



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos (ERIS)
Maestría en Ingeniería Sanitaria

**Eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo en los
filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de
Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

Inga. Ileana Felicia Pierri Palma

Asesorado por Dr. Ing. Adán Ernesto Artemio Pocasangre Collazos

Guatemala, noviembre de 2013

Universidad de San Carlos de Guatemala



Facultad de Ingeniería

Eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo en los
filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de
Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Estudio especial

Presentado a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos (ERIS)

Por la Ingeniera

Ileana Felicia Pierri Palma

Asesorado por el Dr. Ing. Adán Ernesto Artemio Pocasangre Collazos

Como registro previo para optar al grado académico de
Maestro (*Magister Scientifcae*) en Ciencias de Ingeniería Sanitaria

Guatemala, noviembre de 2013

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería



Nómina de Junta Directiva

Decano	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Vocal I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
Vocal II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Vocal III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
Vocal IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
Vocal V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
Secretario	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

Tribunal que practicó el examen general privado

Examinador	Dr. Ing. Adán Ernesto Artemio Pocasangre Collazos
Examinador	MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
Examinador	MSc. Ing. Zenón Much Santos

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**Eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo en los
filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de
Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), con fecha julio 2013.

Inga. Ileana Felicia Pierri Palma

ilepieri@gmail.com

Carné No. 100023968

Acto que dedico a:

- Dios** Como fuente de toda sabiduría y conocimiento. Por permitirme culminar esta meta.
- Mis padres** Roberto Otoniel Pierri Ventura e Ileana Maribel Palma Avalos, por apoyarme incondicionalmente en mi formación académica.
- Mi hermano** Juan Roberto Pierri Palma, que esta meta sea un símbolo de dedicación en tu carrera y que puedas alcanzar tus sueños también.
- Mis compañeros** Por todo lo vivido durante la maestría y las amistades que se forjaron estos años, gracias compañeros.
- USAC-ERIS** Como alma máter. Por formar profesionales de alto rendimiento para que sean competitivos a nivel centroamericano.

Agradecimientos a:

**Dr. Ing. Adán Ernesto
Pocasangre Collazos**

Por ser parte de este estudio especial como asesor y coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria.

**MSc. Ing. Zenón Much
Santos y MSc. Félix
Aguilar**

Por su valiosa colaboración y apoyo en la elaboración de la presente investigación.

**MSc. Ing. Pedro Saravia
Celis, MSc. Ing. Julián
Duarte, MSc. Ing. Joram
Gil, MSc. Ing. Juan José
Sandoval y Dra. Malvina
de León**

Catedráticos de ERIS, por ser parte de la formación académica superior.

**Bibliotecóloga Dora
María Cardoza Meza**

Por su gentileza, dedicación y ayuda al brindar el material didáctico para la elaboración del presente estudio.

Sr. Adolfo Dubón

Auxiliar del Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”. Por su amabilidad y valiosa colaboración en los ensayos de las muestras, toma de datos y discusión de resultados.

**Al personal operativo de
la Planta de Tratamiento
de Aguas Residuales
Ing. Arturo Pazos**

Por su colaboración en el montaje del modelo experimental y en la toma de muestras.

Guatemala 11 de noviembre de 2013

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hidráulicos
ERIS

Respetuosamente les comunico que he revisado, en mi calidad de Asesor y Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el documento de Estudio Especial titulado:

Eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo en los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos

Presentado por el estudiante de la maestría antes mencionada,

Ingeniera Civil Ileana Felicia Pierri Palma

Les manifiesto que la estudiante cumplió en forma satisfactoria con los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos – ERIS- y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio.

Agradeciendo la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Dr. Ing. Adán Ernesto Artemio Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

Edificio de ERIS
Área de prefabricados Facultad de
Ingeniería
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

www.ingenieria-usac.edu.gt

El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, Msc. Ing. Zenón Much Santos y Msc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos y la revisión de lingüística efectuada por la Licenciada en Letras Rosa Amelia González Domínguez colegiada No. 5284, del trabajo del estudiante Ing. Ileana Felicia Pierri Palma, titulado:

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hidráulicos
ERIS

**Eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo en los
filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de
Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos**

En representación de la comisión de admisión y otorgamiento de grado, procede a la autorización del mismo.

