

cuentas en varias clases de residuos industriales. Hay grandes variaciones de la toxicidad en relación a la naturaleza del compuesto y a las características del medio. Así es como, por ejemplo, la combinación del cianuro con el níquel (níquelcianuro) en un medio ácido, es más tóxica en una concentración de 1.0 mg/l que el mismo complejo en un pH 8.0, en concentraciones de 1,000 mg/l (43).

5.5.3. Eutrofización.

La actividad biológica de un cuerpo de agua depende, fundamentalmente, de la capacidad nutritiva, o sea, de la productividad del agua. Esa productividad depende de la intensidad con que se realizan las actividades de síntesis orgánica y éstas dependen de la presencia de elementos fundamentales, sobre todo, para la fotosíntesis, es decir: la luz y las sales minerales. Un agua en que esas condiciones sean suficientes para permitir una alta productividad se denomina eutrófica; en cambio, cuando el cuerpo de agua es "pobre", se dice que es oligotrófico. Las actividades humanas llevan, en general, a un enriquecimiento o a una fertilización progresiva de las aguas, de tal manera que éstas, de oligotróficas pasan a eutróficas y el proceso ha recibido la denominación de eutrofización. Ese "abonamiento" de las aguas se hace directamente por la introducción de sales minerales nutrientes (principalmente sales de N, P, K) mediante los desagues industriales, o por efluentes de plantas de tratamiento de desagues domésticos, o, indirectamente, por la introducción de desagues orgánicos crudos, los cuales, por proceso de estabilización biológica (autopurificación) llevan a la formación de aquellas sales minerales. La eutrofización es benéfica desde un punto de vista de la biología de los cuerpos de agua, pues la población de peces depende de la existencia de alimento básico y los piscicultores procuran provocar ese fenómeno por la introducción de fertilizantes químicos. Pero, en relación a la utilización del agua para abastecimiento, el desarrollo intenso de microorganismos puede ser considerado nocivo. Además, el crecimiento de plantas acuáticas macroscópicas puede llevar a la formación de fango y provocar la disminución de la capacidad volumétrica o hasta la extinción completa de los lagos.

En Inglaterra, desde 1908, se conocen los efectos que la polución provoca en el desarrollo de las algas marinas - del género Ulva en los estuarios. Una parte de esas algas al morir, entran en descomposición, provocando la depresión del oxígeno disuelto, muerte de los peces y, por actividad anaerobia, la formación de olor desagradable y muy fuerte - (44).

Varios experimentos han demostrado que, de los elementos necesarios al desarrollo de las algas (tales como: azufre, potasio, magnesio, etc.) sólo el nitrógeno y el fósforo son limitativos generalmente (45) (46). Es decir, que la introducción experimental de esos dos elementos (y no de

los otros) es que provoca un aumento en la población de algas, o de algunas especies en particular (47). En efecto se sabe que, por lo menos en relación al nitrógeno (el cual es parte integrante de la molécula proteica) las necesidades manifestadas por el organismo son proporcionales a la concentración existente, del mismo elemento, en sus células. Las especies de algas más exigentes, con relación al nitrógeno son las verdeazuladas que provocan el fenómeno de floración de las aguas. De éstas, Microcystis aeruginosa tiene 55.58% de su peso seco formado de proteínas; Anabaena flos-aquae, 60.56% y Aphanizomenon flos-aqua, 62.80% (48).

Las cantidades de nitrógeno y fósforo minerales en las aguas naturales son, en general, muy pequeñas para atender a tan altas demandas. El nitrógeno proviene de la actividad de las bacterias nitrificadoras, a partir del amoníaco resultante de la descomposición de la materia orgánica nitrogenada. En zonas salitreras, el nitrato puede, provenir de las rocas, y, en terrenos abonados, de fertilizantes químicos. Además, el agua de lluvia puede contener pequeñas concentraciones de amoníaco o de ácido nítrico de la atmósfera, como resultado de la polución atmosférica industrial o de las descargas eléctricas de los rayos, que provocan la combinación química del hidrógeno con el nitrógeno atmosférico. Finalmente, algunas especies de algas verdeazuladas pueden fijar directamente el nitrógeno del aire disuelto.

