

INFORME FINAL PROYECTO RJE.01.02/04/2013/ TC1109.7

**“FILTRACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON CONTAMINANTES
RECALCITRANTES PARA REMOCIÓN DE MACRONUTRIENTES (Segunda etapa)”**

Jefe de Proyecto

Marco A. Garzón Zúñiga

Participantes

Violeta E. Escalante Estrada

Colaboradores

Juventino Balderas Castrejón
Liliana García Sánchez

IMTA - Diciembre 2013

RESUMEN EJECUTIVO

“FILTRACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON CONTAMINANTES RECALCITRANTES PARA REMOCIÓN DE MACRONUTRIENTES (Segunda etapa)”

Proyecto: RJE.01.02/04/2013/ TC1109.7

En el 2008 el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM), de forma conjunta con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, y la Universidad de Guanajuato (UG) sometieron un proyecto a la convocatoria 2008 de Ciencia Básica del CONACYT denominado: “FILTRACION DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES CON CONTAMINANTES RECALCITRANTES PARA REMOCIÓN DE MACRONUTRIENTES”; el cual fue seleccionado para ser apoyado. En Mayo del año 2010 el CONACYT, a través del “Fondo sectorial de investigación para la educación” (EL "FONDO") y UNAM firmaron un Convenio de asignación de recursos para la realización de dicho proyecto (Fondo Sectorial CONACYT-SEP No. 103922). Entre junio y diciembre de 2010, el II-UNAM, el IMTA y la UG realizaron la Gestión de un convenio de colaboración interinstitucional para poder regular las actividades de investigación que cada institución debe realizar en el marco del proyecto, así como para realizar la asignación de los recursos. Dicho convenio fue firmado en Enero de 2011. Fecha en la que se inicia el proyecto TC1109.4 en el IMTA para realizar las siguientes actividades de investigación: **1)** Estudiar el efecto de la granulometría, la velocidad de filtración y de la carga orgánica en la remoción de macronutrientes de aguas residuales municipales, en un sistema de biofiltración sobre material orgánico **2)** Estudiar el efecto de la relación C/N y de la aireación en la remoción de macronutrientes de aguas residuales porcinas en un sistema de filtración anaerobio – aerobio. **3)** Estudiar la remoción de colorantes azo y aditivos utilizados en la industria textil por un proceso combinado fotocatalisis y filtración tipo MBR (Biofiltro/Membrana)

El objetivo de esta 2ª etapa fue: Continuar el desarrollo de los trabajos de investigación sobre el tema II. Efecto de la relación C/N y la aireación en la remoción de ambos macronutrientes de agua residual agro-industrial.

Para ello se evaluaron tres sistemas de para el tratamiento de agua residual porcina, los cuales estuvieron constituidos por fosa séptica, filtro anaerobio y biofiltro aerobio. El filtro anaerobio fue empacado con un material inorgánico (tezontle) y el biofiltro con un material orgánico (*Jacaranda Mimosifolia*). Los sistemas de tratamiento fueron alimentados con agua residual porcina de diferente etapa de crecimiento (producción) de la granja: el S1 se alimentó con agua porcina de la etapa de maternidad, el S2 con agua de la etapa de engorda y el S3 con agua de la etapa de destete.

Los sistemas se evaluaron aplicando diferentes cargas orgánicas y tasas de aireación. Se encontró que al aplicar cargas orgánicas volumétricas (COV) entre 11 y 12 Kg DQO m⁻³ d⁻¹ a un filtro anaerobio se generaron eficiencias de remoción entre 78 y 82% de DQO.

Se encontró que la de aireación más efectiva fue 1.4 m³ m⁻² d⁻¹ para eliminar el nitrógeno amoniacal y materia orgánica presentes en agua residual porcina de diferentes etapas de crecimiento de la granja.

INDICE

ANTECEDENTES	1
Antecedentes de gestión del proyecto	1
Antecedentes técnicos del proyecto	1
OBJETIVOS	4
Objetivo global de proyecto	4
Objetivo principal para la 2ª etapa	4
METODOLOGÍA	5
Desarrollo del trabajo de investigación del tema II	5
RESULTADOS	6
Metodología	6
Resultados	8
Desempeño del Sistema 1 (S1)	8
Comportamiento del pH en el Sistema 1 (S1)	8
Comportamiento de la temperatura en el Sistema 1 (S1)	9
Comportamiento de los sólidos disueltos totales (SDT) en el Sistema 1 (S1)	9
Comportamiento de la alcalinidad en el Sistema 1 (S1)	10
Comportamiento de la materia orgánica en el Sistema 1 (S1)	11
Comportamiento de los sólidos en el Sistema 1 (S1)	13
Comportamiento del nitrógeno amoniacal en el Sistema 1 (S1)	14
Relación C/N en el Sistema 1 (S1)	16
Influencia de la tasa de aireación sobre la remoción de nitrógeno y materia orgánica	16
Desempeño del Sistema 2 (S2)	16
Comportamiento del pH en el Sistema 2 (S2)	16
Comportamiento de la temperatura en el Sistema 2 (S2)	17
Comportamiento de los sólidos disueltos totales (SDT) en el Sistema 2 (S2)	18
Comportamiento de la alcalinidad en el Sistema 2 (S2)	19
Comportamiento de la materia orgánica en el Sistema 2 (S2)	20
Comportamiento de los sólidos en el Sistema 2 (S2)	22
Comportamiento del nitrógeno amoniacal en el Sistema 2 (S2)	23
Relación C/N en el Sistema 2 (S2)	25
Influencia de la tasa de aireación sobre la remoción de nitrógeno y materia orgánica	25
Desempeño del Sistema 3 (S3)	26
Comportamiento del pH en el Sistema 3 (S3)	26
Comportamiento de la temperatura en el Sistema 3 (S3)	27
Comportamiento de los sólidos disueltos totales (SDT) en el Sistema 3 (S3)	27
Comportamiento de la alcalinidad en el Sistema 3 (S3)	28
Comportamiento de la materia orgánica en el Sistema 3 (S3)	29
Comportamiento de los sólidos en el Sistema 3 (S3)	31

Comportamiento del nitrógeno amoniacal en el Sistema 3 (S3)	32
Relación C/N en el Sistema 3 (S3)	34
Influencia de la tasa de aeración sobre la remoción de nitrógeno y materia orgánica	34
CONCLUSIONES	35
REFERENCIAS	36

ANTECEDENTES

Antecedentes de gestión del proyecto

En el 2008 el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM), de forma conjunta con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y la Universidad de Guanajuato (UG) sometieron un proyecto a la convocatoria 2008 de Ciencia Básica del CONACYT denominado: “FILTRACIÓN DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES CON CONTAMINANTES RECALCITRANTES PARA LA REMOCIÓN DE MACRONUTRIENTES”, el cual fue seleccionado para ser apoyado. En Mayo del año 2010 el CONACYT, a través del “Fondo sectorial de investigación para la educación” (EL “FONDO”) y UNAM firmaron un Convenio de asignación de recursos para la realización de dicho proyecto (Fondo Sectorial CONACYT-SEP No. 103922). Entre Junio y Diciembre de 2010, el II-UNAM, el IMTA y la UG realizaron la Gestión del convenio de colaboración interinstitucional para poder regular las actividades de investigación que cada institución debe realizar en el marco del proyecto, así como para realizar la asignación de los recursos. Dicho convenio fue firmado en Enero de 2011.

NOTA IMPORTANTE: Para el CONACYT la fecha de inicio de proyecto es el 01 de Mayo de 2010, porque es cuando se firmó el convenio entre el “FONDO” y la UNAM. Por tal razón, la primera etapa y la primera ministración corresponde al periodo comprendido entre el 01-Mayo-2010 al 31-Abril-2011.

Antecedentes técnicos del proyecto

En el proyecto antes mencionado, las actividades de investigación que debe realizar el IMTA se relacionan con los temas siguientes:

- 1.-** Las transformaciones de los colorantes que descarga la industria del teñido de textiles y que pueden ser degradados por microorganismos bajo condiciones anaerobias y aerobias y en membranas (Van der Zee y Villaverde, 2005).
- 2.-** Las transformaciones de contaminantes del agua residual realizadas por microorganismos que se desarrollan como biopelículas sobre materiales: a).- inorgánicos (minerales y plásticos); b).- orgánicos (viruta de madera o turba) (Garzón y Moeller, 2007) y c).- membranas. Dependiendo del medio de soporte las biopelículas se comportan de manera diferente.
- 3.-** El tamaño y la porosidad de las partículas que soportan la biopelícula proporcionan características aplicables a diferentes tipos de contaminantes al desarrollarse diferentes tipos de microorganismos sobre la superficie. Este aspecto es de especial importancia cuando las biopelículas crecen sobre membranas permeables o semipermeables.

4).- Dependiendo de la presencia o ausencia de oxígeno molecular es posible manipular las comunidades microbianas para remover diferentes contaminantes, como pueden ser los compuestos nitrogenados por nitrificación y desnitrificación, los fosfatos y algunos compuestos recalcitrantes como son los colorantes azo (O'Neill *et al.*, 2000; López *et al.*, 2004; Van der Zee y Villaverde, 2005).

Teniendo en cuenta la óptica del proyecto global interinstitucional, el presente proyecto a realizarse el IMTA comprende el estudio de las siguientes investigaciones específicas:

- 1) Estudiar el efecto de la granulometría, la velocidad de filtración y de la carga orgánica en la remoción de macronutrientes de aguas residuales municipales, en un sistema de biofiltración sobre material orgánico.
- 2) Estudiar el efecto de la relación C/N y de la aireación en la remoción de macronutrientes de aguas residuales porcinas en un sistema de filtración anaerobio – aerobio.
- 3) Estudiar la remoción de colorantes azo y aditivos utilizados en la industria textil por un proceso combinado foto catálisis y filtración tipo MBR (Biofiltro/Membrana).

En la primera etapa del proyecto se realizaron las siguientes actividades:

1. Se montaron tres reactores para evaluar el desempeño de tres sistemas de biofiltración sobre lecho orgánico, empacados con granulometrías de diferente tamaño para el tratamiento de un agua residual municipal. El material filtrante utilizado fueron trozos de madera del árbol *Jacaranda mimosifolia*. Las tres granulometrías experimentales, se seleccionaron a partir de los resultados obtenidos de unas pruebas rápidas de filtración. Los diámetros seleccionados de los reactores de acrílico transparente fueron 33, 36 y 50 cm para las partículas de 10 a 12 cm, 13 a 15 cm y 16 a 18 cm, respectivamente. Los tres sistemas experimentales se operaron en continuo y con la misma tasa de aireación ($1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

2. Se seleccionaron tres diferentes tipos de agua residual porcícola (maternidad, destete y engorda) con diferente relación C/N para la realización del estudio. Se caracterizaron tres efluentes generados en una granja porcícola ubicada en el estado de Morelos. Se implementaron tres trenes de tratamiento en paralelo cada uno formado por una fosa séptica, filtro anaerobio de flujo ascendente (empacado con material inorgánico) y un filtro aerobio (empacado con material orgánico). En estos sistemas se van a aplicar tres diferentes relaciones C/N, velocidades de filtración y diferentes tasas de aireación para estudiar el efecto de estas variables sobre la producción de gases de efecto invernadero.

3. Se instaló un sistema tipo MBR que consta de cuatro partes: 1) biofiltro sobre material orgánico, 2) reactor con una membrana sumergida de ultrafiltración, 3) sedimentador

colocado bajo el módulo de membranas y 4) sistema semiautomatizado, para el tratamiento de agua residual de la industria textil. En este prototipo se evaluaron dos diferentes cargas hidráulicas superficiales (0.063 y $0.158 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Durante la segunda etapa del proyecto (2012) se realizaron las siguientes actividades:

1. Se concluyeron las etapas experimentales de los temas de investigación I y III.
2. Se escribieron las tesis de maestría de los temas I y III.
3. Los alumnos obtuvieron el grado de maestro en Ingeniería (Ambiental), un alumno presentó el examen en Noviembre del 2012 y el otro alumno lo presentó en Enero de 2013.
4. Se redactó y publicó un artículo científico en un foro internacional especializado “IWA 3rd Regional Conference on Membrane Technology” llevado a cabo en Buenos Aires, Argentina del 03 al 06 de Diciembre de 2012.
5. El tema de investigación II concluyó su primera etapa experimental.

OBJETIVOS

El presente proyecto con una duración de 36 meses persigue el siguiente:

Objetivo global de proyecto

Determinar el efecto de diferentes variables (carga orgánica, carga hidráulica, granulometría, aireación, etc.) sobre la remoción de macronutrientes de aguas residuales utilizando biopelículas inmovilizadas en diferentes medios (inertes, orgánicos y membranas semipermeables).

Objetivo principal para la 2ª etapa

El objetivo principal de este proyecto para la 2ª etapa es el siguiente: Continuar con el desarrollo de los trabajos de investigación sobre el tema II: Efecto de la relación C/N y aireación en la remoción de ambos macronutrientes de agua residual agro-industrial.

METODOLOGÍA

Desarrollo del trabajo de investigación del tema II

El trabajo de investigación del tema II “Efecto de la relación C/N y la aireación en la remoción de ambos macronutrientes de agua residual agro-industrial” corresponde al trabajo de tesis doctoral de la M. en C. Violeta Escalante Estrada bajo la dirección del Dr. Marco A. Garzón Zúñiga. La alumna se encuentra cursando actualmente el 6° Semestre (de ocho) del programa de Doctorado en el Posgrado en Ingeniería Bioquímica del Instituto Tecnológico de Durango, por lo cual el proyecto se concluirá a medida que la alumna avance en su seguimiento del programa de Doctorado.

