

## TEMA 2.6 MICROBIOLOGIA AMBIENTAL

### CI41B Ingeniería Ambiental

Profesores C. Espinoza, D. Rodríguez y R. Muñoz  
Semestre Otoño 2005

## 1. INTRODUCCION

A pesar de que la palabra *salud* no es mencionada en el título el motivo principal de este capítulo es la protección de la salud humana de influencia ambientales. La **microbiología** (del griego: **micro** - pequeño, **bios** - vida, y **logos** - estudio de) es el estudio de los microorganismos y sus actividades. La microbiología ambiental y sanitaria se preocupa principalmente de los microorganismos presentes en el agua, agua servida, aire, y en algunos casos en el suelo, que pueden afectar la salud pública.

## 2. FUNDAMENTOS DE MICROBIOLOGÍA

### 2.1 Clasificación

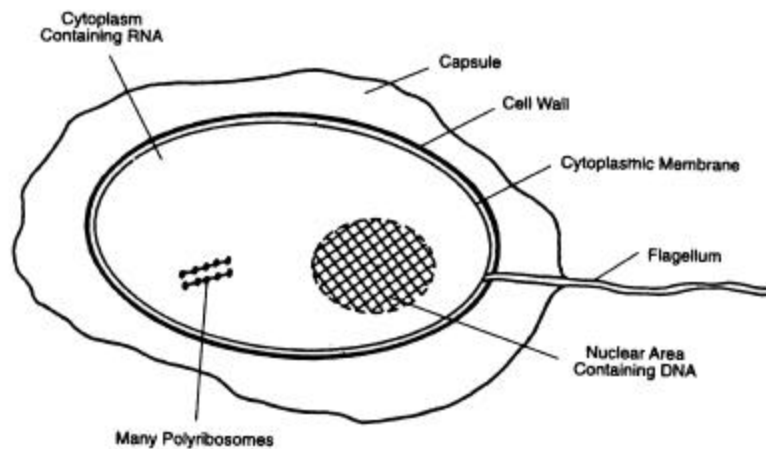
Muchos organismos vivos fueron clasificados originalmente como pertenecientes a los reinos animal o vegetal. Sin embargo, muchos microorganismos no pueden ser clasificados en alguna de esas dos categorías. De esta manera, en 1866 Haeckel propuso una nueva categoría o reino, denominado **protista**. El reino protista incluye los protozoos, algas, hongos, y bacterias (los virus eran desconocidos en 1866). Con el avance en el conocimiento de la estructura celular los protistas fueron divididos a su vez en dos categorías: protistas superiores (**eucariotes**), que corresponden a organismos uni o multicelulares que poseen un núcleo real, y los protistas inferiores (**procariotes**), los cuales no poseen un núcleo real. En los procariotes, algas azul-verde y bacterias, el material genético de la célula - ADN - no está organizado en estructuras reconocibles como cromosomas y no está separado del citoplasma por una membrana nuclear.

### 2.2 Bacterias

Las bacterias son organismos microscópicos unicelulares. Ellas se encuentran en el agua, agua servida, suelo, aire, leche, plantas (frutas y vegetación), animales y seres humanos (piel y tracto digestivo). Las bacterias se reproducen por fisión binaria y se caracterizan por su forma, tamaño, y estructura. Bacterias individuales tienen alguna de las siguientes formas: esféricas (*cocci*), cilíndricas (*bacilo*), y espiral (*espiral*). Las bacterias se agrupan formando pares, racimos y cadenas. Algunos ejemplos de bacterias que son importantes en el campo ambiental se indican en la Tabla 1. Un diagrama esquemático de una bacteria se presenta en la Figura 1.

Algunas bacterias son capaces de rápidos movimientos en líquidos. Algunas bacterias (*bacilo o clostridium*) forman esporas, las que representan la fase durmiente o de descanso de la célula. Una célula normal y activa se denomina *vegetativa*. Las bacterias que forman esporas pueden vivir en estado vegetativo por muchas generaciones. Las esporas son extremadamente resistentes a ambientes químicos o físicos adversos, lo que las hace muy difícil de eliminar. Estas bacterias son muy comunes en el aire, suelo y agua.

**Figura 1**  
**Diagrama Esquemático de una Bacteria**



### 2.3 Crecimiento y Muerte de Bacterias

Todos los organismos vivos tienen requerimientos nutricionales y físicos que deben ser satisfechos para sostener sus vidas. Entre las diferentes especies de bacterias existe una amplia variación en los requerimientos nutricionales y las condiciones físicas que ellas pueden soportar. Ciertas bacterias crecen a temperaturas bajo los 0°C, mientras que otras lo hacen a cerca de 99°C. Algunas bacterias requieren oxígeno, mientras que otras son afectadas por su presencia.

Las bacterias se dividen en dos grandes grupos tomando en consideración sus fuentes de energía y carbono: **heterotróficos** y **autotróficos**. Las *bacterias heterotróficas* obtienen su energía y carbono desde un compuesto orgánico o materia orgánica. Las *bacterias autotróficas* usan dióxido de carbono como su fuente de carbón y obtienen su energía desde la luz solar o a través de la oxidación de compuestos inorgánicos. Si las bacterias autotróficas requieren luz solar como su fuente de energía ellas son denominadas **fotoautotróficas**. Si ellas obtienen su energía a partir de la oxidación de compuestos químicos inorgánicos, ellas son llamadas **quemoautotróficas**.

Además del carbono los requerimientos nutritivos incluyen nitrógeno, sulfuro, fósforo, y trazas de elementos metálicos como el magnesio, calcio y fierro. La forma en que estos elementos son obtenidos son muy variadas. Algunas bacterias pueden "fijar" u obtener su nitrógeno desde la atmósfera, mientras que otras utilizan compuestos inorgánicos como el amoníaco o los nitratos. Muchos factores físicos pueden afectar el crecimiento de las bacterias. Entre otros: temperatura, ambiente gaseoso, y el *pH*. Las bacterias pueden ser agrupadas de acuerdo al rango de temperatura en el cual se desarrollan. **Psicotróficas** son aquellas bacterias que se desarrollan entre 0°C y 30°C. **Mesófilas** son aquellas bacterias que se desarrollan en el rango 30 a 40°C, mientras que las **termófilas** pueden soportar hasta 99°C.

