

Naturalmente, en los desagues, el proceso encierra mayor complejidad. Además de los factores expuestos, pueden intervenir otros, así, por ejemplo, se sabe que, en ese medio, pueden existir diversos tipos de coloides orgánicos e inorgánicos, de diversos orígenes, que están formados por las bacterias. Tales coloides, de acuerdo con su carga electrocinética y su naturaleza química, pueden intervenir de una o de otra manera en el proceso, ya sea sirviendo como alimento para las bacterias, proporcionándoles energía, y, por consiguiente, actuando contra la coagulación, ya sea produciendo coagulación, adsorción de partículas y de las propias bacterias. Por otro lado, la presencia de electrolitos en el desague se considera de poca importancia, dada la pequeña capacidad de reacción presentada por la cápsula de polisacáridos de la bacteria. También está demostrada la existencia de coagulación causada por protozoarios (22) (23) (24). Esa coagulación originada de manera un poco diferente a la discutida y diferente también de la que se suponía anteriormente, puede ser observada en las siguientes condiciones: cuando los protozoarios, especialmente ciliados, que habitan en gran número en los desagues, entran en fase de declinación de crecimiento, comienzan a formar cuerpos esféricos de tamaño relativamente grande, en el interior de sus células. Una vez muertos los organismos, estas esferas quedan libres, uniéndose en masas de capacidad adsorbente, dando origen a flocs.

6.3.2.2. Nutrición de los Microorganismos.

La realización de la oxidación del desague depende de la presencia de microorganismos en gran cantidad, los cuales deben reproducirse, por lo tanto, auto-construirse, o mejor dicho, sintetizar nuevos organismos, a costa del material retirado del medio, a través del proceso de nutrición. Los organismos responsables de esas actividades pueden ser autótrofos o heterótrofos, comprendiendo estas clasificaciones, varios grados de necesidades con relación a los nutrientes minerales y orgánicos. Considerándose en conjunto, puede decirse que hay exigencia, por parte de los organismos, ya sea de sustancias minerales o de compuestos orgánicos, para el desempeño de sus funciones.

El alimento orgánico está constituido principalmente por las partículas de sustancias descomponibles, oxidables, que representan el material contaminador del desague. Hay exigencias diferentes, de los diversos tipos de microorganismo heterótrofos, con relación a la naturaleza de esos compuestos. La bacteria *Sphaerotilus* por ejemplo, que forma extensos filamentos en ciertos tipos de desagues y aguas contaminadas, exige, por su metabolismo, grandes cantidades de carbohidratos, reproduciéndose más intensamente en medios que contengan mayor porcentaje de esas sustancias (25) (26) (27) (28). Se cree, igualmente, que tengan cierta importancia en la transformación de esos compuestos en el tratamiento de desagues (20). Ciertos hongos, frecuentes en instalaciones de tratamiento aerobio, utilizan, para su nutrición, sustancias resultantes de

la descomposición de bacterias (30). También ciertos tipos de animales, como caracoles, gusanos y larvas de insectos, que se nutren de materia orgánica de desagues, pueden, a veces, destruir la capa de zooglea que se forma en los cascajos de los filtros biológicos, perjudicando en parte el tratamiento. Finalmente, ciertos protozoarios se nutren de bacterias, hecho que se considera de importancia para el tratamiento bajo varios aspectos, como discutiremos en las páginas siguientes.

Es interesante, desde el punto de vista del tratamiento, que apenas una parte mínima del material orgánico consumido por las bacterias, sea utilizada para la producción de energía por esos organismos, siendo deseable que la mayor parte constituya elemento material para la reproducción bacteriana (31), y esto es mucho más exacto cuando se considera frente a los nuevos conceptos sobre la actividad purificadora de las bacterias. Se puede prever que cerca de medio kilogramo de nuevas células se forma por cada kilogramo de DBO estabilizado.