RESULTADOS

Se realizaron los trabajos de experimentación del tema de investigación II. Se concluyó la parte experimental y se comenzó con el análisis detallado de los datos. A continuación se presentan los resultados obtenidos de la parte experimental.

El tema “Efecto de la relación C/N y la aireación en la remoción de ambos macronutrientes de agua residual agro-industrial” fue desarrollado en la planta piloto del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, bajo la dirección del Dr. Marco Garzón.

Metodología

Se implementaron tres sistemas (trenes) para el tratamiento de agua residual porcina, los cuales estuvieron constituidos por fosa séptica (FOSA), filtro anaerobio (FAFA) y biofiltro aerobio. El FAFA estuvo empacado con un material inorgánico (tezontle) y el biofiltro con un material orgánico (*Jacaranda Mimosifolia*).

Los sistemas de tratamiento fueron alimentados con agua residual porcina de diferente etapa de crecimiento (producción) de la granja: el S1 se alimentó con agua porcina de la etapa de maternidad, el S2 con agua de la etapa de engorda y el S3 con agua de la etapa de destete.

Durante la primera etapa experimental se realizaron las siguientes actividades: a) Caracterización de aguas residuales porcinas, b) Diseño e implementación de tres trenes de tratamiento, c) Realización de pruebas de trazado para determinación de patrón de flujo, tiempo de retención real y % de zonas muertas en filtros anaerobios, d) Determinación del efecto de la relación C/N en filtros anaerobios sobre la remoción de materia orgánica con un caudal de 16 L d^{-1} y e) Determinación del efecto de la relación C/N en biofiltros aerobios sobre la remoción de nitrógeno y formación de N_2O y N_2 . Las dos últimas etapas se realizaron por separado.

Durante la segunda etapa experimental (la presente) se evaluaron tres periodos experimentales como se muestra en la Tabla 1. Los tres sistemas de tratamiento fueron operados durante 565 días aplicando diferentes cargas orgánicas en cada proceso del tren de tratamiento. Los biofiltros operaron con tres tasas de aireación, la primera de $3.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y la segunda de $1.7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para los tres sistemas. En la tercera etapa se utilizó una tasa de $2.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en el BF1 y $1.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para el BF2 y BF3.

Tabla 1 Resumen de parámetros de operación de los sistemas de tratamiento

Periodo experimental		1	2	3a	3b	3c
Duración (d)		0-380 (0-90 Estabilización)	381-494	495-535	536-550	551-565
Sistema 1						
FOSA 1	C.O.V. (kg DQO m ⁻³ d ⁻¹)	5.1±3.9	7.7±3.7	5.4±2.2		
FAFA1	TRH (d)	0.8±0.1	0.7±0.2	0.4±0.1		
	Q (L/d)	18.4±3.2	20.5±3.1	31.5±1.5		
	C.O.V. (kg DQO m ⁻³ d ⁻¹)	5.3±3.0	8.1±3.8	9.6±4.6		
BF1	Tasa Aeración (m ³ m ⁻² h ⁻¹)	3.4	1.7	2.3		
	Q (L/d)	6.35±1.95	7.62±1.07	16±5.11		
	C.O.S. (kg DQO m ⁻² d ⁻¹)	0.2±0.1	0.3±0.3	0.6±0.5	0.5±0.3	0.9±1.2
Sistema 2						
FOSA 2	C.O.V. (kg DQO m ⁻³ d ⁻¹)	9.4±6.0	14.0±6.0	15.2±15.6		
FAFA2	TRH	0.7±0.1	0.6±0.1	0.3±0.1		
	Q (L/d)	17.4±2.7	19.1±2.1	30.6±3.8		
	C.O.V. (kg DQO m ⁻³ d ⁻¹)	15.5±7.4	13.1±5.2	31.8±13.1		
BF2	Tasa Aeración (m ³ m ⁻² h ⁻¹)	3.4	1.7	1.4		
	Q (L/d)	5.8±3.5	7.2±1.2	16.2±4.2		
	C.O.S. (kg DQO m ⁻² d ⁻¹)	05±0.6	0.6±0.4	1.4±0.6	1.2±1.0	1.4±1.0
Sistema 3						
FOSA 2	C.O.V. (kg DQO m ⁻³ d ⁻¹)	9.7±4.1	15.8±8.2	7.0±2.5		
FAFA3	TRH	0.8±0.3	0.6±0.2	0.3±0.1		
	Q (L/d)	17.2±3.6	21.5±4.7	26.7±3.1		
	C.O.V. (kg DQO m ⁻³ d ⁻¹)	10.1±4.6	18.6±7.6	24.8±18.8		
BF3	Tasa Aeración (m ³ m ⁻² h ⁻¹)	3.4	1.7	1.4		
	Q (L/d)	7.1±3.6	7.8±0.7	15.2±4.4		
	C.O.S. (kg DQO m ⁻² d ⁻¹)	1.9±1.0	3.3±1.7	2.4±0.9	2.6±1.6	7.9±4.3

Resultados

Desempeño del Sistema 1 (S1)

Comportamiento del pH en el Sistema 1 (S1)

En la Figura 1 se presenta el comportamiento del pH en el sistema S1, observándose que el influente del sistema es variable con valores en un intervalo entre 5.5 y 8.5 durante todas las etapas experimentales. Una vez que el agua residual porcina es tratada en la fosa séptica el pH del efluente (IFAFA) tiende a estabilizarse en valores en un intervalo entre 7.0 a 8.7. El efluente del FAFA permaneció en un intervalo de valores más estable con pH entre 7.5 y 8.5 durante la mayor parte de la experimentación, valores son ligeramente mayores a los óptimos para un sistema anaerobio (6.5-7.5). Una vez que el agua residual en tratamiento pasa a través del biofiltro ésta es acidificada por la presencia de los ácidos húmicos y fúlvicos contenidos en el material orgánico filtrante lo que produce un efluente general (EBF1) con valores de pH en un intervalo entre 5.0 y 6.5 la mayor parte de los tres periodos experimentales. Se observa en la gráfica que durante la etapa 3a y 3b se presentaron los valores de pH más bajos (hasta 4.5 unidades de pH) probablemente producto de la nitrificación que se lleva a cabo dentro del sistema y que produce un consumo de la alcalinidad y por lo tanto una disminución en el pH en agua residual porcina (Magrí *et al.*, 2007).

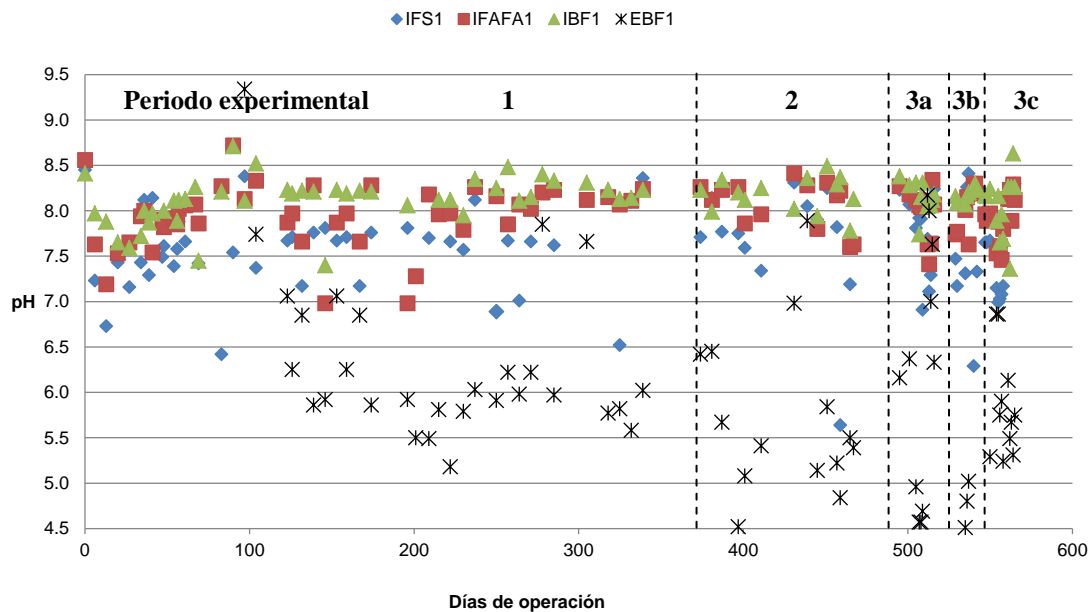


Figura 1 Comportamiento del pH en el Sistema 1

Comportamiento de la temperatura en el Sistema 1 (S1)

El sistema S1 mantuvo valores de temperatura en el rango mesofílico durante las 3 etapas experimentales (Figura 2). Durante las etapas 1, 3a, 3b y 3c los valores de temperatura se mantuvieron en un intervalo de valores entre 21 a 27°C tanto en el agua residual porcina cruda como en el efluente de los sistemas del tren de tratamiento (fosa, FAFA y biofiltro). Durante la etapa 2 se presentó un incremento en la temperatura de todos los sistemas probablemente por la época del año a la que corresponde la operación del sistema.

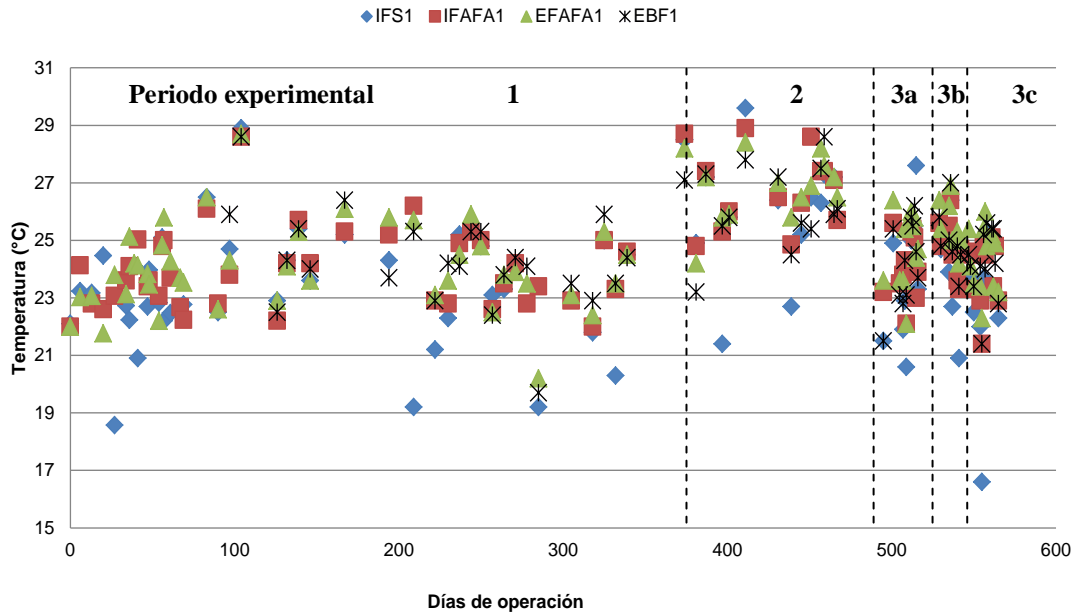


Figura 2 Comportamiento de la temperatura en el Sistema 1

Comportamiento de los sólidos disueltos totales (SDT) en el Sistema 1 (S1)

En la Figura 3 se presenta el comportamiento de los SDT en el Sistema 1 durante las tres etapas experimentales. Se observa que los valores de SDT en el influente y efluente de la fosa séptica y FAFA se mantuvieron en un intervalo entre 2 y 5 mg L⁻¹ durante la mayor parte de la experimentación. En el efluente del biofiltro se obtuvieron valores cercanos a 2 mg L⁻¹. Se observa en la gráfica que al disminuir el TRH (cambio de etapa experimental) la concentración de SDT disminuye en todos los procesos que conforman el tren de tratamiento.

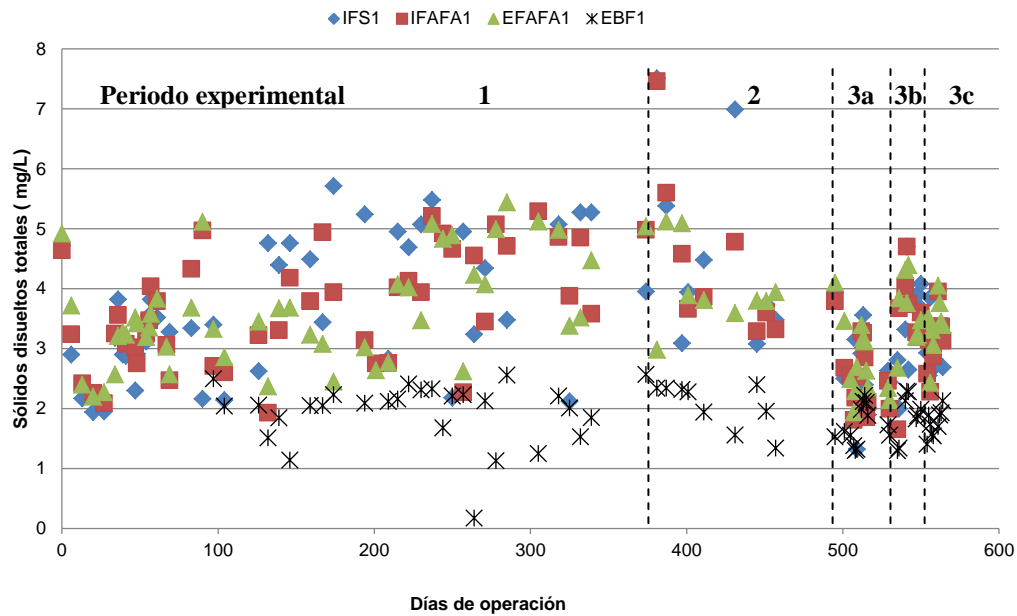


Figura 3 Comportamiento de los SDT en el Sistema 1

Comportamiento de la alcalinidad en el Sistema 1 (S1)

La alcalinidad en los sistemas anaerobios (fosa séptica y Fafa) se mantuvo durante la mayor parte de las tres etapas experimentales en un intervalo de valores entre 2,000 a 3,500 $\text{mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ (Figura 4). Estos valores se encuentran dentro del rango óptimo de operación para sistemas anaerobios según Metcalf y Eddy (2003). Una vez que el agua tratada pasa a través del biofiltro, la alcalinidad disminuye hasta valores cercanos a cero debido al proceso de nitrificación que consume la alcalinidad y disminuye el pH.