**Tabla 1**  
**Algunas Bacterias de Importancia en el Ambiente**

Grupo de Bacteria	Género	Importancia Ambiental
Bacteria Patogénica	<i>Salmonella</i> <i>Shigella</i> <i>Mycobacterium</i>	Causa fiebre tifoidea Causa disentería Causa tuberculosis
Bacteria Indicadora	<i>Escherichia</i> <i>Enterobacter</i> <i>Streptococcus</i> <i>Clostridium</i>	Contaminación fecal
Bacterias que degradan	<i>Pseudomonas</i> <i>Flavobacterium</i> <i>Zooglea</i> <i>Clostridium</i> <i>Micrococcus</i> <i>Methanobacterium</i> <i>Methanococcus</i> <i>Methanosarcina</i>	Degrada orgánicos Degrada proteínas Forma flocs en plantas de lodos activados Produce ácidos grasos desde organismos en digestor anaeróbico Producen gas metano desde ácidos grasos en un digestor anaeróbico
Bacterias Nitrificadoras	<i>Nitrobacter</i> <i>Nitrosomonas</i>	Oxida compuestos de nitrógeno inorgánico
Bacterias Denitrificadoras	<i>Bacillus</i> <i>Pseudomonas</i>	Reduce nitrato y nitrito a nitrógeno gas u óxido nitroso
Bacterias que fijan nitrógeno	<i>Azotobacter</i> <i>Beijerinckia</i>	Capaces de fijar nitrógeno atmosférico a NH <sub>3</sub> .
Bacteria sulfuro	<i>Thiobacillus</i>	Oxida sulfuro y fierro
Bacterias reductoras de sulfato	<i>Desulfovibrio</i>	Involucrada en corrosión de tuberías de fierro
Bacterias fotosintética	<i>Chlorobium</i> <i>Chromatium</i>	Reducen sulfitos a sulfuro elemental
Bacterias de Fierro Filamentosas Oxidan fierro	<i>Sphaerotilus</i> <i>Leptothrix</i>	Responsable por formar lodos Oxida fierro

Los gases más importantes involucrados en el crecimiento bacterial son el oxígeno, para la oxidación aeróbica biológica, y el dióxido de carbono como fuente de carbono para los autotróficos. Debido a la importancia del oxígeno se acostumbra dividir las bacterias en grupos, de acuerdo a su necesidad de oxígeno libre o molecular:

- Bacteria aeróbica que requiere oxígeno para su crecimiento.
- Bacteria anaeróbica que puede crecer sin oxígeno libre.
- Bacteria facultativa puede crecer con o sin oxígeno.
- Bacteria microaerófila, la que crece en la presencia de muy pequeñas cantidades de oxígeno.

Los adjetivos **facultativa** y **obligada** describen el grado de dependencia en una condición particular. Así por ejemplo, una anaeróbica obligada es una bacteria que no crecerá en presencia de oxígeno libre. El tercer factor que afecta el crecimiento bacterial es el *pH*. La

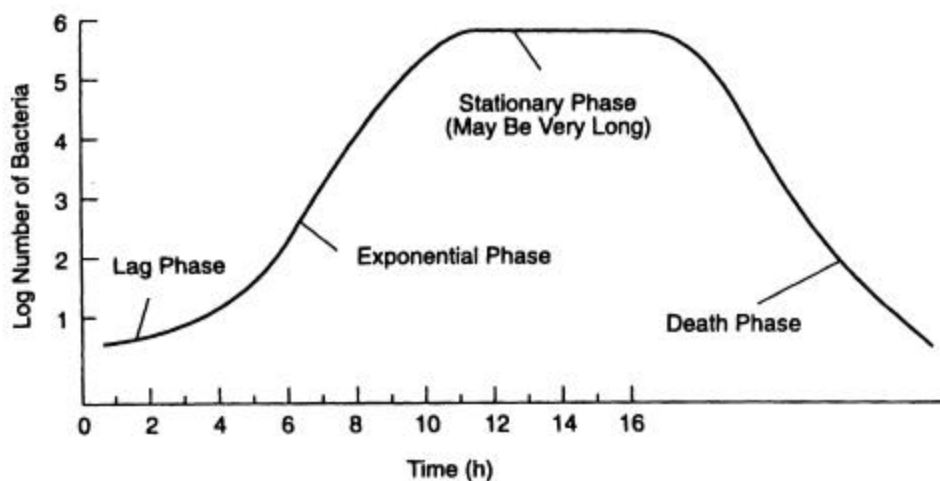
mayor parte de las bacterias muestra una tasa de crecimiento óptimo en el rango de  $pH$  entre 6.5 y 7.5. Sin embargo, las bacterias son capaces de desarrollarse en forma correcta con un  $pH$  entre 4.0 y 10.0.

El crecimiento y reproducción de las bacterias ocurre a medida que nutrientes son procesados e incorporados como nuevo material de célula. El proceso reproductivo de la célula, **fisión binaria**, es una característica del crecimiento bacterial. Las poblaciones bacterianas pueden alcanzar altas densidades muy rápidamente. Las células individuales se duplican a una tasa característica para cada organismo. Este intervalo de tiempo se conoce como el tiempo de generación. El tiempo de generación a 20°C alcanza a 20 minutos para *escherichia coli*, hasta algunas horas para otras especies (11 horas para la *nitrosomona europea*).

El crecimiento de una población bacteriana se compone de una serie de fases. Durante la primera de ellas, **fase lag**, las células se ajustan a su nuevo ambiente. Ellas pueden tener deficiencias en ciertas enzimas y coenzimas por lo que durante esta etapa se produce la síntesis de estos materiales. Al final de esta etapa se entra a la **fase exponencial o logarítmica**, en la cual la población se duplica a intervalos regulares. Este es el período de más rápido crecimiento bajo condiciones óptimas. Cuando el número de células que son producidas iguala al número de células que mueren se establece un equilibrio dinámico en el cual no existe un mayor crecimiento. Esta etapa se denomina **fase estacionaria** y se debe a un agotamiento de algún nutriente. La **fase de muerte o declinación** se alcanza cuando la tasa de destrucción supera la tasa de crecimiento. En la Figura 2 se presenta un esquema que ilustra esta situación.

