



DETERMINATION OF THE KINETIC COEFFICIENTS AND ESTEQUIMETRIC OF THE PROCESS OF AEROBIC DEGRADATION IN THE BIOLOGICAL TREATMENT OF THE RESIDUAL WATER IN DISCONTINUOUS REACTORS

DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES CINÉTICOS Y ESTEQUIMÉTRICOS DEL PROCESO DE DEGRADACIÓN AEROBIA EN EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DEL AGUA RESIDUAL EN REACTORES DISCONTINUOS

RAMON, J.A. Ph. D. GUALDRON, L.D. Ing. y MALDONADO, J.I. MSc.

Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS)
Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Tel:
5685303 (ext. 140) e-mail: jacipt@unipamplona.edu.co

RESUMEN

Este trabajo de investigación ha desarrollado, un reactor de lodos activos tipo SBR, que fue empleado para determinar la cinética de reacción del tratamiento biológico del agua residual, mediante la construcción y puesta en marcha de un reactor piloto discontinuo de lodos activos. Se diseñó un reactor de lodos activos que opera en condiciones discontinuas SBR, donde se cargó el reactor con aguas residual y se dejó reaccionar durante un periodo de tiempo definido para obtener las condiciones óptimas para el tratamiento del agua residual. Luego se dejó sedimentar un tiempo y el sobrenadante es descargado por medio de un sistema de purga, para volver a ser cargado y continuar el ciclo de tratamiento; periódicamente se evacuó una cantidad de lodos excedentes para controlar la edad de los lodos presentes en el sistema. El reactor fue construido en una cuba de geometría rectangular con material de vidrio y un volumen total de 30 litros, se utilizaron compresores pequeños como sistemas de aireación y para la agitación se construyó un mecanismo por medio de un motor y palas del rodete axial situadas de forma paralelas al eje vertical del agitador y del tanque. Se realizaron ensayos durante 9 horas y en el cual se recolectaron muestras cada hora y media, a estas muestras se le determinaron DBO₅, SSV, SST, OD y SS, con esta información se aplicaron dos planteamientos que permitieran encontrarlos coeficientes cinéticos que gobiernan el proceso de degradación y crecimiento biológico y con los sólidos sedimentables redeterminaron las características de sedimentación del sólidos generados durante el proceso.

ABSTRACT

This investigation work has developed a reactor of muds active type SBR that was employed to determine the kinetics of reaction of the biological treatment of the residual water, by means of the construction and setting in march of a reactor discontinuous





pilot of active mud. You design a reactor of active muds that operates under discontinuous conditions SBR, where you position the reactor with residual waters and you accent to react during a period of defined time to obtain the good conditions for the treatment of the residual water. Then accent to settle a time and the sobrenadante is discharged by means of a purge system, be loaded again and to continue the treatment cycle; periodically a quantity of muds surpluses is evacuated to control the age of the present muds in the system. The reactor was built in a vat of rectangular geometry with glass material and a total volume of 30 liters, small compressors were used as aireación systems and for the agitation you build a mechanism by means of a motor and shovels of the located axial bun from a parallel way to the agitator's vertical axis and of the tank. They were carried out rehearsals during 9 hours and in which samples were gathered everyone and a half hour, to these samples they were determined DBO5, SSV, SST, OD and SS, with this information two positions were applied that allowed to find them kinetic coefficients that govern the degradation process and biological growth and with the solid sedimentables redeterminaron the characteristics of sedimentation of the solids generated during the process.

KEYWORDS

Reactores SBR, Flujo Pistón, Reactores Biológicos, Tratamiento de aguas residuales, Tratamiento aerobio.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad esta situación se ha incrementado de manera directamente proporcional al tamaño de los asentamientos lo cual ha conllevado a la humanidad de buscar diversos métodos para la solución o mitigación de los impactos que producen esta aguas (METCALF, 1994)

Los diversos métodos de tratamiento de las aguas residuales de tipo domestico, industrial y comercial han sido desarrollados para la reducción o eliminación de los contaminantes de esta agua, estas sustancias son tratadas con tratamientos primarios, secundarios y terciarios, encaminados a la reducción de materia orgánica, metales pesados, sustancias tóxicas y microorganismos patógenos vertidos. En el tratamiento primario se utiliza operaciones físicas, como el desbaste y la sedimentación, para eliminar los sólidos sedimentables y partículas flotantes que se encuentran en las aguas residuales.

