

# BIORREMEDIACIÓN PARA LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL AGROPECUARIA

H. Medrano Roldán

Instituto Tecnológico de Durango. Unidad de Alimentos y Biotecnología Industrial. Ave. Felipe Pescador 1830 Ote. 34080 Durango, Dgo. México. hiram@itdposgrado-bioquimica.com.mx

**RESUMEN.** La Biotecnología, definida como la suma del uso de la microbiología, la bioquímica y la ingeniería en la producción de compuestos útiles para el hombre, las plantas y los animales, se ha convertido en una herramienta primordial para la biorremediación de suelos, agua y aire, contaminados con diferentes elementos nocivos para la conservación de la biodiversidad del planeta. El papel multidisciplinario de los biotecnólogos e ingenieros exige mayor conocimiento del funcionamiento de los seres vivos así como de la interacción con el entorno en el que se basa su trabajo. Por otro lado, la ética ambiental plantea cuestiones acerca de la moralidad de las relaciones entre los humanos y el resto de la naturaleza, de tal manera que se establezcan las obligaciones, deberes y responsabilidades con el entorno natural y sopesarlos frente a los valores e intereses humanos, erradicando la indiferencia destructiva sobre el resto del mundo natural y desarrollar una relación tú-yo con el ambiente. La biotecnología con sus conceptos microbiológicos básicos pueden ser aplicados a los problemas de contaminación ambiental propiciados por el sector agropecuario, entre otros, examinando tópicos con referencia a la física y química del suelo, los residuos de corral y las excretas de animales. De estas, el estiércol de ruminantes, especialmente vacuno, propicia una contaminación cuyo abatimiento, a través de la biorremediación, puede conducir a la producción de biogas y por lo tanto, el establecimiento de un negocio. Por ello, se debe tener presente que la ciencia y la tecnología, no solamente cubren aspectos académicos y de investigación, sino también, aquellos que pueden hacer que los egresados de instituciones de educación superior y centros de investigación, puedan crear pequeñas empresas a partir de resultados de la investigación aplicada y no estar ante la incertidumbre de “**qué voy hacer al terminar mi carrera?**”.

**Palabras clave:** Biorremediación, suelos contaminados, biogas.

**SUMMARY.** Biotechnology defined as the use of the knowledge on microbiology, biochemistry and engineering in order to obtain products useful for plants, animals and the human being, has been used as an attractive alternative for the bioremediation of polluted soils, air and waters to preserve the biodiversity on the earth. The presence of biotechnology and some branches of engineering (agronomy, biochemistry, food, environment, biomedical, electronics, computer systems, mechanics, civil, etc.) needs to extend their knowledge on the living system focusing its relationship with the environment which it is working on. Besides, the environmental ethic set some matters up about the morality between human being and nature defining expressions of opinion such as responsibilities and duties with the environment hefting them with the human behavior in the nature, removing our superiority sentiment settling a you-me scope with the environment. Therefore, biotechnology offers basic and applied microbiology concepts to participate in the environmental pollution problems due to the agriculture and cattle productive sector, including topics on physics and chemistry on the soil and animal wastes. On this last matter, manure from ruminants produces an important pollution problem which through bioremediation processes can be solved becoming a possibility of business with the production of biogas. Wherefore, it should be established to professors, investigators and students that research does not mean just academic and research work but also the design and structure of a business by using positive results from the work carried out in our research facilities avoiding to the students the classical question:

**What shall I be doing after finishing my studies?**

**Key words:** Bioremediation, soils pollution, biogas.

## INTRODUCCIÓN

La biorremediación no es un concepto nuevo en el campo de la Microbiología Aplicada, ya que los microorganismos han sido utilizados para transformar la materia orgánica y compuestos tóxicos a partir de diferentes tipos de efluentes y desechos de tipo doméstico e industrial, por muchos años. Lo que sí es nuevo, es que la biorremediación se ha conceptualizado

como una industria de tal manera que ha tenido un alto nivel de aceptación por su efectividad, desde el punto de vista técnico y económico, para limpiar suelos, aguas y aguas subterráneas mediante la eliminación de una gama muy amplia de compuestos tóxicos que afectan marcadamente en forma negativa la vida de los seres vivos. Por lo cual, la biorremediación se ha convertido en una tecnología que la ingeniería ha venido utilizando en la solución de problemas ambientales,

principalmente en sitios contaminados con hidrocarburos del petróleo.

Los ingenieros dedicados a la solución de problemas ambientales, utilizan la biorremediación para atacar problemas relacionados con diferentes tipos de compuestos tóxicos. En México existen varios grupos de investigación trabajando en temas referidos al suelo, agua y aire mediante programas de remediación con el apoyo de organismos gubernamentales. Sin embargo, los recursos económicos son más escasos para investigación, tendientes a ser aplicados en encontrar soluciones que por mucho tiempo no han recibido la atención debida como consecuencia de una falta de entendimiento hacia lo que es la ciencia y la tecnología por la iniciativa privada, e incluso, por los tres niveles de gobierno, y en algunas ocasiones, por funcionarios académicos.

Los investigadores en ciencia aplicada luchan con denuedo por establecer sus propios criterios en cuanto a la mejor técnica de biorremediación. En éste trabajo se aborda el problema agropecuario, que sin ser el más importante desde el punto de vista de contaminación, comparado con los hidrocarburos del petróleo, sí reviste gran interés, especialmente el que se refiere a la acumulación de estiércol de tipo vacuno que bien podría convertirse en negocio importante en la producción de biogas. Asimismo, se hace un intento por enfocar los problemas ocasionados por la contaminación agrícola, lo cual afecta los ciclos de nutrientes, las propiedades físicas y químicas del suelo, y que por lo tanto se debe poner atención mediante una metodología para el control de la contaminación agrícola, analizando los obstáculos en el control de los focos puntuales así como las aplicaciones tecnológicas en el terreno donde se presentan los residuos contaminados y el establecimiento de normas de práctica para la aplicación y en la búsqueda sobre el abatimiento de residuos animales y de otro tipo.

El objetivo del presente trabajo de investigación es mostrar a los estudiantes e investigadores del área de agronomía la gran oportunidad que brinda la Microbiología, la Bioquímica y la Ingeniería para convertirse en una herramienta útil en la solución de problemas ambientales, pero más aún en la oportunidad de que los egresados de las carreras de agronomía, puedan establecer negocios de biorremediación e impedir esa incertidumbre que embarga a los egresados no solamente de los niveles de licenciatura, sino también de los diferentes posgrados, con la siguiente pregunta,  
**“Qué voy a hacer cuando termine mis estudios”.**

El trabajo se ha dividido en: Microbiología industrial y Biorremediación, Contaminación Agrícola, Procesos de Biorremediación: Necesidades y limitaciones.

## MICROBIOLOGÍA INDUSTRIAL Y BIORREME- DIACIÓN

**Composición de los seres vivos.** Todos los organismos vivos ya sean bacterias, levaduras, plantas o animales, comparten una serie de características comunes. Todas ellas, con la excepción de los virus, tienen una composición común que contiene: ácido desoxirribonucleico (ADN), ácido ribonucleico (ARN), y proteínas.

La molécula de ADN es la que fabrica los genes, los cuales a su vez contienen toda la información requerida para la fabricación y el control de los organismos. La información contenida en el ADN es transferida al resto de los genes justo para actuar como una información almacenada en un disco de computadora y que tiene que ser leída. El flujo de información desde el ADN al resto de la célula está controlado por moléculas de ARN, las cuales eventualmente se dirigen a la síntesis de proteínas, las cuales, como componentes estructurales o como enzimas, dirigen y controlan muchas de las funciones que tiene el organismo. El proceso de transferencia de información genética de las moléculas de ADN a las de ARN se conoce como transcripción y la transferencia de información de las moléculas de ARN a las proteínas se conoce como translación (Figura 1).

