

2013-07-01

Degradación de explosivos por medio de microorganismos

Joaquín L. Benavides López de Mesa

Universidad de La Salle, Bogotá, jbenavides@unisalle.edu.co

Follow this and additional works at: <https://ciencia.lasalle.edu.co/bi>

Citación recomendada

Benavides López de Mesa, Joaquín L. (2013) "Degradación de explosivos por medio de microorganismos," *Biodiversidad Colombia*: No. 2 , Article 5.

Disponible en:

This Artículo de Divulgación is brought to you for free and open access by the Revistas descontinuadas at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Biodiversidad Colombia by an authorized editor of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

Joaquín L. Benavides López de Mesa
Licenciado en Biología, MSc.
Universidad de La Salle
jbenavides@unisalle.edu.co



DEGRADACIÓN DE EXPLOSIVOS por medio de microorganismos

DESDE su invención, los explosivos han sido utilizados con diferentes fines industriales y militares. Sin embargo, al ser desechados y no realizar una adecuada disposición de estos, se producen residuos generalmente tóxicos que contaminan suelos y cuerpos de agua. Una posible solución para este tipo de contaminación son los microorganismos, algunos de los cuales tienen la capacidad de transformar estos compuestos.

Nota: a menos que se indique lo contrario, todas las fotos y las figuras son del autor.

¿CÓMO SE DEFINEN LOS EXPLOSIVOS?

Los explosivos son, por su naturaleza, compuestos químicos que consisten en una mezcla de materiales combustibles y oxidantes (materiales que al oxidarse, tienen la capacidad de liberar energía, desprendiendo calor) dando lugar a una rápida reacción química. El inicio de esta reacción puede efectuarse por calor (chispa o llama), fricción o impacto, u onda de choque (presión).

Los explosivos son utilizados con diferentes fines, por ejemplo, en obras civiles, extracción minera y en la industria militar. De hecho, algunos son utilizados como medicamentos para tratar afecciones cardíacas (como es el caso de la pentrita). En la figura 1 se puede observar la fórmula estructural de algunos de los explosivos más comúnmente utilizados.

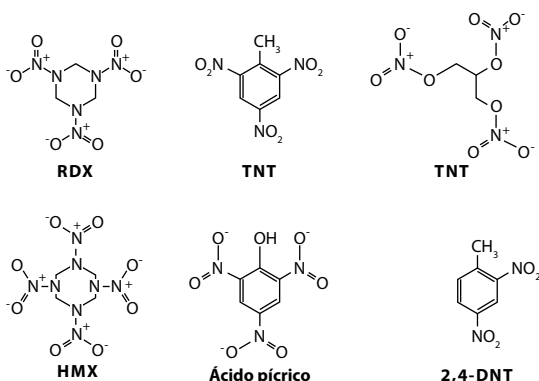


Figura 1. Diferentes tipos de explosivos encontrados en suelos contaminados
Fuente: Lewis *et al.* (2003).

¿QUÉ IMPACTO CAUSAN EN LA SALUD Y EN EL AMBIENTE?

Los residuos generados como resultado de la fabricación, el almacenamiento, el uso y la disposición de materiales explosivos, tanto en el ámbito militar como en el civil, se relacionan estrechamente con factores de riesgo para el medio ambiente y la salud humana.

Su amenaza para el medio ambiente no se limita al riesgo de la detonación, sino al efecto que, debido a su toxicidad y mutagenicidad,

genera en los sistemas biológicos, la salud animal y humana (Honeycutt *et al.*, 1996; Bruns-Nagel *et al.*, 1999; Steevens *et al.*, 2002).

Además, la presencia de explosivos altera la composición y la estructura de los suelos y contamina los cuerpos de aguas subterráneas y superficiales. Como si fuera poco, se ha encontrado que en los diferentes ecosistemas, la gran mayoría de los explosivos son muy persistentes en el ambiente, debido a que presentan una resistencia a procesos de degradación como la atenuación natural (Twibell *et al.*, 1984).

En el mundo, la presencia de residuos de explosivos es un problema más común de lo que se piensa; se encuentra en más

ATENUACIÓN NATURAL

...