En los tratamientos secundarios son los procesos biológicos y químicos los que se encargan de eliminar la mayoría de materia orgánica. En el tratamiento terciario se utiliza combinaciones adicionales de los procesos y operaciones unitarias para eliminar otros componentes, tales como el nitrógeno y el fósforo, que no son eliminados por el tratamiento terciario. (ROMERO, 2002), (CRITES y TCHOBANOGLIOUS 2000).

El sistema construido fue un reactor de lodos activos que opera en condiciones discontinuas, es decir un tipo SBR o batch, este tipo de reactores se carga y se deja reaccionar durante un periodo de tiempo definido para las condiciones del tratamiento que se desean, luego se deja sedimentar y el sobrenadante es descargado para volver a ser cagado y continuar el ciclo de tratamiento, periódicamente se evacuar una cantidad de lodos excedentes para controlar la edad de los lodos presentes en el sistema. (RAMALHO, 1991)





El reactor construido para el presente trabajo estaba constituido por una cuba de reacción en vidrio y los aireadores eran pequeños compresores usados en peceras ornamentales, el agitador se construyó con el motor de un ventilador y se hicieron orificios en tres puntos distintos del reactor para realizar la descarga del agua residual y la purga de lodos.

El sistema fue llenado y recargaba con agua residual fresca cada dos días para obtener una cantidad de biomasa activa suficiente para realizar el ensayo que permitiera determinar los coeficientes cinéticos que gobiernan el proceso de degradación aerobia. Para la determinación de la cinética del proceso se emplearon dos planteamientos propuestos por dos autores, con base en estos dos planteamientos se determinaron los coeficientes que pueden ser empleados para realizar el adecuado diseño de un reactor de este tipo a escala real, aplicable para las características climáticas de la región. (GIRALDO, G.I. 2000)

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Constantes de Reactores por Lotes

Este método procura encontrar los coeficientes cinéticos y estequiométricos en un único ensayo, en el cual a un cultivo de lodos debidamente aclimatados a una edad de lodos específica, se le inyecta el sustrato que se quiere analizar y se observa su comportamiento cada hora (o cada cierto tiempo). Es conveniente advertir que este

procedimiento es menos recomendable, pues no simula adecuadamente las condiciones de un tratamiento continuo. Sin embargo existen a escala real Reactores por Lotes Secuenciales, (Sequencing Batch Reactors, SBR) que pueden ser simulados de esta manera. Por otro lado, también se pueden obtener los coeficientes cinéticos y estequiométricos para reactores de flujo continuo con ciertos artificios de cálculo. Es claro que con este tipo de ensayo no se pueden encontrar condiciones de operación para diferentes edades de lodos, pues la aclimatación se efectúa para una sola edad, como se explicó antes. Los coeficientes obtenidos varían, en general, en comparación con los obtenidos por flujo continuo. Sin embargo, a veces es el único método que se puede implementar de modo que conviene conocerlo para aplicarlo en estos casos especiales, teniendo en cuenta, eso sí, las reservas expresadas. Lo primero que hay que hacer en los ensayos piloto por lotes, con reactores completamente mezclados, es graficar cada parámetro medido, principalmente la DQO1 (o DBO5) y los SSV, contra el tiempo, y se le ajusta, a mano alzada o con curvígrafo, la curva que mejor se adapte, según se muestra en la Figura 1. (JARAMILLO O. A. 2005)

Aquí se debe desplegar mucho criterio, pues a menudo las observaciones son algo erráticos, por lo que se conviene ajustar curvas que tengan el comportamiento esperado. Es necesario descartar los primeros puntos a

