Evaluación del Requerimiento de Nitrógeno y Fósforo en Sistemas de Tratamiento Biológico Aerobio de Aguas Residuales

Mauricio Saya

Resumen

El adecuado Tratamiento Biológico de las Aguas Residuales depende de muchos factores ambientales del líquido mismo, entre los cuales se pueden resaltar la concentración de los Macronutrientes, elementos fundamentales en cantidades importantes para el correcto desarrollo del metabolismo de los Microorganismos. Fundamentalmente, en los Tratamientos Biológicos de las Aguas Residuales se presta especial atención a los elementos Nitrógeno y Fósforo, pues participan en la generación de nueva biomasa, y en casos de escasez pueden convertirse en los factores limitantes del proceso de depuración. Usualmente, ha sido aceptada la relación entre la cantidad de Materia Orgánica, Nitrógeno y Fósforo como 100:5:1 medido en términos de Concentración de DBO_5: N: P.

En las Aguas Residuales Industriales es muy común tener deficiencias importantes de los citados Macronutrientes para lograr cumplir la relación 100:5:1 mencionada, así como también en algunos casos particulares de Aguas Residuales Domésticas. Para satisfacer dichos requerimientos de Nitrógeno y Fósforo, se utiliza comúnmente la adición artificial de Soluciones acuosas de Urea, Acido Fosfórico o Fosfato de Amonio. Dichas dosificaciones generan sobrecostos importantes de la operación en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales que sería importante reducir.

El estudio de la relación de DBO_5: N: P cobra entonces vital importancia para lograr establecer mediante una investigación teórico-práctica si efectivamente los valores de 100:5:1 son efectivamente los mínimos requeridos o si, por el contrario, se puede llegar a operar Plantas de Tratamiento Biológico Aeróbico con requerimientos inferiores de estos Macronutrientes esenciales.

Se realizó una investigación como Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Civil,

que encontró resultados muy importantes sobre la mencionada importancia del Nitrógeno y el Fósforo, cubriendo la recopilación de material bibliográfico específico existente, y realizando diferentes experimentos a escala de laboratorio con un reactor biológico aeróbico operado con cinco diferentes relaciones DBO_5: N: P.

Los resultados de la investigación llevada a cabo en los laboratorios de la Universidad Militar Nueva Granada con el apoyo del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes, arrojaron resultados bastante interesantes sobre los requerimientos de Nitrógeno y Fósforo desde varios puntos de vista aplicables a la operación cotidiana de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales de tipo Biológico Aeróbico. Se encontraron fuertes influencias de las concentraciones de los Macronutrientes para las etapas de Arranque y Puesta en Marcha del proceso de Depuración, así como influencia directa en la Eficiencia de Remoción de Materia Orgánica, y en la Capacidad de Sedimentación Secundaria de los Lodos Activados obtenidos. La importancia de la investigación se puede traducir en la influencia económica que puede llegar a tener la aplicación a escala real de los resultados aquí obtenidos.

PALABRAS CLAVES
Tratamiento biológico aerobio de aguas residuales, macronutrientes, aguas residuales industriales, nitrógeno, fósforo, DBO, remoción de materia orgánica.

Introducción

En Septiembre de 1997, previa recopilación de la información secundaria disponible sobre el tema, se dio inicio al arranque y puesta en marcha de un reactor biológico aerobio a escala de laboratorio, en el cual se monitorearon durante 142 días la influencia que causan las variaciones de dosis de Nitrógeno y Fósforo sobre el desarrollo de la biomasa en el reactor y sobre la calidad del tratamiento del agua residual. Los trabajos corresponden al Proyecto de Grado de Ingeniería Civil de M. Saya, dirigidos por el ingeniero M. Muñoz.