Con relación a las necesidades en nutrientes minerales, presentadas por el conjunto de microorganismos del desague, se sabe que, en su mayor parte, éstos se encuentran presentes como constituyentes normales de los desagues domésticos e industriales. Tan sólo los compuestos de nitrógeno y de fósforo pueden ser insuficientes, especialmente en los desechos del segundo tipo. Ya ha sido ampliamente demostrada la importancia de conocer, en un desecho, las relaciones entre DBO y nitrógeno y DBO y fósforo, procurando establecer la relación más adecuada que permita una buena estabilización. Esa relación puede ser modificada, en un desecho, por la introducción de otro más o menos rico en nitrógeno y fósforo, que es lo que se comprueba cuando se realiza la mezcla de desague doméstico con desecho industrial. Para que se obtenga una buena tasa de estabilización, se debe procurar obtener, en esos casos, una relación $\frac{DBO}{N} = \frac{17}{1}$ y una relación $\frac{DBO}{P} = \frac{90}{1}$ (31).

6.3.2.3. Reproducción - Papel de los Protozoarios.

La reproducción de los diversos microorganismos que toman parte en el tratamiento aerobio de desagues depende, primeramente, de la nutrición, como ya se vió. Además de esto, depende también del abastecimiento de oxígeno y otros factores, como por ejemplo, la afluencia, la producción de autotoxinas, etc. La afluencia se comprueba siempre que un determinado medio constituye elemento favorable para el desarrollo de varios tipos de microorganismos diferentes. No obstante, cuando existe una condición desfavorable, aquellos microorganismos capaces, por sus características, de sobrevivir, pasan a predominar sobre los otros. En el tratamiento de desagues es frecuente observar, en ciertas épocas, la predominancia de ciertos tipos de hongos u otros organismos, de acuerdo con las condiciones de temperatura, pH, concentración de fósforo, nitrógeno, oxígeno, etc., vigentes en ese período (30). Un

caso semejante se presenta con los varios géneros de protozoarios que, en determinado momento, pueblan los filtros biológicos o los lodos activados (29).

En cuanto al último factor citado, relacionado con la reproducción de los microorganismos, o sea, la producción de autotoxinas, se sabe que muchas proliferaciones se controlan a fin de impedir la super-población. Eso debe, no sólo a la falta de nutrimentos que acabará por comprobarse cuando el medio no se renueva, sino también a la secreción, por los propios microorganismos, de sustancias con características antibióticas que impiden o disminuyen la tasa de su reproducción.

Cuando se observa el crecimiento de microorganismos en un medio de cultivo, se aprecia que ese crecimiento se realiza según una curva en la que se reconoce: una fase de adaptación, de crecimiento lento, una fase de ascensión rápida, o fase de crecimiento logarítmico (ya que cada organismo forma dos descendientes, por división, y así sucesivamente); una fase de declinación del crecimiento (en que la reproducción alcanza un límite, para comenzar a retroceder); y una fase endógena (en que la curva de crecimiento cae sensiblemente) (24). La declinación y especialmente la fase endógena, en que los microorganismos pasan a vivir de sus propias reservas, se debe principalmente a la escasez de sustancias (o de alguna en particular) nutritivas en el medio. Está comprobada, sin embargo, por lo menos para algunos tipos de microorganismos, la existencia de sustancias auto-inhedoras del crecimiento que producidas por las células, aumentan de concentración en el medio a medida que éstas se multiplican, llegando a una cantidad tal que impiden o disminuye mucho la reproductividad de los microorganismos. Tal es el caso, por ejemplo, de las algas del género *Chlorella*, productoras de un inhibidor químico que ya fué aislado, denominado *clorelina*. Por este motivo, para obtener cultivos en gran escala de esos microorganismos es necesario no sólo agregar frecuentemente nuevo material nutritivo sino también eliminar parte de los microorganismos, a fin de disminuir la concentración del antibiótico.

A no ser por la acción auto-inhedoras de la reproductividad, se llegaría a resultados fantásticos, en el proceso de división de los microorganismos. En efecto, si se calcula, tan sólo por curiosidad, el volumen de esos seres que se formarían después de un período de 64 horas de libre reproducción, en fase logarítmica, o sea, en progresión geométrica de razón dos, suponiendo un único organismo inicial, reproduciéndose por simple división, en dos descendientes, cada media hora (lo que es común, en ciertas bacterias) se contarían al cabo de 64 horas, 128 generaciones y el número de individuos originados por el microorganismo inicial estaría dado por la expresión:

$$n = 1 \times 2^{128}$$

Suponiendo que se tratase de bacilos con diámetro aproximado de 1 micra y 4 micras de largo, se podría compararlos a

cilindros cuyo volumen:

$$\frac{\pi D^2 h}{4} = \frac{3.14 \times 1\mu^2 \times 4\mu}{4} \approx 3\mu^3$$

