

## El proceso de lodos activados y el diagrama de predominio relativo

Ing. Jairo Alberto Romero Rojas

Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia; *Master of Engineering* en Ingeniería Ambiental, *Rensselaer Polytechnic Institute*, Troy, Nueva York; diplomado en Aguas Subterráneas, Universidad Hebrea de Jerusalén; Profesor asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional; director del Centro de Estudios Ambientales y profesor, Escuela Colombiana de Ingeniería. Autor de los libros: *Acuitratamiento por lagunas de estabilización*; *Acuipurificación y Acuiquímica*, editados por la Escuela Colombiana de Ingeniería.

### INTRODUCCIÓN

Una forma de ayudar a entender los diferentes aspectos de importancia en el proceso de lodos activados y la relación existente entre ellos es, posiblemente, el «diagrama de predominio relativo». La figura 1 muestra un modelo de este diagrama para un sistema de lodos activados.

### EL DIAGRAMA DE PREDOMINIO RELATIVO

Suponiendo condiciones ideales: temperatura de 20 °C, pH entre 6.5 y 8.5, OD mayor de 2 mg/L, nutrientes apropiados, ausencia de sustancias tóxicas y un reactor típico de cocheda, la figura 1 representa las etapas en las cuales los organismos alcanzan su número máximo. En este diagrama el eje horizontal representa el tiempo de aireación o la edad de lodos y el eje vertical representa el número relativo de organismos. Debe tenerse en cuenta

que la escala no es real, puesto que el número de organismos difiere grandemente y así, por ejemplo, el número de bacterias será mucho más grande que el número de rotíferos, lo cual hace muy difícil representar verdaderamente los valores reales.

La curva de rayas discontinuas de la figura 1 representa el alimento remanente o DBO. A medida que el proceso avanza en el tiempo, el alimento disminuye hasta un valor muy bajo.

La curva de puntos representa la masa de organismos existentes en cualquier momento. Inicialmente el número de organismos es muy bajo; se incrementa rápidamente con el tiempo hasta alcanzar el valor máximo sustentable por el alimento remanente, y disminuye al entrar la biomasa en respiración endógena. Para cualquier tiempo se tiene una determinada concentración de alimento o DBO y una masa fija de microorganismos; si se divide la cantidad de alimento remanente por la masa de microorganismos se obtiene la relación A/M para dicho punto y la distribución promedio de

los microorganismos para dicha relación A/M.

Como puede verse en la figura 1, en un proceso de cocheda el alimento disminuye con el tiempo, los microorganismos aumentan hasta un valor máximo y la relación A/M decrece.

La curva de rayas y puntos representa la tasa de consumo de oxígeno del proceso. Como al iniciar el tratamiento existen muy pocos microorganismos, la tasa de consumo de oxígeno es baja; luego aumenta a medida que el número de microorganismos crece. La tasa de consumo de oxígeno depende no sólo de la masa microbial, sino también de la actividad de las células. La tasa de consumo de oxígeno es máxima un poco antes de obtenerse el número máximo de organismos y luego disminuye.

### Punto A

El punto A de la figura 1 representa el comienzo del proceso de cocheda; el agua residual acaba de ser introducida en el tanque y la aireación comienza a operar. En aguas residuales domésticas existirán los microorganismos necesarios para el tratamiento y no se observará en A predominio significativo de ningún organismo. Durante el desarrollo del proceso estarán presentes muchos tipos de organismos; en condiciones ideales ninguno alcanzará población tan numerosa como para tener un efecto significativo sobre el proce-

Fuente: E. Landon Niedringhaus, "Keeping Track of the Bugs", WPCF, Highlights, vol. 19 No. 10, octubre 1982.

so; sin embargo, cuando no se mantienen condiciones de operación apropiadas, se pueden desarrollar organismos indeseables en número apreciable que afecten el proceso.