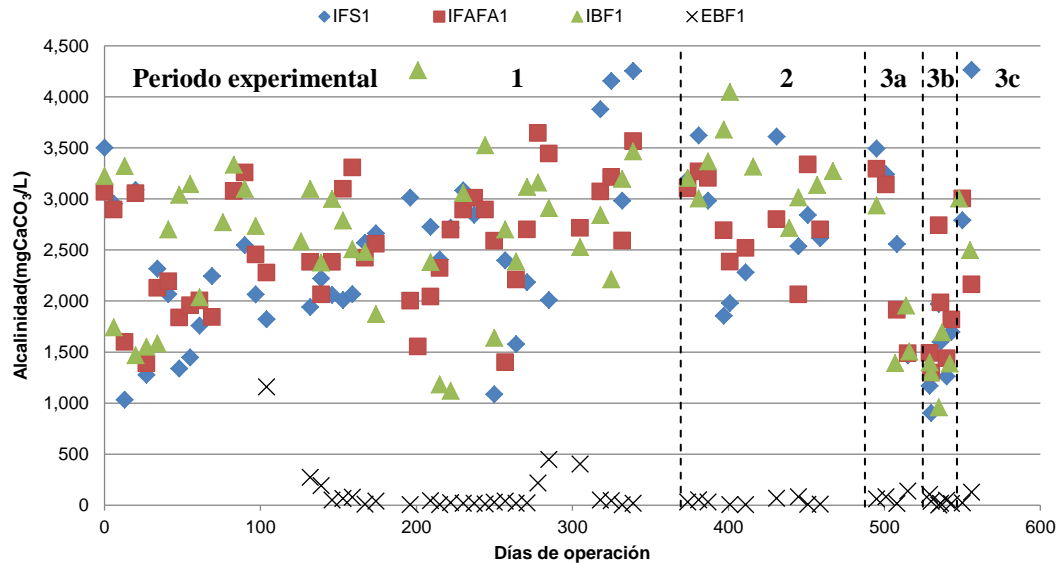


Figura 4 Comportamiento de la alcalinidad en el Sistema 1

Comportamiento de la materia orgánica en el Sistema 1 (S1)

En la Figura 5 se muestra el comportamiento de la DQO en el sistema S1. Se observa claramente que el influente del sistema (agua cruda) presentó variabilidad en la concentración de materia orgánica durante todas las etapas experimentales debido a que se trabajó con un agua residual porcina real con la que se obtuvieron valores de DQO promedio de $8,968 \pm 5,382$, $10,288 \pm 4,511$, $4,944 \pm 1,499$, $3,118 \pm 712$ y $8,842 \pm 3,891$ mg.L^{-1} para el periodo 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente (Tabla 2), los cuales son similares a los reportados en otras investigaciones para este tipo de agua (Ra *et al.*, 2000; Meers *et al.*, 2006).

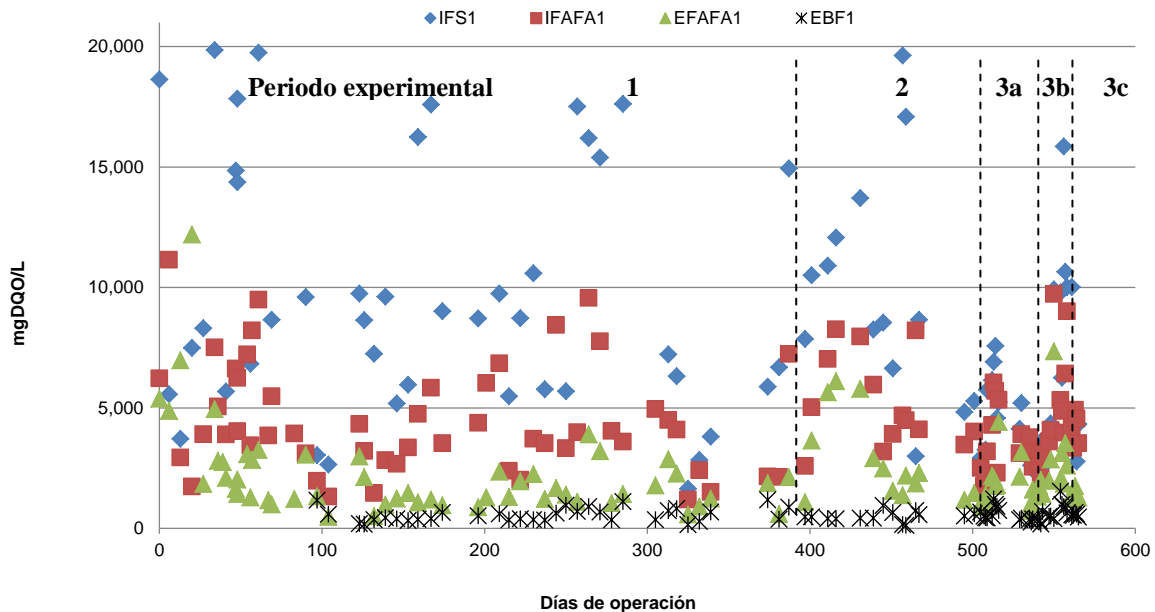


Figura 5 Comportamiento de la materia orgánica en el Sistema 1

A la salida de la fosa séptica se encontraron valores menores a $5,000 \text{ mg.L}^{-1}$ de DQO con promedios de remoción de 49 ± 20 , 53 ± 16 , 27 ± 10 , 19 ± 20 , y $34 \pm 25\%$ para el periodo 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente, sin embargo, las concentraciones se mantuvieron con el mismo comportamiento variable. En el filtro anaerobio (FAFA) se presentó un comportamiento más estable de la materia orgánica obteniendo remociones promedio de DQO de 70 ± 15 , 58 ± 15 , 65 ± 9 , 56 ± 17 y $59 \pm 15\%$ y concentraciones promedio de DQO de $1,072 \pm 423$, $2,141 \pm 1,173$, $1,213 \pm 411$, $1,330 \pm 476$ y $3,467 \pm 4,007 \text{ mg.L}^{-1}$ para el periodo 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente. Durante la operación del filtro anaerobio se presentó un ligero incremento en la concentración de materia orgánica cuando se realizaba el cambio en el TRH. El efluente del biofiltro mantuvo un comportamiento estable con concentraciones menores a $1,000 \text{ mg.L}^{-1}$ de DQO durante todas las fases experimentales (576 ± 267 , 548 ± 288 , 653 ± 273 , 394 ± 155 , $737 \pm 321 \text{ mg.L}^{-1}$ de DQO para el periodo 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente). El comportamiento del biofiltro solamente se vio afectado en el cambio de TRH, sin embargo el sistema regresaba a su comportamiento original después de 3 ó 4 d de operación. Los resultados anteriores muestran una remoción total de materia orgánica para el sistema de tratamiento 1 de 92 ± 5 , 93 ± 7 , 86 ± 5 , 87 ± 6 y $90 \pm 6 \text{ mg.L}^{-1}$ de DQO para el periodo 1, 2, 3a, 3b y 3c respectivamente, siendo el filtro anaerobio (FAFA) el principal medio de degradación de materia orgánica para el agua residual porcina.

Tabla 2 Remoción de materia orgánica en el sistema S1

Periodo experimental (d)	Fosa Séptica		FAFA		Biofiltro		Sistema S1	
	Influyente (mg.L ⁻¹)	Remoción (%)	Influyente (mg.L ⁻¹)	Remoción (%)	Influyente (mg.L ⁻¹)	Remoción (%)	Efluente (mg.L ⁻¹)	Remoción total (%)
1 (0-380)	8,968±5,382	49±20	4,326±2,380	70±15	1,072±423	46±18	576±267	92±5
2 (381-494)	10,288±4,511	53±16	5,128±2,192	58±15	2,141±1,173	64±27	548±288	93±7
3a (495-535)	4,944±1,499	27±10	3,684±1,489	65±9	1,213±411	45±17	653±273	86±5
3b (536-550)	3,118±712	19±20	3,120±627	56±17	1,330±476	68±14	394±155	87±6
3c (551-565)	8,842±3,891	34±25	5,444±2,126	59±15	3,467±4,007	63±20	737±321	90±6

Comportamiento de los sólidos en el Sistema 1 (S1)

En las gráficas de la Figura 6 se presenta el comportamiento de los sólidos suspendidos totales y volátiles. Se observa que a medida que el agua residual porcina va pasando a través de las diferentes etapas del sistema de tratamiento la concentración de sólidos va disminuyendo. En el influente se presentaron valores en un intervalo entre 1,000 y 10,000 mg L⁻¹ de SST y SSV, posteriormente se encontraron valores entre 500-5,000 mg L⁻¹ de SST y SSV en el efluente de la fosa séptica y en el efluente del filtro anaerobio, los valores obtenidos se encontraron en un intervalo de concentraciones entre 100 y 1,000 mg L⁻¹ de SST y SSV. El efluente del biofiltro o efluente general presentó valores en un intervalo entre 10 y 100 mg L⁻¹ de SST y SSV, lo que indica altas remociones con este sistema de tratamiento. No se observó efecto en el comportamiento de los sólidos debido al cambio en el TRH probablemente por la capacidad de los sistemas anaerobios de amortiguar estos cambios.

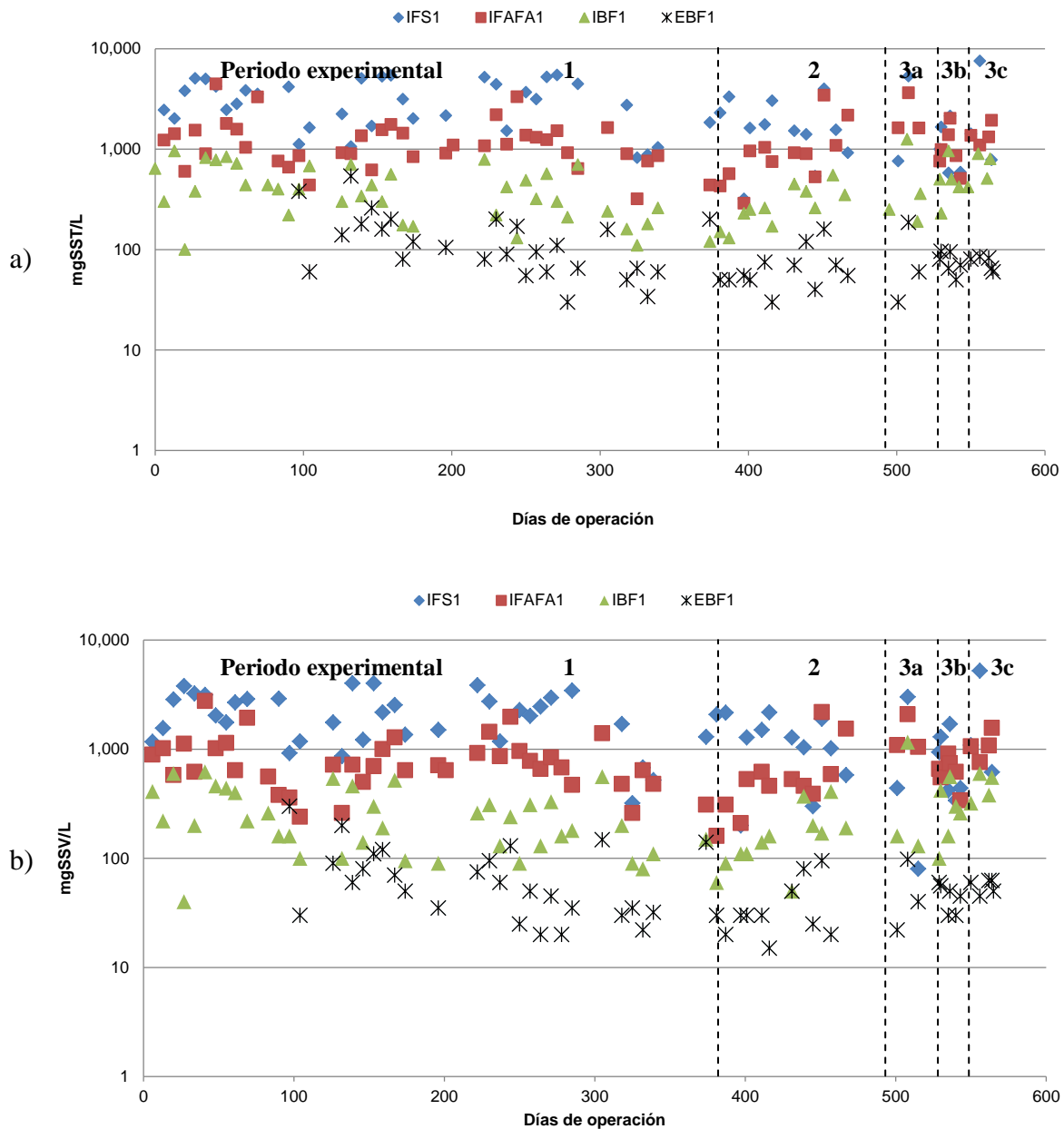


Figura 6 Comportamiento de los sólidos en el Sistema 1: a) SST y b) SSV

Comportamiento del nitrógeno amoniacal en el Sistema 1 (S1)

En lo que respecta al nitrógeno amoniacal las concentraciones en los influentes de la fosa séptica, FAFA y biofiltro fueron muy estables durante los tres periodos experimentales como se puede observar en la Figura 7, mientras que en el biofiltro se observó un comportamiento variable directamente relacionado con el cambio en la tasa de aeración.