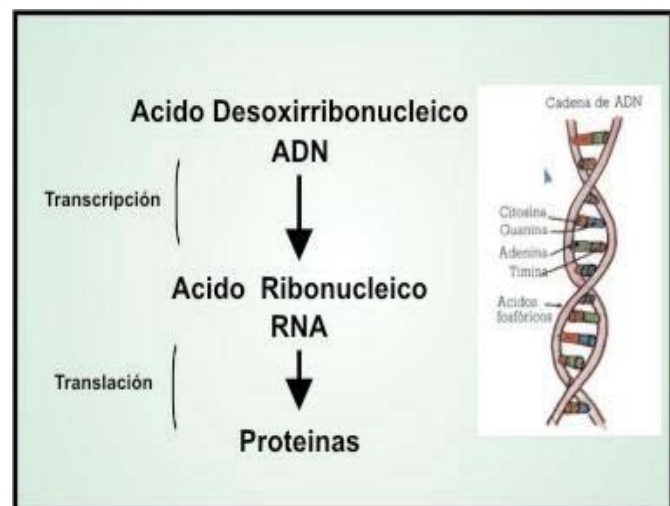


Fig. 1 Estructura y función celular

Los procesos de biorremediación requieren de un conocimiento general sobre la vida del o los microorganismos que van a participar en el proceso de limpieza. Desde el punto de vista práctico, y en un intento por facilitar el entendimiento de la aplicación de

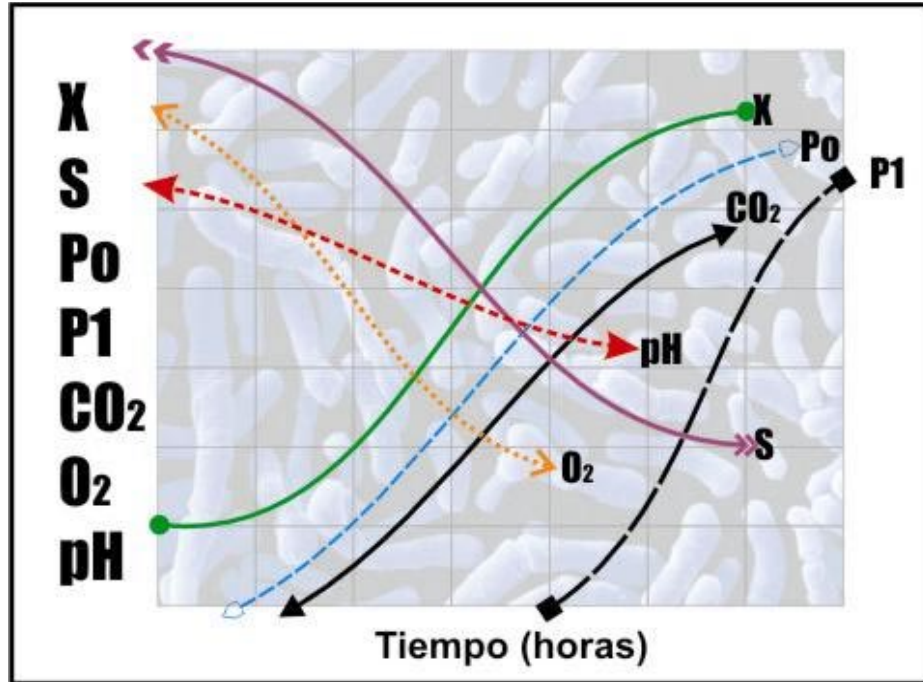


Fig. 2 Crecimiento microbiano

microorganismos en los procesos de biorremediación, se dice que el estudiante debe conocer el *currículum vitae* del microorganismo, el cual se aprecia en la Figura 2 del crecimiento microbiano.

Como puede apreciarse, conceptos como biomasa celular (X), sustrato o materia prima (S), producto (P, P<sub>1</sub>), CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, pH, son importantes durante el crecimiento de un microorganismo, y su comportamiento deberá ser conocido ampliamente por el especialista en biorremediación puesto que habrá de informar la forma en cómo el microorganismo puede abatir los contaminantes que se localizan en el lugar que se desea biorremediar.

En la búsqueda de procesos técnicos y económicos factibles, y con el uso de conceptos básicos de la Microbiología, es importante lograr un entendimiento entre el especialista y el microorganismo. Este se comunica con el especialista a través de la información que le proporciona con respecto al comportamiento de las variables antes mencionadas (X, P, S, pH, etc.) y que son producto de las condiciones ambientales bajo las cuales se propaga el microorganismo y que deberán ser adecuadas para que los contaminantes sean eliminados en procesos de biorremediación.

### CONTAMINACIÓN AGRÍCOLA

La agricultura produce alimento y fibra. Las plantas son la producción básica de la agricultura, tanto si se producen para el consumo humano directo, como si se

utilizan como fuente de alimento para los animales o son procesados en fibras y otros productos orgánicos. El suelo es el medio básico para la producción de la planta. En sí mismo es un sistema no homogéneo que tiene propiedades físicas, químicas y biológicas que varían ampliamente.

Cuando hay animales implicados en el sistema de producción, la ingestión de nutrientes es incluso más difícil. Los animales sólo retienen aproximadamente el 15 por ciento de los nutrientes contenidos en la materia convirtiéndolos en producto animal, el 85 por ciento restante se excreta. Por lo tanto, los residuos de animales contienen cantidades significativas de nutrientes que deben ser manejados de forma ambientalmente aceptable. Típicamente los residuos de los animales se manejan reciclandolos a la tierra que produce los ingredientes que han sido consumidos por los animales. Sin embargo, hacerlo así en un medio abierto (para distinguirlo de un medio cerrado en una factoría) crea ciertos riesgos de contaminación, que se amplían por la gestión práctica y los problemas tecnológicos asociados con la aplicación al terreno de los residuos. En las granjas de cerdos y aves de corral, las dificultades en el control de nutrientes se ven aumentadas, además porque las aportaciones de nutrientes se producen en otras granjas y se adquieren por los productores de animales. Esto crea un gran exceso de nutrientes en las granjas de cerdos/aves de corral las cuales requieren extensiones importantes de terreno para extender los residuos y evitar un exceso en la aplicación de nutrientes, en particular el P.

Considerando que uno de los problemas más importantes de contaminación ambiental en el sector agropecuario es el estiércol, vacuno, principalmente, es importante tener un conocimiento sobre lo que es el ciclo del nitrógeno.

### **Ciclo del nitrógeno**

El nitrógeno es un elemento omnipresente que tiene nueve estados diferentes de oxidación química. Las bacterias del suelo son las responsables de la mayoría de las transformaciones del nitrógeno en el suelo; la capacitación de la planta también juega su papel. Por lo tanto, la actividad microbiana y el crecimiento de las plantas gobiernan las velocidades a las que se producen las transformaciones del N, las cuales a su vez, vienen determinadas por un número de variables ambientales. Estas variables incluyen el contenido de humedad del suelo, la temperatura y las concentraciones de oxígeno, dependiendo todas ellas del tiempo atmosférico.

Globalmente, la mayor parte del N existe como gas nitrógeno elemental,  $N_2$  en la atmósfera, y hacia esta forma estable es a la siempre tiende a volver el N de los diversos compuestos. En los sistemas agrícolas, el N elemental puede transformarse en formas orgánicas mediante las plantas leguminosas y ciertas bacterias y algas.