Materiales y métodos

Se diseñó un reactor para tratar una carga hidráulica de 5L/día, con una concentración de DBO constante, y el cual fue operado mediante secuencia batch durante la Investigación. A continuación se presentan los parámetros de diseño del reactor a escala:

Tabla No. 1:
PARÁMETROS DE DISEÑO

Parámetro	Concentración	Carga
Caudal, Q		5L/día
Volumen		10 L (D=24.5cm, H=25cm)
DBO_5	2.000 mg/L	10 g/día
pH		6.8 – 7.2
Temperatura		19 °C
Producción de Lodos		0.45 – 0.65 mg SSV/mg DBO_5
Tiempo de Detención, t_d		1 día
Carga orgánica, A/M		0.43 mg DBO_5/mg SSVLM-día
Espacio Máximo para Sedimentación, EMS		50 %
Edad de Lodos, J_c		7 días
SSVLM		2.337 mg/L
Remoción de DBO esperada		90 %

El reactor a escala se construyó para simular la operación de una planta de tratamiento de aguas residuales, igualmente se observó la necesidad de simular las aguas residuales que habrían de ser tratadas por el reactor. Para tal propósito se preparó diariamente el sustrato influente, siguiendo las recomendaciones encontradas en la bibliografía (Muñoz, 1993; Metcalf & Eddy, 1996; Orozco y Giraldo, 1986).

El Sustrato Influente

El sustrato debía contener los diferentes micronutrientes en las proporciones necesarias para garantizar el buen desarrollo de los microorganismos. A continuación se describen los tipos de sales micronutrientes que se usaron a diario en la preparación del sustrato influente:

Tabla No.2:
MICRONUTRIENTES DEL INFLUENTE

Sal micronutriente	Concentración Madre (g/L)
SAL I	
$MgCl_2.6H_2O$	1.118
SAL II	
KCl	2.0

$FeCl_3.6H_2O$	1.0
$CoCl_2.6H_2O$	0.3
$NiCl_2.6H_2O$	0.61
SAL III	
H_3BO_3	0.38
$CuCl_2.H_2O$	0.18
$NaMoO_4.2H_2O$	0.17
$ZnCl_2$	0.14

El reactor estaba diseñado para tratar una carga hidráulica igual a 5L/día, lo que indica que diariamente se prepararon cinco (5) litros de sustrato influente usando los siguiente volúmenes de sales micronutrientes: 50 mL de SAL I, 50 mL de SAL II, y 8 mL de SAL III.

La DBO inicial que el reactor debía tratar era preparada a diario con una concentración de DBO de 2.000 mg/L, la cual se obtenía mediante una mezcla compuesta de Sacarosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$) y Acido Acético (CH_3COOH). Para calcular las cantidades de Sacarosa y de Acido Acético requeridas para obtener la DBO arriba mencionada se procedió de la siguiente manera (Muñoz, 1993):

DBO teórica de la Sacarosa:

$$\underset{342\ g/mol}{C_{12}H_{22}O_{11}} + \underset{12x32\ g/mol}{12O_2} \xrightarrow{\text{Microorganismos}} 11H_2O + 12CO_2$$

Luego, la DBO teórica de la Sacarosa es:

$$DBO_{Sacarosa} = \frac{12 \times 32}{342} = \frac{384}{342} = 1.123\ g\ DBO/g\ Sacarosa$$

Igualmente, la DBO teórica del Acido Acético:

$$\underset{60g/mol}{CH_3COOH} + \underset{2x32g/mol}{2\,O_2} \xrightarrow{\text{Microorganismos}} 2\,H_2O + 2\,CO_2$$

Luego, la DBO teórica del Acido Acético es:

$$DBO_{Acido\ Acético} = \frac{2x32}{60} = \frac{64}{60} = 1.067\ g\ DBO/g\ Acido\ Acético$$

Con base en lo anterior, como la DBO inicial sería de 2.000 mg/L lo que se decidió como más conveniente es que 1.000 mg/L fueran suministrados en forma de Sacarosa, y los restantes 1.000 mg/L lo fueran por Acido Acético para favorecer la cinética de la degradación microbiológica aerobia.

El reactor biológico aerobio

El reactor se construyó usando un recipiente plástico transparente de 24.5 cm de diámetro, 25 cm de altura, con capacidad para diez litros, al cual se le instaló un difusor poroso de aire en su parte inferior, y el cual se graduó de forma tal que se facilitara la lectura del volumen de contenido en cualquier momento, y se mantuvo siempre cubierto con polietileno negro para evitar la llegada de la luz y la posible aparición de algas y/o microorganismos fotosintéticos indeseables dado que modificarían las condiciones de

remoción de materia orgánica, de concentración de oxigeno disuelto, de utilización de Nutrientes, etc.

