

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE LODOS ACTIVADOS A ESCALA DE LABORATORIO

TREATMENT OF RESIDUAL WATERS BY MEANS OF ACTIVATED MUDS

L. Méndez*, V. Miyashiro*, R. Rojas**, M. Cotrado*** N. Carrasco****

RESUMEN

Se realizó la prueba de tratamiento de aguas residuales a escala de laboratorio. Para lo cual se ha diseñado un módulo compuesto por 6 minirreactores, los cuales son una adaptación de los mostrados en la bibliografía. Las ecuaciones empleadas fueron deducidas según los procedimientos de Eckenfelder (1970) y Metcalf & Eddy (1998).

Con los resultados analíticos obtenidos se determinó las constantes cinéticas de crecimiento biológico, a escala de laboratorio, utilizando el método de lodos activados.

Las constantes cinéticas obtenidas empleando un agua residual sintética fueron:

a : 0,8763 (Parámetro de utilización de oxígeno para la oxidación de sustrato), b : 0,0744 (Parámetro de utilización de oxígeno utilizado en la respiración endógena), Y : 0,0494 (Coeficiente de producción de biomasa por consumo de sustrato), k_d : 0,00048 d⁻¹ (Coeficiente de consumo de biomasa por respiración endógena), k : 0,0025 h⁻¹.L/mg (Constante de velocidad de consumo de sustrato). Las aguas residuales fueron suministradas a cada minirreactor mediante un dosificador, el mismo que fue abastecido por medio de una bomba peristáltica. Encontrándose dificultades en la distribución apropiada de los caudales. Por lo cual se recomienda realizar el experimento con una bomba peristáltica para cada unidad de los minirreactores, pues los dosificadores utilizados tuvieron dificultad en operar óptimamente al obstruirse continuamente.

Palabras claves: Tratamiento de aguas residuales, lodos activados, constantes cinéticas, biomasa, escala de laboratorio.

ABSTRACT

The experiment was carried out at the laboratory scale. For this purpose a system with 6 mini reactors was designed, adapted from the literature. The used equations were deduced from the Eckenfelder (1970) and Metcalf & Eddy (1998) proceedings.

The kinetics constants of biological growth at laboratory level were obtained using the activated sludge method.

The obtained kinetic constants with synthetic wastewater were:

a : 0,8763 (Parameter of oxygen utilization to substrate oxidation). b : 0,0744 (Parameter of oxygen utilization to substrate oxidation in the endogenous respiration). Y : 0,0494 (Ratio of the mass of cells formed to the mass of substrate consumed). k_d : 0,00048 d⁻¹ (Endogenous decay coefficient). k : 0,0025 h⁻¹.L/mg (Velocity constant of substrate utilization).

The wastewater were supplied to each mini reactor trough a dosificator and a peristaltic pump. It was found difficulty in the water flow distribution. It is recommended to carry out the experiment, pumping wastewater with a peristaltic pump to each mini reactor, because the used dosificator got obstructed frequently.

Keywords: Wastewater treatment, activate sludge, kinetic constants, biomass, laboratory scale.

* Universidad Nacional Agraria La Molina - Facultad de Ciencias. E-mail: leonor_mendez@hotmail.com, vmk@lamolina.edu.pe

** Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. E-mail: rrojas@cepis.ops-oms.org

*** Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Química y Manufacturera. E-mail: mariela_cotrado@hotmail.com

**** Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Museo de Historia Natural. E-mail: nancycarrascoa@hotmail.com

I. INTRODUCCIÓN

El método de tratamiento mediante lodos activados se desarrolló por primera vez en Inglaterra en el año 1914 y actualmente es el método estándar de tratamiento de aguas residuales en los países desarrollados.

En el Perú, al concluir el año 1998 se alcanzó el nivel de cobertura en agua potable de 58,4% y en alcantarillado de 47,0% (CEPIS, 2000).

En el país se generan alrededor de 30 m³/s de aguas residuales domésticas y se tratan 4,3 m³/s que representa al 14%, resultando que el 86% es descargado sin ningún tratamiento a los ríos, lagos, quebradas o mar (Yupanqui, 2001).

Debido a la necesidad de tratar el 86% de las aguas residuales, se pretende, con este estudio contribuir en el desarrollo de una alternativa de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados, que sea diseñado con constantes cinéticas obtenidas experimentalmente de acuerdo a nuestra realidad.

Lodos activados

Una planta de lodos activados es un sistema de mezcla completa. Su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo en medio aerobio. Este método está provisto de un sistema de recirculación y eliminación de lodos. El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de aereadores mecánicos, que también sirven para mantener el líquido en estado de mezcla completa. Al cabo de un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las antiguas se conduce hasta un tanque de

sedimentación para ser separados por sedimentación del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas se recirculan para mantener en el reactor la concentración de células deseadas, mientras que la otra parte se purga del sistema. La fracción purgada corresponde al crecimiento del tejido celular.

