

Efecto de la disponibilidad de nutrientes y la adición de coagulantes sobre la sedimentabilidad de lodos activados

Vanessa Finol¹, Isabel González¹, Lenin Herrera¹ y Lewis Godoy²

¹Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo, Venezuela.

²Laboratorio de Control de Calidad de Efluentes Líquidos. Superintendencia de Calidad e Investigación y Desarrollo. Oxiteno Andina C.A.Santa Rita, Estado Zulia, Venezuela.

Email: vanessafinol1995@hotmail.com, isacgl1997@gmail.com, leninherre@gmail.com, lm7s@oxiteno.com,

Recibido: 05-04-2017

Aceptado: 19-09-2017

Resumen

Tanto la disponibilidad de nutrientes como la adición de coagulantes pueden influenciar la capacidad de asentamiento de lodos biológicos de una planta de tratamiento de aguas residuales (P.T.A.R). Con la finalidad de evaluar tal influencia en la P.T.A.R de una industria química, se caracterizaron su afluente y efluente. Posteriormente, se realizaron pruebas de jarra utilizando como coagulantes sulfato de aluminio, cloruro férrico y quitosano para estudiar su efecto sobre la sedimentabilidad del lodo. Finalmente, se llevaron a cabo estudios experimentales en reactores por carga a escala de laboratorio para verificar el desempeño del coagulante que mostró mayor eficiencia durante los ensayos de jarra; así como para determinar la influencia de la disponibilidad de nutrientes en el proceso de sedimentación, estimando las dosis de nitrógeno y fósforo que deben añadirse en base a la DBO medida en el afluente y a los SSV perdidos por el efluente. Los resultados obtenidos en la caracterización permitieron detectar una baja carga orgánica y una deficiencia de nutrientes en el sistema. Igualmente, se encontró que tanto la adición del quitosano como la reposición de nutrientes en base a los SSV perdidos por el efluente tienen un impacto positivo en la sedimentación de los lodos.

Palabras clave: Lodos activados, sedimentación, nutrientes, coagulantes.

Effect of the availability of nutrients and the addition of coagulants on the sedimentability of activated sludge

Abstract

Both the availability of nutrients and the addition of coagulants can influence the activated sludge settling capacity of a wastewater treatment plant (W.W.T.P). In order to evaluate such influence in the W.W.T.P of a chemical industry, its influent and effluent were characterized. Subsequently, jar tests were performed using aluminum sulfate, ferric chloride and chitosan as coagulants to study their effect on the sedimentability of the sludge. Finally, experimental studies were carried out in laboratory-scale batch reactors to verify the performance of the coagulant which showed greater efficiency during the jar tests; as well as to determine the influence of nutrient availability on the sedimentation process, estimating the doses of nitrogen and phosphorus to be added based on the BOD measured in the influent and the SSV lost by the effluent. The results obtained in the characterization allowed the detection of a low organic load and the deficiency of nutrients in the system. It was

also found that both, the addition of chitosan and the replacement of nutrients on the basis of the SSV lost by the effluent have a positive impact on the sludge's sedimentation.

Keywords: Activated sludge, sedimentation, nutrients, coagulants.

Introducción

En el tratamiento biológico con lodos activados, el residuo orgánico se introduce en un reactor donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. El contenido del reactor se conoce con el nombre de licor mezclado, y consiste en una mezcla de la masa activa de microorganismos y las aguas residuales que se tratan en el proceso. [1] La planta de tratamiento de aguas residuales en la que se llevó a cabo este estudio utiliza el sistema de lodos activados para purificar tanto las aguas negras generadas en la empresa como las aguas industriales procedentes de la manufactura de glicoles y productos derivados de óxido de etileno, tales como polioles y tensoactivos no iónicos.