Técnica usada para minimizar la concentración de contaminantes mediante el uso de procesos naturales como los microorganismos nativos, la adsorción de los contaminantes en las partículas o su fotodegradación o evaporación del compuesto por incremento de la temperatura ambiente.

de veinte países en el mundo, incluyendo países europeos, africanos y del continente americano (figura 2).

Debido a esto, es de suma importancia el adecuado tratamiento de los desechos sólidos y líquidos que surgen como resultado de la producción de explosivos. Históricamente los métodos para la eliminación de municiones incluyen la quema y la detonación en ambientes abiertos, así como su disposición en suelos (enterrándolos) o su

incineración. Sin embargo, tales métodos están cada vez más en desuso debido a su impacto ambiental negativo. En el caso de la incineración de suelos contaminados con TNT (un explosivo utilizado como base de la dinamita), esta trae como resultado la pro-

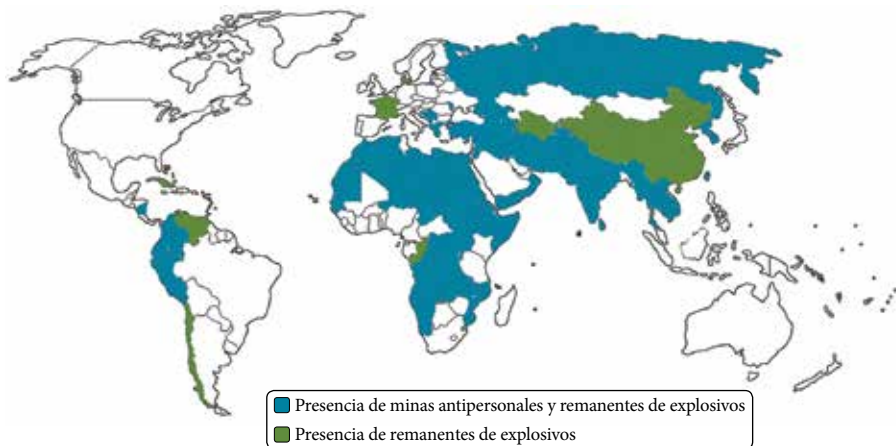


Figura 2. Contaminación global de remanentes de minas y explosivos utilizados con fines militares
Fuente: modificada a partir de Nazareth College (<http://www-pub.naz.edu:9000/~skeenan1/images/Contamination.jpg>).

ducción de miles de toneladas de ceniza que no pueden ser reutilizadas porque presenta una amenaza a la calidad del aire mediante la liberación de partículas finas. Por otro lado, la detonación de explosivos en campo abierto genera la liberación de contaminantes secundarios como dioxinas y bifenilos policlorados (Boyd y Bruce, 2002), dos compuestos altamente tóxicos que se acumulan en la cadena alimentaria, principalmente en el tejido adiposo de los animales. Estos contaminantes se pueden almacenar en productos como pescados, mariscos, lácteos y cárnicos; además, causan problemas en la reproducción y el desarrollo, modificar procesos hormonales y generar algunos tipos de cáncer en animales y probablemente en el hombre.

En cuanto a los explosivos que por cuestiones técnicas son enterrados, esta situación hace que el explosivo contamine el ecosistema, debido a que se va diluyendo en aguas subterráneas hasta llegar a aguas superficiales y suelos aledaños. Un indicativo de la presencia de explosivos como el TNT en agua es la presencia de coloración rojiza o vino tinto en esta.

UNA DE LAS SOLUCIONES: LA BIORREMIEDIACIÓN CON MICROORGANISMOS

Debido a su capacidad para transformar moléculas orgánicas en otros compuestos menos complejos, los microorganismos se han utilizado ampliamente para la descontaminación de suelos y cuerpos de agua. Esta técnica hace parte de un conjunto de estrategias denominadas *biorremediación*,

definida como cualquier proceso en el que se utilicen organismos vivos (como microorganismos, hongos o plantas) o sustancias químicas derivadas de estos (como enzimas) para reducir la contaminación de compuestos orgánicos e inorgánicos.