Relaciones cinéticas

El estudio de la cinética del tratamiento biológico aerobio conduce a determinar la velocidad a la cual los microorganismos degradan un residuo específico, suministrando información básica necesaria para diseñar el tamaño de los reactores biológicos aerobios. Este estudio se lleva a cabo, convenientemente, en un reactor continuo o discontinuo de laboratorio. El agua residual conteniendo un inóculo de microorganismos (el inóculo puede ser una masa de lodos activos procedentes de una planta en operación o aguas residuales decantadas) se introduce en los reactores y se aplica aire comprimido dentro del sistema. El lodo biológico, medido como Sólidos Suspending Volátiles en el Licor de Mezcla (SSVLM), se mantiene en un estado de mezcla completa debido a la agitación proporcionada por el aire inyectado en el sistema. Se determina la concentración de sustrato (S) del agua residual medida como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). En la figura 1 se presentan curvas típicas de disminución de la concentración de sustrato soluble «S» y variación de la cantidad de SSVLM con el tiempo.

La concentración de sustrato soluble «S» del agua residual, que es una medida de la concentración de materia orgánica, decrece con el tiempo conforme dicha materia orgánica se oxida.

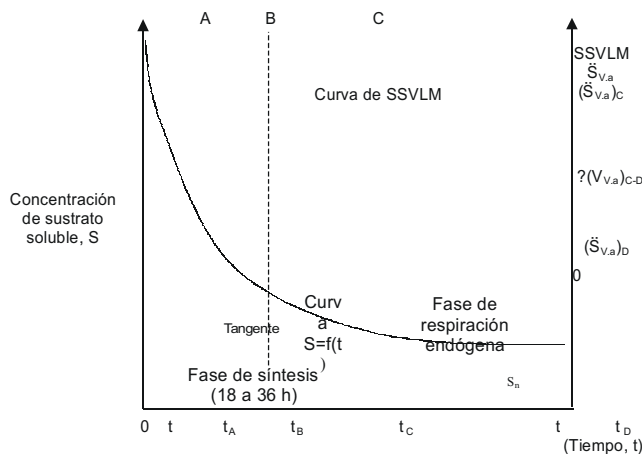


Figura N.º I. Curvas típicas de la concentración de sustrato soluble y de los SSVLM en un reactor discontinuo.

Las líneas verticales A, B y C de la figura 1 corresponden a condiciones típicas de operación de reactores continuos. Los tiempos t_A , t_B y t_C corresponde a estos tipos de reactores.

La línea B corresponde al proceso convencional de lodos activados. En este caso hay una producción neta de SSVLM (pendiente positiva). Hay una reducción de DBO del 85 al 95% y la concentración de SSVLM está en el rango de 2000 a 3000 mg/L.

La línea C corresponde al proceso de aeración prolongada. En este caso la producción neta de SSVLM es teóricamente nula (la tangente a la curva SSVLM es paralela al eje de abscisas). Los valores de equilibrio que corresponden a la intersección de la línea C con la curva SSVLM están en el intervalo 3000 a 6000 mg/L.

La línea A corresponde al proceso de lodos activados a carga elevada. El intervalo normal para los valores de equilibrio de SSVLM está entre 600 a 1.000 mg/L. (Ramalho, 1993).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental se realizó en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Ambiental, Física y Meteorología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y en la Unidad de Apoyo Técnico para el Saneamiento Básico del Área Rural (UNATSABAR) del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). La evaluación bio-

lógica se realizó en el laboratorio de Limnología del Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y en el laboratorio de biología de la UNALM. El proyecto se inició en setiembre de 2001 y concluyó en agosto de 2003.

2.1. Materiales

El Esquema del funcionamiento del sistema a escala de laboratorio se presenta en la figura 3. El sistema está formado por seis pequeños reactores, construidos con planchas acrílicas, cada reactor tiene una capacidad de 11l y se encuentran uno al lado del otro, representan simplificadaamente a un reactor con su correspondiente sedimentador y tienen dos salidas que permiten la salida del afluente tratado y el drenaje de los excesos de lodo.

En un tanque se almacenó el agua residual sintética o natural a ser tratada, el cual fue bombeado mediante una bomba peristáltica hacia un sistema de distribución que aplicó diferentes caudales hacia cada uno de los seis reactores, permitiendo diferentes tiempos de retención. Al mismo tiempo cada uno de los seis reactores recibieron la dotación de aire a través de un sistema de distribución cuya fuente fue un compresor de aire. Cada reactor constó de dos zonas (mezcla completa y sedimentación de lodos).

En la identificación de los organismos indicadores de calidad de aguas residuales se utilizó un microscopio marca OLYMPUS CH 40, y un estereoscopio marca Leica.