Las razones por las cuales se decidió operar el reactor mediante secuencia batch fueron fundamentalmente tres: (i) Se tiene mejor control tanto de las cargas orgánicas como de las cargas hidráulicas con las que el reactor debe operar, (ii) Se tiene absoluto control de la edad de lodos (q_c) con la que el reactor debe operar; y (iii) La eficiencia de un reactor operado mediante secuencia batch puede ser superior a la del mismo operado en forma continua, siempre y cuando los caudales a tratar sean relativamente pequeños (Metcalf & Eddy, 1996).

Operación diaria del Reactor

El reactor biológico aerobio que se construyó e instaló en el Laboratorio de Aguas de la UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA, y operó desde el 25 de Septiembre de 1997 hasta el día 13 de Febrero de 1998. El monitoreo realizado para obtener la información requerida para la presente investigación tuvo una duración de 142 días.

El tiempo de detención era de veinticuatro (24) horas, lo que implica un estricto control diario. La Figura No.1 ilustra los ciclos de operación del reactor, en secuencia batch, utilizados para este proyecto:

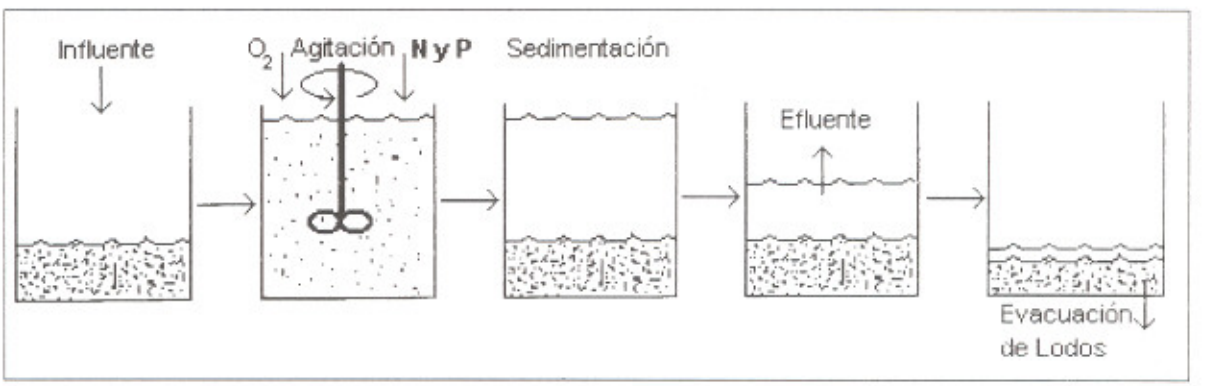

Figura No. 1: Ciclos de Operación del Reactor por secuencia Batch

Al observar la Figura No.1, se muestran los ciclos de 24 horas. En primera instancia, se ingresaban manualmente los cinco (5) litros de sustrato influente al reactor durante un tiempo de un (1) minuto. Enseguida se prendían los equipos de aireación por difusión, y de agitación magneto-mecánica, y se dejaba el reactor operar bajo estas condiciones durante un período de aproximadamente veinte (20) horas. Durante este tiempo se sucedían las diferentes reacciones bioquímicas propias de la estabilización del sustrato influente, el sustrato se mezclaba homogéneamente con la biomasa presente en el reactor, los Nutrientes se mezclaban también homogéneamente, el suministro de oxígeno era permanente y la agitación continua garantizaba un licor mezclado homogéneo durante esta etapa de reacción. Pasadas las veinte horas de reacción se

apagaban los equipos de aireación y agitación y se dejaba reposar la biomasa para que se diera lugar a la etapa de sedimentación de los lodos, la cual tomaba entre dos (2) y tres (3) horas.

Una vez que la sedimentación se había completado, se procedía a extraer los cinco (5) litros de Efluente del reactor mediante mangueras de látex, por efecto sifón. Finalmente, se extraía la cantidad de lodo de desecho del reactor cada semana.

Control Diario del Reactor

Diariamente durante los 142 días, se efectuó el monitoreo del Reactor. Antes de apagar los sistemas de aireación y agitación se medía el oxígeno disuelto para verificar que este se encontrara siempre igual o superior a 2 mg OD/L, e igualmente se medía la temperatura y el pH para comprobar que la operación del reactor se ejecutara siempre dentro de un pH lo más neutro posible, es decir dentro de 6.5 y 7.5. Se desprendían los lodos que se adherían a los bordes superiores del reactor y se raspaban las paredes de difusor de aire para garantizar que no hubiese lodos obstruyendo los orificios de salida del aire.