El fósforo del agua proviene de las rocas fosfáticas (apatitas) o del suelo por transformación de los fosfatos en fosfitos, hipofosfitos y fosfina, por acción bacteriana, todavía poco esclarecida (49). O también puede provenir de terrenos fertilizados químicamente. Pero, en el agua el fósforo con frecuencia es precipitado, por reacción con el fierro y en presencia de oxígeno disuelto, formando fosfato ferroso insoluble. Con todo, las principales fuentes de nitrógeno y de fósforo son los desagues domésticos. Estos desagues son, actualmente, aún más ricos en fósforo, debido al creciente uso de los detergentes sintéticos. En los Estados Unidos, la concentración de fósforo en los desagues domésticos ha duplicado en un período de 6 años, por ese motivo (50).

Todavía no se ha determinado cuál de los dos elementos (nitrógeno o fósforo) es el más importante desde el punto de vista de la eutrofización. Sawyer (46) ha observado, en varios lagos de Wisconsin, la formación de floración de las aguas cada vez que la concentración de fósforo inorgánico es superior a 0.01 mg/l y la del nitrógeno es superior a 0.3 mg/l (cuando las demás condiciones ambientales son favorables). Sin embargo, al realizar después experimentos de laboratorio con esas mismas aguas (50) ha podido constatar que al añadir al medio cierta cantidad de desagues domésticos de la cual habría eliminado el fósforo no habría aumento proporcional de algas. En cambio, siempre que agregaba el desague sin nitrógeno había fertilización. Eso le ha permitido llegar a la conclusión de que, aunque ambos sean indispensables, el fósforo puede ser limitativo y el nitrógeno no, pues éste es toma-

do directamente de la atmósfera por las algas verdeazuladas.

A su vez, Gerloff y Skoog (51) (52) han realizado experimentos de laboratorio determinando la cantidad de los dos elementos en las células de las algas para conocer cuales son, en realidad, sus necesidades reales. Después, han comparado los resultados obtenidos por ese procedimiento con los resultados del método de añadir al agua natural, compuestos como: nitratos, fosfatos, sales de fierro, etc. Han llegado a la conclusión de que el nitrógeno es el principal factor limitativo, pues la introducción de NO_3 , solamente, al medio, ha permitido una elevación de 10 veces en la producción de algas llegando éstas a una productividad de 64% en relación a la productividad máxima obtenida por la adición de $\text{NO}_3 + \text{PO}_4 + \text{Fe}$. En cambio, la introducción de PO_4 solamente, ha provocado una productividad de 6%.

Posiblemente los dos resultados no son antagónicos. En realidad el nitrógeno es el factor limitativo más importante pues, cuando se reduce su concentración, provoca limitación inmediata en la productividad de los lagos estudiados. Ello se debe al hecho de que las algas demandan cantidades mucho más grandes de nitrógeno que de fósforo y en las aguas naturales, aunque el fósforo esté presente en concentraciones más pequeñas que el nitrógeno, la desproporción no es tan marcada. La proporción encontrada por Sawyer, necesaria para una gran productividad, fué de N:P = 30:1 y el mismo investigador ha observado que la proporción entre los dos elementos en los desagües domésticos es de 8:1 (15 a 35 mg/l de N y 2 a 4 mg/l de P). Así se entiende que, aunque el fósforo esté presente en concentraciones muy inferiores a las del nitrógeno, hay, en las aguas polucionadas, un exceso del fósforo en relación al otro elemento. Así es como, cuando las algas presentes hayan consumido todo, o casi todo, el nitrógeno, la concentración de fósforo sería aún suficiente para mantener la floración (si nuevas cantidades de nitrógeno se hubieran introducido). Así, en las aguas naturales el fósforo puede ser considerado el principal factor limitativo; en las aguas fuertemente polucionadas por desagües domésticos, el factor limitativo más importante pasa a ser el nitrógeno. Sin embargo, el fósforo es más fácilmente controlado, pues el nitrógeno puede ser obtenido directamente del aire, por las bacterias y las algas verdeazuladas. Por ello es que, en los efluentes de plantas de tratamiento se busca, en general, controlar el fósforo y no tanto el nitrógeno.