Así, la biorremediación permite minimizar el impacto de compuestos y subproductos de explosivos de manera controlada y eficiente, buscando la degradación completa (mineralización) de los explosivos; además, la gran versatilidad metabólica de los microorganismos permite que al ser degradados los contaminantes se puedan utilizar para su desarrollo como fuente de carbono, nitrógeno o energía (Eweis *et al.*, 1999; Rodgers y Bunce, 2001; Atlas y Bartha, 2002).

Numerosas investigaciones han demostrado que los microorganismos con capacidad degradadora de explosivos se pueden encontrar y aislar a partir de lugares contaminados con estos compuestos, debido a que los microorganismos que habitan en estos sitios contaminados han estado expuestos de forma prolongada a ellos y si están presentes en una zona afectada es porque han logrado sobrevivir en las condiciones de contaminación del sitio. Esto trae como consecuencia que se encuentren adaptados metabólicamente a estas condiciones ambientales (French *et al.*, 1999).

En consecuencia, se han encontrado cepas microbianas y de otros microorganismos capaces de transformar varias clases de explosivos; estos microorganismos pueden actuar de manera individual o en consorcios, siendo estos últimos los más efectivos para los procesos de biorremediación de la ma-

yoría de los compuestos, debido a sus relaciones de cometabolismo. Los consorcios pueden realizar funciones que son difíciles e incluso imposibles para especies o cepas individuales. Por ejemplo, es difícil que una sola especie tenga la capacidad para metabolizar compuestos que tengan entre cinco y seis átomos de carbono; sin embargo, diferentes microorganismos sí podrían complementarse para degradar un compuesto tóxico y optimizar el proceso de biodegradación. Otra característica importante de los consorcios microbianos es su capacidad de realizar funciones que requieren varias etapas; estas tareas son posibles cuando las diferentes etapas se han completado mediante la acción de distintos tipos de células (Brenner *et al.*, 2008).

Por todo lo anterior, el uso de microorganismos para su aplicación y su implementación en los procesos de biorremediación de explosivos los convierten en una alternativa viable, sencilla, económica y, lo más importante, ambientalmente amigable.

¿CÓMO LOS MICROORGANISMOS DEGRADAN EXPLOSIVOS?

En los ecosistemas se encuentran muchos microorganismos que poseen la capacidad de degradar una gran variedad de los compuestos xenobióticos presentes en diferentes ambientes. En la mayoría de los casos, estos compuestos son mineralizados por microorganismos mediante el uso de rutas metabólicas, las cuales generan productos intermediarios que, en algunos casos, pueden ser utilizados como precursores en el crecimiento del microorganismo. Lo anterior, unido al proceso de presión selectiva de microorganismos que poseen nuevas posibilidades de degradación, constituye el proceso por el cual estos se han adaptado a la presencia de los compuestos xenobióticos (Alexander, 1999) y pueden llegar a degradarlos.

CEPA MICROBIANA

...

Es una variante fenotípica de una especie, es decir, individuos que contienen una serie de instrucciones heredadas incluidas en su código genético, lo que les da identidad.

CONSORCIO

...

Poblaciones microbianas que están constituidas por más de dos especies distintas de microorganismos que, en conjunto, degradan uno o varios sustratos.

COMETABOLISMO

...

Transformación no obligatoria de un compuesto orgánico por acción de un microorganismo que es incapaz de usar otro sustrato presente como fuente de energía o como un elemento nutritivo esencial. Esto da lugar a poblaciones activas que obtienen beneficios no nutricionales de los sustratos que cometabolizan.

En general, los explosivos pueden ser biodegradados aeróbica (en presencia de oxígeno) y anaeróbicamente (en ausencia de oxígeno), siendo esta última vía la más efectiva para su transformación (Sagi *et al.*, 2012). Como resultado final de la degradación o de la transformación se pueden generar subproductos que, en algunos casos, pueden ser inocuos o en su defecto causan un impacto ambiental negativo en aguas o suelos.

XENOBIÓTICOS

...

Compuestos químicos sintetizados por acción humana, generalmente muy persistentes en el ambiente y de baja biodegradabilidad. No se encuentran presentes en la naturaleza ni son producidos por organismos vivos.