Los animales consumen el N orgánico de las plantas (como proteína= incorporan una parte nutriente al tejido y hueso, y excretan el resto como productos residuales (heces y orina en forma orgánica e inorgánica. La mineralización y los procesos químicos (hidrólisis de la urea en orina) transforma el N orgánico de los residuos animales en formas inorgánicas aprovechable por las plantas. El N de la urea en la orina se convierte casi inmediatamente a  $NH_4-N$ . Inversamente, como regla general, aproximadamente el 50 por ciento del N orgánico en los residuos de animales se convierte a  $NH_4-N$  en un periodo de 12 meses, aunque la velocidad real de transformación depende de las condiciones ambientales. En consecuencia, el 50 por ciento del N orgánico que se queda se convierte anualmente mediante una serie típica de descomposición.

### **Suelo y sus propiedades**

Las transformaciones del N y del P en los sistemas agrícolas están muy relacionadas con el suelo, como son de hecho los procesos de residuos (la mineralización de la materia orgánica). Las propiedades físicas del suelo, y en menor medida las propiedades químicas, también controlan el movimiento del aire y del agua a través del suelo. La importancia de la física y de la química del suelo para el movimiento de

nutrientes no se describe con detalle aquí. Sin embargo, al igual que otros temas a los que se hace referencia existen textos completos y de amplios cursos sobre la física y química del suelo. Sin embargo se proporciona una explicación superficial a los conceptos básicos.

Es importante distinguir entre suelo y sistema del suelo. Este último es una entidad biológica viva, no homogénea, que consiste en el suelo, fauna (microorganismos y macro-invertebrados) y flora. En el lenguaje de la ingeniería sanitaria y ambiental, el sistema del suelo es, de hecho, un reactor biológico.

### **Propiedades físicas del suelo**

En un volumen dado de un suelo mineral, hay una proporción aproximadamente igual de sólidos y de espacio de poro. Los primeros se componen de 45 por ciento de minerales y 5 por ciento de materia orgánica y el último consiste en agua y aire. Para el tratamiento de residuos, además de la producción de cultivos, la proporción de aire y de agua debería ser aproximadamente igual para crear las condiciones favorables para la actividad biológica (tanto microbiana como vegetal).

El movimiento del aire y de la humedad a través del suelo son factores importantes en la descomposición de la materia orgánica y del crecimiento del cultivo. La facilidad relativa con que el agua se mueve dentro y a través del suelo influye también en la extensión que alcanzan la lixiviación (la pérdida de N) y la escorrentía (la pérdida de P), y por tanto el potencial para la contaminación del agua subterránea y de superficie respectivamente. La textura y la estructura del suelo son determinantes claves que afectan al movimiento tanto del aire como del agua a través del perfil del suelo.

### **Propiedades químicas del suelo**

Además de transmitir las características al suelo, las fracciones mineral y orgánica también determinan las propiedades químicas del suelo. Son estas fracciones las que contienen la mayor parte de los nutrientes del suelo, en formas que no están disponibles para las plantas. Los nutrientes que no se encuentran disponibles para las plantas no suelen representar una amenaza para la calidad ambiental (a menos que las partículas o la materia orgánica sean erosionadas y transportadas hasta las aguas receptoras). Los nutrientes que están disponibles en forma vegetal también lo están para producir contaminación al agua. No obstante, las propiedades químicas del suelo, especialmente las capacidades de intercambio catiónico y aniónico, tienden a mitigar este potencial.

La capacidad de intercambio de cationes (CIC) define la capacidad de un suelo para retener los iones cargados positivamente, o los cationes. La CIC se mide en términos de meq/100 g y varía desde 2 a 3 meq/100 g para la arena y sedimento y de 100 a 200 meq/100 g para la materia orgánica. Las partículas inorgánicas del tamaño de la arcilla y el humus (materia orgánica coloidal) son las responsables de la mayor parte de las propiedades químicas del suelo. Tanto la arcilla como el humus tienen una carga eléctrica neta negativa que puede atraer, y hasta cierto punto adsorber, a los cationes cargados positivamente desde la solución del suelo. Las cargas negativas de la fracción coloidal del suelo proceden de:

- La sustitución de los cationes trivalentes por los divalentes en los minerales de arcilla.
- De las cargas eléctricas no compensadas en los bordes de las partículas de arcilla rotas y
- De la disociación de los protones (hidrógeno) a partir de los ácidos orgánicos y de las superficies de óxidos hídricos.

### Residuos contaminantes en las granjas

Los contaminantes de las granjas pueden clasificarse como físicos (por ejemplo suelo erosionado, las emisiones gaseosas), químicos (por ejemplo, nutrientes) o biológicos (por ejemplo, bacterias). Las fuentes de estos contaminantes son diversas: residuos de animales, efluente ensilado, escorrentías contaminadas procedentes de las zonas de corrales, lavados lácteos, pesticidas y fueloil. El estiércol de animal es con mucho el más significativo, especialmente en la Europa occidental. Se estima en 87 millones de toneladas de estiércol la producción anual sólo en Irlanda (Ver Tabla 1); de éstos, casi 30 millones de toneladas se producen en interiores y requieren un control. Los residuos de animal que requieren un control incluyen todo el estiércol de los cerdos y de las aves de corral y además el

producido por el pastoreo durante el periodo de alimentación en interiores en invierno. Si no son adecuadamente utilizados, estos residuos tienen un potencial significativo para causar contaminación tanto del aire como del agua (en términos de la volatilización del amoníaco y de los olores molestos).

La excreción (heces y orina procedente de los animales en una dieta de forraje consistente aproximadamente en 65 por ciento de heces y 35 por ciento de orina en volumen) consiste en los restos parcialmente digeridos de la ingestión del pienso de los animales diluidos con cantidades variables de agua. La excreción incluye una gama de materiales que varía desde los restos de los alimentos no digeridos hasta los componentes primarios de los tejidos vegetales, dióxido de carbono, minerales y agua combinados con los microbios procedentes del tracto que los hacen sustancias biológicamente activas, una de sus características importantes. La actividad microbiana es la responsable de la mineralización de los nutrientes en la materia orgánica.

### Contaminación potencial de los residuos agrícolas

Los residuos de los animales son de alta resistencia y tienen potencial para provocar serios problemas de contaminación del agua.

Como se evidencia por las altas concentraciones tanto de DBO<sub>5</sub> (demanda bioquímica de oxígeno) y la DQO (demanda química de oxígeno), los residuos de animales tienen cantidades considerables de materia orgánica y de especies inorgánicas reactivas (o sea, amoníaco) que ejercerán una demanda excesiva de oxígeno en las aguas superficiales. Estas altas demandas de oxígeno también excluyen el tratamiento mediante procesos convencionales de los residuos de animales, como se ha hecho con las aguas fecales domésticas y otros residuos industriales. En consecuencia, la aplicación al terreno es un método económicamente viable y ambientalmente sostenible de "tratar" los residuos

Tabla 1. Producción estimada anual de estiércol procedente del ganado y control de las cantidades necesarias en Irlanda

Tipo de Animal	Producción (miles t/año)	Cantidad requerida (miles t/año)
Bovino	76,000	28,327
Ovino	8,258	454
Cerdo	1,854	1,804
Pollo	224	227
Total	86,919	30,812

animales. La aplicación de los residuos animales al terreno no resultará en contaminación del mismo cuando se aplica en proporciones agronómicas y en las épocas correctas del año. La aplicación al terreno de algunos residuos de alta resistencia en proporciones altas puede provocar que aquél llegue a ser temporalmente anaerobio debido a la demanda de oxígeno de los residuos.