Un ejemplo típico de eutroficación de las aguas es el observado en el embalse Billings, en Sao Paulo (Brasil), donde el agua es fertilizada por desagües crudos que, mediante un proceso de intensa autopurificación, llegan a producir concentraciones muy altas de nitrógeno y fósforo inorgánicos, con la intensa producción de algas verdeazuladas del género *Microcystis*. La autopurificación es muy acelerada, en este caso, por la intensa actividad fotosintética de las algas, que llega a producir 100 toneladas de oxígeno al día (53) (54). La eutroficación se puede medir en la práctica por incubación -a la

temperatura ambiente y luz adecuada- de muestras del agua, sembradas con cultivos de varios tipos de algas y por períodos de 2 a 3 meses. La materia biológica sintetizada se mide en peso seco (55). Otra manera de medir aproximadamente el grado de eutroficación es por medio de la productividad; se hace la determinación del oxígeno disuelto en botellas opacas y transparentes o, aún, por la concentración de clorofila o del fósforo y el nitrógeno en sus varias formas.

La técnica de las botellas es, en resumen, la siguiente: Una muestra de agua tomada en el cuerpo de agua se divide en 3 botellas. En la primera, se mide el oxígeno disuelto presente. Las otras dos son colocadas en el agua, a la misma profundidad a la que se ha recogido la muestra. Una de esas botellas debe ser transparente y la otra envuelta en una hoja de "papel de aluminio", opaca. Después de un período de tiempo variable entre 1 y 24 horas (éste depende de la cantidad de algas existentes, así como de otros factores que solamente la experiencia puede indicar) se sacan las botellas y se mide el oxígeno disuelto existente en las mismas. La concentración final de oxígeno en el frasco transparente representa el oxígeno inicial del agua (anterior a la incubación) aumentado del oxígeno producido por la fotosíntesis, menos el oxígeno que fué consumido por la respiración de los microorganismos presentes (DBO). La concentración final en el frasco opaco representa la concentración inicial, menos el oxígeno que fué consumido por la respiración. El frasco transparente contiene, pues, además de lo que contiene el opaco, el oxígeno producido por fotosíntesis. La DBO, en aquel espacio de tiempo, puede ser dada por la diferencia entre la concentración de oxígeno inicial y la del frasco opaco.

Para obtener el valor de la productividad real, es decir, la cantidad de carbono fijado por las algas en la fotosíntesis, se convierte la producción de oxígeno en producción de carbón (que es proporcional) mediante el factor de conversión:

$$d = \frac{c}{h} \text{O}_2$$

donde:

d = densidad normal del oxígeno = 1.42896
h = período de incubación, en horas = 1/2 h.; 1 h.; 24 h.
c = peso atómico del carbón = 12.011
 O_2 = peso molecular del oxígeno = 32

el resultado se expresa en miligramos de carbón por litro por hora.

Según Sawyer (56) un miligramo de nitrógeno por litro de agua puede permitir la formación de 12 mg/l de organismos planctónicos y, por ello se tiene, también, una medida de la eutroficación. Pero esa medida sólo tiene significado en los lagos de clima templado, inmediatamente después del período de productividad mínima (comienzo de la primavera) y antes de que una cantidad grande de nitrógeno inorgánico haya sido

transformada en orgánico. Y no se debe olvidar la fijación del nitrógeno del aire por las algas verdeazuladas.

5.6. Indicadores Biológicos de la Polución.

Las consecuencias generales de la polución, para la vida acuática, son relacionadas a: a) toxicidad; b) reducción de la fuente de energía (en el caso de turbiedad y color que limitan la luz) o su aumento (por introducción de compuestos orgánicos nutrientes); c) reducción de la fuente de oxígeno. Sin embargo, esos efectos no tienen una acción indiscriminada sobre toda la flora y la fauna. Hay predominancia de un proceso de selección, según el tipo de respiración (aerobia o anaerobia), de nutrición (autotrófica o heterotrófica) o de resistencia y sensibilidad a los efectos físicos, tóxicos, etc. Los micronutrientes, es decir, los elementos que son demandados por los organismos, en cantidades imposibles de ser medidos, pueden ser responsables por las variaciones de especies o hasta cambios más grandes en la población acuática.

De modo general, puede decirse por ello, que el conjunto de especies que se encuentra refleja con precisión, las características ambientales existentes. La presencia de una especie indicadora de polución en forma aislada, sólo muy raramente puede caracterizar un ambiente, a no ser que esté representada por una población muy concentrada de individuos. Pero un conjunto de especies, todas conocidas como indicadoras de una misma condición, y la ausencia de otras especies puede formar un cuadro muy característico del ambiente ecológico. Este cuadro es el que se busca obtener por intermedio de los sistemas ecológicos de clasificación que se estudiarán más adelante.