Así como es posible crear condiciones para el crecimiento óptimo de bacterias, es también posible crear condiciones para su destrucción. La destrucción de la vida bacteriana se denomina **esterilización**, mientras que la destrucción selectiva de patógenos se denomina **desinfección**. La forma más simple de esterilización es mediante un incremento en la temperatura por sobre 100°C. La desinfección se consigue mediante el uso de agentes bactericidas químicos como el cloro, yodo y ozono. Estos agentes destruyen la célula o partes de ella con lo que se evita su posterior duplicación.

**Figura 2**  
**Fases de Crecimiento de una Población Bacteriana**



## 2.4 Virus, Algas, Hongos y Protozoos

Otros microorganismos de importancia en ingeniería y ciencia ambiental son los virus, algas, hongos y protozoos.

Los **virus** más pequeños tienen tamaños entre 10 y 250 nm. Para comparación podemos agregar que una bacteria de tamaño pequeño, *Salmonella typhi*, tiene alrededor de 1000 nm o 1mm. Los virus son únicos ya que ellos no poseen enzimas internas y por lo tanto no pueden generarse o crecer por si mismos. Ellos son parásitos obligados por lo que infectan los tejidos de bacterias, plantas, y animales, incluidos los seres humanos. Algunos ejemplos de virus patogénicos son aquellos que causan la hepatitis infecciosa, influenza o la poliomelitis.

La Figura 3 muestra un dibujo esquemático de los virus de influenza y paperas. En general los virus están compuestos de un ácido nucleico central, ADN o ARN, rodeado por una membrana protectora. Una unidad de virus se denomina *virión*. Cada tipo de virus puede infectar un tipo de célula específica, es decir, un virus animal no puede ser transmitido a un ser humano y viceversa.

De acuerdo a la teoría celular un virus no es un organismo vivo. Sin embargo, ellos tienen la habilidad de reproducirse o replicarse dentro de su célula receptora. Debido a que ellos no están vivos fuera de su célula receptora pueden sobrevivir un largo tiempo entre cuadros infecciosos y pueden ser destruidos sólo mediante la alteración de sus estructuras moleculares.

**Figura 3**  
**Ejemplos de Viruses**



**Mumps**



**Influenza**

Las **algas** son clasificadas como eucariotes, lo que significa que tiene un núcleo real. Las formas de las algas unicelulares pueden ser esféricas, cilíndricas o en espiral. Independientemente de su forma o complejidad las algas contienen pigmentos fotosintéticos y son capaces de realizar fotosíntesis. Las algas son importantes productores primarios en la cadena alimenticia primaria; sin embargo, ellas producen bastantes problemas durante la producción de agua debido a que contribuyen con sabor y olor, reducen las carreras de funcionamiento de filtros y causan una alta demanda de cloro para desinfección. El crecimiento excesivo de algas, conocido como *blooming*, forma una película de material orgánico que interfiere con el uso recreacional de las aguas.

Los **hongos** son protistas no fotosintéticos y pueden ser divididos en tres grandes grupos: **molds** que son hongos filamentosos, **levaduras** que son no filamentosos, y **mushrooms** que son hongos macroscópicos. Los hongos son principalmente aerobios y **saprofíticos**, lo que significa que se alimentan de materia orgánica en descomposición. Ellos son capaces de usar una gran variedad de elementos en su cadena alimenticia.

Finalmente los **protozoos** son los más especializados de los organismos unicelulares. Muchos son no fotosintéticos, se reproducen asexualmente por fisión binaria y no tienen paredes celulares. Muchas especies poseen mecanismos de transporte y se clasifican de acuerdo a ellos. Su tamaño varía desde algunos micrones hasta cientos de micrones. Los protozoos se encuentran en todos aquellos lugares con alta humedad. Ellos sobreviven a condiciones adversas formando envolturas con gruesas paredes.

### 3. MICROBIOLOGÍA APLICADA

#### 3.1 Microbiología de Suelos y Residuos Sólidos

Muchos de los seres vivos - plantas, animales y protistas - y sus residuos asociados encuentran su destino en el suelo. Allí, la actividad microbiana transforma este material en las sustancias que constituyen el suelo. Sin esta actividad, los ciclos de nutrientes tales como el de carbono o nitrógeno no podrían ser completados, y la vida en la tierra estaría comprometida.

Los suelos están compuestos de una delgada película de material sobre la superficie de la tierra. La profundidad del suelo y sus características físicas y químicas son extremadamente variables, pero en general existen cinco componentes principales:

- *Partículas minerales inorgánicas.* Estas partículas, principalmente aluminio, sílice y pequeñas cantidades de otros minerales, tienen tamaños entre muy pequeñas partículas de arcilla a granos de arena y peñascos. Las proporciones de estas partículas determinan las características de almacenamiento de agua, su estructura, y la disponibilidad de aire y nutrientes. Suelos inorgánicos son los más comunes.
- *Residuos orgánicos.* Restos de plantas y animales que conforman la componente orgánica del suelo a través de distintos estados de descomposición, finalizando en el denominado *humus*.
- *Agua.* El agua es necesaria para la actividad microbiana. La cantidad de agua en un suelo depende de un número de factores, los que incluyen la precipitación, estructura del suelo, y población microbiana. El agua es contenida en los espacios entre granos en el caso de sistemas saturados, y está adsorbida en los granos de arena en los suelos no saturados. Muchos nutrientes se encuentran disueltos en el agua y por lo tanto están disponibles para los microorganismos.
- *Gases.* Algunos gases, principalmente nitrógeno y oxígeno, pero también dióxido de carbono, llenan los espacios entre granos que no contienen agua. En suelos saturados, pequeñas cantidades de gas están disueltas en el agua.
- *Sistemas biológicos.* Raíces de plantas, pequeños animales y microorganismos crean el quinto componente del suelo. Un gramo de suelo agrícola puede contener 2,500,000,000 de bacterias, 500,000 hongos, 50,000 algas, y 30,000 protozoos.