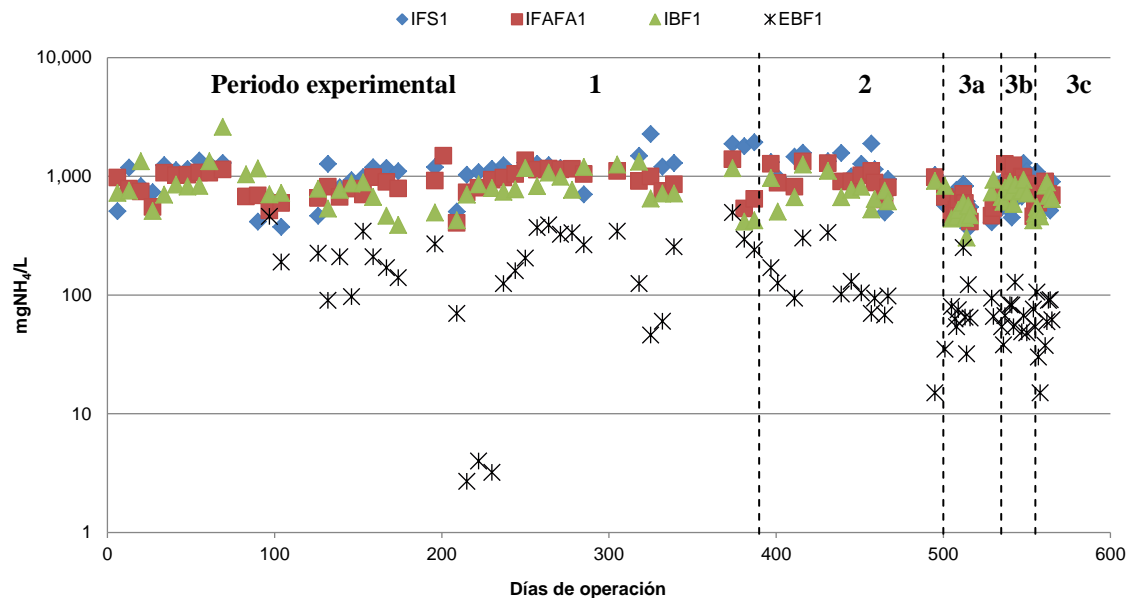


Figura 7 Comportamiento del N-NH₄ en el Sistema 1

En la Tabla 3 se presentan las concentraciones promedio de nitrógeno amoniacal obtenidas durante la experimentación para el sistema 1. El agua residual porcina a la entrada del sistema 1 presentó concentraciones de $1,212 \pm 395$, $1,373 \pm 415$, 654 ± 193 , 677 ± 262 y 861 ± 236 mg L⁻¹ N-NH₄ en el periodo 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente, estos valores son similares a los reportados para este tipo de aguas (Vázquez, 2002; Bonmati *et al.*, 2001).

Se observó claramente que durante las fases anaerobias no hay remoción notable de nitrógeno, sin embargo al pasar el agua a través de la fase aerobia (biofiltro) se lleva a cabo el proceso de nitrificación obteniendo remociones de nitrógeno amoniacal de 82 ± 13 , 79 ± 17 , 86 ± 11 , 92 ± 3 y $88 \pm 12\%$ y concentraciones de 182 ± 139 , 182 ± 125 , 74 ± 70 , 69 ± 25 y 61 ± 28 mg L⁻¹ en el periodo 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente.

Tabla 3 Remoción de nitrógeno amoniacal en el sistema S1

Periodo experimental (d)	Fosa Séptica	FAFA	Biofiltro		
	Influente (mg.L ⁻¹)	Influente (mg.L ⁻¹)	Influente (mg.L ⁻¹)	Efluente (mg.L ⁻¹)	Remoción (%)
1 (0-380)	$1,212 \pm 395$	971 ± 221	882 ± 248	182 ± 139	82 ± 13
2 (381-494)	$1,373 \pm 415$	961 ± 268	753 ± 265	182 ± 125	79 ± 17
3a (495-535)	654 ± 193	620 ± 161	552 ± 199	74 ± 70	86 ± 11
3b (536-550)	677 ± 262	916 ± 233	777 ± 128	69 ± 25	92 ± 3
3c (551-565)	861 ± 236	695 ± 122	627 ± 153	61 ± 28	88 ± 12

Relación C/N en el Sistema 1 (S1)

En la Tabla 4 se presentan los valores promedio obtenidos de la relación carbono/nitrógeno. En el agua residual porcina cruda se encontró una relación C/N de 8.2 ± 6.6 , 7.1 ± 3.4 y 7.1 ± 2.8 , para el período 1, 2 y 3, respectivamente, lo cual es resultado de las elevadas concentraciones de materia orgánica y nitrógeno amoniacal. Una vez que el agua residual ha pasado por los procesos anaerobios (fosa y FAFA) y la carga orgánica ha disminuido pero no el nitrógeno amoniacal (puesto que éste no es removido por tales procesos) se tiene una relación de C/N a la salida del FAFA (o Influyente biofiltro) de 1.1 ± 0.3 , 3.2 ± 1.8 y 2.5 ± 1.4 , para el período 1, 2 y 3, respectivamente.

Tabla 4 Relación C/N (DQO/N-NH₄⁺) en el S1

Periodo experimental (d)	Fosa Séptica	FAFA	Biofiltro
	Influyente (C/N)	Influyente (C/N)	Influyente (C/N)
1 (0-380)	8.2 ± 6.6	4.0 ± 2.0	1.1 ± 0.3
2 (381-494)	7.1 ± 3.4	6.0 ± 3.2	3.2 ± 1.8
3 (495-565)	7.1 ± 2.8	6.1 ± 2.8	2.5 ± 1.4

Influencia de la tasa de aireación sobre la remoción de nitrógeno y materia orgánica

En la Tabla 5 se observa que la tasa de aireación que permitió los mejores resultados de remoción de materia orgánica y nitrógeno amoniacal fue la de $2.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Tabla 5 Influencia de la tasa de aireación sobre la remoción de nitrógeno en el biofiltro (S1)

Periodo experimental (d)	Tasa de aireación (m ³ m ⁻² d ⁻¹)	COS (Kg DQO m ⁻² d ⁻¹)	DQO (%)	N-NH ₄ (%)
1 (0-380)	3.4	0.2 ± 0.1	46±18	82±13
2 (381-494)	1.7	0.3 ± 0.3	64±27	79±17
3a (495-535)	2.3	0.6 ± 0.5	45±17	86±11
3b (536-550)		0.5 ± 0.3	68±14	92±3
3c (551-565)		0.9 ± 1.2	63±20	88±12

Desempeño del Sistema 2 (S2)

Comportamiento del pH en el Sistema 2 (S2)

En la Figura 8 se presenta el comportamiento del pH en el sistema S2. Se observa que el influente del sistema general presentó valores de pH en un intervalo entre 6 y 7 durante los tres periodos experimentales. Una vez que el agua residual pasa por los sistemas anaerobios

el pH se incrementa estabilizándose en valores cercanos a 8.0 lo que permite condiciones adecuadas para que se lleve a cabo la metanogénesis en el filtro anaerobio. Al pasar el agua en tratamiento por el biofiltro ésta se acidifica hasta valores de pH en un intervalo entre 5 y 7 durante el primer periodo experimental y entre 5 y 6 durante los periodos 2 al 5, estos valores se deben probablemente a la nitrificación en el sistema.

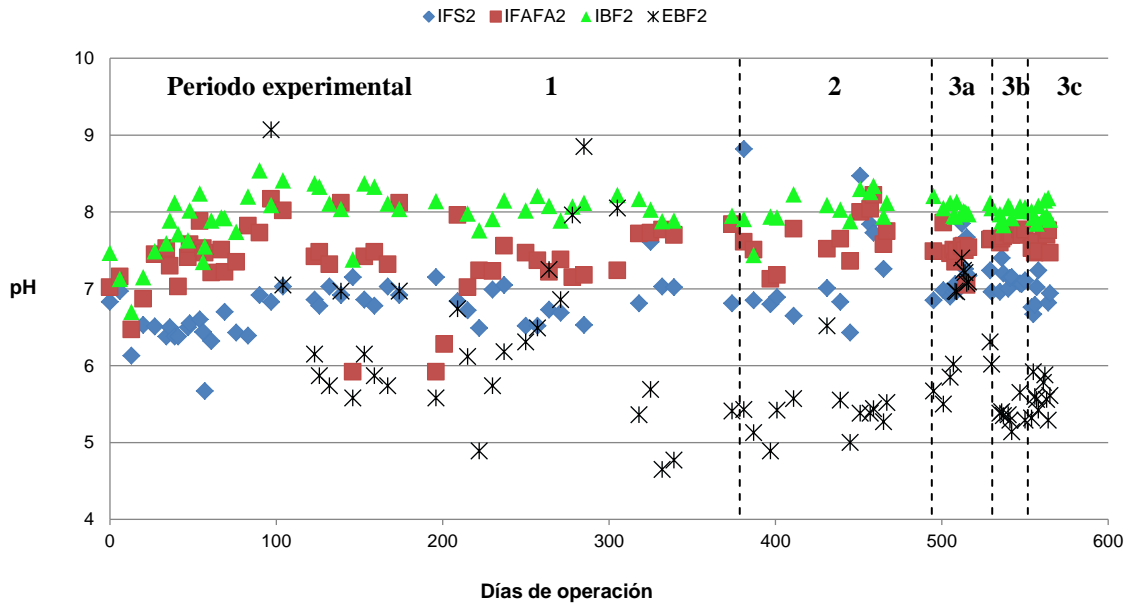


Figura 8 Comportamiento del pH en el Sistema 2

Comportamiento de la temperatura en el Sistema 2 (S2)

La temperatura en el sistema S2 durante la etapa 1, 3a, 3b y 3c se mantuvo en un intervalo entre 21 y 27°C para el influente y el efluente de los sistemas. En la etapa 2 al igual que para el sistema S1, la temperatura se incrementó a valores entre 25 y 29°C. Durante todas etapas experimentales los sistemas que conforman el tren de tratamiento operaron en un rango mesofílico de temperatura, tal como se muestra en la Figura 9.

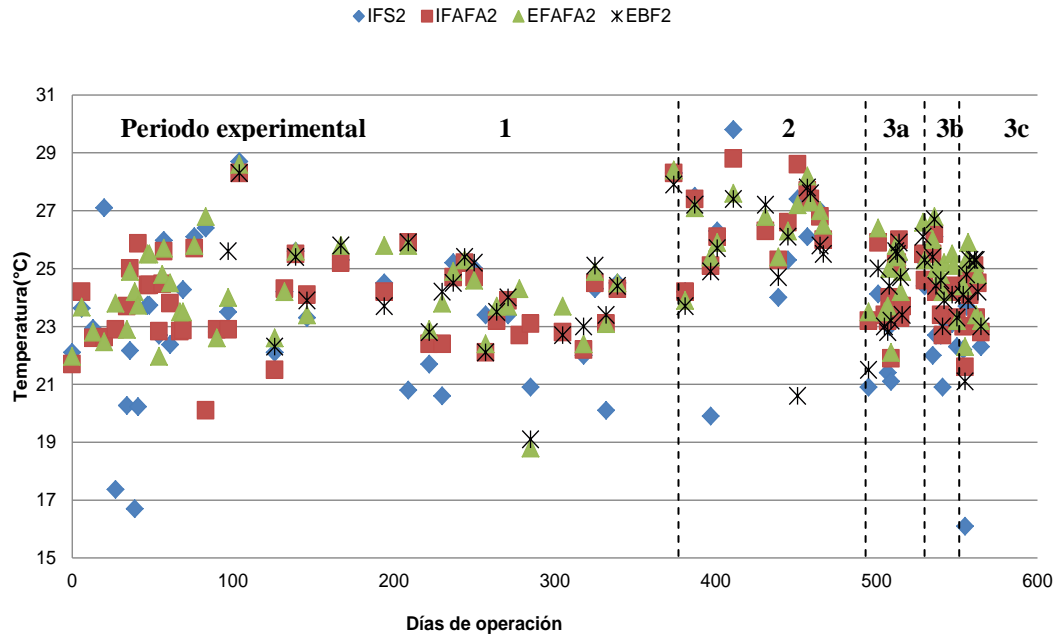


Figura 9 Comportamiento de la temperatura en el Sistema 2

Comportamiento de los sólidos disueltos totales (SDT) en el Sistema 2 (S2)

En cuanto a los resultados de sólidos disueltos totales se observó que una vez que el agua residual en tratamiento pasa por las diferentes etapas del tratamiento, la concentración de SDT disminuye, siendo el efluente del biofiltro el que presenta las menores concentraciones y las más estables. (Figura 10). Las concentraciones de SDT en las tres etapas experimentales se mantuvieron en un intervalo entre 3 y 6 mg L⁻¹ en la fosa y el FAFA. En el biofiltro las concentraciones de SDT se mantuvieron en un intervalo entre 1 y 3 mg L⁻¹.