En una planta con estas características, la sedimentación se aplica para separar la biomasa que se genera en el reactor durante la degradación de los contaminantes del agua residual, para dejarla libre de sólidos suspendidos. [2] La capacidad de asentamiento en el sistema puede medirse a través del Índice Volumétrico de Lodos (IVL), el cual se define como los mililitros de lodo por gramo de sólidos suspendidos totales, basado en 30 minutos de decantación de un litro de licor mezclado. [3]

Por otro lado, los sistemas de lodos activados requieren la existencia de un equilibrio entre la fuente de carbono y las concentraciones de nutrientes como nitrógeno y fósforo, para lograr un adecuado desarrollo de la biomasa en el reactor biológico. [4] De acuerdo con lo anterior, los requerimientos de nitrógeno y fósforo se estiman normalmente sobre la base de la DBO_5 del agua residual, de modo que la relación $DBO_5:N:P$ sea 100:5:1. [5] Aunque ésta proporción ha demostrado cubrir los requerimientos de nutrientes, su aplicación puede sobreestimar las necesidades reales de los mismos. [6] Para evitar esta situación, se ha propuesto calcular los requerimientos de nutrientes sobre la base de la cantidad de lodo que es purgado del sistema utilizando las siguientes expresiones:

$$\text{Requerimiento de N} = 0,122 * SSV \quad (1)$$

$$\text{Requerimiento de P} = 0,023 * SSV \quad (2)$$

En otro orden de ideas, existen distintos problemas operacionales que pueden ocasionar que los lodos biológicos no sedimenten a una velocidad adecuada que permita obtener una buena clarificación, causando un incremento en el IVL del sistema, lo cual refleja una deficiencia en la calidad del tratamiento; en estos casos la adición de coagulantes surge como una medida correctiva. Debe resaltarse que existen numerosos compuestos que pueden actuar como coagulantes, y la efectividad de uno u otro varía dependiendo de su naturaleza y de las características del agua a tratar. En este sentido, las sales inorgánicas que pueden formarse con Al(III) y Fe(III) son ampliamente utilizadas como coagulantes químicos en el tratamiento de aguas residuales [7]. La desestabilización producida por estos coagulantes está influenciada por tres factores: dosificación de coagulante, pH y concentración coloidal. [8]

En contraparte, el quitosano es un copolímero lineal de D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina, cuyo peso molecular, cristalinidad y grado de desacetilación (DD) le confieren propiedades coagulantes [9]. Además de contar con una estructura de cadena larga, el quitosano posee abundantes grupos amino libres a lo largo de su cadena principal, los cuales pueden protonarse en medio ácido; caso en el cual el quitosano se comportaría como un polielectrolito catiónico típico. Asimismo, el quitosano debe a sus grupos amino e hidroxilo disponibles, su aplicación en la quelación de iones metálicos tales como Hg^{2+} y Cu^{2+} para formar complejos insolubles, lo que permite la eliminación eficaz de los contaminantes. [10]

Parte experimental

Caracterización del afluente y efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales

1. Análisis de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) empleando el método Hach 8043.
2. Análisis de Demanda Química de Oxígeno (DQO) empleando el método Hach 8000.
3. Análisis de pH utilizando el método potenciométrico.
4. Análisis de nitrógeno empleando el método 4500 M establecido en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.
5. Análisis de fósforo mediante el Test de Fosfatos 1.14848.0001 de la Merck.
6. Análisis de sólidos suspendidos totales (SST) empleando el método 2540 B establecido en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.
7. Análisis de sólidos suspendidos volátiles (SSV) empleando el método 2540 E establecido en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Realización de pruebas de jarra

El proceso de determinación de las dosis a evaluar en cada prueba de jarra fue similar para los tres coagulantes. En el caso de la primera prueba, se seleccionaron concentraciones bajas, desde 4 mg/L, aumentando en intervalos de 4 mg/L hasta alcanzar 20 mg/L. Las concentraciones a utilizar en los test de jarra posteriores, dependieron de la eficiencia del coagulante. Las dosis evaluadas se continuaron incrementando hasta alcanzar una concentración en la que la acción del coagulante no beneficiara la sedimentación de los lodos activados. La metodología adoptada para el test consistió en 30 segundos de mezcla rápida, colocando el equipo en 100 rpm, seguido de 5 minutos de mezcla lenta a 20rpm y finalmente 20 minutos de sedimentación.