Bacterias y hongos constituyen el mayor grupo de microorganismos en el suelo. Bacterias autotróficas y heterotróficas degradan complejas sustancias orgánicas e inorgánicas, algunas bajo condiciones aeróbicas y otras bajo condiciones anaeróbicas. Los hongos descomponen celulosa y otros componentes de los tejidos de plantas.

En un suelo fértil las actividades de las algas no son tan importantes como las de las bacterias y hongos. Sin embargo, en suelos inorgánicos y rocas ellas son las principales productoras de material orgánico. Los protozoos son abundantes en condiciones aeróbicas.

La importancia y tipo de crecimiento bacteriano en suelos, depende de los siguientes factores:

- cantidad de nutrientes,
- disponibilidad de humedad, y para organismos aeróbicos, de aire,
- temperatura y *pH* adecuados.

Bajo condiciones ambientales favorables creadas por un relleno sanitario los organismos presentes en el suelo pueden ser usados para degradar residuos sólidos domiciliarios. El método más común de disposición de residuos sólidos es un relleno sanitario municipal, en el cual los residuos sólidos, ricos en materia orgánica, son depositados en zanjas, compactados, y cubiertos cada día con una capa de suelo orgánico que provee una gran diversidad de organismos para la degradación de estas basuras. La actividad microbiana se inicia en forma aeróbica y más tarde se modifica a anaeróbica. Los microorganismos anaeróbicos o facultativos rompen las sustancias orgánicas complejas produciendo ácidos orgánicos simples que pueden ser oxidados por los hongos y bacterias aeróbicas. La actividad aeróbica queda limitada debido a la disponibilidad de oxígeno una vez que las basuras se encuentran cubiertas con agua o enterradas por nuevos residuos. Algunos productos de descomposición tales como el dióxido de carbono, ácidos orgánicos, etanol, y amoníaco pueden causar problemas ambientales.

Cuando la descomposición de residuos municipales sólidos se lleva a cabo en forma aeróbica controlada el proceso es acelerado y recibe el nombre de *composting*. El objetivo de este proceso es producir un producto estable y rico en nutrientes que pueda ser utilizado en el mejoramiento de suelos agrícolas. Otras aplicaciones en las que la actividad microbiológica tiene un rol importante es el tratamiento de aguas residuales en el suelo y el uso de los lodos de desecho en tierra agrícola.

### **3.2 Microbiología de Aguas y Aguas Servidas**

Toda el agua que se obtiene a partir de precipitación en la forma de lluvia o nieve remueve partículas de polvo desde el aire. Sin embargo, luego de los primeros minutos de precipitación todo el polvo es limpiado desde la atmósfera y el resto de la lluvia cae relativamente libre de impurezas. Luego de alcanzar el suelo, el agua que no es interceptada por la vegetación percola en el suelo, convirtiéndose en agua subterránea, o escurre hacia ríos o lagos.

Debido a la acción filtrante del suelo, los bajos niveles de nutrientes, la baja temperatura, y la ausencia de luz, las aguas subterráneas carecen, generalmente, de microorganismos. Sin embargo, en áreas rocosas, especialmente en formaciones limosas, la infiltración de agua superficial a través de grietas puede producir la contaminación microbiana de las aguas subterráneas.

El agua superficial recoge muchas sustancias durante su paso sobre suelos agrícolas y áreas industriales. Las tierras agrícolas contribuyen con nitratos, fosfatos, y otros nutrientes, más

microorganismos desde el suelo. Materiales orgánico tales como hojas, pasto, desechos animales y de aves, y desechos de plantas procesadoras de alimentos, con su consiguiente fauna microbiana, también tienen acceso a aguas superficiales. A menos que los contaminantes tóxicos sean excesivos, el resultado final es que todas las aguas superficiales tienen algún tipo de población microbiana (la excepción a esta regla es el lago Tahoe en el límite de California y Nevada, en los EEUU).

Muchas formas de vida microbiana pueden existir en el agua si los requerimientos físicos y la disponibilidad de nutrientes son los adecuados. Oxígeno disuelto es necesario para el crecimiento de bacterias aeróbicas y protozoos. Nitrógeno y fósforo, así como luz solar, son necesarios para el crecimiento de algas. El número y tipos de microorganismos presentes en el agua nos da una idea de la calidad del agua. En agua limpia o con muy pocos nutrientes, el número total de microorganismos es muy pequeño, pero una gran variedad de éstos pueden existir. A medida que el contenido de nutrientes aumenta, el número de microorganismos aumenta pero el número de especies disminuye. En un curso de agua anaeróbico muy contaminado existirá un reducido número de bacterias anaeróbicas o facultativas. El típico número de bacterias en varios tipos de agua se presenta en la Tabla 2.

**Tabla 2**  
**Valores Típicos de Bacterias en Agua**

Fuente	Bacteria por 100 mL	Bacterias Coliformes por 100 mL
Agua de la llave	10	0 - 1
Agua natural, limpia	$10^3$	0 - $10^2$
Agua contaminada	$10^6 - 10^5$	$10^3 - 10^5$
Aguas residuales	$10^8$	$10^5$

Además del comportamiento independiente de los diversos tipos de microorganismos, lo que ha sido descrito en los párrafos anteriores, existen otras dos modalidades de interacción: cooperativa y competitiva. Tales interacciones ocurren muy frecuentemente en el ambiente y deben ser consideradas en el diseño de sistemas de tratamiento biológicos. Tres ejemplos de esta interacción se presentan aquí:

- *Alga-bacteria*. Una muy cercana asociación entre algas (las cuales necesitan dióxido de carbono y producen oxígeno) y bacterias aeróbicas (las cuales requieren oxígeno y producen dióxido de carbono) se desarrolla en lagunas de oxidación, pantanos, lagos y otros ambientes similares.
- *Protozoo-bacteria*. En el tratamiento de aguas servidas municipales mediante lodos activados, las bacterias son el principal agente de conversión de residuos orgánicos a productos estables. Al mismo tiempo, protozoos consumen y limitan la población bacteriana en una relación depredador-presa, lo que permite mantener un balance dinámico en la población microbiana.
- *Bacteria-bacteria*. La digestión anaeróbica de materia orgánica demuestra la interdependencia de dos grupos de bacterias: las que forman o producen ácidos (como por ejemplo el ácido acético), y las que producen metano a partir de estos ácidos más complejos.