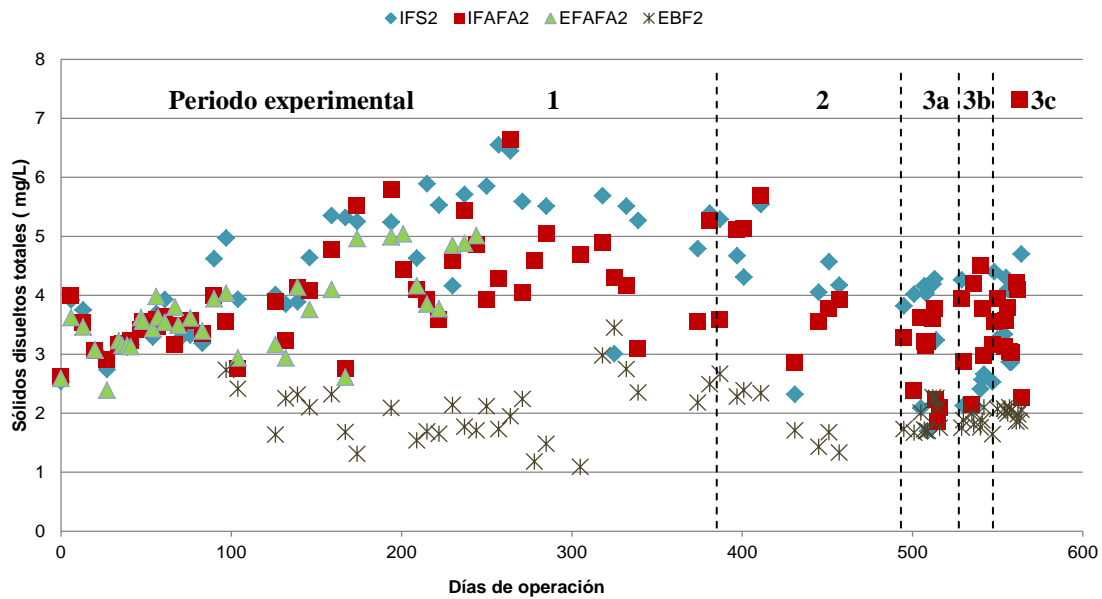


Figura 10 Comportamiento de los SDT en el Sistema 2

Comportamiento de la alcalinidad en el Sistema 2 (S2)

El sistema S2 mantuvo el mismo comportamiento que el S1, con valores de alcalinidad en un intervalo entre 2,000 a 3,500 mg CaCO₃.L⁻¹ la mayor parte del tiempo (Figura 11), los cuales se encuentran dentro del rango óptimo de operación para sistemas anaerobios. El efluente de los biofiltros se mantuvo en valores cercanos a cero, lo cual está relacionado con la disminución en el pH y el proceso de nitrificación en el sistema.

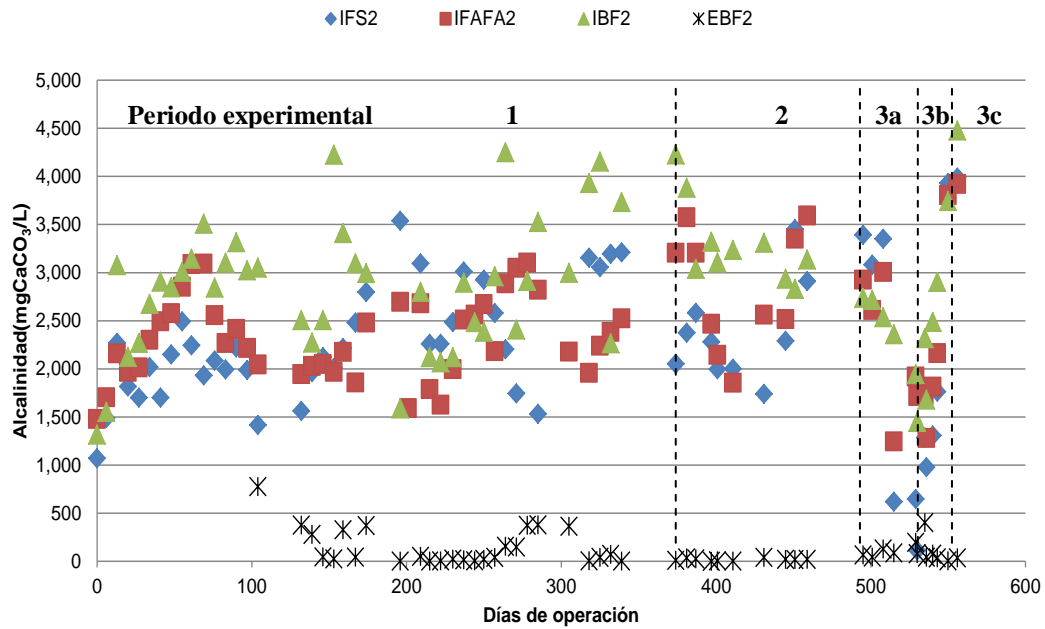


Figura 11 Comportamiento de la alcalinidad en el Sistema 2

Comportamiento de la materia orgánica en el Sistema 2 (S2)

En la Figura 12 se muestra el comportamiento de la DQO en el sistema S2. El agua residual utilizada para alimentar el S2 presentó concentraciones de DQO en un intervalo entre 10,000 y 20,000 mg L⁻¹, estas concentraciones fueron superiores a las del influente del S1 debido a que se trabajó con agua proveniente de la etapa de engorda de la granja, la cual presenta las mayores concentraciones de contaminantes tal como lo mencionan Garzón y Buelna (2014). El efluente de la fosa séptica se mantuvo en un intervalo de concentraciones entre 10,000 y 15,000 mg L⁻¹ la mayor parte de las tres etapas experimentales. Una vez que el agua ha pasado al FAFA las concentraciones de DQO disminuyen a valores menores a 5,000 mg L⁻¹ la mayor parte del tiempo. En el biofiltro las concentraciones disminuyen hasta valores en un intervalo entre 500 y 1,500 mg L⁻¹.

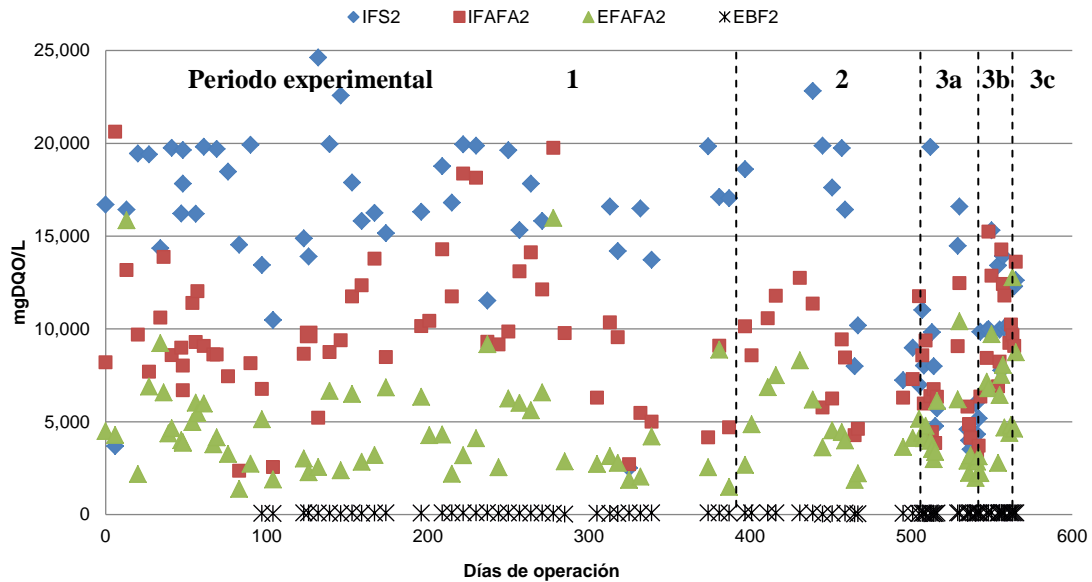


Figura 12 Comportamiento de la materia orgánica en el Sistema 2

Como se muestra en la Tabla 6 las concentraciones de DQO promedio en el influente fueron $17,907 \pm 9,787$, $21,040 \pm 7,897$, $13,993 \pm 12,658$, $6,368 \pm 2,749$, y $11,713 \pm 2,398$ mg L^{-1} , para la etapa 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente. La variación en las concentraciones del influente es resultado de diversos factores tales como, el periodo de recolección de la muestra (hora del día), limpieza de las naves de cerdos, tipo de alimentación, usos del agua, clima, entre otros.

Una vez que el agua residual pasa por la fosa séptica se remueve un 39 ± 22 , 60 ± 11 , 25 ± 43 , 31 ± 14 y $21 \pm 15\%$ de DQO en la etapa 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente. En el Fafa se presenta la mayor parte de la remoción de materia orgánica del tren de tratamiento S2, con concentraciones más estables de materia orgánica y concentraciones promedio de DQO en el efluente de $3,119 \pm 1,883$, $3,220 \pm 1,771$, $3,468 \pm 570$, $3,053 \pm 2,158$ y $6,457 \pm 4,672$ mg L^{-1} , lo que representa remociones promedio de 68 ± 22 , 61 ± 12 , 51 ± 11 , 48 ± 23 y $55 \pm 13\%$ durante la etapa 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente. Estas remociones son similares a las obtenidas para el agua residual de la etapa de engorda evaluada con el S1. Durante la operación del S2 se observó el mismo comportamiento que en el S1 para el filtro anaerobio, es decir, un ligero incremento de la concentración de DQO con el cambio de TRH. El efluente del biofiltro mantuvo un comportamiento estable con concentraciones de DQO promedio de 604 ± 440 , 763 ± 554 , $1,224 \pm 320$, 354 ± 168 y 446 ± 158 mg L^{-1} en la etapa 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente.

En general con el tren de tratamiento Fosa séptica, Fafa y biofiltro para tratar agua residual porcina de la etapa de engorda se obtuvieron remociones promedio de DQO del 96 ± 2 , 95 ± 5 , 88 ± 7 , 94 ± 3 y $96 \pm 2\%$ en la etapa 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente.

Tabla 6 Remoción de materia orgánica en el sistema S2

Periodo experimental (d)	Fosa Séptica		FAFA		Biofiltro		Sistema S1	
	Influyente (mg.L ⁻¹)	Remoción (%)	Influyente (mg.L ⁻¹)	Remoción (%)	Influyente (mg.L ⁻¹)	Remoción (%)	Efluente (mg.L ⁻¹)	Remoción total (%)
1 (0-380)	17,907±9,787	39±22	11,065±4,713	68±22	3,119±1,883	76±19	604±440	96±2
2 (381-494)	21,040±7,897	60±11	8,129±2,952	61±12	3,220±1,771	72±26	763±554	95±5
3a (495-535)	13,993±12,658	25±43	7,429±2,173	51±11	3,468±570	64±12	1,224±320	88±7
3b (536-550)	6,368±2749	31±14	6,076±3,851	48±23	3,053±2,158	83±12	354±168	94±3
3c (551-565)	11,713±2,398	21±15	10,756±2,379	55±13	6,457±4,672	90±6	446±158	96±2

Comportamiento de los sólidos en el Sistema 2 (S2)

En la Figura 13 se presenta el comportamiento de los sólidos en el tren de tratamiento S2. La concentración de SST y SSV en el influente se mantuvo en un intervalo entre 1,000 y 10,000 mg L⁻¹ durante las tres etapas experimentales. Las concentraciones en el influente del S2 fueron mayores a las del S1 puesto que la concentración de sólidos en el agua residual porcina de la etapa de engorda es superior a la de la etapa de maternidad. Al salir de la fosa séptica la concentración de sólidos mantiene concentraciones más estables que en el influente. La concentración de sólidos en el efluente del FAFA se mantuvo en un intervalo entre 100 y 4,000 mg L⁻¹ de SST y SSV durante las tres etapas experimentales. El efluente del biofiltro presentó concentraciones de sólidos en un intervalo entre 10 y 1,000 mg L⁻¹.