Los olores son el “contaminante” del aire más reconocible que se origina en los residuos animales; generalmente estas emisiones están asociadas con el proceso de la aplicación al terreno. Aunque menos evidente a las personas, la volatilización del  $\text{NH}_3$  de los residuos de los animales ha sido identificada como un serio contaminante del aire en ciertas regiones (por ejemplo los Países Bajos). Se ha aprobado una legislación estricta en estas zonas para controlar la pérdida de N gaseoso. En las construcciones cerradas (es decir establos de animales) donde los residuos se almacenan debajo del edificio, la liberación de amoníaco y de sulfuro de hidrógeno pueden ser contaminantes amenazantes para la salud tanto de los animales como del ser humano. Una construcción y unas características de diseño para almacenar el estiércol apropiadas pueden reducir las emisiones de  $\text{NH}_3$  hasta niveles aceptables; posniveles de  $\text{H}_2\text{S}$  no suelen ser problema hasta que los residuos de los animales sean eliminados de los edificios. En ese momento, deben separarse los animales de los edificios y los operarios han de tener especial cuidado y usar dispositivos de protección de la respiración para evitar riesgos para la salud.

### Contaminación por pérdidas de nutrientes

Los nutrientes que proceden de los fertilizantes o de los residuos no utilizados por las plantas pueden “fugarse” de los sistemas agrícolas hacia las aguas subterráneas o hacia las aguas superficiales. Estas pérdidas son económica y ambientalmente indeseables. Los dos nutrientes de principal importancia agrícola son el nitrógeno y el fósforo, los cuales tienen el mayor potencial para crear la contaminación del agua. Ambos nutrientes pueden:

- Ser absorbidos por las plantas en crecimiento
- Moverse hacia el agua superficial en la escorrentía (P)
- Moverse hacia el agua subterránea en la lixiviación (N)
- Quedar inmovilizados en el suelo/balsas de materia orgánica.

Además, el N procedente de los fertilizantes o de los residuos puede perderse a la atmósfera como gas.

### CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN AGRÍCOLA

El objetivo principal de la empresa agrícola es la optimización del beneficio. En el pasado, el aumento de la producción ha sido la forma más apropiada de lograr este objetivo; los granjeros han llevado a cabo esto modificando el agro-ecosistema: Los cambios durante las últimas décadas incluyen un mayor uso de fertilizantes inorgánicos y un mayor uso de sustancias químicas para controlar las malas hierbas y otras plagas, dando como resultado mejores cosechas y de mayor calidad. Otros cambios incluyen mayores rebaños, mayores tasas de pastoreo, mayor uso de concentrados alimenticios y un rendimiento animal mejorado como resultado de los programas de alimentación. Los nuevos diseños de establos y el uso de prácticas de producción con alta densidad de animales estabulados son otros cambios producidos en la práctica agrícola. Los resultados de estos cambios se han manifestado en una mayor concentración de nutrientes, materia orgánica y sustancias químicas en las granjas modernas comparados con los que se utilizaban hace algunas décadas.

Por lo tanto, el potencial de contaminación de las granjas modernas es significativamente mayor que el de los sistemas de granja más extensivos de las décadas anteriores. Además, el terreno agrícola se utiliza ahora como receptor de los desechos orgánicos no procedentes de la granja, tales como los residuos del procesamiento de alimentos y los lodos de las aguas residuales urbanas. La necesidad de controlar la contaminación procedente de la agricultura es más obvia, ahora que los esfuerzos para reducir la contaminación de la industria y los municipios en los años 70 han hecho efecto.

Este artículo introduce conceptos para desarrollar y evaluar las estrategias efectivas para el control de la contaminación agrícola. El esfuerzo principal se concentra en controlar la contaminación del agua.

### Obstáculos para el control de la contaminación

Los rasgos propios de la industria agrícola hacen que el control de la contaminación sea difícil. La producción agrícola se da en circunstancias que son completamente distintas de las que son comunes a la mayor parte de las industrias que deben controlar su contaminación.

**Suelo.** En primer lugar, el medio básico para casi toda la producción agrícola (es decir, el suelo) es un sistema biológico no homogéneo, con características físicas, químicas y biológicas que pueden variar mucho incluso en unos pocos metros. Otras industrias toman

sofisticadas medidas de control de calidad para reducir la variabilidad de su base de producción (por ejemplo la maquinaria, las materias primas y las instalaciones).

**Condiciones incontroladas.** En segundo lugar, al contrario que en las industrias de fabricación que se basan en zonas delimitadas bajo condiciones controladas (dentro de las fábricas, por ejemplo), los sistemas de producción agrícola basados en la tierra implican grandes zonas de terreno. Los sistemas de producción agrícola basados en la tierra están expuestos a los efectos de cambios climáticos incontrolables y en gran parte impredecibles, los cuales añaden variabilidad a las condiciones de producción. En cambio, otras industrias de producción se esfuerzan por tener entornos de producción estrechamente controlados y regulados (por ejemplo, ventilación, humedad relativa y niveles de iluminación) y reservas de materias primas predecibles, si no controlables.

**Costos de producción.** La producción de productos agrícolas básicos implica pequeños márgenes de beneficio. Los mayores costos de producción asociados al control de contaminación son difíciles de transferir a los consumidores, en parte debido a los mecanismos de control de los precios agrícolas al menudeo controlados por los gobiernos nacionales e internacionales y los grupos comerciales internacionales.

### Focos puntuales de contaminación

Los principales focos puntuales de contaminación agrícola son la propia granja (las zonas descubiertas de ejercicio o de alimentación, algibes de agua en tierra), instalaciones realizadas para almacenar los desechos animales (tanques y pozos para los detritos, estercoleros), instalaciones para recoger y almacenar el efluente del ensilaje (balsas y estanques) e instalaciones para almacenar y manipular pesticidas (casetas de almacenamiento, zonas de recolección del llenado y aclarado). Estos focos suponen una amenaza para el ambiente porque concentran grandes cantidades de potenciales contaminantes en un área y volumen relativamente reducido.

La reducción de los riesgos de contaminación de los focos puntuales depende de un adecuado diseño, construcción y control de las instalaciones. Desde el punto de vista de la ingeniería, unas instalaciones «adecuadamente diseñadas y construidas» son aquellas que cumplen con el objetivo previsto al mínimo costo compatible con las medidas de seguridad aceptadas. Los objetivos previstos de los controles para la mayor parte de los focos puntuales agrícolas son

retener los contaminantes y evitar su emisión incontrolada al ambiente. El requerimiento básico para estas construcciones es una capacidad adecuada de almacenamiento de residuos, integridad estructural y una localización cuidadosa del lugar. Muchos países tienen criterios de diseño basados en la investigación para estas construcciones, criterios que son especificados por las agencias gubernamentales apropiadas. Deben seguirse los criterios de construcción aceptados para garantizar que estas instalaciones funcionen para lo que fueron diseñadas. Igual de importante es, sin embargo, que los operadores (granjeros) deben utilizar o controlar estas instalaciones adecuadamente para lograr los objetivos del diseño, es decir, seguir un método de calidad total para controlar la contaminación.

