

Biorremediamos nuestros problemas

Albert Sabater Barragan



En la facultad de Biología de la Universidad de Barcelona podemos encontrar un pequeño grupo de investigación consolidado por la Generalitat dedicado a abordar los problemas ocasionados por agentes contaminantes. Liderado por la doctora Magdalena Grifoll, el grupo de Biorremediación y Biodegradación lleva a cabo su labor investigando para descubrir microorganismos que degraden hidrocarburos nocivos para el medio ambiente y describiendo los compuestos que se producen durante este proceso. Además, también actúan ofreciendo servicios a empresas que deseen solventar el problema de la contaminación en sus propios terrenos.

Vivimos en un mundo especial

Nuestro planeta es especial. Esta afirmación no se debe a un simple arrebató de egocentrismo, sino que se hace referencia al significado genuino de la palabra especial. Aunque haya muchos otros cuerpos celestes con capacidad de albergar vida y todavía hoy el número de candidatos sigue aumentando ostensiblemente, la Tierra es el único planeta conocido que contiene vida. Durante miles de millones de años, incontables seres vivos han estado coexistiendo, evolucionando, dando lugar a especies más complejas y dejando una pequeña huella que permitía identificar su paso. Así podemos conocer la existencia de organismos que, aun habiéndose extinguido hace eras, desempeñaron un rol extremadamente importante, forjando los eslabones que forman nuestro pasado y permitieron así que la vida sea como la conocemos actualmente.

Hoy en día, ese legado continúa prevaleciendo. El mundo en el que vivimos es el resultado de más de 3.500 millones de años de procesos evolutivos que se detendrán en el momento en el que toda forma de vida haya llegado irremediamente a su fin. Consciente o inconscientemente, todos los seres vivos que habitamos en este gran planeta también dejamos nuestra huella para dejar claro que hemos existido en un momento dado. Sin embargo, si hay una especie, entre todas las que conviven, que más empeño ha puesto en destacarse por encima de las demás, esa sería sin duda el ser humano.

Si comprimieramos la historia de la tierra en un reloj de 24 horas, nos encontraríamos que los humanos no aparecieron hasta muy tarde. Si la hora 0 coincidiera con la misma formación de la Tierra, hasta las 4 horas no aparecería el primer rastro de vida. A las 6 horas surgieron los primeros organismos fotosintéticos, mientras que no sería hasta las 16 horas que las células con núcleo harían acto de presencia. Si queremos ver cómo las plantas invaden tierra firme, tendríamos que esperar hasta las 22 horas. ¿Y los humanos? El **primer humano nacería alrededor de las 23:59:30 horas**. En efecto, toda nuestra historia se resume en 30 segundos, incluyendo la parte en la que ni siquiera existían poblaciones asentadas. Si sólo quisiéramos contar a partir de la revolución industrial, punto en el que la humanidad fue encadenando logro tras logro, apenas contaríamos con unos pocos segundos.

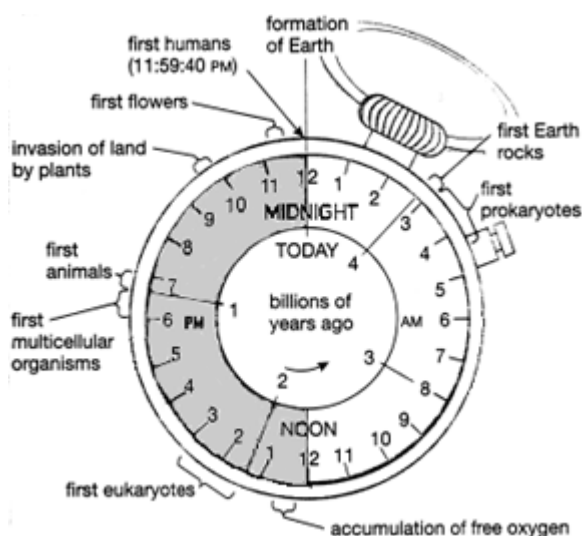


Imagen 1. (<http://www.counterbalance.org>) Historia de los aproximadamente 4.500 millones de años de la Tierra comprimida en 24 horas.

En el fondo, tampoco hemos estado habitando este mundo durante tanto tiempo como parecemos creer, ni tampoco somos la única especie que reside en este, así como tampoco somos la más importante. Sí es cierto que en conjunto hemos conseguido hitos impresionantes: hemos colonizado casi cualquier rincón del planeta, conseguimos vivir en los hábitats más inhóspitos, hemos moldeado el entorno a nuestro confort, somos capaces de recorrer largas distancias con mayor rapidez que el más veloz de los animales, podemos surcar los cielos como cualquier ser volador aún sin contar con alas propias para ello, hemos conseguido viajar fuera del planeta en el que vivimos y navegar a través del espacio exterior. Todas estas proezas han sido llevadas a cabo mediante el conocimiento que se ha ido transmitiendo de generación en generación, ampliándolo y pudiendo así avanzar como especie. La curiosidad es uno de los principales motores que empujan al ser humano a actuar y a descubrir lo que permanecía en el halo oscuro de la ignorancia. Si no hubiera sido por la curiosidad y por la capacidad de raciocinio, difícilmente tendríamos los redaños de autoproclamarnos como la especie dominante del planeta, aún siendo muy vulnerables como individuos.

Sin embargo, todo progreso tiene su precio. Por mucho que las acciones hayan sido hechas en pos de un bien mayor, ha habido consecuencias. La huella que ha dejado el ser humano es, sin duda, muy profunda pese a la brevedad de nuestra existencia. Una marca indeleble que difícilmente se diluirá con el paso del tiempo. Grandes extensiones de bosques que desaparecen para dar lugar a ciudades. Mares menos poblados debido a una intensa actividad pesquera. Ecosistemas enteros que se ven peligrados a causa de la caza. Parajes alterados debido a la obtención de recursos. Esta es la otra cara de la moneda del progreso. Por muchos avances que se hayan dado, siempre van a haber consecuencias negativas que se deriven de ello hasta que no aprendamos a solventarlas con eficacia.

Uno de los grandes problemas surgidos es precisamente la **contaminación**. Usualmente, ésta se suele definir como “la introducción de sustancias en un medio que provocan que este sea inseguro o no apto para su uso”. El agente contaminante puede ser una **sustancia química** o puede ser **energética**, como por ejemplo la misma luz (contaminación lumínica) o radiactividad. Representa siempre una alteración negativa del estado natural del medio y, por lo general, se genera siempre por la actividad humana. No resulta una afirmación pretenciosa creer que la humanidad es especial en un mundo especial si es capaz de modificar el entorno a su gusto aun habiendo todos los efectos colaterales que se derivan.