Una vez culminado el tiempo de sedimentación, se procedió a analizar color aparente, turbidez y pH del sobrenadante de cada muestra. Seguidamente, se seleccionó aquella dosis que presentase una mejor sedimentación y se determinó la concentración de SST del sobrenadante y el IVL de esta muestra, a fin de obtener un porcentaje de reducción de IVL en comparación con la muestra inicial.

Realización de pruebas experimentales en reactores por carga a escala de laboratorio

Se instaló un sistema conformado por reactores tipo batch. Para la realización de la primera prueba se dispuso de cuatro reactores, empleándose uno como blanco, uno para verificar la efectividad del coagulante (Reactor Q), uno para evaluar la dosis de nutrientes calculada en base a los SSV del efluente (Reactor N₁) y uno para evaluar la dosis de nutrientes calculada a partir de la DBO del afluente (Reactor N₂). En el caso de la segunda prueba, operaron únicamente dos reactores, en uno de ellos se examinó el efecto conjunto del coagulante con la dosis de nutrientes más efectiva y el otro fue empleado como blanco. Es importante mencionar que los nutrientes se adicionaron mediante soluciones de urea y ácido fosfórico. La metodología aplicada en el desarrollo de cada prueba se describe a continuación:

1. Adicionar a cada reactor 2 L de lodo concentrado proveniente del tanque de lodos activados de la P.T.A.R.
2. Agregar a cada reactor 2 L de agua residual cruda proveniente del afluente de la P.T.A.R.
3. Colocar la aireación y esperar 10 minutos para que se establezca el sistema.
4. Añadir con una pipeta la solución correspondiente a cada reactor.
5. Determinar inmediatamente después de la adición los valores de pH, DQO, concentración de fósforo, concentración de nitrógeno, SST e IVL.

6. Mantener la aireación hasta que se cumpla un tiempo de residencia de 18 horas.

7. Una vez culminado el tiempo de residencia retirar la aireación y determinar los valores de pH, DQO, concentración de fósforo, concentración de nitrógeno, SST e IVL.

Resultados y discusión

A continuación se presenta la Tabla 1, la cual contiene los resultados de la caracterización del afluente y efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 1. Caracterización del afluente y efluente de la P.T.A.R.

Parámetro Fuente	pH	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	Fósforo (mg/L)
Afluente	7.60	478.29	1572	103	77	1.2	0.28
Efluente	7.68	37.52	317	60	40	15.58	0.5

Se observa que la relación DBO/DQO obtenida en el afluente es igual a 0.3; encontrándose esta cifra en el límite inferior admisible. Este resultado se traduce en una baja relación F/M, ya que apenas el 30% de la alimentación es biodegradable por los microorganismos que conforman el sistema.

Debe destacarse que la relación SSV/SST en el efluente presenta un valor de 0.67, lo que indica que del total de sólidos suspendidos que salen del sistema, el 67% está conformado por material celular sintetizado. Al evaluar los resultados de nitrógeno y fósforo, puede observarse que en el afluente las concentraciones de estos nutrientes son bajas en comparación con las proporciones teóricas. Asimismo, se encontró que el efluente presenta un alto contenido de estos elementos, lo que indica una pérdida de los mismos en la biomasa que se purga por el efluente; hecho que deriva en una deficiencia de nutrientes en el sistema.

Seguidamente, se presentan las tablas que contienen los resultados de las pruebas de jarra. En primer lugar, se muestra la Tabla 2, en la cual se exhiben los resultados del test de jarra utilizando sulfato de aluminio como coagulante.