### Control de los focos de contaminación

#### Selección del emplazamiento

La proximidad de cualquier foco de contaminación a aguas receptoras es un determinante fundamental en el riesgo de contaminación relativo generado por el foco. La selección del emplazamiento es por tanto el primer paso al diseñar instalaciones que van a contener contaminantes agrícolas. La normativa de la buena práctica agrícola proporciona normalmente consejos para la colocación de los controles de contaminación de los focos puntuales. Como norma, estas instalaciones deberían estar situadas lo más lejos posible de las aguas superficiales y gradiente abajo de los pozos subterráneos cercanos (50 a 70 m). Además, estas instalaciones deberían situarse donde las condiciones del suelo y del subsuelo sean las apropiadas (baja materia orgánica, bajo potencial de plasticidad, buena compactación y una capacidad de carga adecuada, un nivel freático profundo, etc.) determinados por medio de sondeo del suelo.

Pueden existir normas urbanísticas locales y se deben cumplir cuando se diseñan instalaciones para el control de los contaminantes agrícolas. Con frecuencia las lecherías están sujetas a normas sanitarias especiales que pueden restringir el emplazamiento de las instalaciones de almacenamiento de residuos animales. El emplazamiento de instalaciones para el control de la contaminación de los focos puntuales debe respetar la salud y la seguridad tanto de los seres humanos como de los animales, considerando como elementos importantes la dirección del viento predominante y la situación de las estructuras existentes. Tanto por cuestiones de seguridad como de practicidad, las instalaciones deberían situarse de tal forma que haya un acceso adecuado en cualquier condición climática.

## Diseño y construcción

La mayor parte de las instalaciones para el control de la contaminación de los focos puntuales son estructuras de hormigón armado y acero que deben diseñarse de acuerdo con los estándares y procedimientos de ingeniería normalizados. La naturaleza corrosiva de muchos contaminantes agrícolas (tales como los residuos animales y las aguas residuales del ensilaje) requiere que se tomen precauciones especiales para seleccionar materiales de construcción resistentes y para seguir prácticas de construcción normalizadas. La construcción de la mayoría de las instalaciones debería ser supervisada por un ingeniero en construcción u otro inspector competente. Se debe tener cuidado para asegurarse que los cimientos son suficientes para evitar el establecimiento diferencial de las instalaciones que podrían debilitar la integridad estructural o causar filtraciones. Las pautas de diseño para la mayor parte de las instalaciones para el control de la contaminación de los focos puntuales son muy asequibles. Las especificaciones de diseño y construcción suelen estar disponibles en las agencias agrarias de los gobiernos locales y nacionales para aquellas instalaciones construidas mediante ayuda económica del gobierno. La información sobre los factores climáticos (velocidad y dirección del viento predominante, temperatura del suelo y del aire, cantidades y patrones de precipitación) puede obtenerse de las oficinas meteorológicas y de las agencias de investigación/asesoría agrícolas.

## Normas para residuos animales y de otros tipos aplicados al suelo

Durante toda la historia escrita los residuos animales han sido aplicados en la tierra como una fuente de nutrientes y materia. No es extraño pues que las normas de prácticas se hayan desarrollado para guiar la utilización de estos residuos para lograr los objetivos agronómicos ambientales. Estas normas o códigos también ofrecen una guía apropiada para la aplicación en la tierra de otros residuos orgánicos (Tabla 2).

### RESIDUOS ORGÁNICOS: EXCRETAS DE ANIMALES

El estiércol de los rumiantes, particularmente vacuno, es muy útil para iniciar el proceso de fermentación, por su alto contenido de bacterias metanogénicas. Por el contrario, la producción de gas será menor que la obtenida por otro tipo de materias primas o desechos por dos factores: en primer lugar, los vacunos extraen mayor parte de nutrientes del forraje y dejan complejos lignosos del forraje más fibroso, que son muy resistentes a la degradación anaerobia, y en segundo lugar, porque realizan una digestión anaerobia parcial y reducen así el potencial de producción de la biomasa. La orina, que contiene menos nutrientes, contribuye poco a la producción de gas, pero incrementan notablemente las propiedades fertilizantes del material, a la vez que diluye la materia prima o sustrato, ahorrando agua. La carga del reactor será más fácil si disponemos de un establo

Tabla 2. Normas típicas de una práctica adecuada para esparcir estiércol

I.	Aplicar el estiércol en las tasas que tienen en cuenta las necesidades nutritivas de la cosecha y los niveles de fertilidad del suelo.
II.	Utilizar periódicamente un programa de comprobación del suelo y estiércol para determinar las aportaciones y necesidades de nutrientes.
III.	Aplicar el estiércol lo más pronto posible en cualquier temporada de crecimiento.
IV.	Evitar aplicar el estiércol sobre suelos mojados o enrachados, terrenos congelados o cubiertos de nieve, y sobre áreas cerca de aguas superficiales y fuentes subterráneas.
V.	Comprobar siempre las partes meteorológicas que puedan producir escorrentías en las 48 horas siguientes.
VI.	Utilizar equipos de aplicación calibrados y utilizarlos de acuerdo con las especificaciones para lograr las tasas de aplicación de residuos deseados.
VII.	Evitar la contaminación directa de las aguas superficiales y subterráneas manteniendo un margen de seguridad suficiente (zonas tope o suelos insaturados, respectivamente) entre estos recursos y el lugar de aplicación del estiércol.
VIII.	Donde sea posible, evitar dejar el suelo al descubierto durante el invierno.
IX.	Tomar todas las medidas razonables para reducir las emisiones de olor (incorporar los residuos inmediatamente, si es posible; no aplicar estiércol cuando los vientos dominantes vayan hacia las residencias cercanas; utilizar aspersores de trayectoria corta en vez de trayectoria larga).

con suelo pavimentado que recoja ambas cosas, estiércol y orina.

La mayor parte de los reactores o digestores simples se alimentan con los diferentes tipos de excretas (estiércol y orina), puesto que estos residuos fermentan bien y producen una buena cantidad de biogás. La cantidad y la composición de las excretas dependen de:

- La cantidad de forraje ingerido y su digestibilidad. Un 40-80% del contenido orgánico de éste se recoge en las excretas ( los ganados por ejemplo, excretan un tercio de las fibras del forraje, aproximadamente ).
- La calidad del forraje usado y del peso medio de los animales.

Es difícil dar valores medios de producción de excretas, puesto que existe una gran variación. En el caso del ganado, por ejemplo, la media puede ir desde 8 a 40 kg por cabeza de animal y por día, dependiendo de la intensidad de crianza .La producción media de excretas deberá ser medida y calculada previamente, en base a la masa de los animales, puesto que existe una buena correlación entre estos dos factores.

En la Tabla 3 se muestran los valores estándar de masa de los animales y producción de excretas. Es para el caso de animales que están todo el día en el establo, el cual, está diseñado para recoger orina y estiércol.

### PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN: NECESIDADES Y LIMITACIONES

La selección de procesos de biorremediación para limpiar suelos contaminados con compuestos

orgánicos requieren, en principio, de una caracterización del material que se desea biorremediar, de la selección de un microorganismos o una mezcla de ellos, así como, de las rutas metabólicas y velocidades de biodegradación que emplean para tal fin. A su vez, el investigador y los estudiantes que laboran en la solución de este tipo de problemas, no deben soslayar en ningún momento los aspectos técnicos y económicos y la funcionalidad del proceso de biorremediación a utilizar, para lo cual, deberán de proveerse de suficiente información que apoye el diseño experimental de investigación y, en su momento, el diseño del proceso en sí. Cuando no se cuenta con una caracterización apropiada sobre los materiales contaminantes así como de fisiología microbiana, el diseño del proceso se vuelve complejo, incluso, para analizar otras posibilidades de remediación ( Tabla 4 ).