Edificio de ERIS
Área de prefabricados Facultad de
Ingeniería
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

www.ingenieria-usac.edu.gt

Guatemala, 11 de noviembre de 2013

IMPRÍMASE

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

A handwritten signature in black ink is written over a circular official stamp. The stamp is blue and contains the text 'ESCUELA REGIONAL DE INGENIERIA SANITARIA Y RECURSOS HIDRAULICOS' around the perimeter and 'FACULTAD DE INGENIERIA' and 'DIRECCION' in the center.

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos

Glosario

Cloración de breakpoint	Proceso de cloración de las aguas con la cantidad de cloro suficiente para producir dos efectos importantes: la presencia de cloro residual libre y la eliminación del Nitrógeno de las aguas.
ERIS	Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria.
Lisis	Se refiere a la destrucción de las membranas celulares.
Nitrificación	Proceso por el cual las bacterias oxidan el nitrógeno amoniacal a nitritos y éstos son convertidos a nitratos.
Desnitrificación	Proceso por el cual las bacterias reducen los nitratos a nitritos y estos a su vez son reducidos a gas nitrógeno.
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala

Índice general

Índice de ilustraciones	III
Tablas.....	V
Resumen	VII
Introducción	IX
Objetivos	XI
Antecedentes.....	XIII
Planteamiento del problema	XV
Hipótesis.....	XVI
Justificación	XVII
Limitaciones.....	XVIII
1. Marco teórico	1
1.1. Eliminación biológica de nutrientes.....	1
1.2. Ciclo del nitrógeno	1
1.3. Ciclo del fósforo	4
1.4. Control de nutrientes	5
1.4.1. Reducción de nitrógeno	5
1.4.2. Reducción del fósforo	6
1.4.3. Efectos de los tratamientos sobre los compuestos de nitrógeno	7
1.5. DBO por nitrificación.....	9
1.6. Acción bacteriana en el nitrógeno y el fósforo.....	10
2. Metodología	11
2.1. Localización.....	11

2.2.	Selección de parámetros de control	14
2.3.	Método estadístico	15
2.3.1.	Número de muestras	15
2.3.2.	Puntos de muestreo	20
2.3.3.	Frecuencia de toma de muestras	23
2.3.4.	Tipo de muestra	23
2.3.5.	Procedimientos usados en el Stándar Methods.....	25
3.	Resultados experimentales.....	27
3.1.	Características del agua residual afluyente a los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	27
4.	Discusión de resultados.....	43
4.1.	Análisis general de eficiencias promedio.....	44
4.2.	Evaluación del ciclo del nitrógeno	51
4.3.	Evaluación del ciclo del fósforo	51
4.4.	Evaluación del índice de biodegradabilidad.....	52
4.5.	Evaluación de resultados con estudios anteriores	52
	Conclusiones.....	53
	Recomendaciones	55
	Bibliografía	57

Índice de ilustraciones

Figuras

1.	Ciclo del nitrógeno	3
2.	Esquema del recorrido a la entrada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	12
3.	Esquema de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	13
4.	Número aproximado de muestras requeridas estimando una concentración media	16
5.	Esquema de los puntos de muestreo en los filtros percoladores de la planta de tratamiento de la USAC	21
6.	Esquema de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	22
7.	Esquema de toma de muestras para caudales	27
8.	Caudal que ingresa a las etapas de filtración de la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC	28
9.	Esquema de toma de muestras para las características generales del agua que ingresa a los filtros.....	29
10.	Esquema de toma de muestras para las características generales del agua entre la Etapa I y Etapa II	30
11.	Esquema de toma de muestras para las características generales del agua entre la Etapa II y Etapa III	31
12.	Esquema de toma de muestras para las características generales del agua que sale de los filtros	32

13.	Demanda bioquímica de oxígeno de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	33
14.	Demanda Química de oxígeno de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	34
15.	Gráfico de amonio de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	35
16.	Gráfico de amoniaco de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	36
17.	Gráfico de nitritos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	37
18.	Gráfico de nitratos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	38
19.	Gráfico de fosfatos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	39
20.	Gráfico de nitrógeno total de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC.....	40
21.	Gráfico de fósforo total de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	41
22.	Gráfico del promedio de nitritos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	45
23.	Gráfico del promedio de nitratos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	45
24.	Gráfico de relación entre porcentaje de remoción de fósforo y el promedio de índice de biodegradabilidad de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC.....	48
25.	Gráfico de relación entre porcentaje de remoción de nitrógeno y el promedio de índice de biodegradabilidad de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC.....	50