Tabla 2. Parámetros evaluados durante prueba de jarra empleando sulfato de aluminio como coagulante

Muestra Parámetro	Inicial	B	1	2	3	4	5
Concentración (ppm)	0	0	20	40	60	80	100
pH	7.62	7.63	7.43	7.41	7.22	7.17	6.96
Turbidez (FTU)	-	>461	194	193	70	62	44
Color Aparente (U. Pt/Co)	-	>550	>550	>550	374	334	243
SST sobrenadante (mg/L)	-	-	-	-	80	60	40
SST licor mezclado (g/L)	2.17	-	-	-	2.56	2.48	2.46
Decantación (mL/L)	980	-	-	-	990	980	980
IVL (mL/g)	451.61	-	-	-	387	395	405
%Reducción IVL	-	-	-	-	14.37	12.5	10.33

En general, esta prueba de jarra arrojó resultados pobres en lo que respecta a porcentaje de reducción de IVL. Por otro lado, los valores de color aparente y turbidez disminuyen notablemente al incrementarse la concentración de coagulante. Esta tendencia indica que la etapa de coagulación fue efectiva, ya que se logró una remoción de las partículas coloidales. Sin embargo, el volumen de lodo sedimentado fue superior al volumen de sobrenadante; es decir, que la etapa de floculación no fue eficaz, al no formarse flóculos

suficientemente densos para sedimentar. Lo anterior se debe a que durante el experimento no se logró una combinación favorable de las variables pH y dosis de coagulante.

A continuación se presenta la Tabla 3, la cual contiene los resultados obtenidos durante la realización de la prueba de jarra utilizando cloruro férrico como coagulante.

Tabla 3. Parámetros evaluados durante prueba de jarra empleando cloruro férrico como coagulante

Muestra Parámetro	Inicial	B	1	2	3	4	5
Concentración (ppm)	0	0	20	30	40	50	60
pH	7.86	7.77	7.5	7.42	7.3	7.24	7.15
Turbidez (FTU)	-	138	68	63	59	54	51
Color Aparente (U. Pt/Co)	-	>550	373	348	310	292	269
SST sobrenadante (mg/L)	-	-	-	-	20	60	-
SST licor mezclado (g/L)	2.46	-	-	-	2.64	2.54	-
Decantación (mL/L)	995	-	-	-	990	990	-
IVL (mL/g)	404.47	-	-	-	375	389	-
%Reducción IVL	-	-	-	-	7.29	3.82	-

Puede apreciarse que la adición de este compuesto no benefició de forma considerable la sedimentabilidad de los lodos, lo cual se refleja en un bajo porcentaje de reducción de IVL. Por otra parte, los valores de color y turbidez se redujeron conforme aumentaba la dosis de coagulante. Su bajo rendimiento puede atribuirse a que durante el experimento no se trabajó dentro del rango de pH óptimo para favorecer el proceso de coagulación con cloruro férrico.

La Tabla 4 contiene los resultados obtenidos durante la prueba de jarra llevada a cabo utilizando quitosano como coagulante.

Tabla 4. Parámetros evaluados durante prueba de jarra empleando quitosano como coagulante

Muestra Parámetro	Inicial	B	1	2	3	4	5
Concentración (ppm)	0	0	4	8	12	16	20
pH	8.02	8.02	8.01	7.95	7.90	7.89	7.85
Turbidez (FTU)	-	158	35	29	28	27	29
Color Aparente (U. Pt/Co)	-	>550	198	160	159	158	160
SST sobrenadante (mg/L)	-	-	-	-	100	100	120
SST licor mezclado (g/L)	1.86	-	-	-	2.07	2.05	2.05
Decantación (mL/L)	990	-	-	-	940	710	880
IVL (mL/g)	532.26	-	-	-	454	346	429
%Reducción IVL	-	-	-	-	14.7	34.99	19.4

Los resultados arrojados por el experimento demuestran un rendimiento elevado del quitosano como coagulante, hecho que se traduce en un porcentaje de reducción de IVL considerable. Es importante destacar que durante el desarrollo del test se observó la formación de flóculos de gran tamaño con una rápida velocidad de sedimentación, excepto para la muestra de 20 ppm, en la que se observó una pequeña cantidad de flóculos que permanecían en la superficie. Este hecho se debe probablemente a una reestabilización de las partículas coloidales por exceso de coagulante.