Los consorcios microbianos permiten combinar y completar las funciones metabólicas de diferentes organismos, para que colectivamente biodegraden compuestos como los explosivos. En muchos casos, algunos grupos de microorganismos solo pueden realizar una parte de toda una cadena de reacciones

químicas para llegar a compuestos que puedan ser fácilmente utilizados por los organismos del mismo consorcio u otros que estén presentes en el ambiente. Además, al estar en grupo los microorganismos constituyentes pueden tolerar los cambios físicoquímicos que se den en el ambiente durante el proceso de biorremediación (Brenner *et al.*, 2008). Si, por el contrario, se realizan aislamientos

de cepas puras, cada cepa aislada no es capaz de degradar todos estos compuestos de manera simultánea; por lo tanto, los consorcios microbianos son esenciales en la mineralización de estas sustancias.

PRESIÓN SELECTIVA

...

Mecanismo mediante el cual por acción de la alta concentración de un contaminante se seleccionan las poblaciones de microorganismos que son capaces de sobrevivir mediante su degradación o transformación.

¿QUÉ INVESTIGACIONES HAY AL RESPECTO?

Los explosivos se consideran difícil degradación debido a su composición y naturaleza. Sin embargo, se han desarrollado diversos estudios con el fin de encontrar y aislar microorganismos con capacidad degradadora y así potenciar esta función para hacer más eficiente este proceso.

En el ámbito mundial, los trabajos de investigación que se han hecho con respecto a procesos de recuperación de ecosistemas contaminados con explosivos, generalmente, están encaminados hacia la aplicación de métodos tradicionales como la incineración, la detonación o el enterramiento en el subsuelo.

En lo concerniente a técnicas que usen microorganismos como agentes depuradores de ambientes contaminados, países como Estados Unidos, Gran Bretaña, España y Canadá son los de mayor relevancia en cuanto a investigación y publicaciones en el área. Además, las rutas o los procesos de biodegradación de estas sustancias se han estudiado durante más de treinta años. La variedad de trabajos acerca de este tema abarca temáticas como el aislamiento de cepas que poseen la capacidad de usar el TNT, PETN, RDX o HMX, bien sea como fuente de carbón, nitrógeno o energía. En estas investigaciones se han encontrado y se han aislado cepas bacterianas como *Enterobacter cloacae*, *Agrobacterium radiobacter*, *Pseudomonas putida*, y cepas de hongos como *Phanerochaete chrysosporium*, *Phlebia radiata*, *Trametes versicolor*, *Agaricus aestivalis*, *Aspergillus terreus*, *Fusarium solani* (Spain *et al.*, 2000; Lin *et al.*, 2013). Además del aislamiento de cepas puras también se han creado consorcios a partir de la mezcla de cepas bacterianas con capacidad degradadora de estos compuestos (consorcios definidos) y el aislamiento de pocos consorcios no definidos con base en muestras de suelos contaminados con explosivos.

Para Colombia, la información que existe sobre conformación y aislamiento de consorcios para la biorremediación de explosivos es muy escasa o limitada, lo cual brinda un amplio campo de investigación.

El único estudio desarrollado en esta área ha sido liderado por el Grupo de Investigación en Bioprospección y Conservación Biológica (llamado antiguamente

Grupo de Biorremediación Ambiental) de la Universidad de La Salle y por el Grupo de Investigación de la Unidad de Saneamiento y Biotecnología Ambiental (USBA) de la Pontificia Universidad Javeriana. Estos dos grupos han trabajado durante los últimos cuatro años aislando microorganismos degradadores de PETN (un agente detonante, que también se ha utilizado como medicamento) y TNT, a partir de ambientes contaminados con explosivos; además, han logrado establecer consorcios bacterianos capaces de transformar dichos explosivos.

Para este fin se aislaron 210 cepas bacterianas degradadoras de PETN y 245 cepas bacterianas degradadoras de TNT, y se establecieron 10 consorcios microbianos capaces de degradar estos compuestos de forma aeróbica. Aunque los explosivos se transformaron en compuestos menos complejos, no se logró la mineralización (es decir, su transformación total a dióxido de carbono y agua). Además, algunas cepas transformaron los explosivos en compuestos menos tóxicos y otras en compuestos más tóxicos, lo cual deberá ser tenido en cuenta en futuras investigaciones para definir cuidadosamente los consorcios por ser utilizados (figura 3).