El agua usada para beber y bañarse puede servir como un vehículo de transmisión de una serie de microorganismos patógenos, los que pueden causar diversas enfermedades. La detección de patógenos en el agua es difícil, antieconómica e impráctica en análisis rutinarios. En vez de esto el agua es analizada usando un microorganismo indicador de contaminación fecal. Dado que los microorganismos no patógenos también se encuentran en el intestino, y por lo tanto también serán encontrados en los desechos, ellos pueden ser usados como un indicador de contaminación.

Las principales características de un indicador ideal son las siguientes: (1) su ausencia implica la ausencia de patógenos, (2) la densidad de organismos indicadores está relacionada con la probabilidad de la presencia de patógenos, y (3) en el ambiente un organismo indicador vivirá un poco más que un organismo patógeno. Por supuesto que un indicador ideal no existe. Sin embargo, la presencia de coliformes totales, coliformes fecales, estreptococos fecales y otros es asociada a la presencia de organismos patógenos y ha sido usada para estudiar la calidad microbiológica del agua durante muchos años.

De los muchos organismos indicadores, el grupo de coliformes totales es el más usado en la práctica. Este grupo incluye, de acuerdo a su definición, “todas aquellas bacterias aeróbicas o facultativas anaeróbicas, gram-negativas, con forma de bastón y que fermentan lactosa con formación de gas dentro de 48 horas a 35°C”. El grupo de los coliformes está compuesto por *Escherichia coli*, *Enterobacter aerogenes*, *Citrobacter freundii* y otras.

En agua potable, donde no debieran existir coliformes de ningún tipo, los coliformes totales se usan como una indicación de contaminación fecal. En el caso de cursos de agua muy contaminados, los coliformes fecales se determinan a partir de un ensayo a una temperatura más alta (44°C). La enumeración de indicadores bacterianos es llevada a cabo mediante dos métodos alternativos, la técnica de fermentación de tubos múltiples (Número más Probable, NMP), y el filtro de membrana (FM).

### **3.3 Microbiología Atmosférica y de Interiores**

Debido a su falta de humedad la atmósfera no es un ambiente donde los microorganismos puedan vivir y crecer. Sin embargo, ellos pueden sobrevivir en su estado vegetativo dependiendo de su resistencia a la falta de humedad, y en menor medida, a su resistencia a las radiaciones ultravioletas. Aquellas bacterias y hongos que forman esporas pueden existir por un tiempo largo en la atmósfera. Células en estado vegetativo sólo sobreviven por un par de día en el aire, mientras que las esporas pueden permanecer en buen estado por un largo tiempo.

El aire es importante en microbiología porque provee un mecanismo de transferencia de microorganismos que es más eficiente que el agua. Por ejemplo, los microorganismos son una porción importante del material particulado en la atmósfera. Por supuesto que mientras más liviano el microorganismo mayores son las posibilidades de permanecer en el aire.

Las partículas en la atmósfera provienen de causas naturales y humanas. Ejemplos de causas naturales son los incendios forestales, erupciones volcánicas, aerosoles desde el océano y polvo levantado por el viento desde campos abiertos. Fuentes humanas son las partículas creadas por la combustión de hidrocarburos, así como aquellas levantadas por el tráfico en las calles.

Las partículas de humo, polvo industrial, y polvo desde erupciones volcánicas constituye la mayor parte del material particulado en el aire, pero muy pocos microorganismos están ligados

a estas partículas. Existe una mayor probabilidad que polvo generado por la acción del viento sobre campos abiertos pueda movilizar esporas a través de la baja atmósfera.

El contenido de microorganismos del aire interior es influido por la existencia de ventilación, el grado de hacinamiento, y por los tipos de actividades realizadas al interior de los edificios. En estos lugares las actividades de los ocupantes genera microorganismos de transmisión aérea, los que se distribuyen en un espacio relativamente pequeño. La remoción de estos microorganismos dependerá fundamentalmente de la eficiencia de los sistemas de filtración y ventilación.

#### 4. CINETICA DE CRECIMIENTO DE CULTIVOS BACTERIANOS PUROS

Un cultivo puro puede crecer en reactores de laboratorio inoculando un medio líquido estéril con un pequeño número de bacterias de una especie individual. El patrón de crecimiento característico de estas bacterias puede ser esquematizado como se muestra en la Figura 2.

Después de un corto período de adaptación al nuevo ambiente (*fase lag*) las bacterias se comienzan a reproducir por fisión binaria, incrementando su número y su biomasa en forma exponencial. La existencia de alimento (sustrato) en cantidad suficiente proporciona las condiciones adecuadas para una tasa de crecimiento máxima. La tasa de metabolismo en la **fase de crecimiento exponencial** (*exponential growth phase*) está limitada únicamente por la capacidad de las bacterias de procesar el alimento. Si  $X$  representa la concentración de biomasa y  $m$  es una constante de proporcionalidad, la tasa de crecimiento de la biomasa se puede escribir como:

$$\left( \frac{dX}{dt} \right)_g = m \cdot X \quad (1)$$

donde

$\left( \frac{dX}{dt} \right)_g$	:	tasa de crecimiento de biomasa, $M/L^3T$
$m$	:	tasa de crecimiento específico de biomasa, $T^{-1}$
$X$	:	concentración de biomasa, $ML^{-3}$