El desempeño obtenido indica que posiblemente el mecanismo de coagulación predominante es el de adsorción y puente interparticular. En este sentido, el quitosano posee una cadena principal larga con numerosos grupos funcionales que interaccionan con las partículas coloidales, mientras que el resto de la

molécula se extiende hacia la solución, adsorbiéndose en otras partículas y actuando como puente entre ellas. Lo anterior aunado al alto peso molecular del quitosano y a la conformación estructural que adquiere a valores de pH como los manejados en este experimento, deriva en la formación de flocúlos densos capaces de sedimentar en una capa compacta de lodo.

Seguidamente se muestran una serie de gráficos que permiten comparar los resultados obtenidos en lo que respecta a porcentaje de reducción de IVL, turbidez y color para cada coagulante.

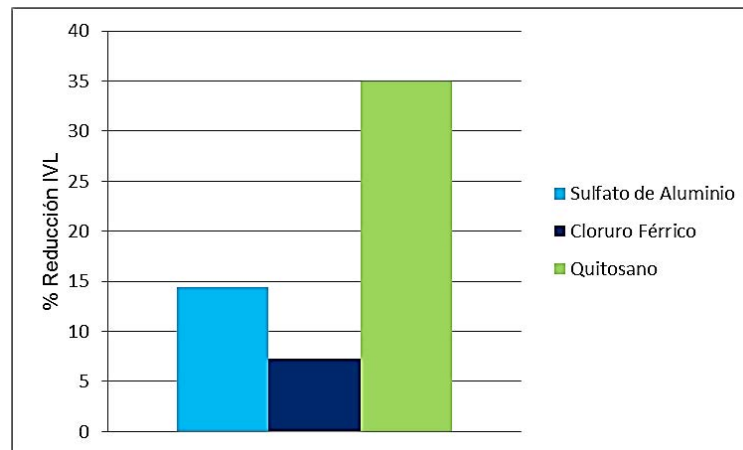


Figura 1. Porcentaje de reducción de IVL obtenido para la dosis óptima de cada coagulante

En la figura 1 se muestra que el quitosano fue el coagulante que arrojó mejores resultados, beneficiando en mayor medida la sedimentabilidad de los lodos. Lo anterior se refleja en un porcentaje de reducción de IVL de 34.99% para la dosis óptima de este coagulante, siendo el valor de la misma igual a 16 ppm.

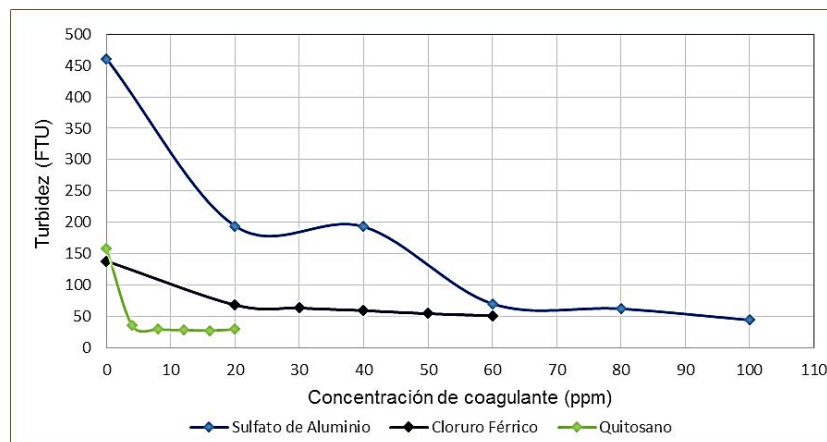


Figura 2. Concentración de coagulante (ppm) vs Turbidez (FTU)