Desde el momento en que se apagaban los sistemas de aireación y agitación se tomaba atenta nota de la sedimentación que ocurría en el reactor, con el objeto de determinar el comportamiento del IVL del reactor. Para ello se había graduado previamente el reactor, de forma tal que se pudiera determinar rápidamente el volumen de sedimentación en cualquier momento.

Entre tanto se sedimentaban los lodos del reactor, se procedía a preparar el sustrato influente que habría de ser tratado en el siguiente ciclo de operación del reactor. En un recipiente se depositaban 4.795 mL de agua previamente aireada para eliminar el cloro residual que pudiera estar presente. Con ayuda de una probeta graduada de 100 mL se suministraban un total de 108 mL de sales micronutrientes, 97.5 mL de Vinagre Comercial (Acido Acético), y 4.45 g de Sacarosa. De esta forma se obtenía siempre un total de 5.000 mL de sustrato influente que se le suministraba a diario al reactor.

Después de preparar el sustrato, y mientras que continuaba la sedimentación del reactor, se procedía a dosificar la cantidad de Urea y de Acido Fosfórico que se requería de acuerdo con las relaciones DBO_5:N:P que se estuvieran probando.

Una vez transcurrido el tiempo de Sedimentación, se extraía el Efluente del reactor, se llenaba el reactor con el sustrato recién preparado, se prendían los sistemas de aireación y agitación, se adicionaba la Urea y el Acido Fosfórico, se inspeccionaba visualmente la operación del Reactor, y finalmente se cubría todo el sistema con el polietileno negro para evitar la llegada de luz al reactor, lo cual podría favorecer la proliferación de organismos fotosintéticos indeseables.

Mediciones quincenales

Cada quince (15) días se verificaba el comportamiento del reactor mediante la toma de una serie de muestras que eran analizadas cuidadosamente en el laboratorio

ambiental de la UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Los parámetros que mayormente se evaluaban eran la DBO del influente y del Efluente, los Sólidos Suspendidos Totales y los Sólidos Suspendidos Volátiles; cada uno de ellos siguiendo la metodología de "Standard Methods for the examination of water and wastewater", Edición 19.

Análisis de Resultados

A continuación se presenta la Tabla No.3 con todos los resultados obtenidos en la investigación, resaltando que se probaron cinco diferentes relaciones DBO:N:P, realizando tomas de datos por triplicado para cada una de ellas:

Tabla No.3:
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA INVESTIGACIÓN

Datos No.	$DBO_{Influente}$ (mg DBO/L)	$DBO_{Efluente}$ (mg DBO/L)	N (mg N/L)	P (mg P/L)	N/P (mg N/mg P)	DBOremovida (mg DBO/L)	DBOremovida (%)	DBOrem/N (mg DBO/mg N)	DBOrem/P (mg DBO/mg P)	Sedimentabilidad mL/L-30min
1	2.010	293	100,10	19,90	5,03	1.717	85,4%	17,15	86,29	
2	2.010	133	100,10	19,90	5,03	1.877	93,4%	18,75	94,33	
3	2.010	203	100,10	19,90	5,03	1.807	89,9%	18,05	90,81	
4	1.824	455	73,51	14,59	5,04	1.369	75,1%	18,62	93,82	
5	1.824	396	73,51	14,59	5,04	1.428	78,3%	19,43	97,86	
6	1.824	492	73,51	14,59	5,04	1.332	73,0%	18,12	91,28	
7	1.828	754	70,01	19,93	3,51	1.074	58,8%	15,34	53,90	
8	1.828	600	70,01	19,93	3,51	1.228	67,2%	17,54	61,63	
9	1.828	664	70,01	19,93	3,51	1.164	63,7%	16,63	58,42	
10	1.812	424	84,98	17,03	4,99	1.388	76,6%	16,33	81,49	
11	1.812	509	84,98	17,03	4,99	1.303	71,9%	15,33	76,50	
12	1.812	509	84,98	17,03	4,99	1.303	71,9%	15,33	76,50	
13	1.915	418	99,96	13,98	7,15	1.497	78,2%	14,98	107,09	
14	1.915	511	99,96	13,98	7,15	1.404	73,3%	14,05	100,43	
15	1.915	398	99,96	13,98	7,15	1.517	79,2%	15,18	108,52	
Promedio 1	2.010	210	100,100	19,90	5,03	1.800	89,6%	17,99	90,47	500
Promedio 2	1.824	448	73,51	14,59	5,04	1.376	75,5%	18,72	94,32	600
Promedio 3	1.828	673	70,01	19,93	3,51	1.155	63,2%	16,50	57,98	580
Promedio 4	1.812	481	84,98	17,03	4,99	1.331	73,5%	15,67	78,16	610
Promedio 5	1.915	442	99,96	13,98	7,15	1.473	76,9%	14,73	105,34	560