Sin embargo, no todo es tan negativo como parece. Es cierto que nuestro planeta no pasa por sus mejores momentos, pero no nos quedamos con los brazos cruzados. Buscamos soluciones a estos problemas prácticamente sin descanso porque en principio queremos dejar algo más que un legado ruinoso a los que aún están por llegar. De hecho, muchos de estos contratiempos no existirían si la mayor parte de la energía no la obtuviéramos de los combustibles fósiles. Las industrias suponen una inconveniencia importante: son un motor importante de nuestro desarrollo que dependen enormemente de esta fuente de energía, pero han ocasionado serios problemas como la emisión de gases de efecto invernadero. Por si fuera poco, la atmósfera no es la única que se ve afectada, sino que el suelo sobre la que se asenta la planta también está perjudicado debido a los residuos que se producen. Si bien los

perjuicios de la contaminación atmosférica son ampliamente conocidos, los del suelo están relativamente menos divulgados. Y no se trata de los causados por vertidos sino por compuestos producidos a raíz de una transformación de estos combustibles.

Biorremediación

La biorremediación surgió como una propuesta para limpiar las zonas contaminadas por la acción de las industrias. Aunque el uso de los combustibles fósiles sea el icono más significativo de contaminación en general, no se trata del único que contribuye a malmeter el medio ambiente. Existen muchos otros agentes que colaboran en esta tarea tan negativa y pueden ser igual de dañinos: el arsénico, el cromo, las dioxinas, el mercurio, el perclorato, compuestos aromáticos... Es una extensa lista de compuestos con aplicaciones diversas en el mundo industrial que van desde la producción de insecticidas hasta disolventes pasando por la manufactura de muchos otros materiales. Aunque muchos de estos hayan sido producidos artificialmente, como es el caso de las dioxinas, llama la atención que el resto, naturales, supongan un riesgo para el entorno. La razón es simple: si bien en una situación normal no encontraríamos una aglomeración de arsénico o de cromo, esto cambia en un suelo industrial, pues en estas zonas se tienden a acumular estos elementos debido a que en los procesos que se llevan a cabo se requieren (o se producen, en su defecto) para su correcto funcionamiento.

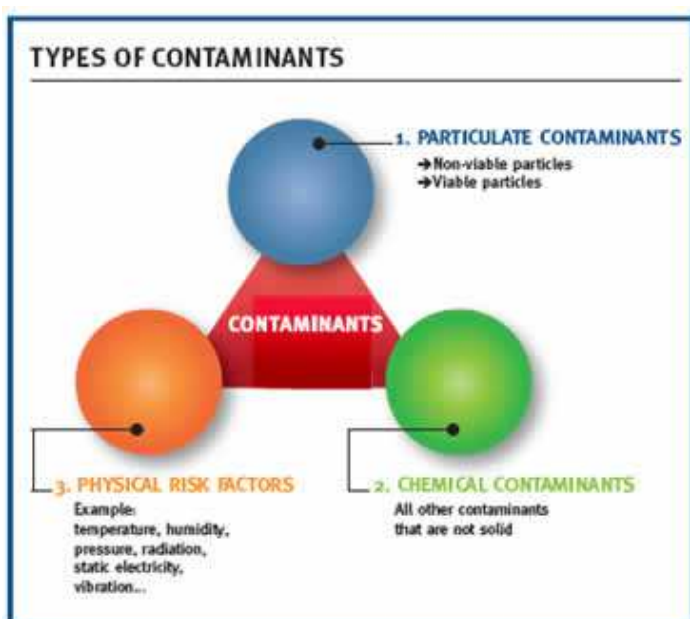


Imagen 2.

(<http://contaminationcontrol.dpp-europe.com>) Tipos de contaminantes. Aunque nos centramos en los agentes químicos, hay de otros tipos que pueden perjudicar el ecosistema.

Como respuesta a tal variedad de contaminantes, existe una igual cantidad de métodos usados para la eliminación de estos compuestos. Cada uno es más o menos eficaz, y puede resolver el problema definitivamente o aplazarlo durante un tiempo. Por ejemplo, si tenemos un suelo contaminado, podemos utilizar un método de volatilización para extraer el material, usar algún tipo de disolvente que deje pocas o nulas secuelas o, si es viable, excavar el terreno afectado y trasladarlo a otro lugar. De este último modo, la zona original ya no estaría afectada.

La biorremediación, sin embargo, no usa estos procedimientos físicos para deshacerse de estos agentes contaminantes. Generalmente son más difíciles de usar, más caros y conllevan más tiempo. En su lugar, aprovecha la actividad metabólica de pequeños microorganismos

para transformar los compuestos nocivos en otros inocuos o, en su defecto, más fácilmente asimilables por otros organismos. En efecto, lo que para una gran mayoría representaría una opción inviable, unos pocos son capaces de coger estos compuestos perjudiciales y usarlos como fuente de energía para sus propias funciones. El área en la que se especializa el grupo de la Dra. Grifoll son los **hidrocarburos**, típicos contaminantes de un suelo industrial, de modo que nos centraremos en los microorganismos que degradan estos compuestos; sin embargo, cabe destacar que existen otros microorganismos que puedan actuar sobre los otros contaminantes ya mencionados.

Cuando nos referimos a microorganismos, en realidad estamos describiendo a un grupo muy extenso en el que se encuadran bacterias, arqueas, protozoos y una parte de las algas y hongos, además de los virus. Aunque las bacterias son las que disponen de mejores mecanismos para asimilar los contaminantes en forma de hidrocarburos, eso no implica que otras especies microbianas no lo puedan hacer, aunque tiende a ser más raro. De hecho, lo usual es que en una zona tengamos una amplísima variedad de microorganismos y sólo una pequeña fracción, si es que existe, es capaz de usar hidrocarburos como fuente de energía.

Teniendo en cuenta todo esto, cuando estamos ante un terreno contaminado a causa de una actividad industrial, existen dos aproximaciones para abordar este problema:

- La llamada **bioatenuación natural monitorizada**. Si nos decantamos por esta opción, debemos mapear muy bien el entorno afectado para entender perfectamente el tipo de contaminante que está presente así como su distribución. Esto querrá decir que tendremos que saber el tipo de suelo que hay, ya que no es lo mismo un suelo de tierra que de rocas; la afectación en profundidad y el riesgo para el ecosistema en general. Una vez está todo analizado, se comprueba que no haya un riesgo inminente aunque de haberlo, se haría un confinamiento, algo así como dejar la zona en cuarentena.