La ingeniería de biorremediación tiene una relación estrecha con la información sobre el sitio a limpiar así como de los candidatos microbianos a participar. El análisis de proceso se inicia a través de establecer ampliamente las características del material contaminante, los microorganismos a utilizar, tipos de reactor, pretratamiento del material contaminante y las condiciones de operación del proceso. Es necesario considerar también mediciones de laboratorio con el fin de explorar alternativas de operación, así como para cuantificar velocidades de degradación en función de parámetros críticos de operación como pH, oxígeno y potencial de óxido-reducción. A pequeña escala deben observarse los fenómenos de transferencia de masa y calor, así como, de requerirse, condiciones de aeración y agitación. Estos últimos aspectos proporcionan una base importante para criterios y métodos de escalamiento de procesos a escala piloto, semicomercial y comercial, así como los requerimientos de su instrumentación y control.

Tabla 3. Valores estándar de masa de los animales y producción de excretas.

Especies	Excreta diaria en función del peso animal		Sólidos del estiércol fresco		Peso animales (kg)
	Estiércol	Orina	ST(%)	SV(%)	
Vacuno	5	4-5	16	13	135-800
Búfalo	5	4-5	14	12	340-420
Porcino	2	3	16	12	30-75
Ovejas/cabras	3	1-1.15	30	20	30-100
Gallinas	4.5		25	17	1.5-2
Humanos	1	2	20	15	50-80

Tabla 4. Tratamiento Aerobio vs. Anaerobio

FACTOR	TRATAMIENTO AEROBIO	TRATAMIENTO ANAEROBIO
Proceso de fermentación	Degradación de la materia a CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, nitratos, sulfatos, fosfatos y biomasa. En presencia de oxígeno molecular.	Degradación peso a peso de la materia orgánica a CO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , metano y biomasa, eventualmente H <sub>2</sub> S. Sin la presencia de oxígeno molecular.
Crecimiento microorganismos	Crecimiento muy rápido, poco tiempo de generación, gran producción de biomasa (fango)	Crecimiento lento (metanógenas), elevado tiempo de generación, poca producción de biomasa (fango)
Condiciones ambientales microorganismos	Mucha diversidad de especies, con un amplio espectro de degradación, nivel de especialización, baja sensibilidad.	Mayor número de grupos de organismos, con condiciones ambientales contrarias, más sensibles a cambios ambientales
Operatividad	Mayor estabilidad biológica que proceso anaerobio, lo que conlleva un menor control del proceso	Biología más conflictiva que proceso aerobio. Necesidad de control del proceso por tratarse de un sistema estanco.
Demanda energética	O <sub>2</sub> necesario como receptor de Hidrógeno, mayor demanda energética para aireación	No precisa O <sub>2</sub> como aceptador de hidrógeno, menor demanda energética (no-aireación)
Ganancias energéticas	Diferencias sensible de nivel energético entre sustrato inicial y producto final, capacidad de auto-calefacción por reacción exotérmica, productos finales sin aplicación energética	Diferencia energética entre sustrato inicial y producto final baja. Nada o muy poca capacidad de auto-calefacción, productos finales con recuperación energética (metano)
Necesidad de nutrientes (N,P)	Mayor	Menor
Calidad del sólido digerido)	Menor estabilización por un proceso menor de digestión	Mayor estabilización debido a una mayor digestión de la materia orgánica.
Productos obtenidos	Fertilizante orgánico sólido o compost	Fertilizante orgánico líquido y sólido, biogás como combustible
Necesidad de calefacción	Al tratarse de una reacción exotérmica, no precisa de calefacción y puede llevarse a cabo en rangos amplios de temperatura	Precisa de calefacción en climas con mínimas anuales inferiores a los 15°C (Véase apartado 2.3.)
Problemas de olores	Aun tratarse de un sistema abierto, los compuestos no generan problemas de malos olores	Problemas de malos olores debido a la producción de H <sub>2</sub> S y mercaptanos

**Factores del proceso a considerar.** Antes de seleccionar cualquier alternativa de proceso de biorremediación, debe caracterizarse muy bien el sitio a limpiar, hacer un estudio de prefactibilidad técnica, y económica, de ser necesario; determinar los puntos clave en los aspectos físicos, químicos y microbiológicos. Con ello, podemos dilucidar detalles de velocidad de limpieza, así como los factores que influyen en ello, para luego dar paso a la obtención de datos de cinética y equilibrio en mecanismos de reacción físicos, químicos y biológicos importantes para el diseño del proceso.

**Caracterización del sitio a limpiar.** La caracterización del sitio permite conocer el tipo de contaminante, su concentración y el grado de la problemática. En seguida hay que cuantificar el perfil

de distribución del contaminante para ver su alcance en cuanto a perjudicar mantos freáticos y determinar el tipo de proceso que se debe aplicar en la biorremediación. Propiedades físicas y químicas relacionadas con solubilidad, presiones parciales de vapor, si el contaminante es hidrofílico o hidrofóbico, coeficientes de adsorción en el suelo y los niveles de biodegradabilidad.

En la biorremediación de suelos el factor limitante de velocidad de limpieza es casi siempre el nivel de desorción del contaminante, puesto que la porción en las partículas del suelo y el contenido de materia orgánica pueden determinar el grado de biodisponibilidad de contaminantes orgánicos. La biodisponibilidad es una característica tóxica importante si es que es determinada por la calidad del proceso de lixiviación

durante el ataque al compuesto contaminante, en lo que la Agencia de Protección al Ambiente (EPA, por sus siglas en inglés) dispone de amplia información. Importante también, es la determinación de si el proceso será *in situ*; esta factibilidad de biorremediación requiere de un estudio extenso sobre las propiedades hidrológicas del suelo, ya que las velocidades de biorremediación están en función de los fenómenos de transferencia de los contaminantes (desorción y difusión), así como de los flujos convectivos y dispersivos de los gases y nutrientes, así como del contenido microbiológico del suelo.

**Caracterización microbiológica.** El primer paso a dar en este tema es la cuantificación de las velocidades de biodegradación por microorganismos nativos. Esta medición puede ser complicada ya que la concentración celular o de biomasa, por lo general, es baja, o bien, porque no existen microorganismos capaces de biodegradar el material contaminante. Por otro lado, existe el problema de que las condiciones de temperatura, oxígeno, abastecimiento de nutrientes y la disponibilidad del contaminante debido a su baja solubilidad y sorción en el suelo, pueden limitar las velocidades de degradación, principalmente al principio de los procesos en donde aun los factores limitantes no están bien definidos.

El objetivo principal de las pruebas de degradación es ver si los microorganismos nativos son capaces de biorremediar el sitio contaminado cuando las condiciones de operación pueden ser optimizadas, o bien, que habrá la necesidad de emplear un microorganismo de colección. Sin embargo, la experiencia dice que los mejores microorganismos para un proceso de biorremediación están, precisamente, en el sitio a biorremediar, es decir, deberá usarse, de preferencia, un microorganismo nativo.

**Factores ambientales.** En relación con las pruebas de biodegradación, se debe poner atención a los factores ambientales que afectan las mediciones de velocidad de biodegradación. Los análisis químicos que respaldan el diseño de procesos de biorremediación incluyen mediciones de pH, DQO, COT, nitrógeno, fósforo y hierro, metales esenciales, inhibitorios y tóxicos. Se requiere información sobre el tipo de suelo, contenido de materia orgánica, así como el perfil de distribución del tamaño de partícula. Los análisis microbiológicos incluyen parámetros como DBO, cuenta viable, estudios de degradación en matraces agitados y en columnas empleando microorganismos ya sea nativos, o bien, de colección microbiana.