Los promedios mostrados reflejan el comportamiento promedio de cada relación DBO:N:P estudiada, y son los que posteriormente se utilizaron para el análisis de resultados. Teniendo los datos promedio, se procedió a analizar si existían algunas tendencias que reflejaran la influencia de las concentraciones relativas de Nitrógeno y Fósforo, para lo cual se elaboraron las siguientes Figuras No.2 a No.4 que se presentan a continuación. Se presentan unas fronteras a partir de las cuales se consideran los resultados como aceptables o favorables, que se básicamente son aquellos en los que se logra tener una remoción de DBO superior al 85% de la remoción esperada del 90% (es decir, que la influencia de las concentraciones relativas de N o P no generen más de un 15% de disminución de la eficiencia del tratamiento), lo que equivale aproximadamente al 75% de remoción de DBO:

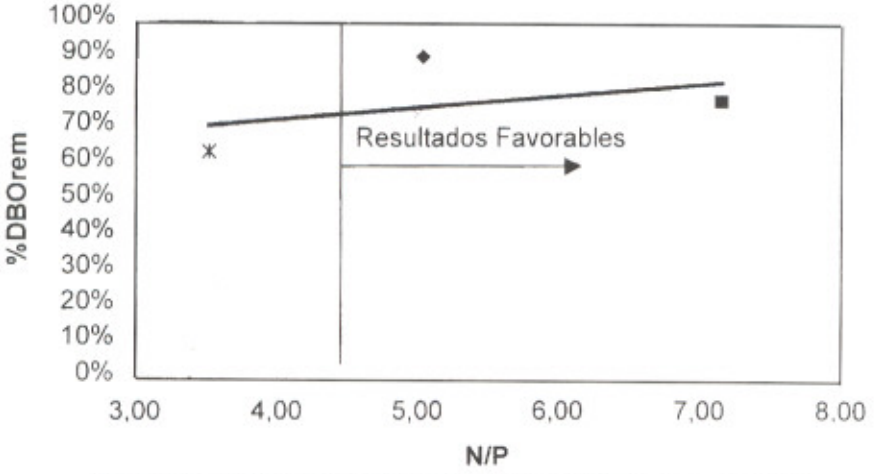

Figura No. 2: Relación entre la Remoción de DBO y la razón N/P

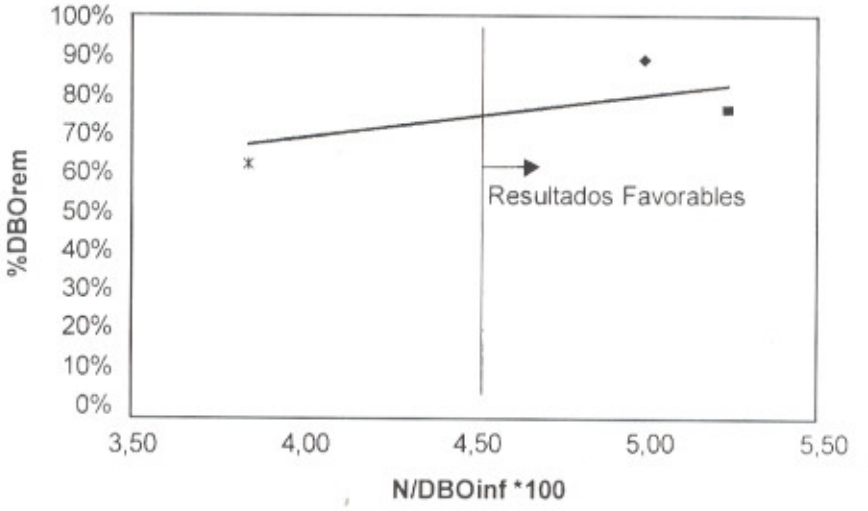

Figura No. 3: Relación entre la Remoción de DBO y la concentración relativa de N

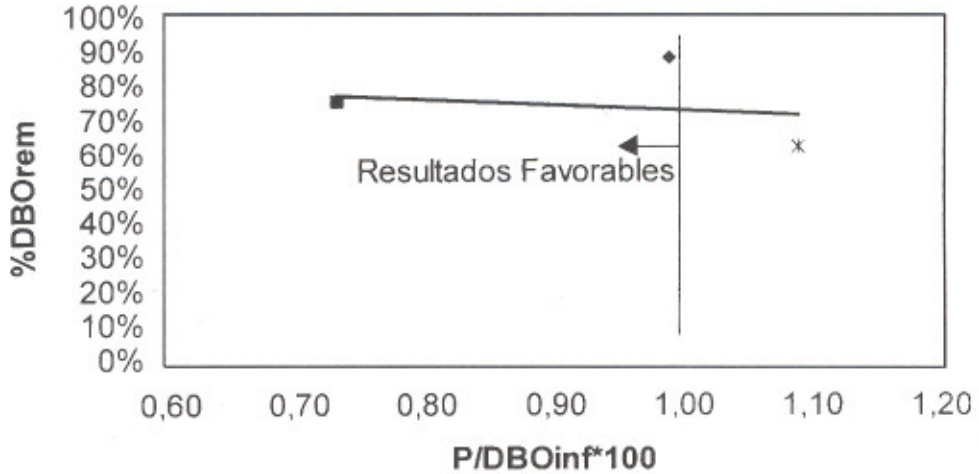

Figura No. 4: Relación entre la Remoción de DBO y la concentración relativa de P

De la Figura No.2 se observa una clara tendencia de aumento del porcentaje de remoción de DBO en la medida en que aumenta la relación N/P suministrados al reactor. La curva de %DBOrem vs. N/P indica, sin lugar a dudas, que a partir del valor de N/P = 5 la eficiencia en la remoción de DBO es superior al 75%, lo cual es bastante aceptable, y que por el contrario, en la medida en la que N/P es inferior a 5, la eficiencia del reactor tiende a ser mucho menor de la frontera fijada como favorable, con lo cual dista de ser aceptable. De la Figura No.3 igualmente se observa una tendencia a aumento en la eficiencia del reactor en la medida en la que se aumenta la dosis de