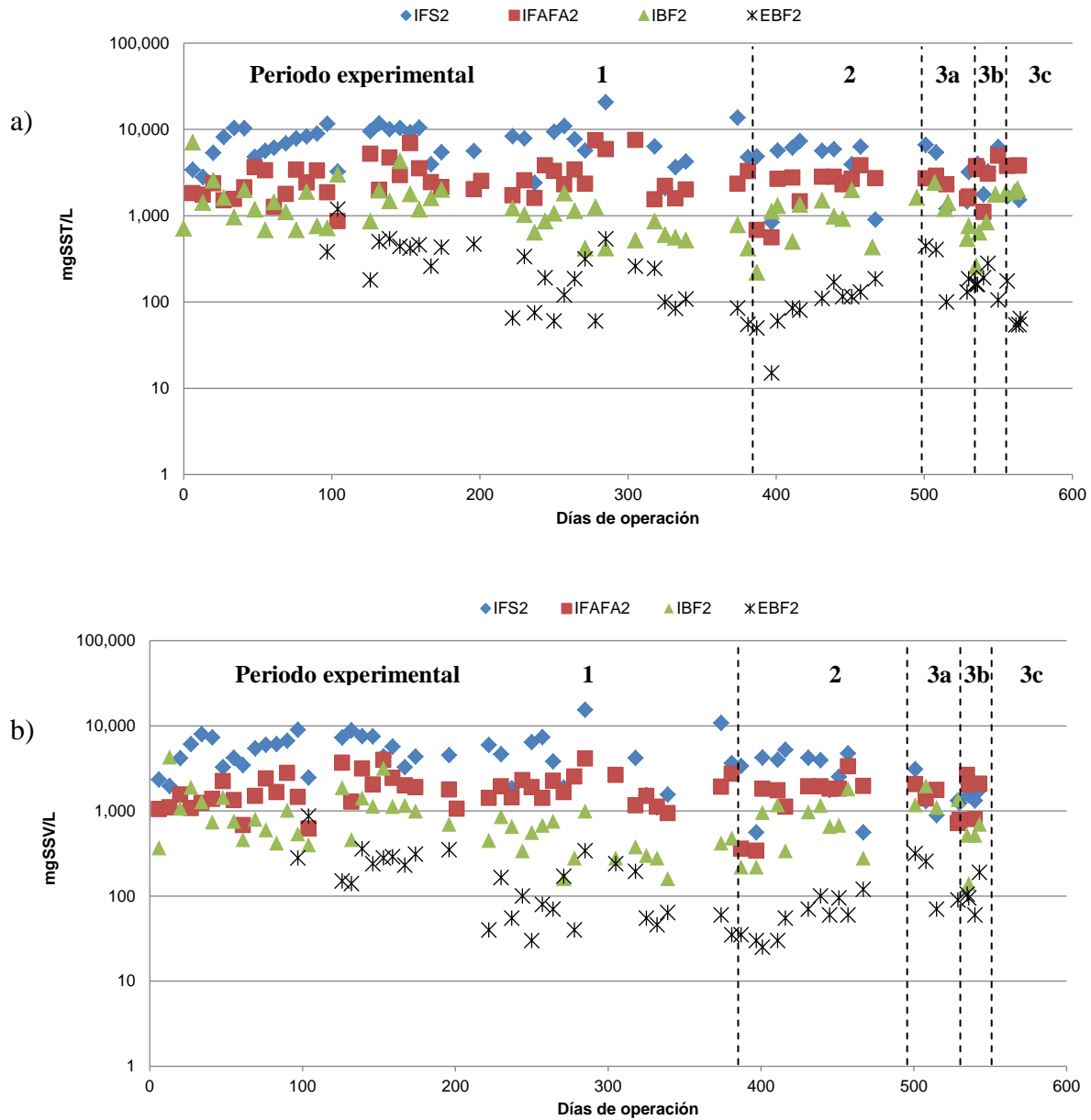


Figura 13 Comportamiento de los sólidos en el Sistema 2: a) SST y b) SSV

Comportamiento del nitrógeno amoniacal en el Sistema 2 (S2)

En la Figura 14 se presenta el comportamiento del nitrógeno amoniacal en el S2. Se observa claramente que durante las fases anaerobias no se presenta remoción del nitrógeno

amoniaco en los sistemas, sin embargo, al pasar el agua residual por el tratamiento aerobio (biofiltro), éste es removido. Se observa en la gráfica que en la etapa 3c que corresponde a una tasa de aireación de $1.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y una COS de $1.4 \pm 1.0 \text{ kg DQO m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ se presentó la mayor remoción de nitrógeno amoniaco.

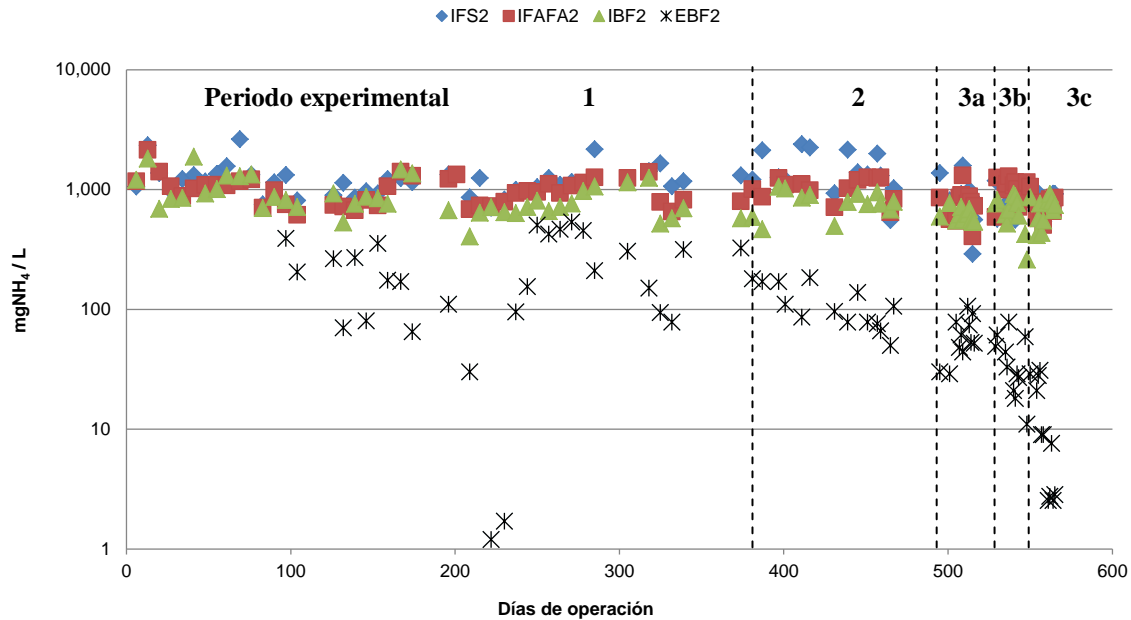


Figura 14 Comportamiento del N-NH₄ en el Sistema 2

El agua residual porcina de la etapa de engorda presentó concentraciones de $1,189 \pm 371$, $1,495 \pm 546$, $1,019 \pm 268$, 815 ± 199 y $838 \pm 153 \text{ mg L}^{-1} \text{ N-NH}_4$ en el periodo 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente (Tabla 7), estos valores son similares a los encontrados en el agua residual de la etapa de maternidad utilizada en el S1.

Se encontraron remociones globales promedio de nitrógeno en el sistema S2 de 75 ± 21 , 86 ± 10 , 92 ± 4 , 95 ± 3 y $98 \pm 2\%$ y concentraciones promedio de 225 ± 193 , 128 ± 70 , 58 ± 25 , 38 ± 22 y 13 ± 12 en el periodo 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente, siendo la etapa 3c en la que se obtuvieron mayores remociones de nitrógeno amoniaco.

Tabla 7 Remoción de nitrógeno amoniaco en el sistema S2

Periodo experimental (d)	Fosa Séptica	Fafa	Biofiltro		
	Influente (mg.L ⁻¹)	Influente (mg.L ⁻¹)	Influente (mg.L ⁻¹)	Efluente (mg.L ⁻¹)	Remoción (%)
1 (0-380)	$1,189 \pm 371$	954 ± 222	759 ± 224	225 ± 193	75 ± 21
2 (381-494)	$1,495 \pm 546$	$1,019 \pm 208$	773 ± 183	128 ± 70	86 ± 10
3a (495-535)	$1,019 \pm 268$	829 ± 222	631 ± 77	58 ± 25	92 ± 4
3b (536-550)	815 ± 199	$1,058 \pm 180$	649 ± 208	38 ± 22	95 ± 3
3c (551-565)	838 ± 153	746 ± 155	686 ± 171	13 ± 12	98 ± 2

Relación C/N en el Sistema 2 (S2)

En la Tabla 8 se presentan los valores promedio obtenidos de la relación carbono/nitrógeno en el sistema S2. En el agua residual porcina de la etapa de engorda se encontró una relación C/N de 15.4 ± 6.9 , 15.2 ± 7.6 y 12.9 ± 7.7 , para el período 1, 2 y 3, respectivamente, estas relaciones son aproximadamente el doble de las encontradas en el agua residual de la etapa de maternidad, lo que indica altas concentraciones de materia orgánica y nitrógeno en el agua de engorda. De forma similar que en el sistema S1, la relación C/N disminuye al pasar por los sistemas anaerobios, puesto que hay remoción de materia orgánica (en mayor medida) y una ligera remoción de nitrógeno, lo que resulta en relaciones C/N a la salida del FAFA de 4.3 ± 3.1 , 4.5 ± 3.2 y 5.5 ± 1.0 , para el período 1, 2 y 3, respectivamente.

Tabla 8 Relación C/N (DQO/N-NH₄⁺) en el S2

Periodo experimental (d)	Fosa Séptica	FAFA	Biofiltro
	Influyente (C/N)	Influyente (C/N)	Influyente (C/N)
1 (0-380)	15.4±6.9	11.7±6.2	4.3±3.1
2 (381-494)	15.2±7.6	8.1±3.5	4.5±3.2
3 (495-565)	12.9±7.7	9.7±5.0	5.5±1.0

Influencia de la tasa de aireación sobre la remoción de nitrógeno y materia orgánica

Las remociones de materia orgánica y nitrógeno más altas se obtuvieron durante el periodo experimental 3c en el que se aplicó una tasa de aireación de $1.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en el biofiltro con una COS de $1.4 \pm 1.0 \text{ kg DQO m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Tabla 9).

Tabla 9 Influencia de la tasa de aireación sobre la remoción de nitrógeno en el biofiltro (S2)

Periodo experimental (d)	Tasa de aeración (m ³ m ⁻² d ⁻¹)	COS (Kg DQO m ⁻² d ⁻¹)	DQO (%)	N-NH ₄ (%)
1 (0-380)	3.4	0.5±0.6	76±19	75±21
2 (381-494)	1.7	0.6±0.4	72±26	86±10
3a (495-535)	1.4	1.4±0.6	64±12	92±4
3b (536-550)		1.2±1.0	83±12	95±3
3c (551-565)		1.4±1.0	90±6	98±2

Desempeño del Sistema 3 (S3)

Comportamiento del pH en el Sistema 3 (S3)

En la Figura 15 se presenta el comportamiento del pH en el sistema S3. Al igual que en el sistema S1 y S2 el pH en el influente fue muy variable, puesto que provenía de un agua residual porcina real. El agua residual utilizada para alimentar el sistema S3 provenía de la etapa de destete de la granja con valores de pH durante en un intervalo de 5 a 7.5 durante los tres periodos experimentales. Al pasar por la fosa séptica el pH se mantiene en un intervalo de valores entre 6.5 y 8 y posteriormente al pasar por el FAFA el pH se incrementa ligeramente tomando valores en un intervalo entre 7.5 y 8.0 la mayor parte de los tres periodos experimentales, estos valores se encuentran dentro del rango óptimo de operación de sistemas anaerobios. Sin embargo, al pasar el agua por el proceso aerobio, la alcalinidad se consume y el pH disminuye presentando un comportamiento muy variable durante las dos primeras etapas experimentales, presentando valores más estables a partir de la etapa experimental 3a con valores de pH en un intervalo entre 5 y 6. Esta disminución en el pH durante el tratamiento en el biofiltro se debe a la presencia de los ácidos húmicos y fúlvicos que se encuentran en la materia orgánica del medio filtrante, este comportamiento fue observado en los tres sistemas experimentales.

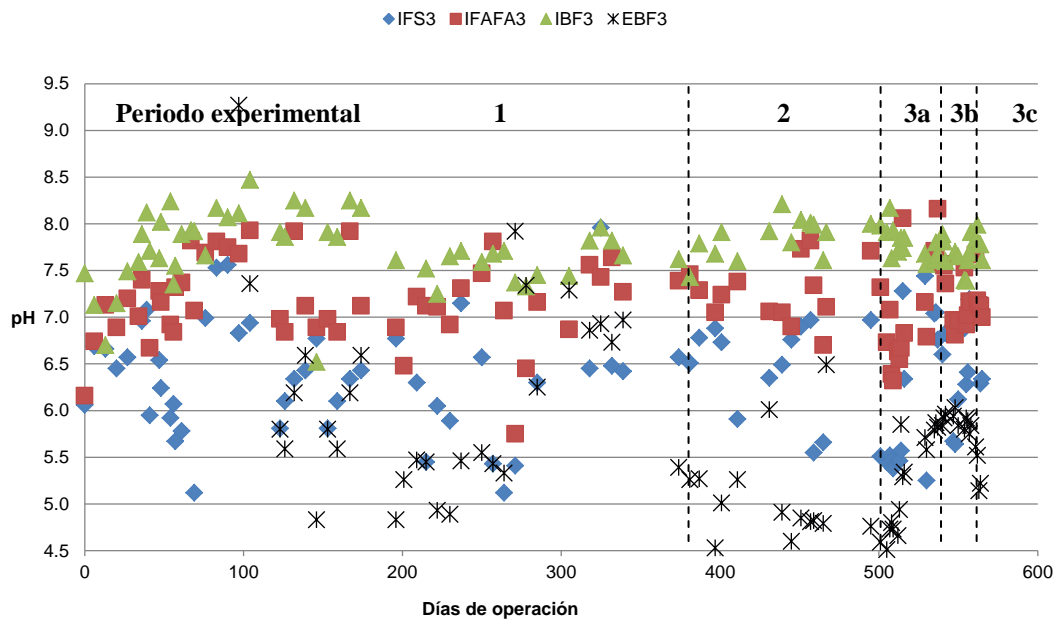


Figura 15 Comportamiento del pH en el Sistema 3

Comportamiento de la temperatura en el Sistema 3 (S3)

La temperatura durante la operación del sistema S3 se presenta en la Figura 16, se observa que la temperatura se mantuvo en un intervalo de valores entre 21 y 27°C durante todas las etapas experimentales tanto en el influente como en el efluente de los sistemas que conforman el tren de tratamiento (fosa, FAFA y biofiltro), lo que indica que los sistemas operaron en un rango de temperatura mesófilo.