## Punto B

Este punto representa el momento en que los organismos sarcodina alcanzan su número máximo. Éstos son organis-

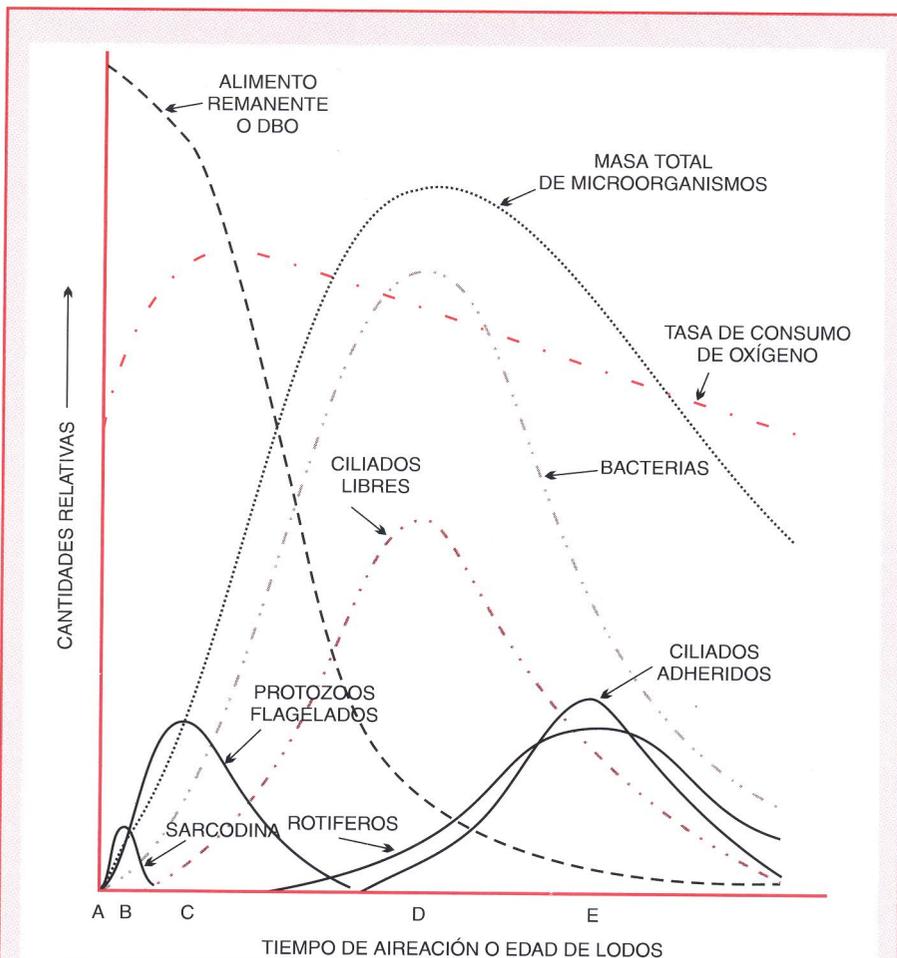
mos muy primitivos, de movimiento muy lento y bastante ineficientes en la competencia por alimento. La ameba es el organismo sarcodina más común; existen en número grande sólo cuando el suministro alimenticio es alto, en procesos de lodos activados cuando se arranca el reactor o cuando se reinicia la operación después de un período en el cual se ha perdido la biomasa.

## Punto C

Es el punto en el cual los protozoos flagelados alcanzan su número máximo. Los protozoos flagelados, como se observa en la figura 2, tienen una estructura más compleja que los sarcodina, son mucho más activos y requieren mayor cantidad de alimento. Su movilidad les permite obtener alimento cuando el suministro es muy bajo para soportar una alta población de sarcodinas. Cuando los protozoos flagelados alcanzan su número máximo la tasa de utilización de alimento es muy alta. Este punto constituye el primer lugar de interés en el estudio de los lodos activados, pues es característico de un lodo joven y corresponde a la zona en la cual opera el proceso de lodos activados de alta tasa. Si se examinara el reactor de cocheda en este punto, se observaría, probablemente, una cantidad considerable de espuma blanca o ligeramente carmelitosa; el lodo sería carmelita claro y si se colocara en una probeta se notaría que es de sedimentabilidad pobre con un sobrenadante turbio; la causa de estos fenómenos es la naturaleza activa de los protozoos flagelados.

Dicho lodo joven se puede comparar con un cuarto de niños que se mantienen activos, en movimiento continuo y muy difíciles de calmar (sedimentar). El nivel alto de actividad de los protozoos flagelados causa una tasa alta de consumo de oxígeno, puesto que los microorganismos, como los seres humanos, requieren más oxígeno cuando son muy activos. La DBO que se remueve del agua residual se utiliza con un doble propósito por los microorganismos: crear nuevas células y suministrar energía para su actividad (anabolismo y catabolismo). Los protozoos flagelados se multiplican rápidamente y son muy activos; por tanto, la remoción de DBO es muy rápida en este punto.