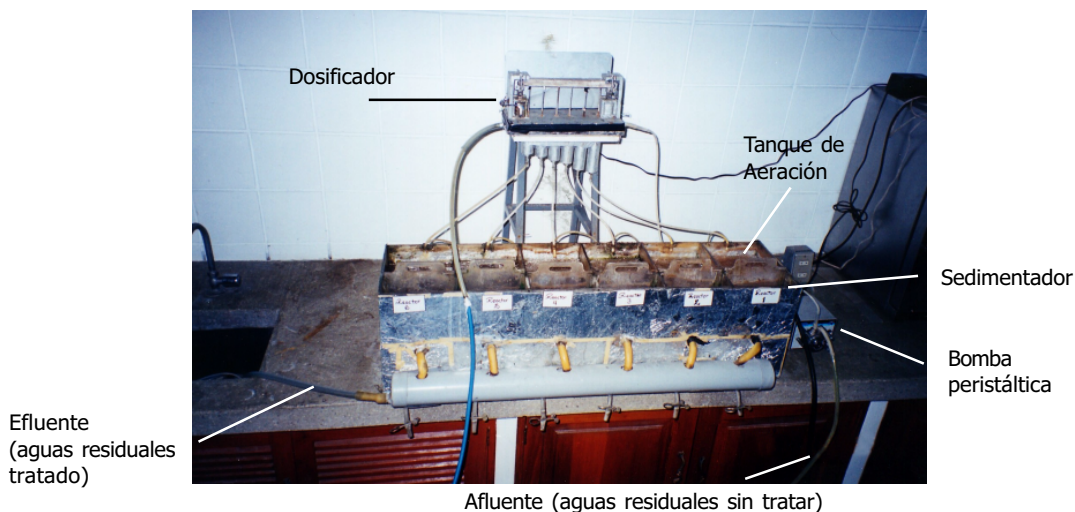


Figura N.º 2. Esquema del funcionamiento del sistema a escala de laboratorio (fotografía Leonor Méndez).

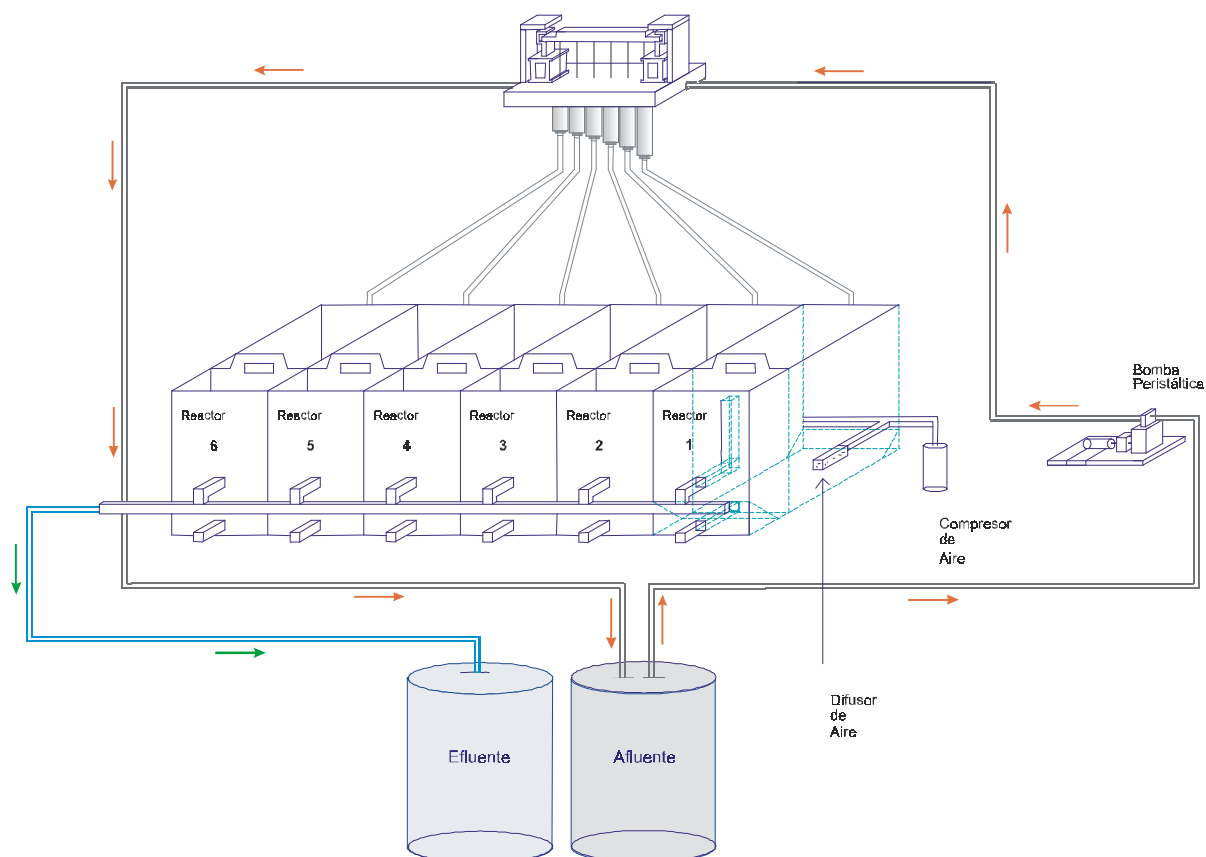


Figura N.º 3. Sistema de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a nivel de laboratorio.