Tablas

I.	Efectos de diversas operaciones y procesos sobre los compuestos del nitrógeno	7
II.	Valores para el cálculo de incerteza.....	17
III.	Valores estimados de incerteza para el método utilizado en la medición del fósforo	18
IV.	Valores estimados en control de producción para nitrógeno según Método Fotométrico	19
V.	Caudal que ingresa a las etapas de filtración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	28
VI.	Características generales del agua residual que ingresa a la Etapa I de la filtración en la PTAR de la USAC	29
VII.	Características generales del agua residual que sale de la Etapa I e ingresa a la Etapa II de la filtración en la PTAR de la USAC	30
VIII.	Características generales del agua residual que sale de la Etapa II e ingresa a la Etapa III de la filtración en la PTAR de la USAC	31
IX.	Características generales del agua residual que sale de la Etapa III de la filtración en la PTAR de la USAC	32
X.	Valores de demanda bioquímica de oxígeno de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC.....	33
XI.	Valores de demanda química de oxígeno de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	34
XII.	Valores de amonio de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC.....	35
XIII.	Valores de amoniaco de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC.....	36
XIV.	Valores de nitritos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC.....	37

XV.	Valores de nitratos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC.....	38
XVI.	Valores de fosfatos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC.....	39
XVII.	Valores de nitrógeno total de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC.....	40
XVIII.	Valores de fósforo total de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC.....	41
XIX.	Valores de porcentaje de remoción de fósforo de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	47
XX.	Valores de porcentaje de remoción de nitrógeno de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC	49

Resumen

El siguiente estudio tiene como objetivo determinar la eficiencia en la remoción de los siguientes nutrientes: nitrógeno total (N_T) y fósforo total (P_T) de cada una de las tres etapas del Sistema de Filtros Percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.

También se determinó el caudal de agua residual, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO), temperatura y pH; para obtener las características generales del agua residual y la relación de índice de biodegradabilidad. Adicionalmente, se determinaron parámetros específicos para nitrógeno y fósforo, siendo estos: amonio, amoniaco, nitritos, nitratos y fosfatos en cada módulo de filtración nitrógeno total y fósforo total en la entrada y salida del Sistema de Filtros Percoladores.

La investigación se realizó entre los meses de octubre de 2012 y enero de 2013, encontrándose el caudal promedio de 4 en l/s. Los resultados indican que la eficiencia promedio en remoción de DBO_5 es de 79,8 % y de DQO es de 71,82 %. Para amonio es de 69,27 %, nitritos es de 25 %, nitratos es de 54,11 % y fosfatos es de 57,68 %. En el caso de nitrógeno total es de 20,35 % y para fósforo total es de 12,49 %. Alcanzando los valores de remoción a un índice de biodegradabilidad de 0,45.

Introducción

Para el tratamiento de las aguas residuales se prefieren los procesos sostenibles, como las unidades que trabajan por gravedad y tiene una operación y mantenimiento bajo. En la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se optó por un tratamiento secundario por medio del Sistema de Filtros Percoladores. Estos están distribuidos en dos líneas de tratamiento en paralelo, las cuales contienen tres etapas o módulos en serie.

Los filtros percoladores tienen gran eficiencia para la remoción de materia orgánica. Este estudio parte de la premisa que en los filtros percoladores también se remueve un porcentaje de nitrógeno y fósforo. Se evaluó el comportamiento del índice de biodegradabilidad en las etapas, así como la eficiencia en la remoción de los nutrientes: nitrógeno total y fósforo total. En el proceso se analiza la etapa donde se está dando la fase de nitrificación y la fase de desnitrificación.

Objetivos

General

Evaluar la eficiencia en la remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) de las aguas residuales domésticas afluentes a la planta de la Universidad de San Carlos de Guatemala, ubicada en la ciudad universitaria, zona 12.

Específicos

1. Medir la reducción del nitrógeno de las aguas residuales domésticas en las tres etapas de los filtros percoladores.
2. Medir la reducción del fósforo de las aguas residuales domésticas en las tres etapas de los filtros percoladores.
3. Analizar en qué etapa de las unidades de filtración se establece la fase de nitrificación y desnitrificación.
4. Analizar los parámetros DBO₅, DQO, temperatura y pH para determinar el índice de biodegradabilidad.
5. Correlacionar el índice de biodegradabilidad con la remoción de nitrógeno y fósforo.