A continuación se van haciendo pozos para evaluar la actividad de los microorganismos a fin de demostrar que los microorganismos que residen en ese lugar degradan activamente el contaminante. Si no fuera así, no podríamos optar por la bioatenuación natural. Además, el plazo de destrucción debe ser relativamente asequible, ya que no nos podemos permitir dejar pasar demasiado tiempo ya que el riesgo podría aumentar. La población microbiana presente en el medio se encargaría de degradar por sí misma el contaminante presente y transformarlos en sustancias inocuas. Usaremos, si se tercia, métodos físicos como los descritos anteriormente para ayudar a la eliminación de los contaminantes. Aunque a priori pueda parecer que nuestra actuación en el terreno es mínima, hay una carga de trabajo considerable, pues hay que demostrar que hay un proceso activo de degradación y no existe un riesgo de que el contaminante se esparza y afecte al resto del ecosistema.

- **Biorremediación dirigida**. Si por el contrario se requiere una actuación, entonces hay que escoger esta opción. Al contrario que la opción anterior en la que no

inflúamos directamente sobre las poblaciones microbianas, aquí intentaremos estimularlas para que la proporción de microorganismos capaces de degradar hidrocarburos aumente y así se elimine el contaminante con mayor eficacia.

Biorremediación dirigida.

Primeramente, debemos tener presente cuáles son los tipos de nutrientes que empleamos para obtener energía. La clasificación más general los reparte en glúcidos o hidratos de carbono; lípidos o grasas; y finalmente, proteínas. Hay otros componentes que no se pueden encuadrar en las tres categorías anteriores porque sus características difieren sensiblemente. Entre ellos, tenemos los ácidos nucleicos como el ADN y el ARN, las vitaminas y los compuestos minerales que los encontramos en cantidades ínfimas, como el cobalto, el manganeso, el molibdeno, selenio, hierro y zinc entre muchos otros que están a una concentración tan diminuta que se consideran prácticamente menospreciados y, sin embargo, son vitales para que el organismo pueda desempeñar sus funciones normales.

Todos los organismos se componen en mayor o menor medida de estos compuestos, desde el más pequeño de las bacterias hasta el más grande animal que habita en este mundo. De manera general, se podría decir que los seres vivos se componen mayoritariamente de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre en mayor medida, seguidos de los elementos traza, hallados en menores concentraciones, combinándose para formar los componentes mencionados anteriormente.

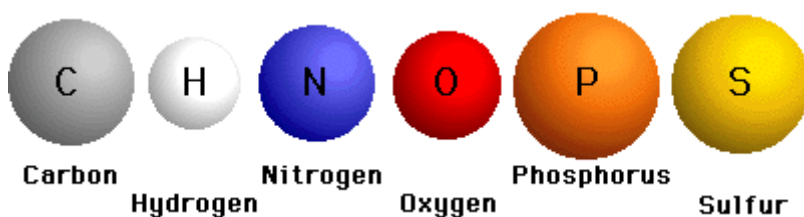


Imagen 3. Principales bioelementos que forman la vida. Aunque estos son los mayoritarios, hay decenas de elementos más que se encuentran en concentraciones casi inapreciables e igualmente indispensables.

Pero, ¿cómo incorporan los organismos estos elementos a su interior? ¿De dónde obtienen la energía necesaria para ello? La forma de nutrirse varía enormemente según el ser vivo del que hablemos. En nuestro caso, el de los humanos, tenemos claro que para obtener energía debemos ingerir alimentos, que pasarán por un proceso de digestión. Sin embargo, esto no es aplicable para seres más pequeños como las bacterias. Hay una grandísima variedad de especies bacterianas, cada cual con un mecanismo distinto para asimilar nutrientes. Habrá quien necesite una fuente de carbono tradicional como es la glucosa en un ambiente con oxígeno, habrá quien pueda valerse solamente con este glúcido, habrá quien use la luz para obtener energía, otros que necesiten además el ácido sulfhídrico, un gas peligroso para nosotros, los humanos. Después, gracias a esta energía obtenida por uno u otro método vendrá la asimilación de otros nutrientes, como aquellos ricos en nitrógeno y fósforo, para sintetizar sus propias estructuras y poder crecer.

En un suelo normal, encontraremos una población bacteriana más o menos variada. Cada especie captará los nutrientes que pueda y crecerá acorde a ellos. Probablemente dispongan de mecanismos para poder captarlos en circunstancias diversas, pero no hacen uso de ellos porque están en una situación normal y apacible. La relación de **carbono: nitrógeno: fósforo** presente en el suelo es la que se esperaría y por ello no surgen problemas.

En un suelo contaminado por hidrocarburos, la situación cambia. La relación de **carbono: nitrógeno: fósforo** se desequilibra completamente. Estamos en una situación en la que hay muchísimo carbono disponible respecto a la cantidad de nitrógeno y fósforo. Por si fuera poco, no todas las especies bacterianas presentes en ese suelo son capaces de asimilar esta nueva fuente de carbono, por lo que apenas podrán crecer con naturalidad. Y si a la vida microbiana se le hace difícil subsistir, el resto de especies (hongos, plantas, animales...) lo tendrán imposible. Esa zona se convierte en un lugar hostil para vivir.

Sin embargo, no todo es tan oscuro como parece. En esa gran población bacteriana puede haber algunas especies que sí sean capaces de metabolizar estos hidrocarburos, de obtener energía a partir de estos y poder crecer. Pueden aprovechar esta nueva situación para imponerse ante las otras especies bacterianas que son incapaces de incorporar esta fuente de carbono tan extraña. Antes, las bacterias degradadoras de hidrocarburos se encontraban en menor proporción debido a que estaban especializadas en degradar largas cadenas de estos compuestos mientras que las otras especies tenían una mayor habilidad para captar compuestos más simples. Ahora, las bacterias degradadoras de hidrocarburos pueden consumir estos compuestos y reducir su concentración hasta que las otras especies sean capaces de volver a captar nutrientes. Son precisamente estas bacterias de características tan particulares la principal herramienta que emplea la biorremediación para tratar de descontaminar una zona sobre la que ha habido actividad industrial.

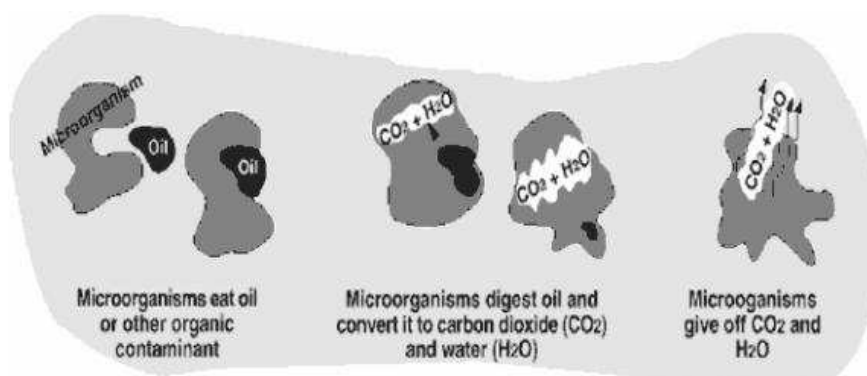


Imagen 4. (<http://www.egr.msu.edu>) Un microorganismo podrá captar el agente contaminante, en este caso petróleo, y degradarlo para que su concentración disminuya.