Puede observarse en la figura 2 que todas las curvas exhiben la misma tendencia; en este sentido, la turbidez tiende a disminuir a medida que se incrementa la dosis de coagulante. No obstante, el sulfato de aluminio y el quitosano presentan inicialmente una reducción brusca de la turbidez para luego disminuir gradualmente, en el caso del sulfato de aluminio; y tomar valores prácticamente constantes, en el caso del quitosano. Por otro lado, el cloruro férrico genera un efecto menos contundente sobre este parámetro. Finalmente, puede concluirse que el ensayo con quitosano arrojó los mejores resultados con respecto a este parámetro; lográndose el valor más bajo de turbidez empleando concentraciones de quitosano considerablemente menores que las requeridas al emplear cloruro férrico o sulfato de aluminio.

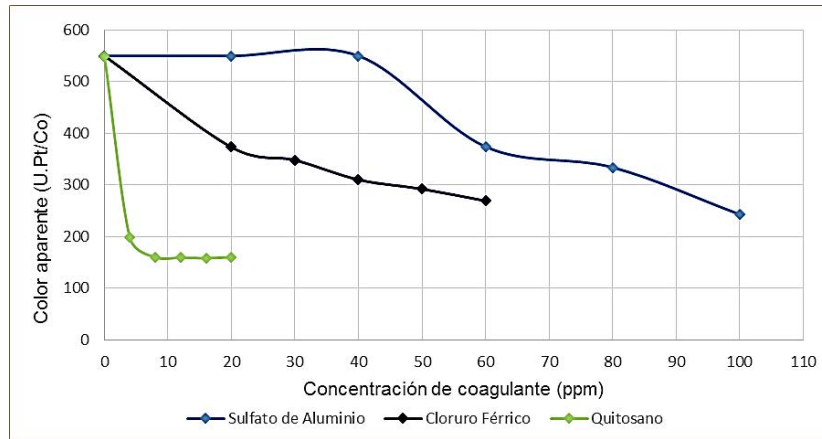


Figura 3. Concentración de coagulante (ppm) vs Color aparente (U.Pt/Co)

En la figura 3, para todos los casos se evidencia una disminución del color a medida que se incrementa la dosis de coagulante añadida. En el caso del sulfato de aluminio puede apreciarse que el color disminuye muy poco a concentraciones bajas, sin embargo, a concentraciones superiores a 40 ppm se observa una reducción considerable de este parámetro.

Con respecto al cloruro férrico, se tiene que el color aparente decrece de forma más uniforme y en mayor medida que con el sulfato de aluminio. Por otro lado, el quitosano genera un efecto importante sobre el parámetro evaluado, logrando disminuir drásticamente su valor con una adición de apenas 4 ppm, manteniendo valores similares para concentraciones mayores.

La eficiencia del quitosano como coagulante se verifica según las tendencias presentadas en esta figura, ya que logra el valor más bajo de color aparente con una adición considerablemente baja, en relación a la requerida si se emplea sulfato de aluminio o cloruro férrico.

A continuación, se presentan los resultados de los experimentos en reactores por carga a escala de laboratorio.