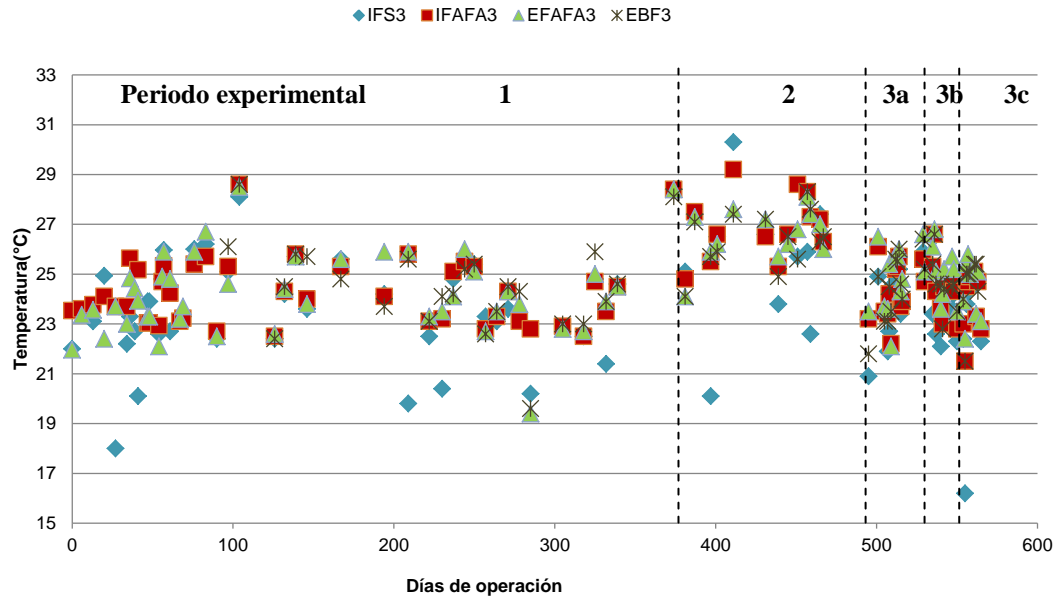


Figura 16 Comportamiento de la temperatura en el Sistema 3

Comportamiento de los sólidos disueltos totales (SDT) en el Sistema 3 (S3)

En la Figura 17 se presenta el comportamiento de los SDT en el Sistema 3. La concentración de SDT en el sistema S3 se mantuvo en un intervalo entre 1 y 4 mg L⁻¹ durante la mayor parte de la experimentación tanto para el influente como para el efluente de los sistemas, estas concentraciones fueron menores y más estables que en las encontradas en el sistema S1 y S2.

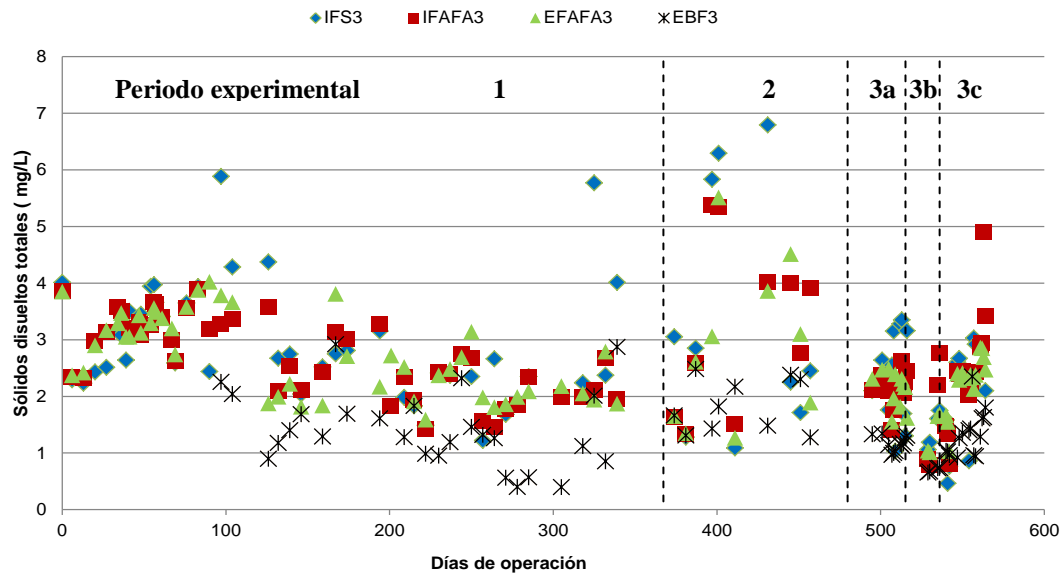


Figura 17 Comportamiento de los SDT en el Sistema 3

Comportamiento de la alcalinidad en el Sistema 3 (S3)

En la Figura 18 se presenta la alcalinidad en el Sistema S3. Se observa que al igual que en el S1 y S2, la alcalinidad es muy variable en todas las etapas experimentales. Los valores de alcalinidad obtenidos tanto en el influente como en el efluente de la fosa y del FAFA oscilaron en un intervalo de valores entre 1,000 y 3,500 mg L⁻¹ durante toda la experimentación. Al pasar por el biofiltro la alcalinidad es consumida obteniendo valores cercanos a cero.

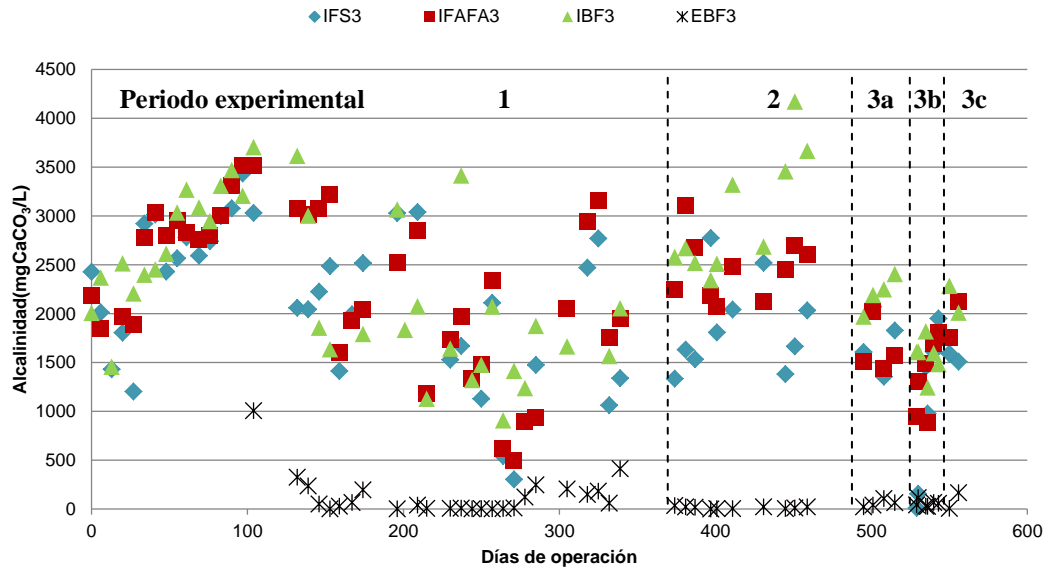


Figura 18 Comportamiento de la alcalinidad en el Sistema 3

Comportamiento de la materia orgánica en el Sistema 3 (S3)

En la Figura 19Figura 5 se muestra el comportamiento de la DQO en el sistema S3. Al igual que en los sistemas anteriores (S1 y S2) las concentraciones de DQO en el influente fueron muy variables y a medida que el agua residual va pasando por los diferentes procesos que conforman el tren de tratamiento la concentración de materia orgánica va disminuyendo y estabilizándose. Se observa en la gráfica un ligero incremento de la materia orgánica una vez que las condiciones experimentales cambian (cambio de etapa experimental), sin embargo, tanto los sistemas anaerobios como el aerobio son capaces de amortiguar estas variaciones y volver a su eficiencia anterior.

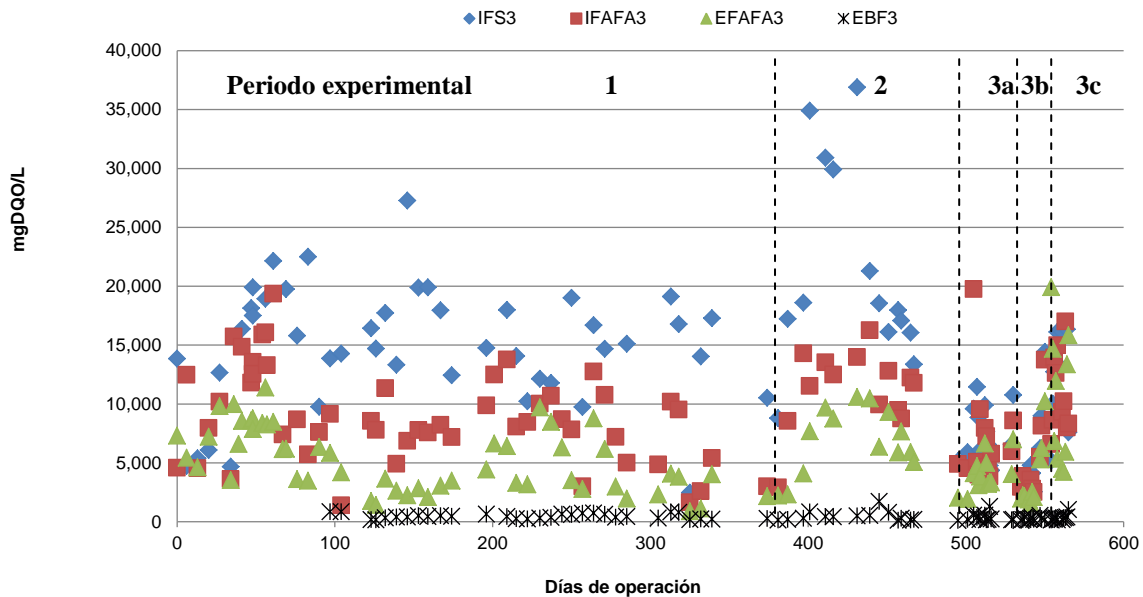


Figura 19 Comportamiento de la materia orgánica en el Sistema 3

En la Tabla 10 se presentan los valores promedio de DQO obtenidos en cada etapa experimental en el S3. El agua residual porcina de la etapa de destete utilizada para alimentar el sistema S3 presentó altas concentraciones de materia orgánica en las tres etapas experimentales, sin embargo, éstas fueron mayores a las de la etapa de maternidad (S1) y ligeramente menores a las de engorda (S2), lo que concuerda con lo reportado por Garzón y Buelna (2014) quienes encontraron que en una granja de tamaño mediano la concentración de contaminantes en la etapa de engorda es similar a la etapa de destete, mientras que el agua de la etapa de maternidad presenta menor concentración de contaminantes. Los valores obtenidos en el influente del sistema fueron $14,075 \pm 4,378$, $20,546 \pm 8,603$, $7,905 \pm 2,154$, $4,369 \pm 2,090$ y $12,453 \pm 4,023$ mg L^{-1} y en el efluente general (efluente del biofiltro) fueron 467 ± 219 , 462 ± 414 , 313 ± 177 , 278 ± 131 y 330 ± 248 mg L^{-1} con remociones globales de 96 ± 2 , 98 ± 2 , 96 ± 1 , 93 ± 3 y $93 \pm 3\%$ para la etapa 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente. Estas remociones son superiores a las encontradas en el sistema S1 y S2.

Tabla 10 Remoción de materia orgánica en el sistema S3

Periodo experimental (d)	Fosa Séptica		FAFA		Biofiltro		Sistema S1	
	Influyente (mg.L ⁻¹)	Remoción (%)	Influyente (mg.L ⁻¹)	Remoción (%)	Influyente (mg.L ⁻¹)	Remoción (%)	Efluente (mg.L ⁻¹)	Remoción total (%)
1 (0-380)	14,075±4,378	42±23	7,804±3,454	60±17	3,106±1,954	81±10	467±219	96±2
2 (381-494)	20,546±8,603	45±20	10,772±3,822	63±18	3,965±2,475	87±9	462±414	98±2
3a (495-535)	7,905±2,154	27±21	7,522±4,953	61±12	2,925±2,030	88±7	313±177	96±1
3b (536-550)	4,369±2,090	20±14	3,782±1,920	39±23	2,235±1,337	87±4	278±131	93±3
3c (551-565)	12,453±4,023	17±19	11,220±3,384	57±18	5,004±1,834	93±4	330±248	97±4

Comportamiento de los sólidos en el Sistema 3 (S3)

Al igual que en los sistemas S1 y S2 las concentraciones de sólidos en el influente se presentaron en un intervalo de valores entre 1,000 y 10,000 mg L⁻¹ de SST y SSV (Figura 20), posteriormente se encontraron valores entre 500-5,000 mg L⁻¹ de SST y SSV en el efluente de la fosa séptica y en el efluente del filtro anaerobio los valores obtenidos se encontraron en un intervalo de concentraciones entre 100 y 1000 mg L⁻¹ de SST y SSV. El efluente del biofiltro o efluente general presentó valores en un intervalo entre 10 y 1,000 mg L⁻¹ de SST y SSV, lo que indica altas remociones con este sistema de tratamiento.