Nitrógeno suministrado. La curva %DBOrem vs. N/DBOinf indica que existe una frontera en aquel valor en donde N/DBOinf = 4.5, y que en la medida en la que se aumenta la dosis de Nitrógeno a partir de ese punto, la eficiencia en la remoción de DBO es superior al 75%. Cuando las dosis de Nitrógeno son inferiores dicho valor encontrado como límite, la remoción de DBO que se logra en el reactor tiende a ser inferior al 75%, lo cual es, nuevamente, indicio de baja calidad en el tratamiento logrado. Se observa en la Figura No.4 contrariamente, una tendencia inversa en las eficiencias de remoción del reactor en la medida en la que aumenta la dosis de Fósforo suministrado. La curva de %DBO-rem vs. P/DBOinf indica claramente que en la medida en la que los porcentajes de suministro de Fósforo son inferiores a 1.0, la eficiencia de remoción de DBO en el reactor es superior al 75%, mientras que al aumentar la dosis de Fósforo por encima del 1%, la eficiencia del reactor es cada vez menor.

En adición a los análisis realizados en los párrafos anteriores, se llevaron a cabo las siguientes observaciones cualitativas:

En cada uno de los períodos de tratamiento, es decir, durante cada período en el que se usaban diferentes dosis de N y P, es claro que el reactor presentó remoción de DBO en mayor o menor grado. Ello se corrobora de varias formas:

- Observando las DBO iniciales y comparándolas con las DBO finales.
- Teniendo en cuenta que aunque el sustrato influente siempre presentaba un pH alrededor de 4.0 debido a la acidez suministrada por el Acido Acético (CH_3COOH), el pH del efluente en ningún caso fue inferior a 6.5 y por lo general fue de 7.5, lo que indica un continuo y adecuado proceso de degradación de materia orgánica en el reactor.
- La formación de Biomasa apreciable día a día.
- Una disminución progresiva del Oxígeno Disuelto, conforme avanzaba el crecimiento de microorganismos.

