y que son citados repetidamente en la literatura por poseer una notable capacidad de degradar gran cantidad de compuestos aromáticos en concentraciones considerables y en tiempos relativamente cortos [13, 28].

De igual manera, algunas especies de *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Burkholderia* y *Sphingomonas* entre otros, con la capacidad de degradar el BaP (Benzo(a) pirina, (compuesto considerado como el más cancerígeno y tóxico) cuando son crecidas con una fuente de carbono alternativa [13]. Dicha degradación de aromáticos está directamente relacionada con la densidad microbiana y su incremento en la biomasa.

Un estudio realizado por Haritash y Kaushik [13], mostró que en un periodo de seis meses un consorcio mixto de *Acanitobacter* y *Klebsiella* tuvo una reducción significativa del 98% del total de hidrocarburos aromáticos policíclicos. En algunos estudios realizados con cultivos puros de microorganismos anaerobios, de igual forma, han mostrado su capacidad para remover hidrocarburos mono y poli aromáticos, este proceso se lleva a cabo por bacterias fermentativas, sulfato reductoras, desnitrificantes y metagénicas [9]. En estos procesos, el principal intermediario es el benzoato (o bencil-CoA) y en menor proporción, resorcinol y floroglucionol [7].

En todos estos procesos, las bacterias siguen una estrategia; primero los diferentes compuestos aromáticos son transformados en intermediarios centrales para posteriormente atacar el anillo aromático y fisionalo, resultando en un compuesto no cíclico y convirtiéndolo en un metabolito central. Las reacciones involucradas en este proceso de canalización son carboxilaciones, descarboxilaciones, hidroxilaciones, reducciones, deshidroxilaciones, desaminaciones, divisiones aril-eter y reacciones liasas [26, 13].

I. Hongos

Muchos hongos son conocidos por tener la propiedad de degradar contaminantes persistentes; estudios realizados concluyen que hay hongos con una gran capacidad de degradación para un gran número de hidrocarburos aromáticos policíclicos en condiciones variables; dicha propiedad debido a enzimas extracelulares con una baja especificidad de sustrato [13].

El sistema ligninolítico de los hongos consiste en tres grupos enzimáticos principales lignina peroxidadas:

- peroxidasa dependiente de manganeso,
- fenoloxidasas (lacasas, tirosinasas) y
- enzimas productoras de agua.

Estudios revelan que compuestos de bajo peso molecular (2-3 anillos) resultan ser degradados más extensamente por *Aspergillus sp.*, *Trichocladium canadense* y *Fusarium oxysporum*. Para hidrocarburos aromáticos policíclicos con mayor peso molecular (4-7anillos) la máxima degradación se ha reportado con *T.canadense*, *Aspergillus sp.*, *Verticillium sp.* y *Achremonium sp.* [13].

Las levaduras son los hongos más abundantes en ambientes contaminados. Se ha reportado que las levaduras pueden oxidar hidrocarburos aromáticos policíclicos como fuentes alternativas de carbono. Gran cantidad de levaduras del genero *Candida*, *Rhodotorula* y *Trichosporon* tienen la habilidad de degradar diversa cantidad de compuestos aromáticos, esta última ha reportado la capacidad de degradar un gran número de compuestos aromáticos casi en misma cantidad que la degradada por *Pseudomonas aeruginosa* [28].

J. Algas

Una célula algal produce biomasa por medio de la asimilación autotrófica (tomada de la luz y disuelve carbono inorgánico), la asimilación heterotrófica (tomada de carbono orgánico disuelto) y de igual modo aunque en menor proporción empleando compuestos aromáticos, principalmente fenol, como única fuente de carbono.

Para la biodegradación de compuestos aromáticos por medio de algas se han realizado estudios que reportan una capacidad biodegradativa para silicatos, fenol y fenantreno. Dichos estudios de igual manera, demuestran una sinérgica relación entre algas y bacterias, es decir las algas son adecuadas para la biodegradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos y actúan co-metabólicamente con bacterias. Es importante resaltar que la biodegradación de cualquier compuesto por algas se da de manera aerobia [13] [25].