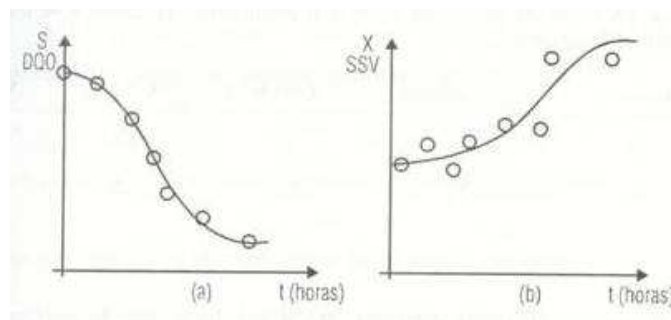


Figura 1. Variación de DQO y SSV vs. Tiempo





veces, pues aquí ocurren circunstancias de aclimatación que no son las típicas en el TAR. La curva de la DQO vs. t debe disminuir luego en forma exponencial o similar. Los SSV deben crecer aproximadamente en forma constante (o exponencial) para terminar en una fase de estabilización.

Para el cálculo de coeficientes cinéticos para lagunas aireadas, no se analizan los SSV, sino sólo la DQO vs. t. La variación debe ser del tipo, graficando en papel semi-logarítmico Ln S/S₀ vs. T debe encontrarse la constante cinética de remoción de sustrato, K_L, como se ve en la Figura 2

$$S = S_0 * e^{K_L * t} \quad (1)$$

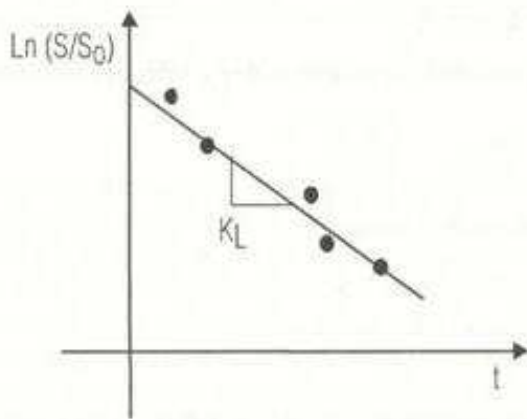


Figura 2. Constante Cinética De Remoción De Sustrato En Lagunas Aireadas

Para el cálculo de los parámetros necesarios en los lodos activados y en general, en los procesos de TAR, se toman datos de las curvas ajustadas, en lugar de los reales (que dan resultados erráticos) y se forma la tabla 1 del siguiente modo: [4]

Tiempo X (Calculado) S (Calculado)

$$\Delta X = X_{i-1} - X_i \quad S = S_{i-1} - S_i$$

Tabla 1. Cálculo de los parámetros en los lodos.

Tie mpo	X calculado	S (Calculado)	$\Delta X = X_{i-1} - X_i$	$S = S_{i-1} - S_i$
t ₀	X ₀	S ₀	ΔX_0	ΔS_0
t ₁	X ₁	S ₁	ΔX_1	ΔS_1
.

Que nos permite construir datos para utilizar las ecuaciones propuestas como se muestra en la tabla 2:

Tabla 2. Datos a partir de las ecuaciones

$\bar{S} = \frac{S_i + S_j}{2}$	$X = \frac{X_i + X_j}{2}$	$\frac{\Delta S}{X \Delta t}$	$\frac{\Delta X}{X \Delta t}$	$\frac{S}{X}$
S ₀	X ₀	U ₀	G ₀	(S/X) ₀
S ₁	X ₁	U ₁	G ₁	(S/X) ₁
.