Antecedentes

Una importante alternativa para el tratamiento de las aguas residuales es el proceso biológico, el cual supone la remoción de contaminantes principalmente sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas, mediante la actividad biológica. Dicha actividad se aprovecha para remover nitrógeno y fósforo del agua residual. (Romero Rojas, 2010).

Para las comunidades de recursos limitados, la aplicación de tecnologías con bajas exigencias de equipos electromecánicos resultan ser los sistemas biológicos, tales como las lagunas de estabilización que requieren de amplios terrenos planos y los lechos bacterianos que deben estar continuamente ventilados.

En los países centroamericanos se opta por procesos de tratamiento de bajo costo de operación y mantenimiento. Frente a esta situación en 1972, la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulico (ERIS-USAC) inicia el proyecto de investigación para estudiar posibles soluciones al tratamiento de agua residual, se inicia el proyecto a cargo del Ing. Arturo Pazos Sosa. En dicho proyecto, se propuso un Sistema de Filtros Torre Percoladores que operarían por gravedad y el uso de materiales locales como medios filtrantes.

De la investigación realizada en la Planta Piloto Aurora II, se obtuvieron parámetros de diseño que se aplicaron por el desarrollo y construcción de la planta de tratamiento de la ciudad universitaria, una vez construida y operando dicha planta, la misma fue objeto de investigación, derivándose los siguientes temas:

- Evaluación del funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Negras de la ciudad universitaria. Ing. Luis Chávez. 1991.
- Evaluación de los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, a través de la eficiencia en la remoción de estreptococos fecales. Inga. Magda López. 2010.
- Estudio de diagnóstico y plan de rehabilitación de dieciocho plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas; Planta USAC. ECOPLA Consultores Asociados S. A. 2001
- Investigación de la eficiencia de las etapas en serie del filtro percolador de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Ing. Oscar Ramírez. 2011.

De la última investigación realizada por el Ing. Oscar Ramírez, se propone analizar la concentración de nitrógeno, en nitritos y nitratos, a lo largo de cada una de las etapas de los filtros percoladores, para determinar en cual está teniendo lugar el proceso de nitrificación.

Planteamiento del problema

Debido a la creciente contaminación en las masas de agua como consecuencia de las descargas de aguas residuales, se observa el deterioro del medio ambiente donde se ven perjudicados los seres vivos. Estas aguas transportan nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo, los cuales son elementos esenciales para la vida, pero al encontrarse en exceso en el agua se da el crecimiento desmedido de flora y esto causa la muerte de la fauna existente ya que se limita el oxígeno en el cuerpo de agua.

Por esta razón, es importante que se reduzcan los nutrientes, tanto del nitrógeno como del fósforo, antes de que se descarguen en un cuerpo receptor, de esta manera se toma una medida preventiva y no correctiva, así se fortalece el sistema de reuso y aprovechamiento del agua residual tratada.

En los filtros percoladores se obtienen remociones que van desde el 40 al 90 % de eficiencia para la eliminación de materia orgánica. Según las características del medio filtrante el efluente puede encontrarse poco nitrificado hasta bien nitrificado, esto influye en la remoción de nutrientes en las aguas residuales. De esta manera se reduce el nitrógeno y el fósforo, de forma sencilla y económica. (Crites & Tchobanoglous, 2000 / Metcalf & Eddy, 1996).

En el caso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala se desconoce la eficiencia de remoción tanto del nitrógeno como del fósforo, así como en el módulo donde se da el proceso de nitrificación y desnitrificación, en el Sistema de Filtros Percoladores. Por lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es la eficiencia de remoción obtenida de nitrógeno y fósforo en los filtros percoladores en tres etapas en serie de la planta de la Universidad de San Carlos de Guatemala?

Hipótesis

En los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se logra una eficiencia de remoción del nitrógeno del 20 % y reducción del fósforo entre 10 % a 20 %.

Justificación

A nivel macro, es importante señalar que debe aplicarse efectivamente la legislación ambiental, toda vez que el Gobierno de Guatemala ha ratificado varios acuerdos multilaterales medio ambientales y ahora que ha suscrito Tratados de Libre Comercio en donde ya se incluye la variable ambiental. Por esta razón el recurso hídrico debe recibir el tratamiento necesario para disminuir el grado de contaminación, que desencadena una serie de problemas, entre ellos la escasez que impera en el país. En ese sentido deben buscarse los mecanismos adecuados para aprovechar en mejor forma el recurso, máxime que es un recurso renovable pero finito, pues únicamente el 2,5 % es agua fresca y el 97,5 % es salada.