Se tendría entonces que:

$$\text{Volumen total de bacterias} = 2^{128} \times 3\mu^3$$

$$\log. (\text{vol. total}) = \log. 2^{128} + \log. 3 + \log. 1$$

$$\log. (\text{vol. total}) = 128 \times 0,301030 + 0,47712 + 0$$

$$= 38,53184 + 0,47712$$

$$\approx 39,00896$$

$$\text{Antilog. (vol. total)} \approx 10^{39} \mu^3$$

Conociendo que un kilómetro cúbico contiene 10^{27} micras cúbicas, resulta:

$$\text{Vol. total} = \frac{10^{39}}{10^{27}} = 10^{12} \text{ Km}^3$$

Por lo tanto, el volumen total de esas bacterias, después de transcurridos más o menos dos días y medio de la libre reproducción, sería de un billón de kilómetros cúbicos, lo que equivale al volumen del globo terrestre (32).

Tratándose de la reproducción de bacterias, la remoción de parte de los microorganismos, a fin de mantenerlos en fase de gran productividad, puede realizarse por intermedio de protozoarios que las utilicen como alimento. En efecto, gran número de ciliados del desague se nutren de bacterias y la importancia de su papel en ese sentido, ha sido indicada por innumerables autores (29) (30). Se cree que esa es una de las razones por la cual la presencia de gran número de ciliados como *Vorticella* y otros, en los sistemas de tratamiento, constituye un indicio de buenas condiciones del funcionamiento de los mismos. Tales protozoarios no permitirían que las bacterias alcanzasen, en el desague, un número tal que causara la acumulación de productos tóxicos o escasez de nutrimentos, manteniéndolos, así, en fase de crecimiento logarítmico, en el que serían más productivas. Frente a los nuevos conocimientos sobre el verdadero papel de las bacterias en la coagulación de los desagues, se encuentra alguna dificultad en conciliar ese punto de vista con el de que las bacterias alcanzan mayor grado de productividad, con relación a la coagulación, en la fase endógena de reproducción y no en la fase logarítmica. Por otro lado, es evidente que en la fase de más franco crecimiento y, por lo tanto, de metabolización, las bacterias son más productivas con relación a la oxidación de la materia

orgánica y remoción de la DBO, siendo necesario obtener, en cualquier proceso aerobio de tratamiento biológico, un término medio, en que las bacterias se presenten igualmente eficientes con relación a su papel en la sedimentación y en la oxidación. Esto podrá obtenerse, en efecto, a través de un abastecimiento adecuado de oxígeno, como será discutido más adelante.

Otras funciones han sido atribuidas, por diversos autores, a los protozoarios en el tratamiento aerobio (22) (23) (24). Además del hecho de contribuir, sin duda, a la oxidación, ya que siendo organismos heterótrofos, se alimentan de lodo orgánico, algunos investigadores han relacionado a los protozoarios con la producción de coágulos o flocs. Algunos ciliados segregan mucosidad a fin de aglutinar bacterias que, una vez fijadas y reunidas en masas más o menos voluminosas, quedan menos sujetas a los remolinos producidos en el agua, además de permanecer en las proximidades del animal. Esas masas gelatinosas forman flocs adsorbentes, tal como la masa de zooglea producida por ciertos tipos de bacterias. Se ha observado, además de esto, el hecho, ya citado, de producir al entrar en la fase de declinación del crecimiento, cuerpos esféricos en el interior de las células, los cuales quedan libres en el medio debido a su muerte.

Algunos investigadores llegan a considerar a los protozoarios como los elementos más activos en el tratamiento aerobio, reconociendo en las bacterias apenas una importancia secundaria, habiendo obtenido purificación del desague con cultivos puros de ciliados del género *Epistylis*, en ausencia completa de bacterias; otros, consiguiendo resultado idéntico con cultivos de bacterias (90% de remoción de DBO) afirman que es nulo el papel de los protozoarios; finalmente, la opinión más común es que ambos tienen importancia en el proceso. Experiencias realizadas con lodos activados normales, en que los protozoarios eran inactivados por varios procesos químicos y físicos, revelaron que, en ausencia funcional de éstos, aunque se obtenga buena eficiencia con relación a la remoción de DBO, esa eficiencia no es tan grande en lo que se refiere a la clarificación del efluente. Concluyen los autores diciendo que, a pesar de que estos organismos son importantes para el tratamiento porque ayudan en la clarificación y también en la purificación, su importancia en el tratamiento es bastante menor que el de las bacterias (23).