Los protozoos flagelados no forman buen *floc*, permanecen en el sobrenadante y producen la turbiedad del mismo. El valor del IVL, índice



A. El proceso comienza cuando se introducen aguas residuales frescas al tanque y se inicia la aireación. Los microorganismos existen pero ninguno predomina.

B. Los sarcodina, organismos primitivos, alcanzan su pico. Este organismo existe en gran número solamente cuando el alimento es alto.

C. Los protozoos flagelados alcanzan su pico. Estos organismos son mucho más activos que los sarcodina y consumen el alimento a una tasa alta.

D. Los ciliados libres y las bacterias alcanzan su pico. Ambos subsisten con suministro alimenticio menor que el requerido por los protozoos flagelados. Esta es la zona de operación del proceso convencional de lodos activados.

E. Predominan los ciliados adheridos y los rotíferos. No existe suficiente alimento para sustentar la masa microbial. Las células mueren. Los rotíferos y ciliados adheridos pueden consumir las bacterias.

Figura 1. Diagrama de predominio relativo.

de volumen de lodos, para este tipo de lodo, puede ser mayor que el valor normal debido a sus características pobres de sedimentabilidad. El examen microscópico del lodo revelará un gran número de protozoos flagelados y una población apreciable de bacterias con posibilidad de unos pocos sarcodinas. El efluente del proceso sería de DBO alta y tendría sólidos suspendidos excesivos, debido a la presencia de los protozoos flagelados activos.

## Punto D

En el punto D del diagrama los ciliados libres y las bacterias alcanzan su número máximo. Dicha zona corresponde a la operación de un proceso de lodos activados convencional. Aunque las bacterias (figura 2) poseen una estructura celular simple, son muy eficientes en la competencia por el alimento a medida que éste disminuye. Las bacterias remueven

alimento del agua residual por absorción y adsorción; en la primera, la DBO disuelta es absorbida directamente a través de la pared celular, en la adsorción las bacterias, mediante una capa o película gelatinosa pegajosa, atrapan partículas finas suspendidas. A esta propiedad adsorptiva del lodo biológico se debe el nombre de lodo activado. Las bacterias no pueden utilizar directamente las partículas finas suspendidas, pero mediante la secreción de enzimas descomponen o disuelven las partículas en tal forma que el material puede ser absorbi-

do dentro de la célula. Las bacterias son menos activas que los protozoos flagelados, requieren menos alimento y tienen una tasa de utilización de oxígeno inferior.

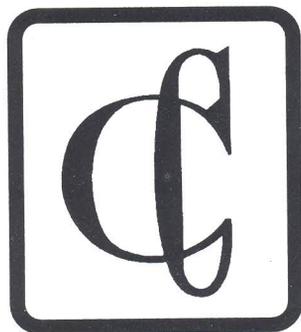
Los ciliados libres tienen una estructura más compleja que los protozoos flagelados y pueden subsistir con un suministro alimenticio inferior al requerido por éstos. Los ciliados libres utilizan los cilios del exterior de la célula para mo-

verse, tienen menos movilidad que los protozoos flagelados y consumen menos oxígeno. Además, aprovechan el suministro alimenticio reducido más eficientemente.

---

*El nivel alto de actividad de los protozoos flagelados causa una tasa alta de consumo de oxígeno, puesto que los microorganismos, como los seres humanos, requieren más oxígeno cuando son muy activos.*

---



*Educamos para  
construir futuro  
con sentido humano*

## ConConcreto S.A.

### Medellín

Cra 42 No. 75-125 (Itagüí) Autopista Sur  
A.A. 177 (Medellín) Conmutador: 281 29 77  
Fax: (94) 372 08 57