En la figura 3 se presenta el esquema teórico del sistema de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a nivel de laboratorio.

2.2. Metodología

En el presente proyecto se determinó las constantes cinéticas de crecimiento biológico a escala de laboratorio, utilizando el método de lodos activados (flujo continuo, sin recirculación, debido a la facilidad para controlar las condiciones experimentales). (Eckenfelder, 1970).

Los dos primeros reactores que trabajaron con tiempos de retención hidráulico (t_h) de 6h y 8h corresponden a la operación convencional y las demás que trabajaron con (t_h) en el rango teórico de 12-36h corresponden a la operación de aeración prolongada.

Programa experimental

El programa experimental tuvo dos etapas consecutivas, realizadas de acuerdo a los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales.

La primera etapa estuvo orientada a demostrar la tratabilidad de las aguas residuales preparadas con un sustrato sintético de composición conocida, el cual permite controlar las condiciones iniciales requeridas para la inicialización y calibración del sistema.

La segunda etapa estuvo dirigida a determinar las constantes cinéticas a partir del sistema de tratamiento con aguas residuales crudas provenientes de la planta piloto de leche de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Puesta en marcha del sistema y estabilización- primera y segunda etapa

Preparación del sustrato sintético

Se preparó el sustrato sintético con la fórmula previamente establecida, incluyendo las cantidades de nitrógeno y fósforo que cubran el requerimiento de los microorganismos. Se usaron los sustratos de acuerdo a la siguiente formulación:

Tabla N.º I. Composición química del sustrato sintético.

Sustrato N.º 1 (DIN 38412)		Sustrato N.º 2 (Univ. Valencia, 2000)	
Compuestos	(mg/L)	Compuestos	(mg/L)
Peptona	160	Gelatina	34
Extracto de carne	110	Almidón	171
Úrea	30	Leche en polvo	102
KH ₂ PO ₄	28	Jabón de tocador	3
NaCl	7	MgSO ₄ ·7H ₂ O	3
CaCl ₂ ·2H ₂ O	4	KH ₂ PO ₄	44,5
MgSO ₄ ·7H ₂ O	2	(NH ₄) ₂ SO ₄	74,2
		NaHCO ₃	150

El sustrato fue almacenado en un bidón de 120 L de capacidad, siendo la alimentación diaria de 90 L/d.

Acondicionamiento de los lodos para inocular

El inóculo (siembra de microorganismos) usado fue extraído de la planta de lodos activados de Los Jardines de la Paz, La Molina. La adaptación de las especies no fue inmediata demandando, aproximadamente, 6 días su aclimatación. Además, se inoculó estiércol de ganado vacuno y abono de jardín (cepas biológicas), a fin de acelerar el crecimiento microbiano.

Puesta en marcha del sistema

- Se llenó cada reactor con el lodo cultivado y una cantidad adicional de sustrato.
- Se puso en marcha el sistema con el encendido del compresor proveyendo de aire a todos los reactores.
- Se encendió la bomba peristáltica, la cual estuvo conectada al dosificador de sustrato, el cual funciona automáticamente dosificando una cierta cantidad de sustrato, dependiendo del tiempo de retención hidráulico de cada reactor. El caudal suministrado fue como sigue:

- EL agua residual dentro de cada reactor fue aerado hasta obtener una concentración inicial de SSVLM de 2.400 mg/L, aproximadamente. Para lograr esta concentración se alimentó el sistema con sustratos de diferentes concentraciones de DBO₅, iniciándose con 300 mg/L.
- Inicialmente se realizó la alimentación con el sustrato N.º 1 que tuvo una concentración menor de 100 mg/L de DBO₅, siendo este valor muy bajo para el crecimiento de los microorganismos y además que el reactor tendía a acidificarse, por el cual los lodos no lograron estabilizarse. Esto condujo a utilizar el sustrato N.º 2 con el cual pudo alcanzarse un buen equilibrio en cada uno de los minirreactores alcanzando el valor de SSVLM de 2.400 mg/L con una DBO₅ del sustrato de 146 mg/L.
- En la segunda etapa se trabajó con un afluente real, es decir, un agua residual cruda de la planta piloto de leche de la Universidad Agraria La Molina. La DBO₅ de las aguas residuales de esta planta tuvo un valor promedio de 226 mg/L.
- Se mantuvo el licor de mezcla a un pH neutro agregando H₂SO₄ para disminuirlo o NaOH para aumentarlo.
- Se alimentó al sistema en flujo continuo hasta alcanzar las condiciones de equilibrio, esto es, cuando la VUO (Velocidad de Utilización de Oxí-

Tabla N.º 2. Volumen del reactor y tiempo hidráulico.