La biorremediación se lleva a cabo, por lo general, a un pH neutro a pesar de que la presencia de hongos

filamentosos necesitan un ambiente ácido; son mesofílicos que requieren una temperatura de 25°-37°C. Cuando se requiere la presencia de oxígeno, su abastecimiento es complejo así como la de nutrientes. En caso de necesitarse bacterias, éstas son capaces de degradar compuestos orgánicos como fuentes de carbono y energía puesto que son heterotróficas. En todos los casos, el ingeniero debe conocer las mejores condiciones de vida de los microorganismos en juego, es decir, conocer el *currículum vitae* del o los microorganismos.


Otro detalle interesante, y desde el punto de vista bioquímico, es aquel que se tiene que dar a las rutas metabólicas durante la biodegradación de los contaminantes. Aquí, cuando menos, se debe probar el nivel de toxicidad de los productos finales de los mecanismos de reacción con el fin de evitar problemas de represión metabólica por retroalimentación. Con este tipo de análisis se cumple, asimismo, con la curiosidad de ver si no hay la presencia de algún compuesto más tóxico que el que se desea eliminar.

**Determinación de velocidades de degradación.** Las velocidades de degradación y sus constantes de equilibrio son importantes para el diseño de procesos de biorremediación. En la biorremediación de suelos, los contaminantes pueden ser degradados o mineralizados, volatilizados, adsorbidos en algún material extra o descargados empleando sistemas de diálisis o algún otro existente en la información tecnológica. La volatilización se presenta en compuestos con valores altos en la constante de la Ley de Henry y las constantes de partición octanol-agua nos dan una pauta a seguir en relación con el potencial de adsorción a matrices hidrofóbicas como puede ser un lodo activado o materiales orgánicos. En el caso de suelos, el contenido de arcilla y la capacidad de intercambio iónico permite conocer los niveles de adsorción para compuestos hidrofílicos. La volatilización y la sorción deben ser disminuidas de tal manera que el papel de los contaminantes en el proceso de biorremediación es su degradación.

Como ejemplo, véase el caso del compuesto tetracloroetileno en la Tabla 5 que se presenta más adelante; este compuesto tiene una constante de velocidad de biodegradación baja y una alta constante de la Ley de Henry, por lo que, será enfocado hacia una volatilización, de tal manera que un proceso alternativo podría incluir un sistema de aeración con el apoyo de biofiltros. Aunque cabe señalar que los datos de constantes de velocidad de biodegradación publicados no son del todo confiables ya que las condiciones en que fueron determinados varían significativamente en todos los casos.

Tabla 5. Cinética de biodegradación en plantas de tratamiento de aguas y constantes de equilibrio

Compuesto	Constante de velocidad de degradación (l/g.h)	Constante de la Ley de Henry (atm.m <sup>3</sup> /mole)	Constante de partición Octanol-Agua
Acetona	0.20	$2.5 \times 10^{-5}$	0.57
Anthracene	3	$8.6 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^4$
Chlorobenzene	3	$3.6 \times 10^{-3}$	690
2,4-Dichlorophenol	100	$9.4 \times 10^{-6}$	790
Fluorene	10	$6.4 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^4$
Hexachlorobenzene	$3 \times 10^{-3}$	$6.8 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^6$
Naphthalene	100	$4.6 \times 10^{-4}$	2000
Nitrobenzene	15	$1.3 \times 10^{-3}$	72
Pyrene	0.1	$5.1 \times 10^{-6}$	$8.0 \times 10^6$
Tetrachloroethane	$1.0 \times 10^{-3}$	0.011	1100.00



**Opción de reactores.** Las opciones de que se dispone para el diseño de reactores están determinadas por las propiedades físicas del sitio contaminado, así como de las propiedades químicas y bioquímicas de los contaminantes, sin embargo, para el caso de suelos contaminados la mejor opción son los reactores intermitentes o tipo batch. Si el contaminante es polar debemos usar un reactor aerobio, caso contrario, un contaminante no-polar será un reactor anaerobio.

La información sobre reactores es por demás amplia y específica. Se tienen sistemas para remediación de aguas subterráneas, lodos activados, biopelículas, anaerobios, slurry y para suelos en actividades agropecuarias, los cuales son los más simples y económicos ( Figura 3, Tabla 6 ).

### CONCLUSIONES

La contaminación del suelo en el sector agropecuario, proviene de los diferentes tipos de excretas animales, de las cuales, la de tipo vacuno es la más importante y con mayor atractivo técnico y económico.

La biorremediación de suelos agropecuarios, con soporte microbiológico, bioquímico y de ingeniería, es la técnica más apropiada para limpiar dichos suelos y que deberá incluir la búsqueda de alternativas para la instalación de negocios a través del uso apropiado de

los resultados positivos que se generen de proyectos de investigación, como es el caso del biogás a partir de estiércol de rumiantes.

Cuando la tecnología no está desarrollada, hay que seguir un exhaustivo procedimiento, puesto que los errores en las fases iniciales de diseño conducen a un fracaso seguro en el intento de hacer negocio con la investigación que se realiza en instituciones de educación superior y centros de investigación, oficiales. Es preciso que para este tipo de criterio de investigación aplicada colabore los tres sectores siguientes:

**La administración:** debe dar soporte estratégico a la tecnología, así como facilidades de financiamiento, de ser necesario.

**El técnico:** desempeñará el análisis inicial de la zona contaminada. Debe asegurar la adaptación del diseño de proceso de biorremediación, y tomar las debidas medidas necesarias para el correcto funcionamiento de todas las partes del proceso de biorremediación.

**Los clientes:** tienen que estar motivados para cumplir con las normas establecidas por la SEMARNAT, en relación con la conservación del medio ambiente. Asimismo, deben comprender el proceso biológico de tal manera que entiendan la afectación de los parámetros ambientales al rendimiento y productividad del biogás

Tabla 6. Relación productiva de gas.

Tipo de establo/estiércol	Ganado, peso medio 200-300 kg			Cerdos, peso medio de 50-60 kg		
	Relación estiércol (kg/día)	Relación gas (l/día)		Relación estiércol (kg/día)	Relación gas (l/día)	
		TR=60	TR=80		TR=40	TR=60
<b>Establo las 24 horas</b>						
Estiércol sólo (húmedo), suelo no pavimentado (10% de pérdidas)	9-13	300-450	350-500	-	-	-
Estiércol y orina suelo pavimentado	20-30	350-510	450-610	2,5-3	120-140	150-180
Residuos de establo (estiércol y 2kg de residuos orgánicos) suelo pavimentado	22-32	450-630	530-730	-	-	-
<b>Pernoctación en establo</b>						
Estiércol sólo (10% pérdidas)	5-8	180-270	220-310	-	-	-
Estiércol y orina suelo pavimentado	11-16	220-320	260-380	-	-	-
1 kg/día de estiércol fresco		±35	±40	-	-	-
1 kg/día de estiércol y orina		±20	±25		±50	±60
1 kg/día de estiércol y orina		±22	±27		-	-
1 kg ST/día	±200	±240		±2270	±340	
1 kg SV/día	±250	±300		±3350	±430	