### Santafé de Bogotá

Cra 6a. No. 115 - 65 Of.: 308  
A.A. 21702 Tel.: 620 21 66  
Fax: (91) 214 63 33

### Cali

Cra 100 No. 16 -20  
Edificio Av.100 piso 7  
Tel.: 923 331222

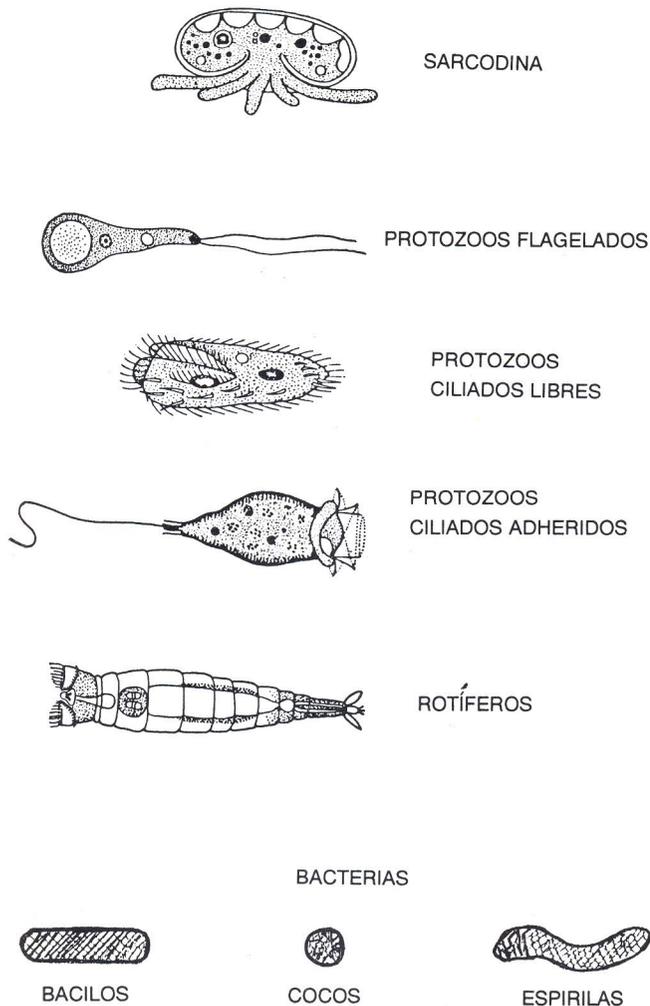


Figura 2. Microorganismos comunes del proceso de lodos activados.

La observación del reactor de cocheda en este punto revelaría una cantidad moderada de espuma de color carmelita. El lodo tendría una *floculación* considerable, buenas condiciones de sedimentabilidad y un sobrenadante claro. La poca actividad de los microorganismos incide en una tasa de sedimentación rápida y la capa gelatinosa pegajosa de las bacterias permite que éstas se junten y adhieran formando un *floc* más grande que sedimenta rápidamente. El cálculo del IVL revelará un número bajo, indicativo de buena sedimentabilidad. De la misma manera, la medición de la tasa de consumo de oxígeno señalaría que ésta empieza a declinar, debido a la disminución de la tasa de conversión de alimento en material celular y a la menor actividad de los ciliados libres y de las bacterias en comparación con la de los protozoos flagelados. El examen microscópico de los lodos permitiría observar un lodo bien floculado con presencia de un gran número de ciliados libres y bacterias; también se pueden observar unos pocos rotíferos, ciliados adheridos y protozoos flagelados. El efluente del proceso sería claro con DBO baja.

## Punto E

En el punto E los ciliados adheridos y los rotíferos alcanzan su número máximo. Este momento corresponde a la zona de operación de un proceso de aireación prolongada en la cual los organismos se encuentran en la etapa de respiración endógena. En esta fase el suministro alimenticio es insuficiente para soportar la masa microbial existente; los organismos utilizan sus reservas alimenticias para subsistir, reducen su actividad y la conversión de alimento en células. Algunas células mueren por inanición; después de su muerte se rompen y se separan en la porción celular sólida que no puede ser usada como alimento y en una porción líquida que es utilizada por los demás microorganismos como alimento en un proceso conocido como lisis celular. Los rotíferos y los ciliados adheridos son capaces de consumir bacterias enteras para subsistir.

La observación del reactor en este punto revelaría la existencia de una espuma carmelita oscura con apariencia grasosa, un lodo de sedimentación rápida, floculación pobre y apariencia granular. La sedimentación rápida se debe a la presencia de rotíferos y ciliados adheridos de mayor tamaño y menor actividad. La presencia de una población bacteriana reducida causa la pobre floculación y la apariencia granular. También es factible observar algunas partículas pequeñas flotantes formadas por masas aglutinadas de material celular inerte. El cálculo del IVL



# Ferretería

## PEGASO'S 170 LTDA

CEMENTO  
 GRAVILLA  
 ARENA  
 BLOQUE  
 HIERRO

### FERRETERIA EN GENERAL

Autopista Norte 167 A - 55  
 Tels: 6705041- 6741162  
 Fax: 6717232

revelaría un valor muy bajo, indicador de un lodo denso; la tasa de consumo de oxígeno sería aún más baja debido a la poca conversión de alimento en células y a la baja actividad de los rotíferos y ciliados.