Según Claassen (57) y también Patrick (13) las informaciones que se pueden obtener de los indicadores biológicos en conjunto, pueden compensar las siguientes deficiencias de los métodos químicos y bacteriológicos: a) Las determinaciones de DBO y recuentos bacteriológicos no demuestran la presencia de sustancias tóxicas; b) No se puede prever, por esos métodos, las consecuencias que un desague podrá provocar en la población biológica de un cuerpo de agua; c) Los análisis convencionales sólo permiten reconocer la presencia de materias polucionantes en el momento mismo de la polución y no después. Así, en los casos, muy frecuentes, de un desague intermitente sólo por los cambios provocados en el panorama biológico -sobre todo de los organismos que viven fijos- es que se puede saber de la existencia anterior de un elemento extraño, pues la comunidad biológica, una vez deshecha, lleva muchos meses para rehacerse.

Sin embargo, en esta clase de estudios, cada investigador debe buscar definir con precisión los objetivos buscados. Todos los cambios biológicos en un agua reflejan cambios de características ecológicas y, si no se tiene bien fijado el concepto de polución según el punto de vista económico, esté-

tico, sanitario o ictiológico, todos esos cambios serían considerados como polución, lo que no tiene interés práctico (58).

En general, desde el punto de vista sanitario, basado principalmente en la disminución de la concentración del oxígeno disuelto provocada por desagües orgánicos, las especies son clasificadas en categorías que representan las zonas de polución establecidas en el sistema de Kolkwitz y Marsson (59):

a) Zona Polisapróbia: El cuerpo de agua, en el punto donde recibe desagües orgánicos, tiene alta concentración de compuestos complejos y oxidables como: hidratos de carbono grasas, polipéptidos y, hasta aún, proteínas. La oxidación bioquímica que se inicia inmediatamente, por la actividad de los microorganismos donde predominan las bacterias, producen fuerte depresión de la concentración del oxígeno. Así, el ambiente polisapróbio es caracterizado por: poco (o hasta ningún, al menos en las regiones más profundas) oxígeno disuelto; gran población de bacterias; gran cantidad de compuestos orgánicos. En las regiones sin oxígeno (como en el fango del fondo, por ejemplo, o también en el agua) grandes poblaciones de microorganismos anaerobios (principalmente bacterias) y producción de compuestos no oxidables totalmente, como: metano, ácidos orgánicos y compuestos de olor desagradable: mercaptans, indol, escatol, hidrógeno sulfurado. El color es oscuro, con alta turbidez y producción de burbujas gaseosas. La fauna está formada de protozoarios anaerobios que pertenecen a pocas especies, pero que están representadas por un gran número. Bacterias del grupo coliforme, así como parásitos intestinales se pueden encontrar.

b) Zona Mesosapróbia alfa (o Mesosapróbia fuerte). En esta zona los compuestos complejos se hallan ya, oxidados parcialmente, pero también se pueden hallar los aminoácidos en concentraciones apreciables (por descomposición de las proteínas) y otros compuestos con alto contenido energético. La DBO ya no es tan grande y la mineralización resultante de los procesos oxidantes permite el apareamiento de los primeros organismos fotosintetizantes de las especies más resistentes a la polución y que necesitan ciertos compuestos orgánicos para su metabolismo. El oxígeno disuelto llega hasta el 50% de saturación. Las aguas son más transparentes por la oxidación del sulfato ferroso a óxido férrico el cual se deposita en el fondo, con el lodo orgánico y mineral. Ya no existe olor pronunciado. El número de bacterias es superior a 100,000 por ml de agua. Los protozoarios son muy abundantes, especialmente los ciliados de movimiento libre, que se alimentan de bacterias. Hay una gran población de gusanos rojos (tubícolas) y larvas de insectos resistentes a la depresión del oxígeno (chironomidae, sirfidae).

c) Zona Mesosapróbia beta (o Mesosapróbia débil). Los compuestos nitrogenados, por oxidación dan lugar a altas concentraciones de compuestos amoniacales, que son los que más caracterizan esa zona. El oxígeno disuelto es superior al