6.3.2.4. Respiración de los Microorganismos.

A través de la respiración aerobia los organismos formadores de flocs oxidan la materia orgánica que retiran del desague. El oxígeno necesario debe estar en el propio desague constituyendo el OD, que puede ser enriquecido por la actividad de microorganismos fotosintetizantes, por contacto directo con el aire del ambiente o por introducción mecánica, de acuerdo con el tipo de tratamiento aerobio.

Las bacterias y otros microorganismos aerobios, al destruir la materia orgánica del desague, proceden como los animales superiores al nutrirse: ingieren ese alimento, después de transformarlo en compuestos orgánicos solubles y asimilables que quedan almacenados en sus células, constituyendo reserva que, ulteriormente, será utilizada en la composición de nuevas células (reproducción) o en el abastecimiento de energía. Así, el desague, al ser intensamente aireado, en la fase inicial del tratamiento, sufre gran reducción de su DBO y, por lo tanto, de su contenido de materia orgánica. Pero esa materia orgánica es, inicialmente, almacenada en las células, principalmente bajo la forma de glucógeno y no es inmediatamente metabolizada. Solo posteriormente, con la continuación del proceso de tratamiento es que será transformada en material para construcción de nuevos microorganismos u oxidada para la producción de energía necesaria para esa misma síntesis o para actividades locomotoras, etc.

De acuerdo con Eckenfelder y Weston (33), los siguientes hechos se pueden observar en este proceso: así como en los medios de cultivo, también en el desague en oxidación biológica los microorganismos se reproducen según una curva que comprende una fase logarítmica de crecimiento, o fase de máxima reproducción de las células de la masa biológica; una fase de declinación, causada por la extinción del alimento en el medio, lo que determina una disminución de la frecuencia de las divisiones celulares -esta fase termina en un estacionamiento de la curva, antes de iniciar la bajada debido a la muerte de gran número de células, que comienza a ocurrir en número igual al de la formación de nuevas células; finalmente una fase de regresión y muerte de las células, o fase de respiración endógena, en que mueren más células de las que se forman por nuevas divisiones. La mayor oxidación biológica del desague (reducción de DBO) se comprueba cuando los microorganismos se encuentran en la primera fase, o sea, al principio de la oxidación, cuando la cantidad de materia orgánica en el medio es muy elevada y las células la almacenan bajo la forma de glucógeno. Al continuar con la aireación y disminución de la materia orgánica, las células pasan a multiplicarse, a transformar glucógeno en material para la formación de nuevas células (síntesis) y a oxidar activamente parte de ese glucógeno en la producción de energía (respiración) hasta que, no teniendo más reservas, entran en fase de declinación. Aquí, pues, es que la DBO es realmente consumida, y la materia orgánica realmente oxidada. Finalmente, si faltase suministro de materia

orgánica, prosiguiendo el abastecimiento de oxígeno, las células pasan a respirar endógenamente, o sea, a oxidar su propio material que ya fue sintetizado, muriendo en gran número. Cuando esto sucede, la masa biológica queda con verdadera "avidez" de compuestos orgánicos, como veremos al tratar el proceso de lodos activados.

El abastecimiento de aire tiene la función, por lo tanto, de suministrar oxígeno al medio, lo suficiente para que los microorganismos puedan respirar, oxidando sus reservas de glucógeno (en el caso de bacterias) o de otros compuestos (en el caso de protozoarios, etc.). El abastecimiento excesivo de oxígeno, en relación a la cantidad de materia orgánica, puede llevar al establecimiento de una fase endógena, en que la masa biológica pasa a auto-destruirse, transformando el material sintetizado en anhídrido carbónico, agua y amoníaco. Este abastecimiento de oxígeno puede realizarse por intermedio de procesos físicos, en el caso de filtración biológica, lodos activados, etc., o por procesos bioquímicos, como en el caso de las lagunas de estabilización.

6.3.2.5. Nitrificación y Desnitrificación.

En el tratamiento biológico de los residuos orgánicos, ya sea en aguas de desecho sometidas a tratamiento, o en un curso de agua sujeto a la autopurificación, pueden reconocerse los siguientes fenómenos generales que constituyen situaciones transitorias de la purificación (34):

- a) coagulación.
- b) oxidación carbonácea.
- c) oxidación del nitrógeno.