La **fase de crecimiento en declinación** (*declining growth phase*) es causada por una reducción sostenida del alimento o sustrato. La tasa de reproducción decrece hasta que el número de bacterias existentes es estacionario, lo que ocurre cuando la tasa de reproducción iguala a la tasa de mortalidad. En experimentos de laboratorio se estudió el crecimiento de bacterias en cultivos artificiales. Como resultado de estas experiencias se encontró que el crecimiento de microorganismos es una función del número de microorganismos y de la disponibilidad de alimento o sustrato. La relación matemática que describe este proceso se debe a Monod y tiene la siguiente forma:

$$m = m_m \cdot \frac{S}{K_s + S} \quad (2)$$

donde

$m$	:	tasa de crecimiento específico de biomasa, $T^{-1}$
$m_m$	:	tasa máxima de crecimiento, $T^{-1}$
$S$	:	concentración del sustrato en solución, $M/L^3$
$K_s$	:	constante de saturación, $M/L^3$ , es la concentración de sustrato a la cual se observa la mitad de la tasa máxima de crecimiento (ver Figura 4).

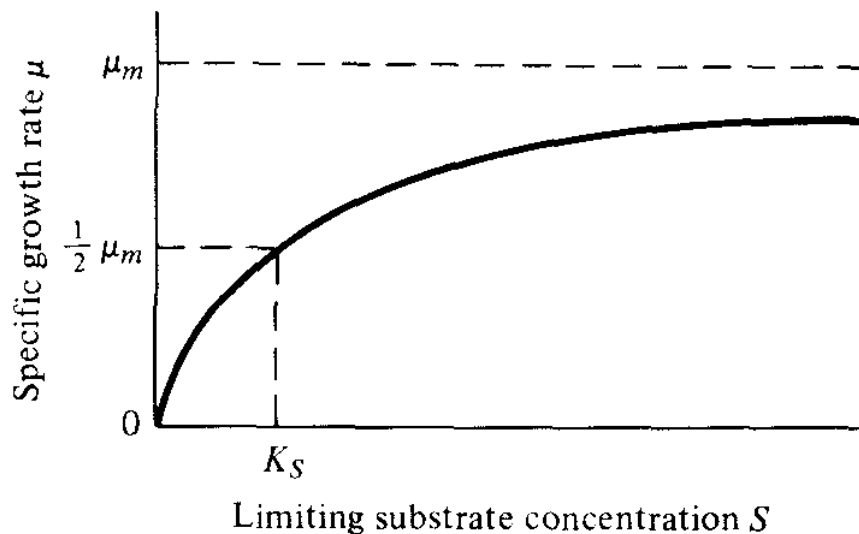
La tasa de crecimiento presentada en la ecuación (2) puede ser substituida en la ecuación (1) para obtener la tasa de crecimiento en una situación de sustrato o alimento limitada:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_g = m \cdot X = \frac{m_m \cdot X \cdot S}{K_s + S} \quad (3)$$

donde:

$(dX/dt)_g$	:	tasa de crecimiento de biomasa, $M/L^3T$
$m_m$	:	tasa máxima de crecimiento, $T^{-1}$
$X$	:	concentración de biomasa, $M/L^3$
$S$	:	concentración del sustrato en solución, $M/L^3$
$K_s$	:	constante de saturación, $M/L^3$

**Figura 4**  
**Tasa de Crecimiento Específico versus Concentración de Sustrato**



La capacidad de crecimiento,  $Y$ , se define como el incremento en la biomasa debido al proceso metabólico causado por la ingesta de alimento o sustrato. La capacidad de crecimiento en un cultivo cerrado es el aumento de biomasa durante las fases de crecimiento y exponencial ( $X_m - X_0$ ) relativo al sustrato utilizado ( $S_0 - S_m$ ):

$$Y = \frac{X_m - X_0}{S_0 - S_m} \quad (4)$$

Dado que el crecimiento está limitado por el consumo de todo el sustrato, se puede asumir que  $S_m = 0$ , con lo que se tiene:

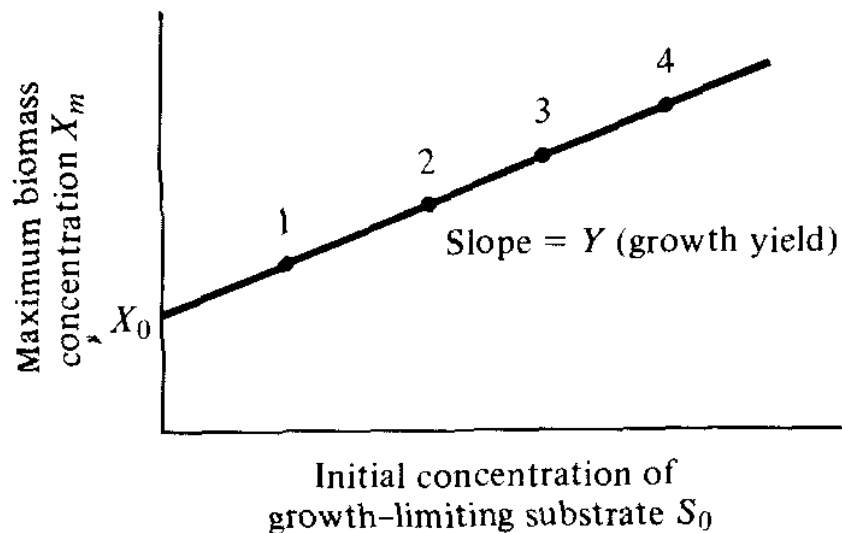
$$X_m - X_0 = Y \cdot S_0 \quad (5)$$

Si una serie de cultivos cerrados individuales crecen a partir de concentraciones de sustrato diferentes, es posible graficar los valores de  $X_m$  como función de la concentración de sustrato inicial,  $S_0$ , y con esto determinar el valor de  $Y$ . En la Figura 5 se muestra esta situación.