De los datos así generados se procede graficar:

2.1.1 Remoción de Sustrato

$$\frac{\Delta S}{X \Delta t} = \frac{S_1 \bar{S}}{k_s + \bar{S}} \cdot \frac{1}{\bar{X}} \quad (2)$$

Obteniendo las constantes cinéticas del figura de Lineweaver – Burk.

$$\frac{\bar{X} \Delta t}{\Delta S} \quad \text{Vs.} \quad \left[\frac{\bar{S}}{\bar{X}} \right]^{-1}$$

2.1.2 Producción de Biomasa

$$\frac{\Delta X}{\bar{X} \Delta t} \quad \text{Vs.} \quad \frac{\Delta S}{X dt}$$





2.1.3 Consumo de Oxígeno

El consumo de oxígeno requerido para realizar el proceso de tratamiento biológico en condiciones aerobias, se deduce de la siguiente relación estequiométrica:

$$-\frac{dO_2}{Xdt} = \frac{dS}{Xdt} - 1.42 \frac{dX}{Xdt} \quad (4)$$

Donde:

$$-\frac{dO_2}{Xdt} \quad \text{Oxígeno consumido (mgO}_2\text{/l)}$$

-1.42 es el factor estequiométrico de conversión de mg SSV/l a mgO₂/l.

2.2 Aireación y Transferencia de Masa

Para que en el tratamiento biológico de las aguas residuales se lleven a cabo las reacciones químicas y biológicas, es necesario transferir sustancias dentro y fuera del agua residual. El material transferido puede ser gas, líquido o sólido, y puede ser vital para el mantenimiento de las reacciones aerobias que son el fundamento de los lodos activados y los filtros biológicos.

Aquí se va exponer las teorías más aceptadas para obtener las fórmulas de cálculo, que garanticen que el oxígeno necesario para que el proceso, sea efectivamente transmitido al agua residual por el mecanismo de aireación adoptada.

La tasa de suministro de oxígeno al AR debe ser suficiente para que se satisfaga la demanda de oxígeno de las reacciones aerobias.

Existen varias teorías que explican los mecanismos por los cuales ocurre la transferencia de oxígeno, siendo la más ampliamente aceptada la teoría de las dos capas. (JARAMILLO O. A. 2005)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se diseñó un reactor de lodos activos que opera en condiciones discontinuas SBR como se muestra en la figura 4, donde se cargó el

reactor con aguas residual y se dejó reaccionar durante un periodo de tiempo definido para obtener las condiciones óptimas para el tratamiento del agua residual. Luego se dejó sedimentar un tiempo y el sobrenadante es descargado por medio de un sistema de purga, para volver a ser cargado y continuar el ciclo de tratamiento; periódicamente se evacuó una cantidad de lodos excedentes para controlar la edad de los lodos presentes en el sistema. El reactor fue construido en una cuba de geometría rectangular con material de vidrio y un volumen total de 30 litros, se utilizaron compresores pequeños como sistemas de aireación y para la agitación se construyó un mecanismo por medio de un motor y palas del rodete axial situadas de forma paralelas al eje vertical del agitador y del tanque. Se realizaron ensayos durante 9 horas y en el cual se recolectaron muestras cada hora y media, a estas muestras se le determinaron DBO₅, SSV, SST, OD y SS, con esta información se aplicaron dos planteamientos que permitieran encontrarlos coeficientes cinéticos que gobiernan el proceso de degradación y crecimiento biológico, y con los sólidos sedimentables redeterminaron las características de sedimentación del sólidos generados durante el proceso.



Figura 4. Representación Esquemática del Reactor Tipo (SBR)





Tabla 5. Datos generales recolectados

Tiempo (H)	DBO ₅ (ppm)	SSV (ppm)	SST (ppm)	OD (ppm)
0,0	270,0	745,0	1241,0	0,0
1,5	234,0	760,0	1263,0	0,3
3,0	176,0	890,0	1462,0	0,9
4,5	131,0	1004,0	1628,0	1,4
6,0	89,0	1121,0	1810,0	2,0
7,5	46,0	1210,0	1980,0	2,6
9,0	39,0	1240,0	2010,0	3,2

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha realizado un total de nueve muestreos en el reactor SBR como se muestra en la tabla 5. Las determinaciones analíticas realizadas han sido: Oxígeno disuelto (OD), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅). Los métodos analíticos han sido extraídos del Standard Methods for the Examination of Water (APHA, 1995).