Las cianobacterias y microalgas eucarióticas son capaces de biotransformar compuestos fenólicos e hidrocarburos poli aromáticos, y son considerados organismos muy tolerantes. El uso de microalgas en la remoción de compuestos aromáticos tiene gran cantidad de ventajas; bajo costo, abundante y emplea energía renovable (luz solar) así como la producción de biomasa para alimento de animales, también de ser de fácil crecimiento; suelen ser una alternativa a otros tratamientos biológicos [25].

En el proceso de biodegradación, el compuesto aromático y el oxígeno son complementarios. La ausencia de oxígeno evita la biodegradación del compuesto aromático. Los productos finales de esta transformación son dióxido de carbono y moléculas simples de carbono, principalmente piruvato. En la oscuridad, el oxígeno se suministra exógenamente por lo que permite su intercambio con el entorno, mientras que en la luz el oxígeno es suministrado fotosintéticamente y el oxígeno en exceso es retirado del sistema. Habría resaltar que con el aumento de biomasa, aumenta la producción de oxígeno fotosintético y así, la concentración de oxígeno disuelto en el sistema. Eventualmente cuando la fuente de carbono sea consumida, la biomasa disminuirá a cero y la concentración de oxígeno alcanzara la concentración de oxígeno saturado de aire [25].

IV. CONCLUSIÓN

La degradación de compuestos aromáticos emplea tecnologías fisicoquímicas y biológicas. El uso de los microorganismos aerobios y anaerobios con la capacidad de degradar este tipo de compuestos, son los que han logrado hacer de esta herramienta una tecnología limpia y sustentable con el medioambiente, permitiendo que la biodegradación sea un método práctico y eficaz para disminuir el problema de la contaminación.

REFERENCIAS

- [1] Çinar, Ö. 2004. Biodegradation of central intermediate compounds produced from biodegradation of aromatic compounds. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 26 (5), 341-345.
- [2] Shrivastava R, Phale P.S. 2012. Biodegradation of mono-aromatic compounds by bacteria. Satyanarayana T et al. (eds.), *Microorganisms in Environmental Management: Microbes and Environment*, Springer Science + Business Media, DOI 10.1007/978-94-007-2229-2321.
- [3] Barrow, G. 1975. *Química General*. Ed. Reverte. pp. 575-591.
- [4] Diaz, E. 2004. Bacterial degradation of aromatic pollutants: a paradigm of metabolic versatility. *Int Microbiol*, 7, 173-180.
- [5] McMurry, J. 2012. *Química Orgánica*, Cengage Learning. 534-536