Si las condiciones del entorno son suficientes, entonces se puede dejar actuar a la población microbiana para que consuma estos hidrocarburos y controlaremos cómo va el proceso. Esta es la bioatenuación natural que se había comentado anteriormente y que puede estar suplida por métodos físicoquímicos adicionales a fin de acelerar un poco el proceso. Normalmente

esto no suele ocurrir con la frecuencia que desearíamos, y para eso hemos de dar un pequeño empujón a las bacterias para que proliferen.

Las bacterias degradadoras de hidrocarburos necesitan oxígeno para poder llevar a cabo su actividad. Por ello, el primer paso sería remover la tierra, airearla para que el oxígeno llegue a todos los niveles del suelo y así las bacterias sean más eficientes a la hora de trabajar. Aún así, falta algo más. Todos los organismos crecen siguiendo unas proporciones específicas de carbono: nitrógeno: fósforo. En el momento, la balanza se ha descompensado completamente hacia el carbono. Pero las bacterias no pueden vivir solamente de esto. Las proteínas están compuestas por nitrógeno, los ácidos nucleicos tienen nitrógeno y fósforo. Hace falta toda una retahíla de elementos más para que se dé un crecimiento adecuado. Es por ello que en la biorremediación dirigida se adicionarán compuestos ricos en nitrógeno y fósforo, entre otros, para que la proporción carbono: nitrógeno: fósforo esté más compensada.

Se puede dar el caso que la población microbiana no sea capaz de degradar el contaminante o, en su defecto, se encuentra en una concentración tan baja que prácticamente no tiene ningún efecto en el terreno. Esto puede ocurrir en lugares muy limpios donde no ha habido una contaminación previa y, por lo tanto, no habrá habido la oportunidad para que estos microorganismos hayan aparecido. También puede deberse a la presencia de un producto tóxico que inhibe a las poblaciones presentes.

Es en estos casos en los que tendrás que añadir algún componente adicional para acelerar el proceso de biorremediación. El **biorefuerzo** consiste en inocular o añadir microorganismos extra que sí degraden el contaminante a una alta concentración. Estos microorganismos añadidos pueden provenir de la misma zona afectada, que los has trasladado al laboratorio y allí los has multiplicado; o puede ser un grupo que no sea originaria del lugar. El inóculo puede estar formado por una única especie degradadora o por un conjunto, pero esto ya dependerá del tipo de contaminación que haya en el entorno. Si bien esta es la idea general, hay una serie de pasos que se deben seguir antes de dar el problema por finalizado.

Fases de la biorremediación

La biorremediación no la lleva a cabo una única persona, sino que se trata de un campo interdisciplinar: hidrogeólogos, químicos ambientales, microbiólogos e ingenieros que colaboran entre sí para intentar descontaminar un terreno. De forma general, un proceso de biorremediación seguirá las etapas siguientes:

- **Investigación del lugar** en relación con los contaminantes y en relación con el tipo de suelo. Se estudia y analiza el emplazamiento así como la identificación, grado y distribución de la contaminación. El término “hidrocarburo” abarca muchos compuestos distintos, y los microorganismos degradadores de hidrocarburos es un concepto igualmente general. Por ese mismo motivo se debe caracterizar bien la zona contaminada antes de planear una estrategia adecuada.
- **Desarrollo de ensayos de tratabilidad** a nivel de laboratorio. Esta es una etapa que, aunque representa una parte muy pequeña del coste total, proporciona información fundamental para la biorremediación y es precisamente a lo que el grupo de

Biorremediación de la facultad de Biología se dedica como un servicio que prestan a empresas, además de su propia labor de investigación. Aquí principalmente se conocerá el tipo de poblaciones microbianas existentes y sus capacidades metabólicas.

- **Desarrollo de ensayos a escala piloto.** Una vez tenemos una idea de a qué nos enfrentamos y de qué disponemos, es hora de llevar a cabo algunos experimentos a pequeña escala para ver si son realmente efectivos. No se aplica directamente sobre toda la extensión del área afectada porque, de fallar, la pérdida de recursos sería considerable.
- **Implantación de la tecnología** escogida. No tenemos una única metodología, y podemos haber contemplado diversas opciones porque una que funcionaba a nivel de laboratorio no lo hacía a escala completa.

De estas etapas, probablemente la de los ensayos de tratabilidad es la que se debe hacer más hincapié debido a que las probabilidades de que la biorremediación sea un éxito o no depende de gran manera de esta fase. Los ensayos de laboratorio tienen dos fases: factibilidad y la tratabilidad propiamente dicha.

En los **ensayos de factibilidad** miraremos si el emplazamiento reúne las condiciones para hacer una biorremediación. En el caso que nos ocupa, los hidrocarburos, efectuaremos una enumeración de la cantidad de organismos degradadores. Contaremos entonces la población heterótrofa total en condiciones aerobias y contaremos los organismos degradadores en un medio simple. Si la zona ha sido contaminada por un crudo de petróleo, a ese medio le añadiremos esa misma sustancia. Si el agente contaminante es un hidrocarburo en concreto, al medio le añadiremos ese hidrocarburo. Así veremos la cantidad de microorganismos que degradarán específicamente este contaminante. Una situación ideal sería que la concentración de bacterias degradadoras fuera de 10^5 o 10^6 , porque eso implicaría una fácil estimulación de las bacterias.

Una prueba secundaria consiste en la denominada **respirometría**, que consiste en evaluar la actividad de la población microbiana de la zona contaminada. Queremos ver si ese suelo podrá responder a una bioestimulación, es decir, si se detectará algún tipo de actividad si añadimos nutrientes. Consiste en una prueba rápida en la que se mide la cantidad de CO_2 que se produce en el momento de la intervención. Ponemos nutrientes (en forma de nitrógeno y fósforo, principalmente), ajustamos la humedad y se observan qué respuestas se obtienen para determinar así si las poblaciones microbianas son estimulables. Uno de los tratamientos que se llevan a cabo es la aplicación de glucosa para ver si hay algún inhibidor de la actividad microbiana. La glucosa es el sustrato más fácilmente asimilable por las bacterias y el que usarán preferentemente para obtener energía. Si el suelo tuviera algún material tóxico, la capacidad de obtención de energía se vería seriamente perjudicada, por eso lo tenemos que comprobar mediante esta prueba. Si se observa que hay una elevada actividad energética querrá decir que no hay sustancias tóxicas que interfieran en el proceso de obtención de energía. Si también obtienes resultados positivos en la adición de nutrientes, sabrás que los microorganismos responderán a los nutrientes, pero esto no implica necesariamente que también vayan a degradar el contaminante. Sabes que son activos, pero no puedes estar seguro de que sea debido a la destrucción del contaminante.