Reactor N.º	1	2	3	4	5	6
Volumen del reactor, V (L)	10,32	10,15	10,15	10,25	10,26	10,05
Caudal, Q (mL/min)	27,0	20,0	12,0	7,4	5,8	3,7
Tiempo hidráulico, t _h (h)	6	8	15	23	29	45

- Se tomaron muestras de licor completamente mezclado, elevando los deflectores con la finalidad de hallar los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSVLM) de cada reactor, los que se busco mantener en los valores previamente establecidos.

geno) en el licor mezclado y la DBO en el efluente tuvieron un comportamiento asintótico después de varios análisis.

- Para el análisis microscópico se tomaron muestras en cada tanque de aeración, en frascos

de polietileno de 250 mL de capacidad, en un volumen no mayor de los dos tercios de su capacidad y trasladada de inmediato al laboratorio para el análisis respectivo.

El análisis cualitativo preliminar se realizó usando muestras frescas de preparados acuosos simples, posteriormente la cuantificación se realizó en muestras fijadas en formol azucarado al 4% y teñidos de acuerdo a la necesidad. Para la cuantificación se empleó el método de la cámara Sedwick Rafter (S-R) y el método de la gota de Lackey.

Determinaciones analíticas - primera y segunda Etapa

Una vez que se llegó al equilibrio, se realizaron los siguientes análisis de acuerdo al cronograma presentado en la tabla 3 (Eckenfelder, W.W., 1970):

Se realizó mediciones repetitivas hasta que se obtuvo resultados consistentes que tuvieron un grado de confianza aceptable. Los parámetros en mención se controlaron desde la puesta en marcha de los minirreactores para asegurar el buen funcionamiento del sistema. Los análisis se realizaron siguiendo los métodos estándares de agua (APHA-AWWA-WEF,1999).

III. RESULTADOS DE ANÁLISIS

Los resultados obtenidos de un promedio de tres mediciones fueron empleados para hacer los cálculos respectivos de las constantes cinéticas, para lo cual se graficó y obtuvo los valores respectivos.

Tabla N.º 3. Parámetros y frecuencia de mediciones.

Análisis	Frecuencia	Afluyente (1)	Licor mezclado (2)	Efluente (3)
Demanda Bioquímica de O₂ (DBO₅, mg/L)	3/semana	§		§
pH y Temperatura	diario	§	§	§
Sólidos Suspendidos (SS, mg/L) y Sólidos Suspendidos Volátiles del Licor de Mezcla (SSVLM, mg/L)	3/semana		§	§
Velocidad de Utilización de O₂ (VUO, mg/L/día)	3/semana		§	
O₂ Disuelto (OD, mg/L)	diario		§	
Índice Volumétrico de Lodos (IVL, mL/g)	3/semana		§	§
Análisis microscópico	1/semana		§	

(1) Muestra tomada de las aguas residuales sintéticas o crudas.

(2) Muestra tomada del reactor sin deflector.

(3) Muestra tomada del bidón del efluente.

Cinética del consumo

Tabla N.º 4. Datos para la obtención de la cinética del consumo.

Reactor N.º	DBO₅ afluente (Mg/L) S₀	Caudal Q₀ (L/h)	Tiempo hidráulico tₕ = V/Q (h)	SSVLM (mg/L) S̄ᵥ,ₐ	F/M = S₀/S̄ᵥ,ₐ · tₕ mg DBO₅ aplicada/mg SSVLM.d	Índice Volumétrico de Lodos IVL (mL/mg)
AGUAS RESIDUALES SINTÉTICAS						
1	146	1,62	6	2.667	0,206	58,6
2	146	1,20	8	2.587	0,160	91,0
3	146	0,66	15	2.680	0,085	177,6
4	146	0,44	23	2.683	0,057	214,8
5	146	0,35	29	2.766	0,043	151,3
6	146	0,22	45	1.722	0,045	336,4
AGUAS RESIDUALES CRUDAS						
1	226	1,62	6	6.267	0,136	95,7
2	226	1,20	8	1.980	0,324	290,4
3	226	0,66	15	1.260	0,280	238,1
4	226	0,44	23	3.010	0,078	299,0
5	226	0,35	29	2.810	0,065	329,2
6	226	0,22	45	2.870	0,042	339,7

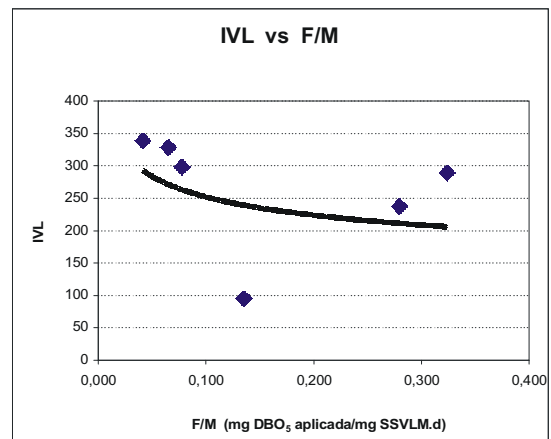
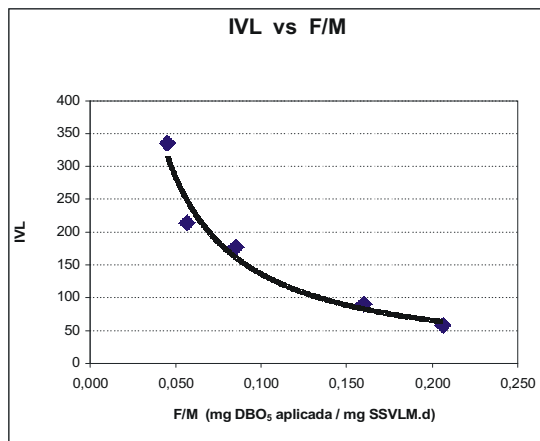