- [6] Gutiérrez-R, E. 1985. Química. Ed. Reverte. 399-314.
- [7] Cai, M., Yao, J., Yang, H., Wang, R., Masakorala, K. 2013. Aerobic biodegradation process of petroleum and pathway of main compounds in water flooding well of Dagang oil field. *Bioresource Technology*, 144, 100-106.
- [8] Cao, B., Nagarajan, K., Loh, KC. 2009. Biodegradation of aromatic compounds: current status and opportunities for biomolecular approaches. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85 (2), 207-228.
- [9] Villarreal-Morales S.L, Balagurusamy N, Rodríguez-Herrera R, Aguilar-González CN, Morlett-Chávez JA. 2014. Biodegradación anaerobia de hidrocarburos aromáticos contaminantes del medio ambiente y alimentos. *Acta Química Mexicana*. 6(11): 28-39.
- [10] Gan S, Lau EV, Ng HK. 2009. Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). *Journal of Hazardous Materials*. 172 (2-3): 532-549.
- [11] Shan-Gen L. 2002. Mechanisms of granular activated carbon anaerobic fluidized-bed process for treating phenols wastewater. *Journal of Environment Science*, 14: 132-135.
- [12] Agudelo EA, Cardona-Gallegos S. 2001. Analisis preliminar del tratamiento fisicoquímico y biológico del aceite dieléctrico presente en tierra Fuller. *Dyna*. 78 (167):193-202.
- [13] Haritash AK, Kaushik CP. 2009. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH): A review. *Journal of Hazardous Materials*. 169(1-3): 1-15.
- [14] Brown GS, Barton LL, Thomson BM. 2002. Permanganate oxidation of sorbed polycyclic aromatic hydrocarbons. *Waste Management*. 23(8): 737-770.
- [15] Chu W, Kwan CY. 2003. Remediation of contaminates soil by a solvent/surfactant system. *Chemosphere*. 53 (1): 9-15.
- [16] Haritash AK, Kaushik CP. 2009. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH): A review. *Journal of Hazardous Materials*. 169(1-3): 1-15.
- [17] Chakraborty R, Coates JD. 2004. Anaerobic degradation of monoaromatic hydrocarbons. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 64:437-446.
- [18] Lin TC, Pan PT, Cheng SS. 2010. Ex situ bioremediation of oil contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*. 176(1-3): 27-34.
- [19]. Villa RD, Trovó AG, Pupo N, Raquel F. 2010. Soil remediation using a coupled process: soil washing with surfactant followed by photo-Fenton oxidation. *Journal of Hazardous Materials*. 174(1-3):770-775.
- [20] Yen CH, Chen KF, Kao CM, Liang SH, Chen TY. 2011. Application of persulfate to remediate petroleum hydrocarboncontaminated soil: Feasibility and comparison with common oxidants. *Journal of Hazardous Materials*. 186(2-3): 2097-2102.
- [21] Fries MR, Zhou J, Chee-Sanford J, Tiedje JM. 1994. Isolation, characterization, and distribution of denitrifying toluene degraders from a variety of habitats. *Applied and Environmental Microbiology*. 60:2802-2810.
- [22] Kulik N, Goi A, Trapido M, Tuhkanen T. 2005. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combined chemical pre-oxidation and bioremediation in creosote contaminated soil. *Journal of Environmental Management*. 78(4): 382-391.
- [23] Kleerebezem R, Pol W, Lettinga G. 1999. Anaerobic degradation of phthalate isomers by methanogenic consortia. *Applied and Environmental Microbiology*. 65:1152-1160.
- [24] Ros M, Rodríguez I, García C, Hernández T. 2010. Microbial communities involved in the bioremediation of an aged recalcitrant hydrocarbon polluted soil by using organic amendments. *Bioresource Technology*. 101(18): 6916-6923.
- [25] Lika K, Papadakis IA. 2009. Modeling the biodegradation of phenolic compounds by microalgae. *Journal of Sea Research*. 62:135-146.
- [26] Bracho M, Díaz L, Soto LM. 2004. Biodegradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos y heterocíclicos por pseudomonas spp. *Ciencia*. 12(4):269-275.

- [27] Kobayashi T, Murai Y, Tatsumi K, Iimura Y. 2009. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Sphingomonas* sp. Enhanced by water-extractable organic matter from manure compost. *Science of the total environment*. 407: 5805-5810.
- [28] Alexieva Z, Gerginva M, Zlateva P, Manasiev J, Ivanova D, Dimova N. 2008. Monitoring of aromatic pollutants biodegradation. *Biochemical Engineering Journal*. 40(2): 233-240.
- [29] Haldane JF. 1968. A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substance, *Biotechnol. Bioeng.* 10:707– 723.
- [30] Datta A, Philip L, Bhallamudi SM. 2014. Modeling the biodegradation kinetics of aromatic and aliphatic volatile pollutant mixture in liquid phase. *Chemical Engineering Journal*. 241: 288-300.
- [31] García-Melo JA. 2007. Biodegradación de fenol en un reactor discontinuo de alimentación secuenciada. Tesis. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- [32] Villatoro-Monzón V, Mesta-Howard AM, Razo-Flores E. 2002. La Biodegradación anaerobia de compuestos aromáticos. *BioTecnología*. 7(3): 7-21.
- [33] Yuan SY, Wei SH, Chang BV. 2000. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by a mixed culture. *Chemosphere*. 41: 1463-1468.