

El cometabolismo y la biorremediación de suelos

contaminados con sustancias xenobióticas

Dra. Ma. del Rosario Peralta Pérez*

El constante crecimiento de las poblaciones humanas, junto con el desarrollo tecnológico a todos niveles, ha dado como resultado un incremento alarmante de la contaminación en el mundo. Esto ha propiciado que se busquen nuevas soluciones a ese problema; una de ellas es la biorremediación, que se define como el uso de microorganismos o partes de éstos para eliminar sustancias tóxicas en un sitio determinado.

Un fenómeno biológico que está estrechamente involucrado con la biorremediación es el "cometabolismo". El término fue propuesto inicialmente por Jackson W. Foster, en 1962, y lo describió como la transformación biológica de un compuesto, denominado cosustrato, en presencia obligada de un sustrato de crecimiento o suministrador de energía; esto quiere decir que los microorganismos transforman el cosustrato y el resultado (la molécula modificada), se acumula en forma estequiométrica mientras usa un sustrato para llevar a cabo la replicación celular y el mantenimiento. Debido a que generalmente se involucran reacciones de oxidación, se ha usado también el término cooxidación, aunque cometabolismo es un término más extenso que puede incluir reacciones de reducción, deshalogenación, etcétera.

Otros autores, como Dalton y Stirling (1982), han sugerido que cometabolismo se refiere a un metabolismo fortuito y no a un novedoso evento metabólico.

La razón por la que ocurre el cometabolismo no es clara, la principal explicación se da con base en la inespecificidad de las enzimas. Esto es, a veces se tiene la enzima capaz de metabolizar un paso, pero el produc-

to ya no puede seguir siendo transformado; o bien, se tiene una enzima que es inespecífica y actúa sobre un cosustrato estructuralmente similar al sustrato original, así que el producto ya no es reconocido y no puede seguir siendo transformado. Entonces, como regla podemos decir que muchas enzimas no son absolutamente específicas para un sustrato, actúan sobre moléculas con estructuras muy parecidas.

Como ejemplo de esto tenemos a:

- a) La metano monooxigenasa de bacterias metilotróficas.
- b) Tolueno dioxigenasa de bacterias aerobias.
- c) Tolueno monooxigenasa de bacterias aerobias.
- d) Dehalogenasas.

En la vida diaria, cuando un compuesto *recalcitrante* (difícil de degradar) se encuentra en el ambiente, como resultado de nuestras actividades industriales o domésticas, se acumula debido a que los microorganismos presentes son incapaces de *mineralizarlo* (oxidarlo hasta CO_2 y H_2O). Generalmente, esta incapacidad se debe a que dichos compuestos tienen estructuras no reconocidas por los microorganismos ya que son fabricados por el hombre; estos compuestos se denominan *xenobióticos* y un claro ejemplo de ellos son los plásticos. Hay veces que la mineralización puede favorecerse modificando las condiciones ambientales, o enriqueciendo los sistemas con nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio; o cambiando el pH y aireando. Sin embargo, como la cantidad de variables es muy grande o simplemente esta estrategia no funciona, es posible modificar una gran variedad de compuestos xenobióticos recalcitrantes por cometabolismo. En la tabla 1 se muestra una gran cantidad de ejemplos en donde podemos observar también

*Profesora investigadora en el Laboratorio de Catálisis Enzimática del TESE.



Tabla 1. Compuestos xenobióticos recalcitrantes biotransformados por cometabolismo.

Microorganismo	Compuesto	Fuente
<i>Hydrogenomonas</i> sp.	DDT	Foehy Alexander, 1971.
<i>Arthrobacter</i> sp.	Bifenilospoliolorinados.	Kolery col., 1988.
<i>Lactococcus</i> y <i>Lencosticus</i>	Carbohidratos y citrato	Cogan, 1987 Bandelly col., 1998.
<i>Pseudomonas</i>	Benzotiofenos metil sustituidos	Saffey col. 1992.
Bacterias Bacterias	Sucralosa PAHs: naftaleno, fenantreno, antraceno, fluoreno, pireno y fluoranteno.	Labrey Alexander, 1994 Bouchez col., 1995
Flora nativa de agua subterránea y sólidos de acuíferos	Cloroforno y 1,1,1 tricloroetano	Kimy col., 1997.
<i>Ciraphium</i> sp.	Metilter-butileter	Hauhsory col., 1997
<i>Pseudomonas acidovorans</i>	1,1-dicloro-2,2-bis(4-clorofenil)etileno	Hay y Foehi, 1998.

la diversidad de microorganismos que pueden llevar a cabo estas reacciones.

El cometabolismo puede jugar un importante papel en la modificación e incluso mineralización de este tipo de moléculas; un compuesto recalcitrante como los hidrocarburos poliaromáticos que aquí se representan, que no pueden ser usados por una sola especie de microorganismos, puede ser degradado por una serie de microorganismos que actúan sobre sustratos específicos. Se ha postulado que este sistema de ayuda para la total mineralización de xenobioticos recalcitrantes ocurre en la naturaleza, aunque probarlo ha sido muy difícil.

Las observaciones acerca de la existencia del cometabolismo, así como de la interacción de diversas poblaciones, fueron realizadas inicialmente en el laboratorio, se han hecho esfuerzos por extrapolar los resultados al campo y aplicarlos en la biorremediación de suelos.

Las primeras evidencias del cometabolismo en la naturaleza fueron realizadas por Jacobson y colaboradores en 1980. Se ideó un sistema modelo, que simulara la naturaleza, usando para ello microorganismos de sitios y comunidades microbianas heterogéneas con el fin de observar el cometabolismo de varios herbicidas marcados radiactivamente: flucloralin, profluralin, trifluralin y nitrofen (todos ellos son químicamente similares). Se usaron lodos de una planta de tratamiento de aguas y se les adicionó los herbicidas en una concentración de

100 µg/ml, 250 ml; los lodos se colocaron en matraces Erlenmeyer y se agitaron a 40 rpm.