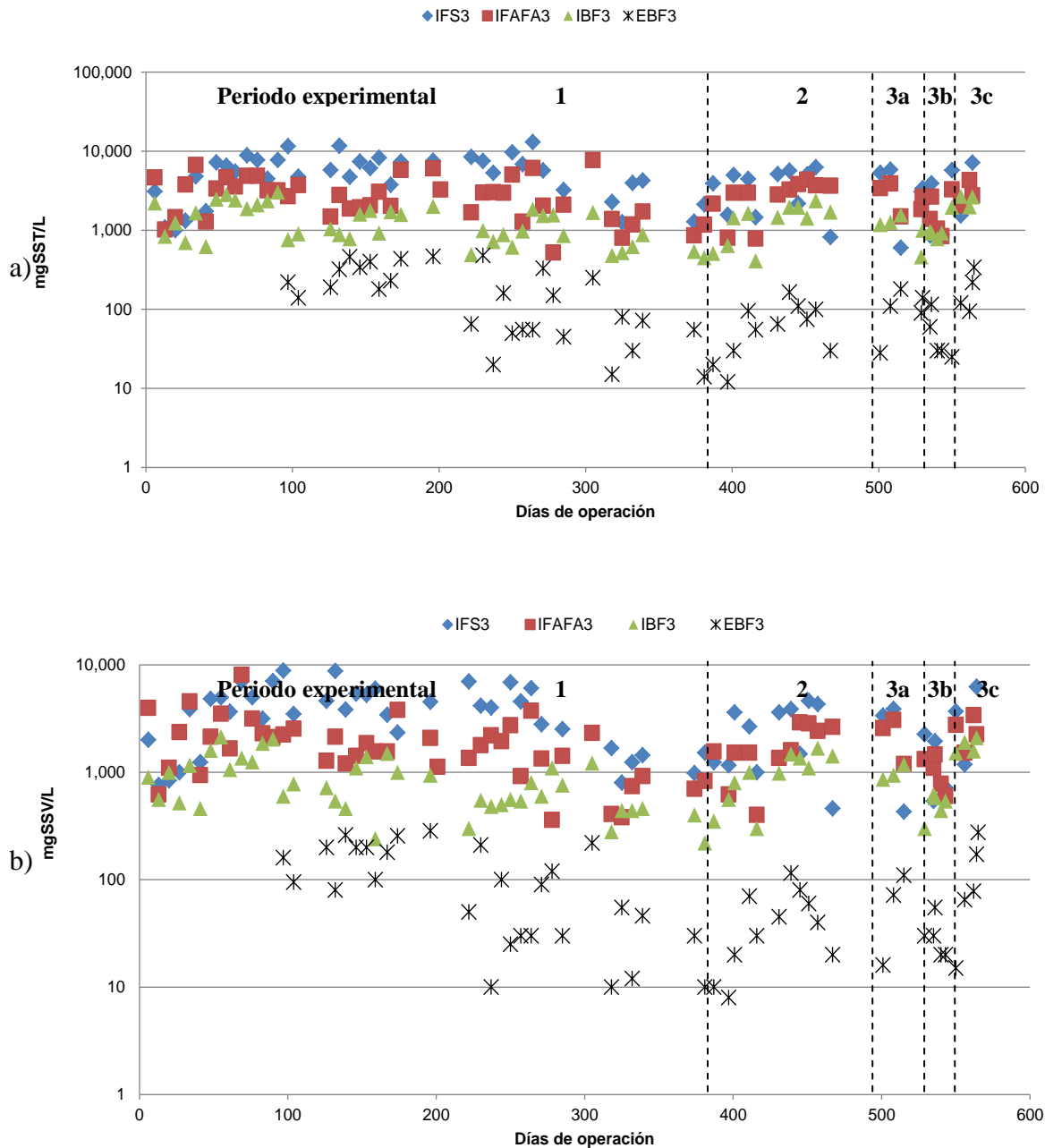


Figura 20 Comportamiento de los sólidos en el Sistema 3: a) SST y b) SSV

Comportamiento del nitrógeno amoniacal en el Sistema 3 (S3)

La remoción de nitrógeno amoniacal se llevó a cabo en el biofiltro anaerobio por medio de un proceso de nitrificación. En la gráfica de la Figura 21 se observa que al igual que en el

S1 y S2, los sistemas anaerobios (fosa séptica y FAFA) solamente estabilizan la concentración de nitrógeno amoniacal y la remuevan ligeramente, sin embargo al pasar el agua en tratamiento al biofiltro el nitrógeno es removido, siendo la etapa 3c con una tasa de aireación de $1.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ la etapa que remueve la mayor concentración de nitrógeno amoniacal.

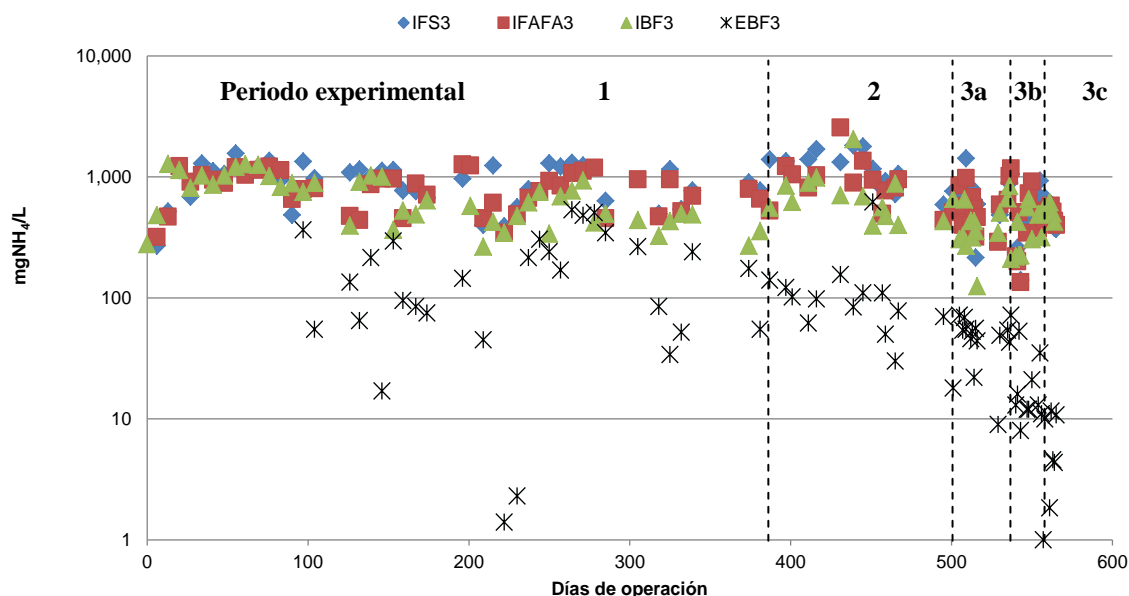


Figura 21 Comportamiento del N-NH₄ en el Sistema 3

En la Tabla 11 se presentan las concentraciones promedio de nitrógeno amoniacal obtenidas en el S3. El influente presentó concentraciones promedio de nitrógeno amoniacal de 859 ± 363 , $1,210 \pm 363$, 785 ± 250 , 508 ± 296 y $641 \pm 227 \text{ mg L}^{-1}$ en el periodo 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente, estos valores son similares a los reportados en para el S1 y S2 en el influente. Se encontró que a la salida del biofiltro y una vez que se ha realizado el proceso de nitrificación, las concentraciones de nitrógeno amoniacal son 207 ± 182 , 133 ± 141 , 51 ± 20 , 33 ± 23 y $11 \pm 10 \text{ mg L}^{-1}$ en el periodo 1, 2, 3a, 3b y 3c, respectivamente.

Tabla 11 Remoción de nitrógeno amoniacal en el sistema S3

Periodo experimental (d)	Fosa Séptica	FAFA	Biofiltro		
	Influente (mg.L ⁻¹)	Influente (mg.L ⁻¹)	Influente (mg.L ⁻¹)	Efluente (mg.L ⁻¹)	Remoción (%)
1 (0-380)	859 ± 363	737 ± 265	517 ± 182	207 ± 182	72 ± 22
2 (381-494)	$1,210 \pm 363$	993 ± 492	718 ± 425	133 ± 141	85 ± 12
3a (495-535)	785 ± 250	600 ± 201	421 ± 144	51 ± 20	89 ± 5
3b (536-550)	508 ± 296	557 ± 349	422 ± 218	33 ± 23	93 ± 4
3c (551-565)	641 ± 227	518 ± 147	491 ± 110	11 ± 10	98 ± 1

Relación C/N en el Sistema 3 (S3)

En la Tabla 12 se presentan los valores promedio obtenidos de la relación C/N durante la experimentación. En el agua residual porcina cruda de la etapa de destete se encontraron relaciones C/N de 17.7 ± 8.8 , 17.4 ± 6.7 y 10.8 ± 4.1 , para el período 1, 2 y 3, respectivamente, valores similares a los encontrados en el agua de engorda (S2) debido a que sus concentraciones de contaminantes son semejantes, como se había mencionado anteriormente. A medida que el agua residual pasa por los diferentes procesos del tren de tratamiento las concentraciones tanto de materia orgánica como de nitrógeno van disminuyendo. A la entrada del biofiltro se encontró una relación C/N de 6.0 ± 4.0 , 5.8 ± 3.0 y 7.2 ± 4.5 , para el período 1, 2 y 3, respectivamente.

Tabla 12 Relación C/N (DQO/N-NH₄⁺) en el S3

Periodo experimental (d)	Fosa Séptica	Fafa	Biofiltro
	Influente (C/N)	Influente (C/N)	Influente (C/N)
1 (0-380)	17.7 ± 8.8	11.0 ± 6.6	6.0 ± 4.0
2 (381-494)	17.4 ± 6.7	12.0 ± 4.9	5.8 ± 3.0
3 (495-565)	10.8 ± 4.1	12.3 ± 5.3	7.2 ± 4.5

Influencia de la tasa de aeración sobre la remoción de nitrógeno y materia orgánica

Como se puede observar en la Tabla 13 y al igual que con los sistemas S1 y S2, la mejor tasa de aireación en el biofiltro para este sistema fue $1.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Se observa claramente que a mayor aireación (etapa 1), tanto la remoción de DQO como de nitrógeno son menores.

Tabla 13 Influencia de la tasa de aireación sobre la remoción de nitrógeno en el biofiltro (S3)

Periodo experimental (d)	Tasa de aeración (m ³ m ⁻² d ⁻¹)	COS (Kg DQO m ⁻² d ⁻¹)	DQO (%)	N-NH ₄ (%)
1 (0-380)	3.4	1.9 ± 1.0	81 ± 10	72 ± 22
2 (381-494)	1.7	3.3 ± 1.7	87 ± 9	85 ± 12
3a (495-535)	1.4	2.4 ± 0.9	88 ± 7	89 ± 5
3b (536-550)		2.6 ± 1.6	87 ± 4	93 ± 4
3c (551-565)		7.9 ± 4.3	93 ± 4	98 ± 1

CONCLUSIONES

Al aplicar cargas orgánicas volumétricas (COV) entre 11 y 12 Kg DQO $\text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ a un filtro anaerobio se generaron eficiencias de remoción entre 78 y 82% de DQO en el tratamiento de aguas residuales porcinas.

Cargas orgánicas superficiales (COS) entre 0.16 y 2.5 Kg DQO $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ aplicadas a biofiltros aireados generaron eficiencias de remoción entre 90 y 97% de N-NH_4 . Bajo estas condiciones de operación y a una tasa de aireación de $3.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}$ en el efluente gaseoso de los biofiltros no se detectó N_2O .

La tasa de aireación más efectiva fue $1.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para eliminar el nitrógeno amoniacal y materia orgánica presentes en agua residual porcina de diferentes etapas de crecimiento de la granja.

Se encontró que los sistemas anaerobios amortiguan las altas cargas de contaminantes, lo que provoca que un cambio en los parámetros de operación no desestabilice el sistema.

Se encontró que con el tren de tratamiento propuesto se obtienen remociones de DQO y nitrógeno superiores al 90% con agua residual porcina de diferentes etapas de crecimiento de la granja.

REFERENCIAS

Bonmati A., Flotats X., Mateu L. y Campos E. (2001). Study of thermal hydrolysis as a pretreatment to mesophilic anaerobic digestion of pig slurry. *Water Science and Technology*. 44 (4): 109-116.

Garzón M.A. y Moeller G. (2007). Nueva tecnología sustentable para tratar las aguas residuales. *Gaceta del IMTA*, numero 7, noviembre.

Garzón-Zúñiga M. A. y Buelna G. (2014). Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 65-79.

Magrí A., Palatsi J., Fernández B. y Flotats X. (2007). Pig slurry treatment strategies- dealing with nitrogen management. *15th Nitrogen Workshop: Towards a better efficiency in N use*. España. Mayo 28-30.

Meers E., Rosseau D. P. L., Lesage E. Demeersseman E. and Tack F. (2006). Physico-chemical P removal from the liquid fraction of pig manure as an intermediary step in manure processing. *Water, Air, and Soil Pollution*. 169: 317-330.

Metcalf and Eddy. (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and reuse*. Fourth edition. Ed. McGraw Hill. New York, U.S.A.

O'Neill, C., Hawkes, F.R., Hawkes, D.W., Esteves, S. and Wilcox, S.J. (2000) Anaerobic-aerobic biotreatment of simulated textile effluent containing varied ratios of starch and azo dye. *Water Research*. **34** (8), 2355-2361.

Ra C. S., Lo K. V., Shin J. S., Oh J. S. and Hong B. J. (2000). Biological nutrient removal with an internal organic carbon source in piggery wastewater treatment. *Water Research*. 34 (3): 965-973.

Van der Zee, F. P. and Villaverde, S. (2005) Combined anaerobic-aerobic treatment of azo dyes—A short review of bioreactor studies. *Water Research* **39**, 1425-1440.

Vazquez B. E. (2002). Evaluación de un reactor anaerobio para el tratamiento de aguas residuales de granjas porcícolas. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. 172.