En Guatemala, las aguas servidas en su gran mayoría, son descargadas a los cuerpos de agua sin el tratamiento adecuado, provocando la contaminación de las fuentes de agua superficiales. Esto es producto de una inadecuada gestión integral del recurso hídrico, pese a que existe un Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de Disposición de Lodos, por medio del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Para el manejo apropiado de las aguas residuales se pueden utilizar diversas tecnologías que permiten la remoción de agentes físicos, químicos y biológicos que sean perjudiciales, tanto para el ser humano como para el medio ambiente.

La tecnología instalada como proceso secundario en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala son los filtros percoladores en serie. Dichos filtros están formados por un lecho de material consistente, el cual es de roca volcánica de diversas formas, sobre las cuales son vertidas las aguas residuales provenientes de un tratamiento primario previo. La distribución de dichas aguas se realiza por medio de brazos fijos. Alrededor del lecho fijo se encuentran adheridas las poblaciones de microorganismos que descomponen la materia orgánica a medida que el agua filtra hacia el fondo de la unidad.

El sistema está compuesto por tres filtros en serie, en los cuales el tratamiento secundario involucra microorganismos que se encargan de degradar la materia orgánica y en ellos se da el proceso de nitrificación-desnitrificación, que juega un rol importante en la remoción del nitrógeno orgánico y fosfatos de las aguas residuales. Ante esta situación se evaluó la eficiencia de cada etapa de la filtración, respecto a la remoción de nutrientes.

Limitaciones

- Las autorizaciones para el acceso a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC son de lunes a viernes, en horario de 7:00 a 4:00 p.m.
- El período para la toma de muestras fue entre los meses de octubre a enero, en época seca.
- Las muestras fueron recolectadas en horario de entre 7:00 y 11:00 a.m.
- No se encuentra disponible la documentación técnica de criterios y memoria de cálculo del diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.

- No se cuenta con la unidad permanente para medición de caudal del afluente.

1. Marco teórico

1.1. Eliminación biológica de nutrientes

La eliminación de los nutrientes del agua residual es necesaria para controlar el vertido de nitrógeno y fósforo, debido a su potencial impacto sobre la calidad de las aguas receptoras. El tratamiento secundario de las aguas residuales por medio de filtros percoladores es de costo relativamente bajo, ya que el agua tiene contacto con el medio filtrante mientras que los microorganismos se encargan de asimilar y transformar los nutrientes a formas más simples de eliminación.

1.2. Ciclo del nitrógeno

Las formas más importantes, en las que se encuentra el nitrógeno, son:

- Nitrógeno amoniacal
- Nitrógeno de nitritos
- Nitrógeno de nitratos
- Nitrógeno orgánico

Los animales y los humanos utilizan proteínas de las plantas para su subsistencia. Los compuestos de nitrógeno que no son utilizados, son arrojados en los excrementos, quienes junto con la materia remanente de animales muertos y plantas son convertidos en amoniaco por la acción de las bacterias.

Esto se puede observar a continuación:



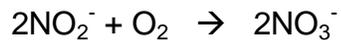
En la orina existe el nitrógeno principalmente como urea, la cual se hidroliza rápidamente por la ureasa en carbonato de amonio.

El amoniaco producido se convierte en nitritos bajo condiciones aerobias.



Bacterias nitrosomonas

Y un segundo grupo de nitro-bacterias, oxida los nitritos para formar nitratos.