Tabla 5. Evaluación del efecto de quitosano y de distintas dosis de nutrientes en reactores por carga a escala de laboratorio en tiempo inicial

Tiempo de residencia (horas)		0			
Reactor	Blanco	N ₁	N ₂	Q	
pH	8.15	8.1	7.59	8.00	
DQO (mg/L)	974	975.5	998.5	1000.5	
Fósforo (mg/L)	0.84	1.055	1.145	0.76	
Nitrógeno (mg/L)	9.27	12.84	28.54	8.56	
SSTLM (g/L)	2.29	2.33	2.27	2.35	
Decantación (mL/L)	750	790	640	770	
IVL (mL/g)	327.51	339.06	281.94	327.66	

Tabla 6. Evaluación del efecto de quitosano y de distintas dosis de nutrientes en reactores por carga a escala de laboratorio en tiempo de residencia de 18 horas

Tiempo de residencia (horas)		18			
Parámetro \ Reactor	Blanco	N ₁	N ₂	Q	
pH	8.17	8.09	8.17	8.17	
DQO (mg/L)	637	554.5	542.5	540.5	
Fósforo (mg/L)	0.36	0.295	0.21	0.28	
Nitrógeno (mg/L)	9.27	9.99	15.70	8.56	
SSTLM (g/L)	3.26	3.34	2.34	3.51	
Decantación (mL/L)	950	900	715	580	
IVL (mL/g)	291.41	269.16	305.56	165.24	
%Reducción IVL	11.02	20.62	0	49.57	
%Remoción DQO	34.60	43.16	45.67	45.98	

Los resultados obtenidos en el reactor Q, muestran que la concentración de SST del licor mezclado aumentó considerablemente al culminar el tiempo de residencia, lo cual se atribuye a la reproducción de los microorganismos. Lo anterior, combinado con la disminución del volumen de lodo sedimentado por acción del coagulante, resulta en un elevado porcentaje de reducción de IVL. Por otro lado, se observa que el porcentaje de remoción de DQO fue superior al mostrado por el reactor blanco, al comparar los valores mostrados en la tabla 5 y 6.

Los resultados de los análisis realizados en el reactor N₂ reflejan un aumento en el IVL a las 18 horas, lo cual puede deberse a una baja carga orgánica en la muestra tomada, que ocasionó que los microorganismos consumieran toda la materia orgánica biodegradable antes de cumplirse el tiempo de residencia. Como consecuencia de la falta de alimento, los microorganismos perdieron peso y aumentó el número de bacterias muertas, lo cual derivó en una decantación pobre, baja reproducción de los microorganismos y finalmente, un IVL superior al inicial; Sin embargo, el porcentaje de remoción de DQO fue superior al reportado por el reactor blanco, lo que demuestra que la degradación de materia orgánica mejoró con la adición de los nutrientes, al comparar los valores referidos en tabla 5 y 6.

Asimismo, se observa una disminución de las concentraciones de fósforo y nitrógeno a las 18 horas, tanto en el reactor N₁ como en el reactor N₂; esto revela que los microorganismos utilizaron los nutrientes añadidos para su metabolismo. Por otro lado el reactor N₁ exhibió resultados positivos, con un porcentaje de reducción de IVL de 20.62% y un porcentaje de remoción de DQO de 43.16%. Los valores obtenidos motivaron la realización de un segundo ensayo para evaluar el efecto combinado del quitosano y de esta dosis de nutrientes. En este sentido, se presentan los resultados de los análisis realizados en la tabla 7 y 8.

Tabla 7. Evaluación del efecto combinado de nutrientes y quitosano en reactores por carga a escala de laboratorio en tiempo inicial

Tiempo de residencia (horas)		0	
Parámetro \ Reactor	Blanco	N ₁ + Q	
pH	8.23	8.01	
DQO (mg/L)	493	526.5	
Fósforo (mg/L)	0.645	0.5	
Nitrógeno (mg/L)	7.21	11.53	
SSTLM (g/L)	1.85	1.94	
Decantación (mL/L)	950	850	

IVL (mL/g)	513.51	438.14
------------	--------	--------

Tabla 8. Evaluación del efecto combinado de nutrientes y quitosano en reactores por carga a escala de laboratorio en tiempo de residencia de 18 horas