El examen microscópico del lodo permitiría observar gran cantidad de ciliados adheridos y rotíferos, así como de ciliados libres y bacterias. El sobrenadante del proceso sería de DBO baja pero con un nivel alto de sólidos suspendidos, resultante de las masas microbiales aglutinadas de células muertas y de la poca habilidad de la pequeña población bacteriana existente para atrapar los sólidos suspendidos finos.

## EL MUNDO REAL

Las consideraciones anteriores son válidas para un reactor de cocheda en condiciones ideales. En la realidad ningún reactor de cocheda opera en condiciones ideales y los procesos de lodos activados son de flujo continuo. Si se sigue suponiendo la existencia de condiciones ideales de pH, temperatura, oxígeno, nutrientes, etc., se pueden hacer otras observaciones de carácter

general. Se presume, además, la existencia de sistemas de flujo en pistón, en los cuales el agua residual es tratada en tanques largos y angostos, donde las partículas retienen su identidad y permanecen en el tanque un período igual al tiempo teórico de retención. Bajo estos supuestos

se puede decir que el proceso convencional de lodos activados opera en la zona correspondiente al punto D de la figura 1. En dicha zona las bacterias y los ciliados libres alcanzan su número máximo; el flujo sale por el extremo final del tanque y entra al tanque de sedimentación. En el tanque de sedimentación los organismos se depositan en el fondo y el sobrenadante clarificado es descargado. La mayoría de los microorganismos o biomasa es recirculada al reactor y mezclada con el agua residual afluyente. La concentración de DBO del agua residual afluyente representa el alimento y la masa de microorganismos, SSVML,

representa los microorganismos.

***En esta fase (respiración endógena) el suministro alimenticio es insuficiente para soportar la masa microbiana existente; los organismos utilizan sus reservas alimenticias para subsistir, reducen su actividad y la conversión de alimento en células.***

## LA FÁBRICA DE DULCES

En ese punto puede surgir una pregunta: ¿por qué no se construye un tanque muy corto de flujo en pistón, se sedimentan los microorganismos y se recirculan inmediatamente a la parte inicial del reactor?

Los microorganismos requieren tiempo para consumir o asimilar el alimento que reciben cuando se mezclan con el agua residual. Dicha situación puede compararse con la de un niño que pasa a lo largo de una fábrica de dulces. El niño recogerá tantos dulces como pueda, se comerá algunos y guardará otros en sus bolsillos para comérselos más tarde. Si el niño es inmediatamente recirculado por la fábrica de dulces, no será capaz de recoger tantos dulces como lo hizo en la ocasión anterior, porque ya no está tan apetitoso y porque aún tiene dulces en sus bolsillos. Sin embargo, si se le da tiempo entre una y otra pasada por la fábrica, de tal manera que los dulces de sus bolsillos sean consumidos y su indigestión haya sido superada, el niño volverá a ser capaz de consumir tantos dulces como consumió en la primera pasada. En forma semejante, si los microorganismos son recirculados al reactor demasiado pronto, no son capaces de consumir tanto alimento; por ello, se les debe dar tiempo suficiente para asimilar el alimento y volver en capacidad de consumir tanto como la ocasión anterior.

## EL TANQUE DE SEDIMENTACIÓN

El tanque de sedimentación es una área de almacenamiento temporal, ya que sólo puede retener una cantidad limita-



**CEDIEL**  
**INGENIEROS**  
**ASOCIADOS LTDA**

**INTERVENTORIA**  
**GERENCIA DE OBRA**  
**ASESORIAS**

**Transv. 18B No. 96 - 50 Of. 305**  
**Tel: 236 15 09 - Telefax: 256 16 76**  
**Santafé de Bogotá, Colombia**

da de microorganismos. A medida que el suministro alimenticio aumenta o disminuye, durante el día, se puede aumentar o disminuir la recirculación de microorganismos mediante el incremento o la disminución de la tasa de circulación. El tanque de sedimentación puede satisfacer así las variaciones a corto plazo de la relación A/M. Sin embargo, a largo plazo, se requiere desechar el exceso de lodo o biomasa. Esto se hará intencionalmente mediante la disposición de lodo de exceso o, en ocasiones, sin desearlo, a través de los vertederos efluentes del sedimentador.