4.1 Determinación de la Cinética de Degradación

4.1.1 Cinética Pseudos Monod (Orozco) Para Sustrato.

Los resultados obtenidos fueron procesados por el método planteado por Orozco, para obtenerlos coeficientes cinéticos que gobiernan los procesos de degradación de sustrato y de crecimiento de biomasa. El modelo cinética planteado por Orozco es un modelo muy similar al modelo cinético de Monod y requiere de la determinación de dos coeficientes para poder establecer el comportamiento del sistema y así emplear la información recolectada en el diseño de sistemas de tratamiento biológico.

El modelo para el crecimiento de biomasa también es un modelo muy similar al modelo de Monod y requiere también de dos coeficientes cinéticos para poder representar el comportamiento de la biomasa activa contenida en el reactor, que es la encargada de realizar la degradación del Sustrato que se desee eliminar.

Explícitamente el modelo planteado por Orozco

debe ser linealizado para poder llegar a una ecuación que permita determinar por regresión lineal a partir de los valores de los diferentes coeficientes cinéticos involucrados en los dos procesos analizados. La información requerida para la linealización planteada por Orozco se presenta en las tablas 1 y 2. En la tabla 6 se puede observar la información requerida para la realización de las regresiones que permiten determinar los diferentes coeficientes cinéticos para cada modelo analizado. En las figura 5 y 6 se muestra la linealización para el sustrato y la biomasa respectivamente. Para la realización de las linealizaciones se omitieron los datos de la primera hora y media del ensayo debido a la aclimatación de las bacterias.

A partir de la figura 5 se obtienen los coeficientes k_0 y k_c particulares para el sistema estudiado, obteniendo la ecuación (5) de diseño para la remoción de sustrato.

$$\frac{dS}{Xdt} = \frac{0.039.(S/X)}{0.3332 + (S/X)} \quad (5)$$

4.1.2 Método de Flujo Pistón Para Sustrato.

El segundo método empleado para la determinación de los coeficientes cinéticos fue el método del flujo pistón, este método se basa en el principio de reactores de mezcla completa operando en serie, que es equivalente a tener un reactor de flujo pistón del tamaño igual a la suma de los tamaños de los reactores de mezcla completa operando en pequeños tiempos de retención, como es el reactor SBR.

En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos para la linealización requerida para la determinar los coeficientes cinéticos propios del flujo pistón en función del tiempo de duración de la prueba como se muestra en la figura 6 para la remoción de sustrato

Los coeficientes cinéticos aquí encontrados fueron empleados para realizar la simulación de las características para un reactor SBR, estableciendo los tiempo óptimos de tratamiento del agua residual dentro de este tipo de sistema.





Tabla 6. Información requerida para linealizar el modelo cinético propuesto por Orozco

ds/dt	dx/dt	Sprom	x prom	ds/x*dt	dx/x*dt	s prom/x prom	1/(ds/x*dt)	1/(s prom)	prom/x
-24,00	10,00	252,0	752,5	0,03189	0,01329	0,33488	31,35417	2,98611	
-38,67	86,67	205,0	825,0	0,04687	0,10505	0,24848	21,33621	4,02439	
-30,00	76,00	153,5	947,0	0,03168	0,08025	0,16209	31,56667	6,16938	
-28,00	78,00	110,0	1062,5	0,02635	0,07341	0,10353	37,94643	9,65909	
-28,67	59,33	67,5	1165,5	0,02460	0,05091	0,05792	40,65698	17,26667	
-4,67	20,00	42,5	1225,0	0,00381	0,01633	0,03469	262,50000	28,82353	

Tabla 7. Datos utilizados para las regresiones y resultados de regresión para el modelo de Orozco para sustrato.