Se tomaron muestras en diferentes días y se enriqueció el matraz con la periódica adición de lodos, que proporcionaron fuente de carbono y energía así como nuevos microorganismos. Se tuvieron dos tipos de muestras: unas que fueron aireadas continuamente y otras que sólo se airearon en forma esporádica, provocando una anaerobiosis discontinua. Los principales resultados obtenidos se muestran en la tabla 2, el tipo de aireación, el compuesto y el carbono 14 recuperado en los productos durante los diferentes días. Se puede observar que en todos los casos existe transformación de los herbicidas, y dicha transformación aumenta con el tiempo de incubación con ambos tipos de aireación.

En ninguno de los dos casos se encontró radioactividad asociada a la fracción de ácidos nucleicos del lodo, demostrándose que estos sustratos no se emplean en la formación de biomasa. Dicho estudio fue un primer esfuerzo por demostrar cometabolismo en un sistema similar a la naturaleza.

Otro estudio clásico fue realizado por Wilson y Wilson en 1985, este trabajo es de cometabolismo de tricloroetileno (TCE) en suelo. Se sabe la monooxigenasa de metanótrofos oxida y declorina metanos halogenados; se ha reportado también que las bacterias que oxidan propano pueden epoxidar etilenos. Estas observaciones sugieren que las enzimas

Forma de alineación	Compuesto	¹⁴ C recuperado en productos (%)			
		18	34	55	88
Aeróbico	Flucloralin	12.0	22.0	92	91
	Profluralin	3.5	27.0	66	87
	Trifluralin	3.0	7.0	N.D.	49
	Nitrofen	<0.1	1.2	30	40
Anaerobiosis discontinua	Flucloralin	N.D.	32	90	95
	Profluralin	0.5	2.8	17	23
	Trifluralin	3.4	5.7	82	91
	Nitrofen	N.D.	1.3	1.8	11

Tabla 2. Degradación de herbicidas en condiciones aerobias y anaerobias.

que epoxidan etileno pueden transformar al TCE. A fin de investigar esta posibilidad, se enriqueció un suelo haciendo pasar una corriente de gas natural (rica en metano) a fin de favorecer a los microorganismos que oxidan pequeños alcanos del gas natural para luego examinar la capacidad del suelo para remover el TCE. El TCE fue alimentado en una concentración de 150 µg/l, se observó que las columnas alimentadas con TCE que no fueron previamente sometidas a la corriente de gas natural no presentaron degradación significativa de TCE.

Comparando con otros resultados, se observa que mientras existe mineralización en este proceso aerobio, enriquecido con gas natural, bajo condiciones anaerobias la transformación es mínima y atribuible al cometabolismo.

Los resultados hasta ahora analizados son en sistemas líquidos; estos modelos no se parecen a lo que ocurre en ambientes naturales; por lo que no es posible aplicar directamente estos conocimientos a la realidad en forma directa. Una propuesta es usar los principios de la Fermentación en Medio Sólido (FMS) para la bioremediación de suelos. En trabajos realizados en la Planta Piloto de Fermentación en Medio Sólido, de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, usando un reactor de un kg de capacidad con suelo contaminado con hidrocarburos, enriquecido con un inóculo adaptado para la degradación de estos compuestos y bagazo de caña como agente de volumen, se logró una degradación de aproximación 18% de los HTP.

Otra idea para entender los complejos sistemas naturales, ha sido proponer un nuevo soporte para hacer crecer microorganismos sobre él. La propuesta ha sido emplear un sistema denominado "sol-gel", en donde alcóxidos metálicos reaccionan con agua, dando como resultado un polímero poroso capaz de retener agua y atrapar en su red polimérica una molécula modelo (fenantreno), que se sabe es cometabolizado en presencia de otra fuente de carbono, glucosa en este caso. El xerogel se prepara en

un medio ácido y se adiciona una solución de fenantreno disuelto en dimetilformamida, se calienta a 60° C, se lava y seca nuevamente, a fin de eliminar el etanol tóxico producido durante la reacción (Peralta-Pérez y Col, 2001).

Este soporte ha servido para hacer crecer sobre él, a dos hongos filamentosos *Aspergillus niger* ATCC9642 y *Phanerochaete chrysosporium* A594; se ha reportado que ambos hongos sólo biotransforman el FE a alcoholes, obteniéndose metabolitos que se acumulan en el MC lo cual podría atribuirse al fenómeno del cometabolismo.

Este tipo de sistemas simplificados y empleando FMS nos permite tener modelos de la naturaleza limpios y más fáciles de estudiar, la intención es que con el tiempo se obtengan resultados que se puedan extrapolar a la naturaleza. ☺

Bibliografía

- Dalton H. y Stirling, D. I. (1982), *Cometabolism*, Phil. Trans. R., Soc. Lond., B297, 481-496.
- Jacobson S. N.; O'mara, N. L. y Alexander M. (1980). *Evidence for cometabolism in sewage*, *Appl. Environ. Microbiol.*, 40: 917-921
- Peralta-Pérez M. R., Gutiérrez-Rojas M., Saucedo-Castañeda G. y Campero A. *SiO₂ Xerogel: A Suitable inert support for microbial growth*, *J. Sol-Gel Sci. and Tech.*, (2001), 20: 105-110.
- Wilson J. T. y Wilson B. H. (1985), *Biotransformation of trichloroethylene in soil*, *Appl. Environ. Microbiol.*, 49: 242-243.