Los **ensayos de tratabilidad** se corresponden a los ensayos de degradación propiamente dichos. Se hacen distintos tratamientos en el laboratorio a diferentes condiciones:

- Nitrógeno y fósforo a concentraciones elevadas.
- Nitrógeno y fósforo a concentraciones bajas.
- Con un sustrato secundario, como por ejemplo un aceite vegetal.
- Con un inóculo comercial añadido.

Las condiciones pueden ser muy variadas, sobre un medio sólido para hacernos mejor a la idea de lo que sucede realmente, y dependerán en gran medida de lo que estemos persiguiendo. Se observa la degradación al cabo de 15 días y se discute qué responde mejor. Estos ensayos pueden ser todo lo sofisticados que uno desee, pero como se trata de un servicio prestado a empresas, el límite lo pondrán estas.

Aplicando la biorremediación

La teoría de la biorremediación puede resultar muy atractiva para solucionar los numerosos problemas medioambientales que azotan nuestro entorno. Sin embargo, esta tecnología no es la panacea que lo puede resolver todo, pues presenta algunas limitaciones. El problema principal que conlleva la biorremediación es que no se sabe hasta qué punto descenderán las concentraciones de los contaminantes una vez se ha implantado el método en la zona afectada. Esto está relacionado con los **productos recalcitrantes**.

Antes se tenía una idea muy ambiciosa respecto a la biorremediación. Se perseguía la destrucción completa del agente contaminante que ponía en riesgo el ecosistema. Más tarde se comprendió que esto era prácticamente imposible a no ser que usáramos métodos drásticos. Quedarían remanentes de productos que serían muy difíciles de eliminar mediante la biorremediación. Esto es debido a los productos recalcitrantes, compuestos que son difícilmente degradables. Esto puede ser debido a que sea un producto muy estable desde el punto de vista químico o que sea poco accesible para el organismo degradador. Si este mismo compuesto estuviera de forma soluble, flotando en el agua, las bacterias sí que lo acabarían degradando. Pero si este mismo compuesto se ha ido introduciendo en los poros de los suelos o de las rocas, será menos accesible; es decir, las bacterias no podrán degradarlo porque no serán capaces de llegar hasta él.

En este caso nos encontraremos ante un problema. Para un mismo contaminante se puede dar el caso de que tengamos dos situaciones distintas:

-El compuesto se ha consumido hasta niveles aceptables para el ecosistema.

-El compuesto, pese a haberse degradado, no lo ha hecho lo suficiente y su concentración está por encima de los valores aceptables.

Esto se debe principalmente a la disponibilidad del contaminante. En el segundo caso es posible que se haya infiltrado entre las rocas y a causa de ello las bacterias no pueden degradarlo, mientras que en la primera situación el mismo compuesto era más accesible. Es esta simple diferencia lo que puede marcar que un experimento de biorremediación sea un

éxito o fracase. No obstante, se trata de uno de los riesgos que deberemos asumir. En el caso que la descontaminación no haya sido exitosa, si es completamente imprescindible eliminar la contaminación se tendrán que aplicar otros tratamientos, pese a que sean mucho más drásticos. Si es demasiado drástico, además de eliminar el agente contaminante también destruiríamos parte del ecosistema. Aún así, hay ocasiones en las que no hay otro remedio, porque existe el riesgo de que el contaminante se extienda a otras zonas, como por ejemplo a un río. En estos casos se trataría de escoger el mal menor a fin de evitar una catástrofe.

Por otro lado están las circunstancias en las que se puede aplicar la biorremediación. Es decir, si bien puede llegar a ser muy efectiva en un terreno firme como pueda ser un suelo industrial, esta eficacia se pierde cuando tratamos con terrenos más próximos al agua o sobre el mismo río o mar. Aplicar la biorremediación en mares y lagos no tiende a ser viable porque al añadir los nutrientes, estos se pierden en la extensión de líquido, diluyéndose. Para que tuviera un verdadero impacto, la cantidad de nutrientes añadidos debería ser descomunal, cosa que no suele ser factible. Por lo tanto, frente a desastres medioambientales marinos, las únicas posibilidades se reducen a métodos físicos de eliminación del agente contaminante.

Un buen ejemplo de ello sería el **caso del Prestige**. Este petrolero se hundió frente a las costas de Galicia en el 2002 con 77.000 toneladas de fuel que, en su gran mayoría, terminó por bañar más de 2.000 Km de costa española y francesa. Fue una catástrofe medioambiental en toda regla que requirió un extenso trabajo de limpieza llevado a cabo por miles de voluntarios. En un principio, este sería un escenario ideal para poder llevar a cabo un proyecto de biorremediación. Sin embargo, esto no sería posible en el propio lugar del hundimiento debido a la dilución de los nutrientes en el entorno marino. En las propias orillas de las costas afectadas ocurriría el mismo problema, ya que las olas arrastrarían los compuestos añadidos. Cuando el grupo de Biorremediación de la Universidad de Barcelona llevó a cabo un proyecto de biodegradación en la costa de Galicia se encontró con este problema. Se trataba de un fuel muy espeso y muy heterogéneo que además llegaba a la costa de forma muy compacta, en forma de galletas. Al coger una muestra, vieron que se daba muy poca degradación en comparación con el aporte continuo que provenía del mar. Se decidió tomar muestras de la arena, en la que el fuel se encontraba en solución y las rocas de la playa que el fuel había cubierto.



Imagen 5. (<http://www.ecologiaverde.com>) El hundimiento del Prestige supuso una de las peores tragedias medioambientales de Europa. Todavía hoy se notan las secuelas del accidente en los ecosistemas de la zona.

Los resultados que obtuvieron no fueron significativos, es decir, ya se había producido un descenso importante de la concentración de fuel aún sin haberse aplicado el tratamiento. Por este motivo no se podía decir que la biorremediación fuera un éxito, ya que aún sin los nutrientes la cantidad de fuel había descendido significativamente. La mejor opción en ese caso fue, desafortunadamente, seguir usando métodos físicos para eliminar el agente contaminante que había causado tantos estragos.