## PROCESOS DE LODOS ACTIVADOS

El proceso convencional de lodos activados (figura 3) como se mencionó antes, opera en la zona correspondiente al punto D de la figura 1, produce un lodo de buena sedimentabilidad y da como resultado un efluente de DBO baja y pocos sólidos suspendidos. Dicho esquema de operación es relativamente estable y tiene un intervalo amplio de relaciones A/M. En muchos casos el intervalo de operación permite mantener una tasa de recirculación constante y logra buenos resultados de eficiencia para cambios normales de alimento. La eficiencia alta que se obtiene ha hecho del proceso convencional de lodos activados uno de los más populares. El proceso de lodos activados de tasa alta opera con una concentración baja de microorganismos o sea con una relación alta A/M.

El proceso opera en la zona donde los protozoos flagelados alcanzan su número máximo (punto C de la figura 1).

El proceso de aireación prolongada opera con una masa de microorganismos alta, es decir, con una relación A/M baja. Le corresponde la zona E de la figura 1, área en donde los ciliados adheridos y los rotíferos alcanzan su número máximo. El efluente de este proceso es, generalmente, de DBO muy baja, pero

puede tener un contenido de sólidos suspendidos alto como resultado de la materia celular muerta existente.

El proceso de aireación escalonada es semejante al tanque de flujo en pistón, pero el agua residual es dosificada escalonadamente, es decir, en varios puntos a lo largo del tanque. El proceso procede a lo largo del diagrama de predominio relativo como en un tanque de flujo en pistón, reduciendo el suministro alimenticio a medida que avanza el período de aireación. Cuando se añade más alimento el proceso se devuelve en el diagrama a una edad inferior de lodos o relación mayor A/M; luego avanza nuevamente a medida que se utiliza el alimento, y continúa sucesivamente su movimiento hacia atrás y hacia adelante en cada adición de flujo.

En el proceso de mezcla completa el contenido del reactor, agua residual y microorganismos, es mezclado uniformemente. Teóricamente la tasa de consumo de oxígeno y la población de microorganismos son uniformes en cualquier punto del reactor. El proceso opera en un solo punto del diagrama de predominio relativo y tiene la ventaja de esparcir uniformemente cualquier sustancia tóxica en todo el tanque dando como resultado un menor efecto deletéreo sobre los microorganismos.

El proceso de estabilización y contacto es similar al sistema de flujo en pistón; el agua residual es mezclada con el lodo de retorno previamente reaireado en un segundo tanque de aireación. El propósito de la reaireación del lodo es el de proveer un tiempo de aireación mayor

para los microorganismos y producir un lodo más activo con mayores capacidades adsorptivas.

## EFECTO DE LA TEMPERATURA

Si la temperatura es inferior a la ideal supuesta de 20 °C, las reacciones se retardarán, el diagrama de predominio relativo se extenderá y cada pico de la curva ocurrirá a una edad de lodos mayor. Para obtener la misma remoción de DBO, la edad de lodos deberá ser mayor o la relación A/M menor. La reducción general en la tasa de reacción de los microorganismos reduce también la tasa de consumo de oxígeno. El agua más fría en el tanque de sedimentación es más densa y se tendrá un lodo de menor sedimentabilidad. El aumento de la edad de lodos para obtener un lodo de sedimentación más rápida puede compen-

sar la pérdida en la tasa de sedimentación de los lodos. Por otra parte, una temperatura mayor que la temperatura ideal tiende a incrementar la tasa de reacción y aumentar la tasa de consumo de oxígeno, con el posible efecto de reducir el contenido de oxígeno disuelto, especialmente al comienzo del sistema de tratamiento. A altas temperaturas, la curva del diagrama de predominio relativo se acortará y los microorganismos alcanzarán los picos o números máximos a una edad de lodos más corta.