La ecuación (5) puede ser expresada en forma diferencial de la forma siguiente:

$$\left( \frac{dX}{dt} \right)_g = Y \cdot \left( \frac{dS}{dt} \right)_u \quad (6)$$

**Figura 5**  
**Capacidad de Crecimiento para una serie de Cuatro Experiencias**



Sustituyendo esta última expresión en la ecuación (3) podemos obtener la tasa de utilización o consumo de sustrato por parte de los microorganismos:

$$\left( \frac{dS}{dt} \right)_u = \frac{m_m \cdot X \cdot S}{Y \cdot (K_s + S)} \quad (7)$$

donde

$(dS/dt)_u$	:	tasa de utilización de sustrato, M/L <sup>3</sup> T
$m_m$	:	tasa máxima de crecimiento, T <sup>-1</sup>
$X$	:	concentración de biomasa, M/L <sup>3</sup>
$S$	:	concentración del sustrato en solución, M/L <sup>3</sup>
$K_s$	:	constante de saturación, M/L <sup>3</sup>
$Y$	:	capacidad de crecimiento, M/M

En la **fase de crecimiento endógena** (*endogenous growth phase*) las bacterias compiten por la pequeña cantidad de alimento disponible. La tasa de metabolismo decrece en forma acelerada, lo da origen a una reducción en el número de bacterias. En estas condiciones se producen más muertes que nacimientos. La tasa de decrecimiento de la biomasa durante esta fase es proporcional a la cantidad de células, es decir:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_d = -k_d \cdot X \quad (8)$$

donde

$(dX/dt)_d$	:	tasa de decaimiento de la biomasa, M/L <sup>3</sup> T
$k_d$	:	coeficiente de decaimiento bacteriano, T <sup>-1</sup>
$X$	:	concentración de biomasa, M/L <sup>3</sup>

Para determinar la tasa neta de crecimiento durante la fase endógena las ecuaciones anteriores se pueden combinar para escribir:

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_u = \frac{m_m \cdot X \cdot S}{K_s + S} - k_d \cdot X = \left(m_m \cdot \frac{S}{K_s + S} - k_d\right) \cdot X \quad (9)$$

lo que representa la tasa de variación de la población bacteriana en la fase endógena.

## EJEMPLO 1

### Sistema de Tratamiento Biológico

Un sistema de tratamiento biológico (Figura E1.1) se utiliza para eliminar materia orgánica presente en aguas residuales mediante la incorporación de microorganismos aeróbicos. La materia orgánica afluente al reactor de tratamiento biológico es igual a  $S_0$  (masa de materia orgánica por unidad de volumen), mientras que la concentración de microorganismos incorporados al afluente es  $X_0$  (masa de microorganismos por unidad de volumen). El agua residual afluente al reactor no contiene oxígeno. El caudal afluente a la unidad es  $Q$  y el volumen de agua en el reactor es  $V$ . En forma adicional se dispone de un sistema de aireación compuesto de mangueras conectadas a generadores de oxígeno, que permiten inyectar una cantidad de oxígeno al reactor,  $G_O$ .

La materia orgánica presente en el reactor biológico se remueve debido a la acción de microorganismos, siguiendo la siguiente tasa de consumo o decaimiento:

$$r_S = \left. \frac{dS}{dt} \right|_{\text{CONSUMO}} = -k_S \cdot S \cdot X \cdot \frac{O}{KM_O + O}$$

donde  $X$ ,  $S$  y  $O$  son la concentración de microorganismos, materia orgánica y oxígeno al interior de la unidad biológica, respectivamente, y  $k_S$  y  $KM_O$  son constantes. Los microorganismos afluentes al reactor biológico se reproducen siguiendo una tasa de nacimientos descrita por la siguiente expresión:

$$r_N = \left. \frac{dX}{dt} \right|_{\text{NACIMIENTO}} = k_N \cdot X \cdot \frac{S}{KM_S + S} \cdot \frac{O}{KM_O + O}$$

y se mueren o decaen siguiendo una ley de primer orden:

$$r_M = \left. \frac{dX}{dt} \right|_{\text{MORTALIDAD}} = -k_M \cdot X$$

donde  $k_N$ ,  $KM_S$ , y  $k_M$  son constantes. Finalmente, el oxígeno incorporado al reactor es consumido a una tasa de primer orden:

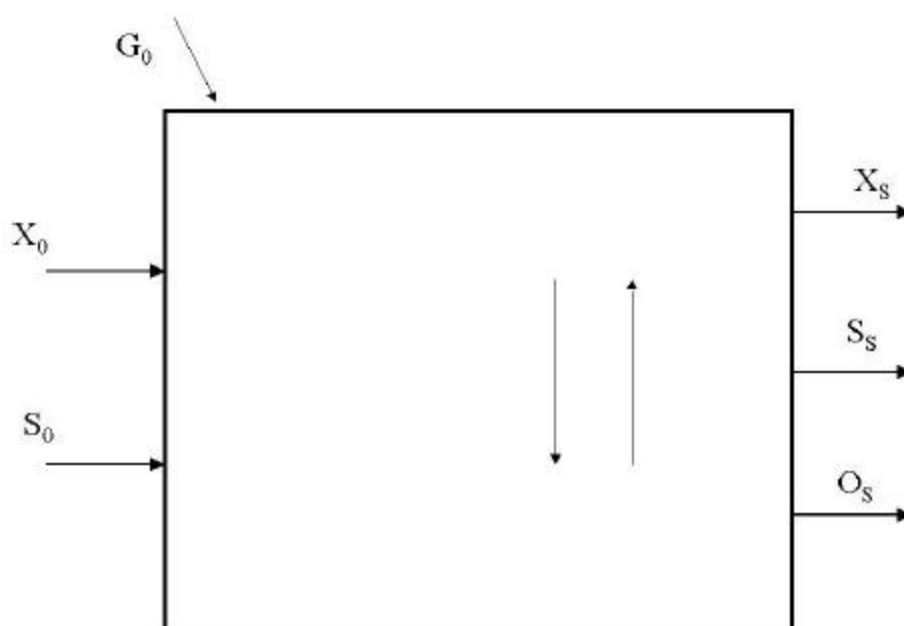
$$r_O = \left. \frac{dO}{dt} \right|_{\text{CONSUMO}} = -k_O \cdot O$$

- A partir de la información anterior escriba la o las ecuaciones que permiten describir la solución en régimen permanente o estacionaria para el sistema descrito anteriormente. Suponga que el flujo de agua residual,  $Q$ , y que el volumen de agua en la unidad,  $V$ , son constantes a través de tiempo. Considere un reactor de mezcla completa e instantánea.
- Si el reactor biológico se diseña para operar con un tiempo de retención hidráulico de 5 horas y la remoción de materia orgánica alcanza al 90%, determine la concentración de equilibrio de microorganismos, materia orgánica y oxígeno. Determine además la concentración de entrada de microorganismos para que la remoción de materia orgánica alcance el 90% indicado.