Figura N.º 4. Índice Volumétrico de Lodos versus F/M Aguas residuales sintéticas (izquierda) y Aguas residuales crudas (derecha).

Velocidad específica de consumo de sustrato

La Constante de velocidad de consumo del sustrato es la siguiente:

	Aguas residuales sintéticas	Aguas residuales crudas
k (h ⁻¹ .L/mg)	0,025	0,006
k (d ⁻¹ .L/mg)	0,600	0,144

Parámetros de utilización del oxígeno

La fracción de sustrato usado por oxidación (*a*) y la fracción de sólidos suspendidos volátiles oxidados por día (*b*) son los siguientes:

	Aguas residuales sintéticas	Aguas residuales crudas
<i>a</i>	0,8763	0,4756
<i>b</i> (h ⁻¹)	0,0031	0,0028
<i>b</i> (d ⁻¹)	0,0744	0,0672

Producción de Biomasa

El coeficiente de producción máximo (*Y*) y el coeficiente de decaimiento endógeno (*k_d*) son:

	Aguas residuales sintéticas	Aguas residuales crudas
<i>Y</i>	0,0494	0,035
<i>k_d</i> (h ⁻¹)	2,00E-05	6,00E-06
<i>k_d</i> (d ⁻¹)	4,80E-04	1,44E-04

Correlación de la biomasa

Durante la puesta en marcha de la planta sucedieron diversas condiciones en la biomasa microbiana, la cuantificación y representación gráfica en el tiempo de los microorganismos permite ver la tendencia del proceso, así como la estructura y composición de la biomasa microbiana. Para la identificación taxonómica de los organismos se realizaron microfotografías de las especies presentes en los diferentes reactores. En la tabla 5 se presentan las especies representativas para cada reactor. En la figura 5 se muestran los microorganismos presentes en el sistema de lodos activados

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El sistema con el sustrato N.º 2 alcanzó una DBO promedio de 146 mg/L. Durante esta etapa la temperatura osciló de 15 a 24 °C, se trató de mantener el pH neutro pero éste oscilaba con tendencia decreciente, llegando a valores de 5,8 de un día para otro, mientras que en la etapa de operación con aguas residuales crudas el pH tuvo una tendencia creciente, alcanzando valores de 8,25.

Los problemas que se observaron fueron la formación continua de flóculos de lodo en el sedimentador. También la cantidad de SSVLM no se incrementó como se esperaba con el sustrato N.º 1.

La constante «*k*» obtenida indica que el sustrato utilizado es altamente biodegradable, lo que se refleja también en altos valores de la constante «*a*».

Indicadores eficientes de lodos activados en el tanque de aeración

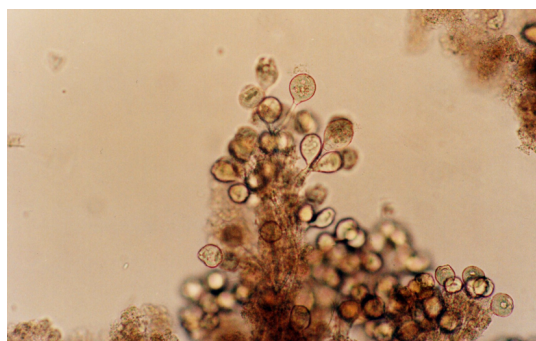


Foto N.º 1. *Epistylis plicatilis*, colonia (Reactor 1-6)



Foto N.º 2. *Epistylis plicatilis*(Reactor 1-6)

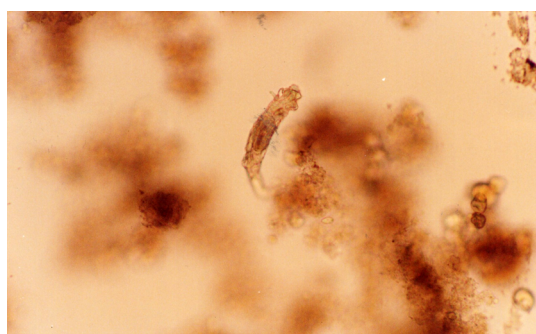


Foto N.º 3. *Philodina sp.* (Reactor 1-6)