1/(s prom/x prom)	1/(ds/x*dt)
2,98611	31,35417
4,02439	21,33621
6,16938	31,56667
9,65909	37,94643
17,26667	40,65698
28,82353	262,50000
Sustrato	
R	0,89552
B=m=(Kc/Ko)	-0,21891
A=b=1/Ko	-0.02395

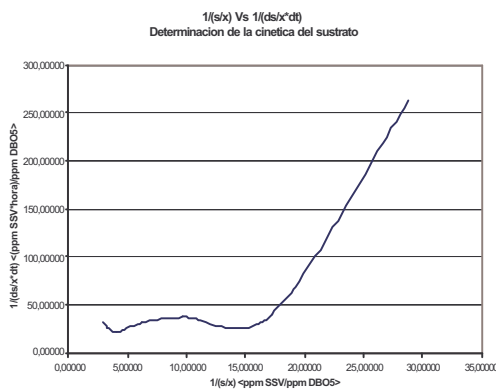


Figura 5. Linelización de Orozco para Sustrato

A partir de la figura 6 y por medio de un tratamiento estadístico básico se obtienen los coeficientes cinéticos y estequiométricos k_0 y k_c particulares para el sistema estudiado, obteniendo la ecuación (6) de diseño para la remoción de sustrato.

$$S = S_0 * e^{-0.23 * t} \quad (6)$$

Tabla 8. Datos para la lineación de flujo de pistón en sustrato

Tiempo $$Horas>	LN(S/S ₀)	Sustrato	
0,0	0	r	-0,9834
1,5	0,143100844	B=m=K	-0,2319
3,0	0,427937964		
4,5	0,723224636		
6,0	1,109785589		
7,5	1,769780563		
9,0	1,934860313		

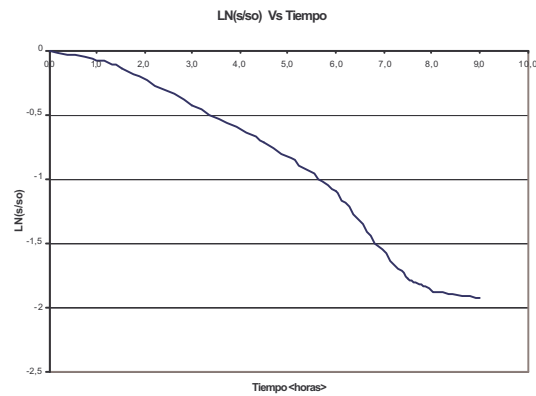


Figura 6. Linelización de flujo pistón para sustrato.

4.1.3 Producción de biomasa

La identificación de la cinética para la producción de biomasa es importante para establecer los tiempos necesarios para realizar la purga de lodos del reactor, con el fin de llevar un correcto control de la edad de los lodos fundamental dentro de los procesos de degradación.





De la tabla 6 se utiliza los datos $ds/x*dt$ y $dx/x*dt$ para la regresión de la obtención de la biomasa a partir del modelo de Orozco, como se muestra en la figura 7.

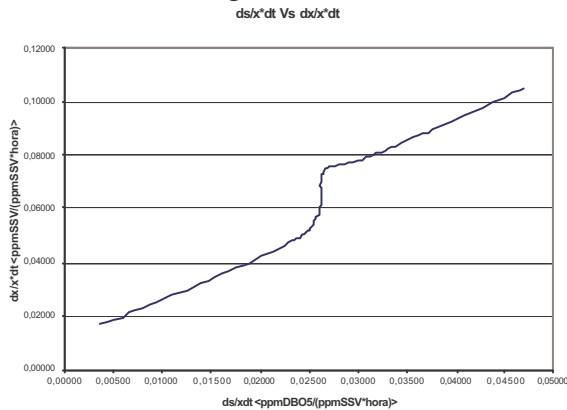


Figura 7. Linelización de Orozco para Biomasa

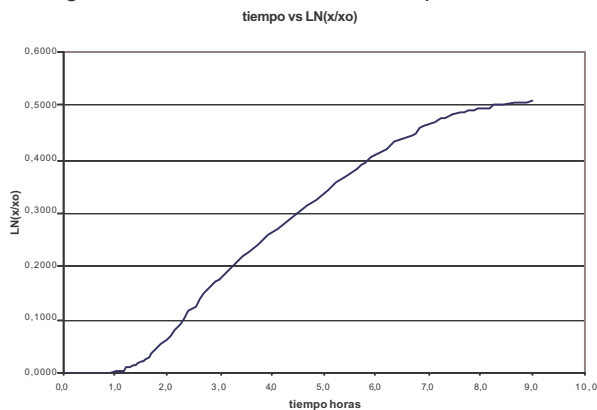


Figura 8. Linelización de flujo pistón para Biomasa.