## EFECTO DEL pH

Si el pH disminuye a valores inferiores a los óptimos de 6.5 a 8.5, las bacterias filamentosas serán capaces de competir con los organismos más deseables y su número aumentaría

*Si los microorganismos son recirculados al reactor demasiado pronto, no son capaces de consumir tanto alimento; por ello, se les debe dar tiempo suficiente para asimilar el alimento y volver en capacidad de consumir tanto como la ocasión anterior.*



**Cada día, más INDUSTRIALES DE LA CONSTRUCCION, LA MINERIA Y EL CEMENTO optan por**

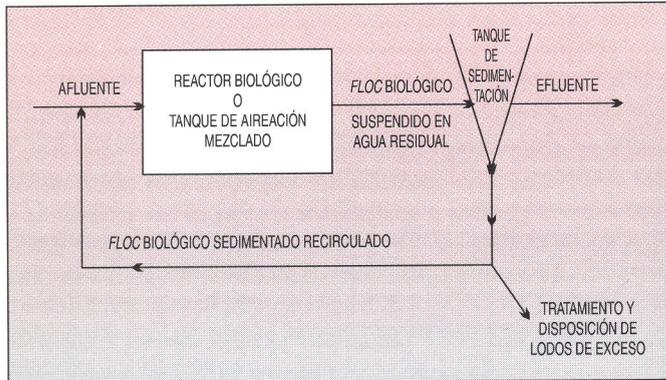


Figura 3. El proceso de lodos activados.

considerablemente. A un pH entre 5 y 6.5, los hongos compiten con las bacterias y si crecen significativamente producirán hinchamiento del lodo. A pH 4.0 a 5.0 los hongos predominan sobre las bacterias y éstas tenderán a ser del tipo filamentosos causando hinchamiento severo del lodo. A pH mayor de 8.5 a 9.0 ocurrirá un atraso severo del proceso y el efecto sobre los microorganismos es similar al que ocurre en condiciones de baja temperatura.

### EFEECTO DEL OXÍGENO DISUELTTO

El intervalo óptimo de OD varía entre 0.5 y 2 mg/L; cuando el oxígeno disminuye a menos de 0.5 mg/L, los hongos pueden competir con las bacterias y se produce el hinchamiento del lodo. Las bacterias filamentosas también compiten con las deseables a niveles bajos de OD. Niveles de OD mayores de 2 mg/L causan despilfarro de energía y la turbulencia mayor producida puede romper el *floc*, retardando su sedimentación.

### EFECTOS DE LOS NUTRIENTES

Si los nutrientes requeridos no existen, en la cantidad y relación apropiadas, los hongos y las bacterias filamentosas tenderán a predominar causando hinchamiento del lodo. Si existen tóxicos, el diagrama de predominio relativo se extenderá con efectos mayores sobre los ciliados adheridos y los rotíferos; eventualmente, si la concentración de sustancias tóxicas es muy alta, los organismos serán aniquilados.

### OBSERVACIONES ADICIONALES

El enfoque del presente artículo contribuye indudablemente a la comprensión del funcionamiento del proceso de lodos activados; sin embargo, es pertinente señalar que la mayoría de los autores consideran que las características de sedimentabilidad del lodo activado son función, principalmente, de su estructura bacterial, en especial de la manera en que las bacterias filamentosas y las formadoras de *floc* biológico constituyan la estructura del lodo; sin dar tanta importancia en dicho aspecto a los protozoarios ni a su relación con la tasa de consumo de oxígeno.

## MOTORES S. A.

El Portafolio de maquinaria, soporte y servicio, cada día más completo.

Esta es una muestra parcial. Consúltenos.

La Cargadora-Retroexcavadora más avanzada del mercado



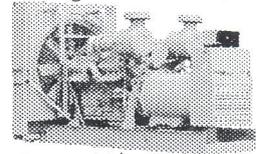
**MF**  
Industrial

La Retroexcavadora con mejores especificaciones del mercado



**KOBELCO**

Una nueva generación de potencia.

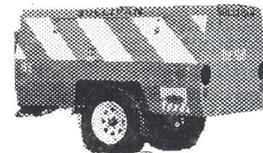


Plantas Eléctricas

**SPECTRUM**

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA

Los Compresores portátiles de mayor eficiencia-bajo costo



**Sullivan**

La Minicargadora al servicio del espacio reducido.



**TT** THOMAS



**MOTORES S. A.**  
RESERVAMOS CALIDAD  
MÁS DE MEDIO SIGLO  
DE EXPERIENCIA

SERVICIO,  
MANTENIMIENTO  
Y REPUESTOS  
ORIGINALES:

FUERA DE BOGOTÁ  
9800-15454

•BOGOTÁ-Conn.:344 03 00 fax:269 43 41  
•MEDELLIN-Conn.:285 66 33 Fax: 285 73 11  
•CALI-Conn.:46 44 60 Fax:46 44 64  
•BARRANQUILLA-Conn.:41 5061 - 31 53 63  
Fax:51 38 78