Aunque esta es la vertiente más aplicada de la biorremediación, hay un gran trasfondo de investigación que el grupo de Biorremediación lleva a cabo para ampliar el conocimiento de esta área. Por ejemplo, se encargan de caracterizar distintas poblaciones degradadoras así como también los procesos que llevan a cabo. Identifican metabolitos que se producen a partir de las actividades que se han producido y usan técnicas moleculares para observar la dinámica de las comunidades microbianas para poder analizar su composición en función de la respuesta que hacen. Estudian qué tipo de bacterias son más abundantes en unas condiciones u otras así como los genes que se activan en cada caso. Las opciones que ofrece la investigación de esta área son casi ilimitadas.

También consiguieron cepas de bacterias aisladas y buscaron aplicaciones biotecnológicas, así como describieron nuevas vías de degradación. Lo que resulta más interesante son las interacciones entre poblaciones microbianas. Estas interacciones a menudo provocan que unas poblaciones bacterianas sean más efectivas juntas que por separado porque actúan sinérgicamente. Gracias a ello descubrieron poblaciones que no son cultivables y que hasta el momento no se habían detectado pero que siguen existiendo cada vez que se hace una simulación de contaminación. Estos cultivos no se pueden aislar porque dependen los unos de los otros. Aunque a nivel de laboratorio se pueda aislar una bacteria y se describa una ruta

degradadora para ella, en la natura todo puede variar porque dependerá en gran parte de las circunstancias que se encuentre.

Por ejemplo, supongamos que tenemos una situación en la que tenemos dos productos, uno más pesado que el otro. La población bacteriana consumirá preferentemente el producto ligero, mientras que el más pesado se limitará a oxidarlo parcialmente. Este compuesto oxidado será entonces aprovechado por una segunda población bacteriana que sí degradará este compuesto. Así se establece una especie de cadena de degradación en la que diferentes poblaciones de microorganismos son capaces de eliminar un agente contaminante encargándose cada una de un paso en concreto, como si fuera una cadena de montaje a la inversa.

Todo esto provoca que la biorremediación en general se esté ampliando cada vez más y que por ello, agentes contaminantes que por ahora no prácticamente imposibles de eliminar, en un futuro sea más factible. Quién sabe, igual llegará un momento en el que la huella que los humanos estamos dejando en la Tierra se reduzca hasta el punto como si no hubiéramos pasado por aquí.

Entrevista a Magdalena Grifoll



¿Cómo surgió tu interés por la biología y, posteriormente, por la microbiología?

A mí la biología me ha gustado desde que iba al instituto. Durante los últimos cursos del BUP, que era lo que había en ese tiempo, tenía un *profe* que era biólogo. Nos explicaba los ciclos bioquímicos y fue esto lo que me sedujo más. No lo tenía claro, había otras cosas que me gustaban y al final opté por la biología.

¿Te has llegado a arrepentir alguna vez de tomar esta decisión?

No. En absoluto. Aunque sí es cierto que uno piensa que podría haber hecho otra cosa como por ejemplo bioquímica, pero lo que es arrepentirse, no.

La microbiología la descubrí a tercero de carrera. En estos tiempos la veis en el instituto, con la bacteriología, los hongos... todo esto nosotros no lo veíamos. No nos decían ni siquiera lo que era una bacteria. Descubrí todo esto cuando hacía segundo, me gustó mucho y luego pensé que podría tener más salidas, pese a que a mí me gustaba también la zoología. Aunque tuve un profesor de zoología que no era demasiado motivador y entonces pensé en la posibilidad de terminar y tener que dedicarme a la enseñanza en los institutos, que era algo que no quería hacer. La microbiología, además de gustarme de por sí, me permitió combinar mi interés por la bioquímica.

¿Qué te impulsó a hacer un doctorado?

Yo entré con una beca de colaboración cuando estaba en 4º. Era una cosa poco conocida y vine al departamento de microbiología para pedir esa beca. Empecé a trabajar en el laboratorio sobre cosas ya de biorremediación de hidrocarburos y me gustó mucho.

Entonces ya no pensé en las salidas laborales ni en ser profesora, pensé que era una oportunidad única de, durante un tiempo, hacer algo que me apasionaba y que me gustaba mucho. Además, yo tenía mucho interés en salir al extranjero y pensé que era una muy buena oportunidad para vivir un tiempo fuera haciendo un post-doc.

¿Consideras entonces que salir al extranjero es una buena experiencia?

Sí, es indispensable.

Ya no es sólo recomendable.

Yo creo que es indispensable. No sólo para los profesores sino para cualquier persona que acabe la carrera. Y cada vez más, ¿eh? Pienso que es muy bueno que veáis, cuando acabéis la carrera aunque sea por poco tiempo, cómo se vive en otros países y cómo se enfocan las distintas situaciones.

¿Cuál fue el tema de tu doctorado?

Trabajé en la detección de agentes mutagénicos en el medio ambiente y en biodegradación, dividido en dos partes.

Una parte era microbiológica, que consistía en el test de *Salmonella* para detectar mutágenos ambientales. Lo hice en colaboración con CID-CSIC, hacíamos extractos ambientales y fraccionamientos para poder identificar cuáles eran las que tenían una mayor carga mutagénica. Cada fracción la ensayábamos con un test de mutagenicidad con *Salmonella*. Trabajábamos sobre todo con sedimentos de ríos y marinos. Vimos que los sedimentos de Barcelona tenían agentes mutagénicos y sospechamos que provenía de un aporte atmosférico.

Después comencé con la directora del grupo la degradación de hidrocarburos, también en colaboración con el CSIC, aunque ella no hacía los análisis, sino que se encargaba de las incubaciones. Comencé a trabajar con química analítica para poder identificar metabolitos. Describí una ruta de degradación de un compuesto denominado fluoreno, un compuesto aromático policíclico.

Cuando haces un experimento, obviamente esperas que todo salga bien. Pero cuando falla, ¿cuál es la mejor actitud para afrontarlo?

Los resultados negativos se deben afrontar siempre de una manera muy crítica. Primero tenemos que mirar qué podemos aprender de ello. Y no te hablo solamente desde el punto de vista de investigadora, sino también de profesora. Los experimentos los hacen doctorandos y los hacen estudiantes de TFG.