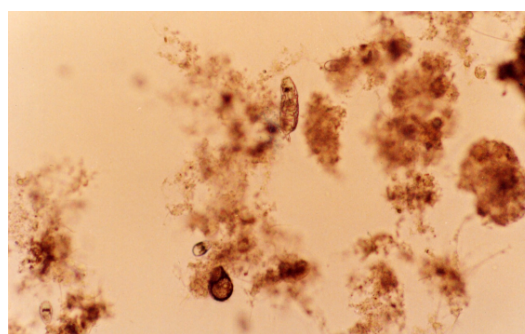


Foto N.º 4. *Lecane sp.* (Reactor 1, 2, 4)

Indicadores no eficientes de lodos activados en el tanque de aeración

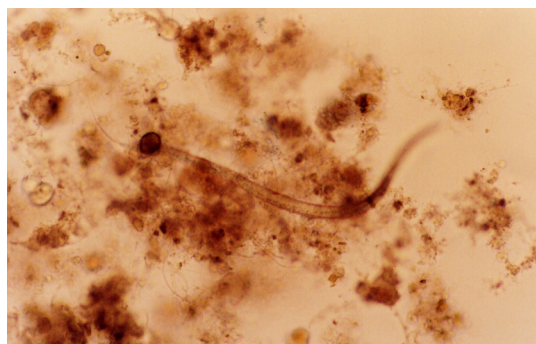


Foto N.º 5. Nematodes (Reactor 1-4, 6)

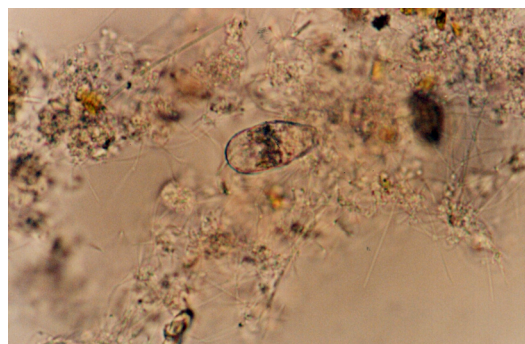


Foto N.º 6. *Difflugia sp.* (Reactor 2-3, 5-6)

Indicadores eficientes de lodos activados en el sedimentador

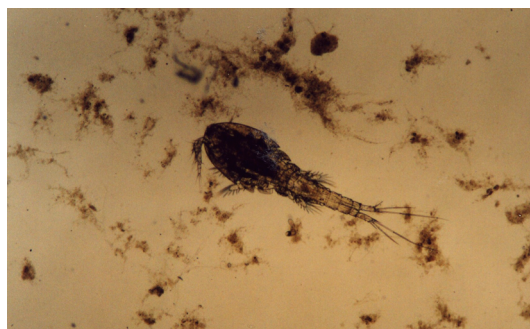


Foto N.º 7. *Cyclops sp.* (Reactor 1-4)

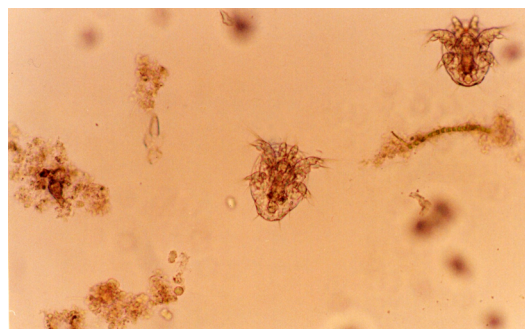


Foto N.º 8. Nauplio-Estadio de copépodos (Reactor 1-4)

Figura N.º 5. Microorganismos presentes en el sistema de lodos activados

Tabla N.º 5. Diversidad de microorganismos presentes en los reactores.

Reactor	1	2	3	4	5	6
F/M	0,205	0,16	0,085	0,057	0,043	0,045
IVL	58,5	91	177,6	214,8	151,3	336,4
Tiempo de retención (Th)	6	8	15	23	29	45
Condición (Lodos activados)	Convencionales (5-7 días)		Aeración prolongada (12-36 días)			
Protozoarios ciliados fijos						
<i>Opercularia sp.</i>	58			2	6	2-27
<i>Epistylis plicatilis</i>	21-1009	123-673	16-26	3-15	9	3
Protozoarios ciliados nadadores						
<i>Aspidisca sp.</i>	7-39	12	25			
<i>Cyclidium sp.</i>	1			2		
Protozoarios flagelados						
<i>Bodo sp.</i>		36-1589	12-258	24-59		
<i>Mona sp.</i>		76	31	3	6-31	9
Rotíferos						
<i>Philodina sp.</i>	2-414	1-108	8	8	1-28	1-5
<i>Lecane sp.</i>	2-19	8		6		
<i>Lecane elsa</i>		3-8				
Copépodos						
<i>Cyclops sp.</i>	1-2	1-4	1	1-4		
Nematodos						
Nematodos	2-12	2	1-3	1		1
Ostracoda						
<i>Ostracodos</i>		1		1	1	2
Rhizopoda						
<i>Amebas sp.</i>	1-2		733	4-26		
<i>Arcella sp.</i>	4	1-4	1	1	1	1-6
<i>Difflugia sp.</i>		195	10		3	65

Los valores de F/M obtenidos se encuentran dentro del rango de trabajo reportado por la teoría (Ramalho, 1993).