Utilizando el mismo procedimiento para el sustrato, por medio de un tratamiento estadístico básico y a partir de la figura 7 y 8, se obtienen los coeficientes cinéticos y estequiométricos k_0 y k_c por el método de Orozco y el Flujo pistón se obtienen las ecuaciones (7 y 8) de diseño para la producción de biomasa respectivamente.

$$\frac{dX}{Xdt} = 2.1086 \frac{dS}{Xdt} + 0.009 \quad (7)$$

$$X = X_0 * e^{0.054 * t} \quad (8)$$

5. CONCLUSIONES

El reactor implementado es útil para el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales presenten descargas discontinuas o intermitentes, es decir, para descargas de aguas residuales que no tengan un caudal constante y que en ciertos periodos de tiempo su caudal sea nulo.

Los altos tiempos de retención que se pueden emplear en este tipo de reactor favorece en gran medida la nitrificación, lo que ayudaría a la disminución de nutrientes en el efluente de la planta.

Se debe anotar que durante el periodo de aclimatación y crecimiento de biomasa se observó que el aumento de biomasa era bajo, este problema fue solucionado adicionando al reactor vitamina B y soluciones de fosfatos que permitieran estabilizar el pH del agua y que proporcionaran los nutrientes adicionales que las bacterias requieren para su adecuado desarrollo.

La biomasa presente en el reactor presento muy buenas características de sedimentación lo que reduce el tiempo entre carga y descarga, es decir, se pueden incrementar el número de batches o cochadas que puede tratar el reactor diariamente para tratar una mayor cantidad de agua residual.

El sistema de aireación empleado para el trabajo cumplió con su finalidad, pero se observo que no es suficiente para realizar la mezcla completa del liquido presente en el reactor, por este motivo se implemento un dispositivo de agitación para realizar la mezcla del agua presente en el reactor, el hecho que el sistema de aireación no contribuya significativamente a la mezcla del liquido contenido en el sistema, representa un costo adicional que posiblemente sea incosteable.

Se debe aumentar el número de parámetros analizados durante los ensayos para poder determinar si el sistema requiere de la adición de nutrientes y de buffers para mantener el pH del agua en valores adecuados para la





supervivencia de las bacterias encargadas de la degradación.

Por medio de un tratamiento estadístico básico se obtuvieron los coeficientes cinéticos y estequiométricos; y las ecuaciones características para la remoción de sustrato y la producción de biomasa utilizando el modelo de Orozco y de Flujo pistón, que van incidir en el diseño del reactor y la eficiencia del proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th edition. American Public Health Association, Washington, D.C. 1995.
- CRITES Ron; TCHOBANOGLIOUS George. Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones. Editorial MC GRAW – HILL INTERAMERICANA. 2000.
- GIRALDO, Gloria Inés. Manual de Análisis de Aguas. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. 2002
- JARAMILLO OROZCO, Álvaro. Bioingeniería de aguas residuales. Teoría y Diseño. Editorial Escuela colombiana de Ingeniería. Acodal. 2005.
- METCALF, hedí. Ingeniería sanitaria, tratamiento, evacuación y reutilización de las aguas residuales. Colombia: Centenario. 1994.
- RAMALHO, Sette Rubens. Tratamiento de aguas residuales. Illinois: Reverts S.A. 1991.
- ROMERO, Jairo A. Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y Principios de Diseño. Editorial Escuela colombiana de Ingeniería. 2002.