Es claro que para que un reactor biológico aerobio opere, requiere de la presencia de N y P en cantidades apreciables. En un principio, se intentó arrancar sin inóculo el reactor, aplicando una relación DBO:N:P de 100:0.5:0.2, sin encontrar ningún resultado medible en cuanto a producción de biomasa durante cerca de un mes de experimentación. Se probó entonces con varias dosis de N y P un poco mayores llegando hasta 100:3.5:0.7, sin presentar resultados favorables durante las siguientes dos semanas. Se puede entonces inferir que dosis inferiores a 100>5:1 durante el arranque y puesta en marcha del sistema no son nada recomendables.

Seguidamente se aplicaron las dosis usuales de N y P de 100:5:1, obteniendo una biomasa en una cantidad muy cercana a la esperada teóricamente, en apenas dos semanas de operación.

Buscando encontrar una formulación empírica de dependencia lineal entre la remoción de DBO y las dosis relativas de Nitrógeno y Fósforo aplicadas, se llegó a la siguiente expresión:

$$\% \text{ DBOrem} = K_1 \times [N] + K_2 \times [P] + K_3$$

(Ecuación No.1)

Donde los valores de las constantes K_i podrán ser encontrados en la medida en que se pueda formar una amplia matriz de datos reproducibles. Sin embargo, como medida ilustrativa, se plantean los siguientes valores:

$K_1 = 0.108$ $K_2 = -0.1659$ $K_3 = 41.2\%$

Valores que en promedio presentan una desviación de menos del 5% con los datos experimentales de remoción encontrados. Es coherente que el valor de K_2 sea negativo, según la tendencia mostrada en la Figura No.4.

Conclusiones

Aunque aparentemente contradice algunas anotaciones encontradas en la literatura, las variaciones de la eficiencia del reactor dependen de forma similar de las variaciones en las dosis de Nitrógeno o de Fósforo.

Como resultados relevantes de la investigación se pueden plantear los siguientes:

- Se recomienda utilizar una relación DBO:N:P de 100:5:1 en todo arranque de sistemas de tratamiento de aguas residuales aerobios.
- Es factible obtener remociones aceptables con unas dosis un 10% menores a la relación usualmente presentada,

representando este resultado un ahorro directo del 10% del monto de la dosificación de Urea y Acido Fosfórico. Esto es 100:4.5:0.9

- Definitivamente, la mejor relación entre N y P es de 5.0 o superior.
- El utilizar menores cantidades de Nitrógeno y Fósforo tiene implicaciones favorables anexas dado que implícitamente generará menores problemas posteriores de Eutroficación en las corrientes superficiales donde se realice el vertimiento.
- Dosis elevadas de Fósforo tienden a inhibir el correcto metabolismo de los microorganismos, según los resultados encontrados.

Bibliografía

- APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. USA: American Public Health Association, 1995.
- BOWKER, Albert, LIEBERMAN, Gerald. Estadística Para Ingenieros. USA: Prentice Hall, 1981.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Handbook for Analytical Quality Control in Water and Wastewater Laboratories. USA: EPA, 1979, 145 p.
- METCALF & EDDY. Wastewater Engineering. USA: Mc Graw Hill, 1991, 1334 p.
- MONTAÑA SANTOS, Rafael. Apuntes en clase curso de Aguas Residuales. 1997
- MUÑOZ BERNAL, Mario. Estudio sobre los parámetros que promueven la granulación en la digestión anaerobia. Santafé de Bogotá: Universidad de Los Andes, 1993, 99p.
- OROZCO, Alvaro y Alvaro SALAZAR. Tratamiento Biológico de las Aguas Residuales. Medellín: Universidad de Antioquia, 1987, 473 p.
- OROZCO, Alvaro y Eugenio GIRALDO. Tratamiento Anaerobio de las Aguas Residuales. Bogotá, Universidad de los Andes-COLCIENCIAS, 1986.
- RIVAS, Mijares. Tratamiento de Aguas Residuales. Caracas: Ediciones Vega, 1978.
- ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuiquímica. Santafé de Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1996, 225 p.
- VAN DALEN, Deobold B. Y William MEYER. Manual de técnica de la investigación educacional. Barcelona, Buenos Aires: Ediciones Paido, 1981, 542p.