Al inicio del proceso se observó sólo la presencia de amebas y flagelados (*Monas*, *Bodo*); posteriormente aparecieron protozoarios holozoicos, los ciliados nadadores (*Ciclydium*, *Aspidisca*), quienes se reprodujeron en altas densidades reduciendo el material suspendido del licor de mezcla, generando las condiciones para el inicio del climax del sistema, apareciendo luego los ciliados fijos como: *Opercularia*, *Epistylis*; y micrometazoarios como rotíferos: *Philodina*, *Lecane*; y Copépodos: *Cyclops* y nemátodos.

V. CONCLUSIONES

Las constantes cinéticas obtenidas en esta investigación usando aguas residuales sintéticas fueron:

a: 0.8763 (Parámetro de utilización de oxígeno para la oxidación de sustrato).

b: 0.0744 (Parámetro de utilización de oxígeno utilizado en la respiración endógena).

Y: 0.0494 (Coeficiente de producción de biomasa por consumo de sustrato).

k_r: 0.00048 d⁻¹ (Coeficiente de consumo de biomasa por respiración endógena).

k: 0.0025 h⁻¹.L /mg (Constante de velocidad de consumo de sustrato).

En el estudio se logró comparar la operación convencional de lodos activados con aeración extendida.

El IVL del sistema alimentado con aguas residuales sintéticas varía entre 58,6 y 336,0 mL/g, mientras que el de alimentado con aguas residuales crudas está en el rango de 95,7 a 339,7 mL/g.

Se concluye que la separación de los lodos biológicos de un sistema alimentado con agua residual sintética de baja carga (146 mg/L DBO₅) es más fácil que el alimentado con aguas residuales

crudas (226 mg/L DBO₅). Esto indica que un sistema alimentado con aguas residuales crudas tiene mayor tendencia al problema denominado «lodo voluminoso», el cual conlleva a una inadecuada compactación de lodos. Esto es atribuible al crecimiento excesivo de organismos filamentosos.

Durante el período de evaluación se identificaron 15 especies: 2 de protozoarios ciliados fijos, 2 protozoarios ciliados nadadores, 2 protozoarios flagelados, 3 rotíferos, 1 copépodo, 1 nematode, 3 rhizopodos y 1 ostracoda.

Los microorganismos presentes en los sólidos suspendidos volátiles en el licor de mezcla (SSVLM) tienen un rol fundamental en la degradación de la materia orgánica, la presencia y abundancia indican el nivel de tratamiento de los lodos activados. Entre los más eficientes encontrados en el sistema evaluado tenemos a los Protozoarios fijos, rotíferos y ciliados nadadores.

Los protozoarios flagelados, nematodos, Rhizopodos y algunos ciliados nadadores se presentaron cuando la eficiencia era escasa.

La presencia del ciliado fijo *Epistylis plicatilis* en el SSVLM se relaciona a la buena eficiencia de los reactores 1 y 2, ello está asociado a los mayores requerimientos nutricionales de los organismos y al menor tiempo de retención; el índice de alimentación-microorganismo F/M muestra claramente esta relación, encontrándose mejor eficiencia a $F/M > 0,1$.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar el experimento con una bomba peristáltica para cada reactor, pues los dosificadores empleados tuvieron dificultad en operar óptimamente, pues se obstruían continuamente.

VII. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue realizado gracias al apoyo financiero del Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC), a quien se le agradece en forma muy especial.

Asimismo, se agradece a las siguientes personas que colaboraron como asistentes de investigación en este proyecto: Blgo. Pedro Ramos, Bach. Theo Torres, Bach. Zoila Quispe, Sr. Joel Manrique y Quím. Susana David. Se le agradece, también, al Blgo. Juan Juscamaita por facilitar el laboratorio de Biología para los exámenes microscópicos.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. APHA-AWWA-WEF (1999) *Standard methods for the examination of water wastewater*. 20th Edition. Washington.
2. Departamento de Ingeniería Química (2000) *Guía de laboratorio de aguas residuales*. Universidad Valencia-España.
3. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN 38412). *Laborkläranlage OECD-Confirmatory-Test*. Alemania. Institut für Biologische Verfahrenstechnik. Alemania.
4. Eckenfelder, W.W y Ford D. L.(1970). *Water pollution control*. Ed. Mc Graw - Hill. Mexico.
5. Metcalf & Eddy Inc. (1998). *Tratamiento, vertido y reutilización*. Vol. I, Mc Graw-Hill. México.
6. Organización Panamericana de la Salud (2000) *Evaluación 2000. Informe Analítico-Perú*. <http://www.cepis.org.pe/index.html>
7. Ramalho, R.S (1993) *Tratamiento de aguas residuales*. Ed. Reverte.
8. Yupanqui, V. (2001) *Exposición en el curso de Gestión Efluentes de Líquidos en la Universidad Nacional Agraria La Molina*. Lima.