Así es como el desarrollo de esta investigación permitió conocer y profundizar en el campo de la biorremediación de explosivos, el cual ha sido poco estudiado en nuestro país. La identificación de los microorganismos con capacidad degradadora permitirá utilizarlos como un sistema integrado en explosivos comerciales biodegradables y en el tratamiento de residuos generados en

esta industria y ecosistemas contaminados con estos compuestos, mediante distintas técnicas de biorremediación microbiana.

La idea no es solamente buscar explosivos comerciales que sean biodegradables, sino —y más importante para la situación actual en Colombia y el mundo— usar microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados, de forma que estas cepas se transformen en un producto que se pueda comercializar y que ayuden a resolver estos problemas de contaminación por explosivos.



Figura 3. Aislamiento preliminar de consorcios microbianos degradadores de pentolita a partir de muestras de suelos, lodos y agua con presencia de explosivos

Fuente: Valderrama y Palomino (2011).

BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, M. (1999). *Biodegradation and Bioremediation* (2ª ed.). San Diego, California: Academic Press.
- Atlas, R.M. y Bartha, R. (2002). *Ecología microbiana y Microbiología Ambiental* (4ª ed.). Madrid: Pearson Education.
- Boyd, E. y Bruce, N. (2002). Defusing the environment. *Microbiology Today*, 29.
- Brenner, K, Lingchong Y. and Frances, A. H. (2008). Engineering microbial consortia: A New Frontier in Synthetic Biology. *Trends in Biotechnology*, 26 (9), 483-489.
- Bruns-Nagel, D., Scheffer, S., Casper, B., Garn, H., Drzyzga, O., Von Löw, E. y Gemsa, D. (1999). Effect of 2,4,6-trinitrotoluene and its Metabolites on Human Monocytes. *Environmental Science and Technology*, 33 (15), 2566-2570.
- Eweis, J., Ergas, S., Chang, D. y Schroeder, E. (1999). *Principios de biorrecuperación* (1ª ed.). Madrid: McGraw Hill.
- French, C., Rosser, S., Davies, G., Nicklin, S. y Bruce, N. (1999). Biodegradation of explosives by transgenic plants expressing pentaerythritol tetranitrate reductase. *Nature Biotechnology*, 17, 491-494.
- Honeycutt, M.E., Jarvis, A.S. y Mefarland, V.A. (1996). Cytotoxicity and Mutagenicity of 2,4,6-trinitrotoluene and its Metabolites. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 35 (3), 282-287.
- Lin, H., Yu, Ch. y Chen Z. (2013) Aerobic and anaerobic biodegradation of TNT by newly isolated *Bacillus mycoides*. *Ecological Engineering*, 52, 270-277

- Rodgers, J. y Bunce, N. (2001). Treatment methods for the remediation of nitroaromatic explosives. *Water Research*, 35 (9), 2101-2111.
- Sagi-Ben Moshe, S., Ronen, Z., Dahan, O., Weisbrod, N., Groisman, L., Adar, E. y Nativ, R. (2009). Sequential biodegradation of TNT, RDX and HMX in a mixture. *Environmental Pollution*, 157, 2231-2238.
- Spain, J.C. y Hughes J. B., (2000). *Knackmuss H-J., Biodegradation of Nitroaromatic Compounds and Explosives*. Florida (US). CRC Press.
- Steevens, J.A., Duke, B.M., Lotufo, G.R. y Bridges, T.S. (2002) Toxicity of the explosives 2,4,6-trinitrotoluene, hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine, and octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine in sediments to *Chironomus tentans* and *Hyalella azteca*: low-dose hormesis and high-dose mortality. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21 (7), 1475-1482.
- Twibell, J.D., Turner, S.L. y Smalldon, K.W. (1984). The Persistence of Military Explosives on Hands. *Journal of Forensic Sciences*, 29 (1), 284-290.