**Tabla E1.1**  
**Resumen Información Básica**

Parámetro	Valor	Unidad
$k_S$	0.5	L/mg-día
$k_M$	0.8	1/día
$k_N$	0.2	1/día
$KM_S$	100	mg/L
$KM_O$	2	mg/L
$k_O$	1.0	1/día
$G_O$	86.4	Kg/día
$S_0$	100	mg/L
$Q$	100	l/s

**Figura E1.1**  
**Sistema de Tratamiento Biológico**



## **EJEMPLO 2**

### **Sistema de Tratamiento Biológico con Recirculación**

El tratamiento de aguas residuales se realiza mediante un sistema de tratamiento biológico en el cual bacterias se alimentan de materia orgánica o sustrato en tanques especialmente diseñados para este propósito. Un sistema de tratamiento biológico típico se esquematiza en la Figura E2.1, en el cual se indica un estanque o reactor biológico en el cual se lleva a cabo el consumo de sustrato por parte de microorganismos, seguido por un sistema de sedimentación en el cual microorganismos que son formados en el tanque biológico sedimentan y son eliminados del agua residual. En el sedimentador no se produce ningún cambio en la concentración de sustrato.

Si  $X$  es la concentración de microorganismos en el agua residual,  $S$  es la concentración de sustrato o alimento, y  $Q$  es el caudal de entrada al sistema de tratamiento **se pide escribir ecuaciones que permitan describir la concentración de microorganismos y sustrato en los dos puntos indicados en la Figura E2.1, así como los caudales pasantes por cada punto (A y B)**. Asuma que el tanque biológico puede ser asimilado a un reactor de mezcla completa. Las concentraciones de entrada son iguales a  $X_0$  y  $S_0$  para el caso de microorganismos y sustrato, respectivamente. Por la salida inferior del sedimentador se extrae un caudal igual a  $Q_R$  con una concentración de microorganismos igual a  $X_R$ .

La tasa de decaimiento o consumo de materia orgánica está dada por la siguiente expresión:

$$r_s = -k_s \cdot X \cdot S$$

La tasa de crecimiento de bacterias se describe por un modelo de primer orden:

$$r_{cX} = k_X \cdot X$$

La muerte de bacterias se describe por un modelo de orden cero del tipo:

$$r_{MX} = -b$$

¿De qué manera se modifican estas expresiones si se considera la recirculación de parte del material removido desde la parte inferior del sedimentador? (Ver Figura E2.2).

Justifique las distintas hipótesis y variables que utilice para abordar este problema.

**Figura E2.1**  
**Esquema de Tratamiento Original**

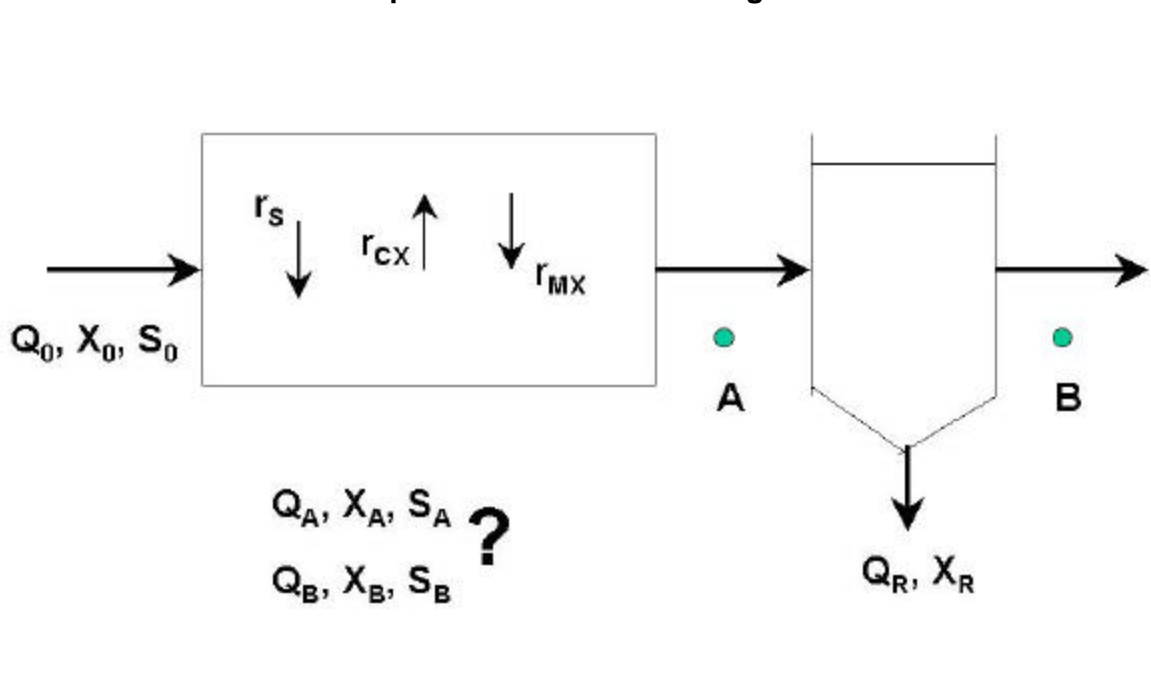




Figura E2.2  
Esquema de Tratamiento Modificado