Tiempo de residencia (horas)		18
Parámetro	Reactor	
	Blanco	N ₁ + Q
pH	8.58	8.32
DQO (mg/L)	326	244
Fósforo (mg/L)	0.31	0.285
Nitrógeno (mg/L)	6.49	7.06
SSTLM (g/L)	2.16	1.95
Decantación (mL/L)	800	620
IVL (mL/g)	370.37	317.95
%Reducción IVL	27.87	27.43
%Remoción DQO	33.87	53.66

Los resultados mostrados indican que el reactor al que se adicionó quitosano combinado con nutrientes presentó un porcentaje de remoción de DQO superior al de los ensayos con los compuestos aislados. Sin embargo, no existió una mejora en la sedimentación de los lodos biológicos, lo cual se evidencia al comparar el porcentaje de reducción de IVL, con el obtenido en el reactor blanco. En este sentido, pudo apreciarse que la concentración de sólidos del reactor N₁ + Q no aumentó significativamente cumplidas 18 horas de tiempo de residencia. Lo anterior refleja una baja reproducción de los microorganismos durante el ensayo; debido probablemente a una aireación pobre, consecuencia del taponamiento del difusor de este reactor.

Conclusiones

La caracterización del afluente y efluente de la P.T.A.R evidenció que existe una pérdida de sólidos suspendidos por el efluente y con ello, la pérdida de nutrientes. Por otro lado, se encontró que la carga orgánica biodegradable y las concentraciones de nitrógeno y fósforo en el afluente son inferiores a las requeridas por el sistema.

Se determinó que, entre los coagulantes evaluados, el sulfato de aluminio y el cloruro férrico no ejercen un efecto significativo sobre la sedimentabilidad del lodo. No obstante, el quitosano arrojó mejores resultados, logrando reducir apreciablemente el valor del IVL con una dosis óptima de tan solo 16 mg/L.

Los estudios experimentales realizados indican que al reponer las cantidades de nutrientes que se pierden por el efluente se ve favorecida la capacidad de asentamiento de los lodos biológicos, evitando emplear un exceso de reactivos que deriven en gastos innecesarios. En este sentido, al adicionar urea y ácido fosfórico de acuerdo con los SSV medidos en el efluente se genera un ahorro de estos reactivos igual a 79% y 37% respectivamente, en relación con la dosis calculada según la DBO.

Referencias bibliográficas

- [1] Nodal, E. (2001). Procesos Biológicos Aplicados al Tratamiento de Agua Residual. *Revista Científica De Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, XXII(4), 52.
- [2] Martínez, S., & Rodríguez, M. (2005). *Tratamiento de aguas residuales con MATLAB*. México: Reverté.

- [3] Rivas, G. (1978). Tratamiento de Aguas Residuales (Segunda Ed.). Caracas, Venezuela: Ediciones Vega.
- [4] Carceller, J. (1998). Los fenómenos del “bulking” y “foaming” en las estaciones depuradoras de aguas residuales. *Tecnología del Agua*(179), 17-26.
- [5] Soya, M. (1998). Evaluación del Requerimiento de Nitrógeno y Fósforo en Sistemas de Tratamiento Biológico Aerobio de Aguas Residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 6, 65-75.
- [6] Herrera, L. (2014). Tratamiento Biológico de Aguas Residuales. *Conferencia de Ingeniería Ambiental*, (págs. 15-17). Maracaibo, Venezuela.
- [7] Manahan, S. (2007). *Introducción a la química ambiental*. México: Editorial Reverté.
- [8] Weber, W. (1979). *Control de la calidad del agua: Procesos fisicoquímicos*. España: Editorial Reverté.
- [9] Renault, F., Sancet, P., Badot, M., & Crini, G. (2009). Chitosan for coagulation/flocculation processes - An eco-friendly approach. *European Polymer Journal*, 45(5), 1337-1348.
- [10] Yang, R., Li, H., Huang, M., Yang, H., & Li, A. (2016). A review on chitosan-based flocculants and their applications in water treatment. *Water Research*, 95, 59-89.