En un experimento como los nuestros que tratan acerca de muestras ambientales, la hipótesis inicial no consiste en un único planteamiento. Estudiamos diferentes condiciones de tratamiento: cuál es el más productivo, los tipos de poblaciones, a qué tiempos se producen por qué uno es mejor y otro no... Las hipótesis son múltiples, son experimentos muy largos en los que no puede ser que una persona que haya estado trabajando durante 6 meses no pueda sacar nada. Si un experimento no ha funcionado, primero se debe mirar si se ha hecho todo bien y luego valorar qué podemos sacar de esa hipótesis. ¿Por qué no ha salido bien? Quizás porque hay algo que no funcionaba de la manera que nosotros pensábamos. Entonces se debería intentar de darle la vuelta y ver qué se ha aprendido. Es una situación en la que se cierra una puerta y se abre otra.

¿Cuál es el experimento del que te sientes más orgullosa?

Para mí, lo más importante fue abordar el tema del cometabolismo en un momento en el que se hacía muy poco. Concretamente, el papel que hacía el cometabolismo en mezclas ambientales. Esto lo comencé a hacer en mi post-doc en Florida, donde aprendí mucho. Hice un artículo en el 95, que ha resultado ser de los más citados que tengo. En este, se veía como una cepa bacteriana degradaba un compuesto pero actuaba sobre muchos otros, que aunque ahora pueda parecer muy simple en su momento era bastante novedoso.

¿Es posible combinar el trabajo de laboratorio con la vida personal?

En mi caso no sólo se trata de combinar el trabajo de laboratorio con la vida personal, sino que además debería añadir la docencia. Es muy difícil. El tema de la vida personal sí que es difícil y tienes una presión encima que a veces se hace complicado sostener. Cuando estás en un sitio, crees que deberías estar en otro sitio y cuando estás en otro sitio piensas que deberías estar en uno más.

Es como hacer malabarismos.

Exactamente. Pero yo creo que es más importante por las mujeres.

¿Cómo es eso?

Te pondré un ejemplo. Aquí en el laboratorio, una mayoría de las mujeres que tienen más publicaciones han tenido hijos muy tarde o son solteras. Las investigadoras, la gente que llega a ser catedrática se encuentran en esa situación. Y es debido a esta circunstancia de tratar de controlar el tiempo, puesto que el trabajo de investigador no lo puedes dejar a un lado y luego volver ya que pierdes el tren. Por eso siempre tienes esa presión.

Por otro lado, cada vez tienes que pedir más proyectos y has de buscar más dinero. Esto implica que no puedes decir “no” a nada. Entonces, bien puedes estar sin un proyecto como tener tres a la vez. Y falta personal técnico que te pueda ayudar. Eso quiere decir que tienes que formar a gente para ello y resulta muy estresante.

Con la docencia pues bien, pero ahora tenemos un peso de gestión muy importante. Esto es más un problema de la propia Universidad de Barcelona porque no entra gente joven, por lo que la gente que estamos tenemos que asumir cada vez más papeles de gestión. Muchas veces

esta gestión es bastante administrativa. Esto quiere decir que tienes que hacer mucho trabajo que podría hacer una secretaria, pero no disponemos de este soporte. Combinar todo esto cuesta mucho. El problema de combinar la docencia y la investigación es que no están bien compartimentadas, con lo que tienes dos inputs continuos y debes ir cambiando de marcha total y continuamente. Todo esto es lo que supone un mayor desgaste.

Suena una experiencia muy estresante.

Lo haces porque realmente te gusta, pero sí que es estresante. Hay gente que lo está dejando y se está jubilandando pronto. Pero se trata de una situación de la propia UB, ¿eh? No es de todo el mundo. Pero por otro lado nuestro trabajo tiene muchos alicientes, tanto en la docencia como en la investigación, y por eso merece más la pena.

Los recortes en investigación se han debido de notar.

Yo lo he notado sobre todo por falta de personal. Nosotros somos ya de por sí un grupo pequeño. Es más difícil conseguir becas y entonces es más difícil mantener un grupo.

¿Cuántos sois?

Nosotros somos un grupo consolidado, que es más grande, y debemos ser unos 20 miembros o así. Pero mi grupo de biodegradación somos 4 ahora mismo. Dos titulares, un post-doc y una doctoranda. El post-doc se ha ido hace poco a Estados Unidos con una beca Marie-Curie y la doctoranda termina la tesis ahora. Ahora tendré a dos personas que seguramente se quedarán a hacer el máster pero que no dispondrán de personal con experiencia en el laboratorio.

Luego están los recortes, que influyen en el número de proyectos. Nosotros pedíamos un proyecto coordinado y este año para asegurar un pequeño proyecto puedes pedirle a un investigador del CSIC, precisamente porque la masa del grupo era pequeña.

Oí que de 10 proyectos que se presentaban escogían al menos 1. Ahora, la proporción es de 1 a 100 más o menos.

Esto quiere decir que tienes que hacer un esfuerzo muy grande para pedir muchos proyectos que realmente no sabrás como terminarán. Y tampoco sabes si tendrás el personal para afrontarlo. Luego también está el que no tenemos ninguna asignación fija. Es decir, si se nos estropea un aparato, no tenemos mucho dinero para arreglarlo. A veces, la facultad nos paga una parte, pero no tenemos dinero extra.

En la Junta de Andalucía, por ejemplo, hacen convocatoria de proyectos mientras que en Cataluña apenas se hacen. Aquí, antes a los grupos de investigación consolidados les daban dinero a la mayoría. Ahora nos han reconocido como grupo consolidado pero no nos han dado dinero.

¿Y todo esto repercute de alguna manera en la calidad de vuestros experimentos? Al tener menos personal eso debe de implicar que tenéis que hacer más cosas o tardáis más

Tenemos... menos éxito. Cuando empiezas algo nuevo, lo haces con gente nueva. La gente nueva se equivoca mucho, aunque eso es normal porque todos nos equivocamos cuando hacemos algo nuevo. Hasta que aprenden... el primer año si tienen un post-doc al lado o un doctorando con más experiencia a su lado...

...Les podrían aconsejar mejor.

Exacto, hay comunicación entre ellos. Pero si no es así, hay muchas cosas que nos pueden resultar obvias cuando llevas un tiempo pero para la gente nueva no lo es tanto. Por ejemplo, un problema de microbiología como es la contaminación, que es un fenómeno que ocurre habitualmente. Si tú tienes experiencia, puedes evaluar la situación y ponerle remedio, pero si no lo sabes ver se puede volver un problema.

¿Crees que la sociedad sabe realmente lo que es la biorremediación o por el contrario crees que tienen una visión distorsionada, como si fuera un remedio perfecto?

Yo creo que hay una parte que lo desconoce completamente. Luego hay otra parte que a lo mejor piensa que es más fácil que lo que es. Ahora, cuando se habla de Biorremediación, se habla de minimizar el riesgo, no de limpiar la zona completamente. Aunque no llegues a la total descontaminación, por lo menos reduces el riesgo del ecosistema.