**TR-tiempo de retención; ST-sólidos totales; SV-sólidos volátiles**

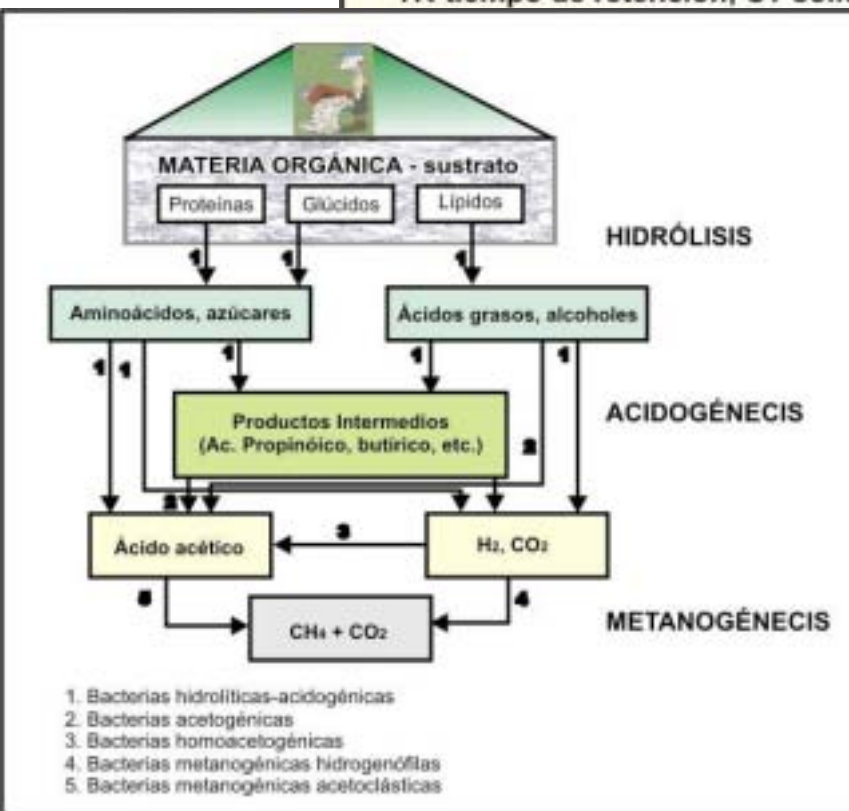


Fig. 3. Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones bacterianas

por parte de las bacterias. Tendrán que conocer también los riesgos y peligros en relación con el manejo del biogás, así como sobre la adaptación de los aparatos que se alimentan con dicho energético.

Un programa de investigación y desarrollo escala de planta piloto y con el apoyo de los tres sectores antes mencionados, garantiza una implantación exitosa de este tipo de tecnología. Crear confianza entre la población es la mejor manera de abatir este problema de contaminación ambiental. Las posibilidades de obtener un fertilizante orgánico post-fermentación y un combustible renovable, son las ventajas relativas que presenta este tipo de biorremediación enfrente de otras alternativas.

La aplicación de tecnologías será distinta en función del tipo de contaminante que se tenga, y será preciso adaptar cada tecnología al tipo de contaminación que se tenga, también.

Finalmente, y como uno de los aspectos más importantes de esta publicación: es vital que todos los que están dedicados a investigación aplicada tengan la seguridad y confianza de que la ciencia y la tecnología pueden generar negocios, aspecto que nuestros estudiantes deberán conocer plenamente y evitar así la incertidumbre sobre el tema de: **Qué es lo que voy a hacer al terminar mis estudios?**

#### LITERATURA CITADA

- Alexander, M. 2004. *Biodegradation and Bioremediation*. New York: Academic Press.
- Andrews, G. 2002. Large-scale bioprocessing of solids. *Biotechnology Progress*, 6, 225-30.
- Autry, A. R. & Ellis, G. M. 2002. Bioremediation: an effective remedial alternative for petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Environmental Progress*, 11, 318-23.
- Block, R.; Stroo, H. & Sweet, G. H. 2003. Bioremediation – why doesn't it work sometimes? *Chemical Engineering Progress*, 89 (8), 44-50.
- Boethling, R. S. & Sabjlic, A. 1999. Screening-level model for aerobic biodegradability based on a survey of expert knowledge. *Environmental Science & Technology*, 23, 672-9.
- Cueto W., J. A.; Castellanos R., J. Z.; Valenzuela S., C. & Figueroa V., U. 2006. Fundamentos para el uso sustentable de desechos orgánicos en sistemas agrícolas. Comunicación personal.
- Cueto W., J. A.; Quiroga G., H.M. & Becerra M., C. T. 2003. Nitrógeno disponible y desarrollo del ballico anual. I. Producción, calidad del forraje y acumulación de nitratos. *Terra*, 21 (2), 285-95.
- Delgado, J. A.; Shaffer, M.; Hu, C.; Lavado, E. S.; Cueto W., J.; José, P., Li, X., Rimski-Korsakov, H.; Follett, R.; Colon, W. & Sotomayor, D. 2006. A decade of change in nutrient management: a new nitrogen index. *Journal of Soil and Water Conservation*, 61 (2) 66A-75A.
- Dibble, J. T. & Bartha, R. 1999. Rehabilitation of oil-inundated agricultural land: a case history. *Soil Science*, 128, 56-60.
- Funk, S. B.; Roberts, D. J.; Crawford, D. L. & Crawford, R. L. 2003. Initial-phase optimization for bioremediation of munition compound-contaminated soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 59, 2171-7.
- Henry, S. & Grbiæ-Galiæ, D. 2001. Influence of endogenous and exogenous electron donors and trichloroethylene toxicity on trichloroethylene oxidation by methanotrophic cultures from a groundwater aquifer. *Applied and Environmental Microbiology*, 57, 236-44.
- Kaake, R. H.; Roberts, D. J.; Stevens, T. O.; Crawford, R. L. & Crawford, D. L. 2002. Bioremediation of soils contaminated with the herbicide 2-sec-butyl-4,6-dinitrophenol (dinoseb). *Applied and Environmental Microbiology*, 58, 1683-9.
- King, R. B. 2002. *Practical Environmental Bioremediation*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Lamar, R. T. 2000. In situ depletion of pentachlorophenol from contaminated soil by *Phanerochaete* spp. *Applied and Environmental Microbiology*, 56, 3093-100.
- Litchfield, C. D. 2001. Practices, potential, and pitfalls in the application of biotechnology to environmental problems. In *Environmental Biotechnology for Waste Treatment*, ed. G. Saylor et al., pp. 147-57. New York: Plenum Press.
- Murray, W. D. & Richardson, M. 2003. Development of biological and process technologies for the reduction and degradation of pulp mill wastes that pose a threat to human health. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 23: 157-94.
- Pflug, A. D. & Burton, M. B. 1998. Remediation of multimedia contamination from the wood-preserving industry. In *Environmental Biotechnology*, ed. G. S. Omenn, pp. 193-201. New York: Plenum Press.
- Reynolds, C. M.; Travis, M. C.; Braley, W. A. & Scholze, R. J. 2004. Applying field-expedient bioreactors and landfarming in Alaskan climates. In *Hydrocarbon Bioremediation*, ed. R. E. Hinchee, B. C. Alleman, R. E. Hoeppe & R. N. Miller, pp. 100-6. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
- Rynk, R., Ed. 2002. *On-Farm Composting Handbook*. Ithaca, NY: Northeast Regional Agricultural Engineering Service.
- Stormo, K. E. & Crawford, R. L. 2002. Preparation of encapsulated microbial cells for environmental applications. *Applied and Environmental Microbiology*, 58: 727-30.
- U. S. Environmental Protection agency 2001. *Biological Treatment of Wood Preserving Site Groundwater by BioTrol, Inc.* EPA/540/A5-91/001. Washington, DC: U. S. EPA.
- Wu, S. & Gschwend, P. M. 1996. Sorption Kinetics of hydrophobic compounds to natural sediments and soils. *Environmental Science & Technology*, 20: 717-25.