Este último recibe la denominación de nitrificación y consiste en la transformación del nitrógeno amoniacal, resultante de la descomposición de los compuestos orgánicos nitrogenados (oxidación carbonácea) en nitrógeno nitroso (nitritos) o hasta nítrico (nitratos), siendo esta última forma estable. Tales transformaciones se realizan por intermedio de la actividad de bacterias nitrificantes, en proceso ya mencionado en el Capítulo 1.

Varios autores -especialmente investigadores de Inglaterra- consideran sumamente importante la nitrificación en los sistemas de tratamiento de desagues, a fin de que sea predominante, en los efluentes, la forma nítrica que, además de constituir un verdadero "reservorio" de oxígeno, para las aguas receptoras, no presenta inconvenientes para la fauna ictiológica, al contrario de los compuestos amoniacales que son tóxicos. La conveniencia de esa intensificación de la nitrificación, sin duda recomendable para ríos de pequeña extensión y poca capacidad de autopurificación, como son los ríos de Inglaterra -es, sin embargo, puesta en duda por autores de otras nacionalidades, por razones que serán mejor discutidas al fi-

nal del presente capítulo, después de ser examinados los varios aspectos del fenómeno en cuestión.

Tratándose de un proceso biológico, la actividad nitrificante depende estrechamente del mantenimiento de condiciones de ambiente propicias para la reproducción y para la actividad bioquímica de las bacterias responsables. Las exigencias de esas bacterias se refieren no sólo a las condiciones de temperatura, pH, etc., sino también, a la presencia de varios elementos micronutritivos indispensables y también a la ausencia de compuestos orgánicos y minerales tóxicos o simplemente inhibidores de su actividad. La temperatura ideal para la nitrificación es la comprendida entre 20 y 25°C, comprobándose que entre 6 y 25°C ella se duplica por cada 10°C de elevación (35); el pH debe estar entre 7.5 y 8.5, no pudiendo, de ninguna manera, ser inferior a 6 ó superior a 10; la concentración de oxígeno disuelto debe ser superior a 1 mg/l aunque la falta del O₂, por períodos más o menos largos, no sea letal a las bacterias y, en concentraciones superiores a ésta, el O₂ deja de ser factor limitativo (35). Hay necesidad, también, de la presencia de Mg, Fe, CO₂ y fosfatos (además de amoníaco o nitritos), indispensables para la síntesis del material bacteriano, así como bases (Na, Ca) para la neutralización de los ácidos nitroso y nítrico producidos por la oxidación del amoníaco. La adición de carbonato de calcio ha demostrado activar la nitrificación en los sistemas de lodos activados, por ese motivo (34).

Según Sawyer (36) la capacidad de nitrificación, en lodos activados, depende de la relación: $\frac{DBO}{N}$ existente en el desague. Cuando esta relación alcanza valores superiores a 16, la nitrificación cesa. Esta afirmación está apoyada por varios autores (34), mientras tanto, Downing y cols (35) admiten que esa aparente dificultad en la obtención de nitrificación se deba, más probablemente al aumento de la producción de lodo -y consecuente consumo de amoníaco en la síntesis de éste- proveniente de la elevación de DBO en el desague, siendo independiente de la concentración de amoníaco o de la relación $\frac{DBO}{N}$, siempre que exista cantidad suficiente de nitrógeno para la síntesis bacteriana. La argumentación de esos autores se fundamenta en los siguientes hechos: la tentativa de previsión de la concentración de amoníaco y de nitrógeno oxidado en el efluente, en función del nitrógeno orgánico del desague, está sujeta a errores debidos, por un lado, a la remoción de nitrógeno para síntesis de nuevas células y, por otro, a la autólisis que lleva a la liberación de amoníaco del medio, independientemente de la nitrificación que se lleva a cabo. Se ha comprobado en sistemas de tratamiento de desagues domésticos que, cuando no ocurre nitrificación, la concentración de amoníaco en el efluente es realmente, muy próxima a la existente en el desague sedimentado, aunque la cantidad de nitrógeno orgánico residual, en el efluente, sea siempre bastante menor que la existente en el desague, donde la proporción es 1 parte de nitrógeno para 10 de carbono orgánico. Esto lleva a la conclusión de que el