La gente de la calle no creo que sepa lo que es realmente la biorremediación. A veces en las noticias que salen en los periódicos, la divulgación no es del todo precisa. En el detalle hay muchos errores pequeños.

Errores que por sí solos se pueden obviar más o menos, pero si se van acumulando llegan a resaltar excesivamente.

Sí, puede resultar a ser poco serio a veces. También a veces le otorgan transcendencia a cosas que a lo mejor no son tan importantes como otras no llegarán al público. En ocasiones habla más de un tema quien precisamente ha trabajado menos en él, y esto puede estar bien porque necesitamos divulgadores pero necesitamos que sean esmerados.

¿Crees que hay un problema de comunicación entre los científicos y la sociedad?

Yo diría que el mayor problema de comunicación no está entre los científicos y la sociedad sino entre los científicos y la administración. La administración por su parte o no responde o no establece los suficientes puentes. Muchas empresas de aquí a veces se van a pedir consultorías en el extranjero porque no saben lo que hay aquí. Y en la misma administración creo que no hay suficientes expertos que dominen el tema, sino que son más ejecutores. Haría falta poner estos tres elementos de industria, administración y científicos mucho más en contacto. Este triángulo, que es mucho más fluido y mucho más activo por ejemplo en países del norte de Europa, al menos en el campo en el que me dedico.

Hace poco fui a un congreso, el AquaConSoil, del que soy miembro; que es el congreso de descontaminación del suelo y había representantes de la administración de Dinamarca, empresas y científicos de todos los países nórdicos. En cambio, aquí falta todo esto. Ves que entre ellos hay una comunicación fluida. Aquí no se da esto. En las Jornadas sobre contaminación de suelos, lo que dijimos todos los científicos de ahí es que tenemos que crear redes en la que haya una comunicación fluida y que todo el tema de la contaminación sea transparente. En los países nórdicos y Estados Unidos este tema se trata de una manera mucho más transparente, la información es mucho más pública.

Aquí no hay nada contaminado, está todo limpio y si partes desde esta premisa es difícil hacer nada. Nadie lo reconoce, hay mucha confidencialidad. Los emplazamientos contaminados aparentemente sólo los conocen la administración y las empresas. Y las empresas por su parte no reconocen que tengan problemas de contaminación.

Es que ninguna empresa admitirá abiertamente que ellos han contaminado algo.

Hay alguna que sí te lo dirá, pero son pocas. Yo tengo publicaciones de empresas que han hecho un trabajo de descontaminación que ha sido un éxito y han tenido interés de publicarlo en revistas técnicas o incluso en prensa local. Pero hay otros... las grandes empresas que son propietarias de territorios que han sido descontaminados con éxito no quieren que se diga que lo contaminaron ellos, por mucho que los consultores tengan la voluntad de hacerlo saber.

Es una pena porque se quedan con la idea de que han contaminado ellos en lugar de quedarse con la parte de haber hecho algo para solucionarlo.

La biorremediación funciona de la siguiente manera, al menos aquí en España: está la gran empresa, muchas veces alguna constructora, que tiene los terrenos contaminados, que a lo mejor no lo han hecho ellos pero los han comprado así. Después están los consultores ambientales que son empresas, a veces pequeñas, que actúan como intermediarios. Evalúan el riesgo y hablan con la empresa sobre si quieren hacer una descontaminación y del contrato que deberían hacer. Luego está la administración que lo supervisa todo. Pues a este cliente final le cuesta mucho creer en el tema de la biorremediación, y necesita que los casos en los que se haya hecho una biorremediación y han sido exitosos lo visualicen.

Esto en EEUU pasa y está colgado en la página oficial de la EPA. Y aquí esto no está. En el norte de Europa está todo mucho más claro, todo más inventariado, más público. Aquí cuesta más. Y también falta dinero. Antes en Cataluña éramos líderes en el sector, por detrás del País Vasco, que invertía más que nosotros, pero todo se detuvo debido a la crisis económica. Faltan técnicos, falta personal. Falta una infraestructura administrativa fluida. Y haría falta un plan de inversión a largo plazo, porque parece que todo lo que se hace aquí se hace para un espacio de tiempo muy corto. Y los temas de descontaminación llevan mucho más tiempo. Se necesitaría un cambio de mentalidad. Sólo así las cosas irían mucho mejor.

Bibliografía

<http://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Bioremediation/cat/Overview/>

<http://omicsonline.org/bioremediation-biodegradation.php>

Fernández-Álvarez P, Vila J, Garrido-Fernández J.M, Grifoll M, Lema J.M (2006). Trials of bioremediation on a beach affected by the heavy oil spill of the Prestige. Journal of Hazardous Materials B137 (2006) 1523-1531

Vila J, López Z, Sabaté J, Minguillón C, Solanas A.M, Grifoll, M (2001). Identification of a Novel Metabolite in the Degradation of Pyrene by *Mycobacterium* sp. Strain AP1: Actions of the Isolate on Two- and Three-Ring Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Applied and Environmental Microbiology, Dec. 2001, p. 5497-5505. Doi: 10.1128/AEM.67.12.5497-5505.2001

Vila J and Grifoll M (2009). Actions of *Mycobacterium* sp. Strain AP1 on the Saturated- and Aromatic-Hydrocarbon Fractions of Fuel Oil in a Marine Medium. Applied and Environmental Microbiology, Oct. 2009, p. 6232-6239. Doi:10.1128/AEM.02726-08

López Z, Vila J, Ortega-Calvo J.J, Grifoll M. Simultaneous biodegradation of creosote-polycyclic aromatic hydrocarbons by a pyrene-degrading *Mycobacterium*. Applied Microbiology Biotechnology (2008) 78:165-172. Doi 10.1007/s00253-007-1284-2

Viñas M, Sabaté J, Grifoll M, Solanas A.M. Ensayos de tratabilidad en la recuperación de suelos contaminados por la tecnología de la biorremediación.

Vila J, Urbizu A, Grifoll M, Bosch M, Nilsson J, Mundó B, Piñuela P (2014). Técnicas de biorremediación para el saneamiento del subsuelo. Industria química, Junio 2014.

Imagen del título: <http://andrewtle2011.wix.com/bioremediation#!background/cp1h>

Imagen 1: <http://www.counterbalance.org/media/earthist.gif>

Imagen 2: http://contaminationcontrol.dpp-europe.com/plugins/fckeditor/UserFiles/Image/en/images/types_of_contaminants.jpg

Imagen 3: http://www.phschool.com/science/biology_place/biocoach/images/biokit/chnops.gif

Imagen 4: <http://www.integraenvironmental.com/Images/1microcell.gif>

Imagen 5: <http://www.ecologiaverde.com/>