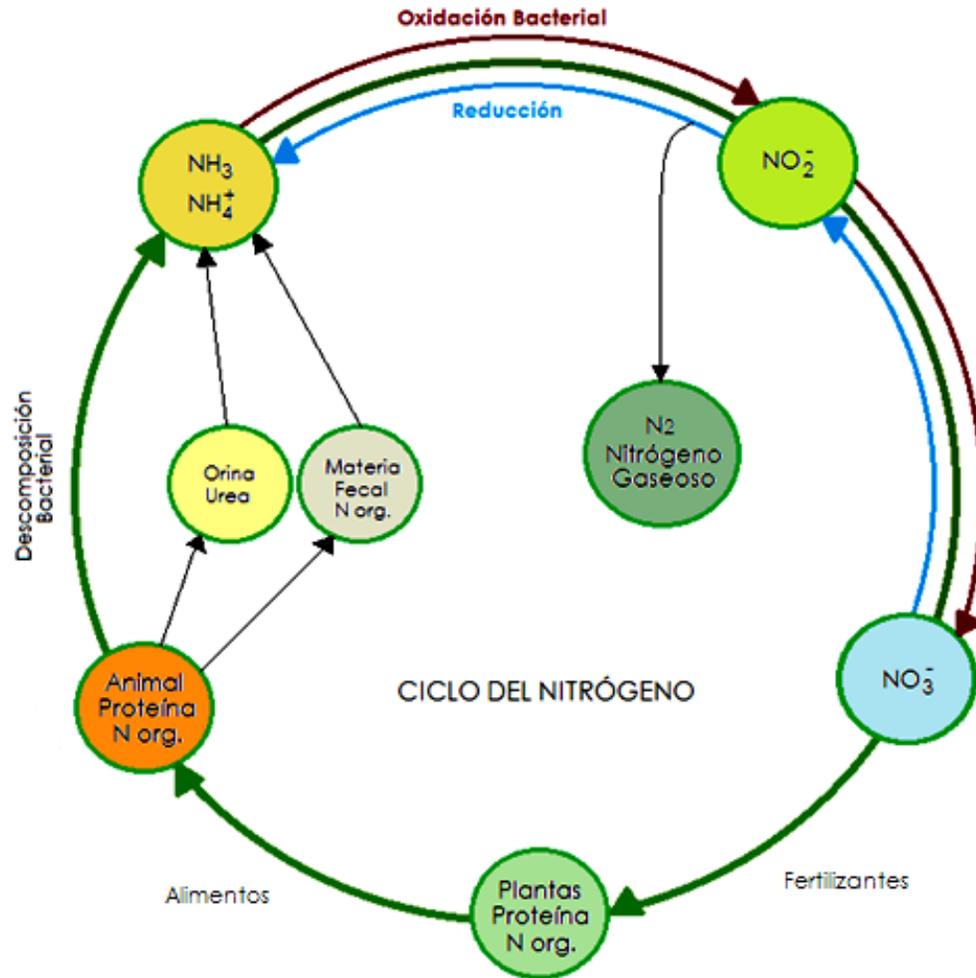
Bacterias nitrobacter

El proceso se conoce como nitrificación y se usa como la primera etapa en el tratamiento de aguas residuales que contienen nitrógeno amoniacal, como las aguas domesticas o universitarias, cuando se requiere la remoción biológica del nitrógeno. Como producto los nitratos formados sirven como fertilizantes para las plantas.

En condiciones anaerobias, los nitratos son reducidos a nitritos y éstos a gas nitrógeno por bacterias; a este proceso se le conoce como desnitrificación y se da en la reducción inicial de los nitratos a nitritos y de los nitritos a nitrógeno gaseoso.

A continuación se presenta el ciclo del nitrógeno:

Figura 1. **Ciclo del nitrógeno**



Fuente: ciclo del nitrógeno. Modificado.

El amoníaco es el producto inicial en la descomposición del nitrógeno orgánico, pues a medida que transcurre el tiempo, en condiciones aerobias, el nitrógeno amoniacal es oxidado en nitritos y estos en nitratos, los cuales son el

resultado final de la descomposición, es decir, el nitrógeno en el estado reducido es oxidado por bacterias nitrificantes.

En general, las aguas residuales domésticas tienen una concentración de nitrógeno total que oscila entre 20 – 85 mg/L-P con un promedio de 40 mg/L-N según Manual de Referencia de la Ingeniería Medioambiental, 1999.

1.3. Ciclo del fósforo

Siendo el fósforo un elemento esencial en el crecimiento de plantas y animales, se considera uno de los nutrientes que controla el desarrollo de las algas. Un exceso de fósforo produce un desarrollo exorbitado de algas y esto a su vez causa condiciones inadecuadas para ciertos usos del agua.

El uso de detergentes que contienen grandes cantidades de fósforo, ha aumentado el contenido de fosfatos en aguas residuales domésticas.

Las formas de importancia del fósforo en el agua son:

- Fosfatos orgánicos
- Ortofosfatos
- Polifosfatos

Es importante conocer los niveles de descarga de fósforo en los cuerpos receptores, ya que 1 gramo de fósforo en un lago puede permitir la formación de más de 100 gramo de biomasa, la cual representa una DBO de 150 gramos de oxígeno para su oxidación aerobia completa, además de los problemas que

conlleva como la eutrofización y crecimiento de fitoplancton (Química para Ingeniería Ambiental, 2000).

En general, las aguas residuales domésticas tienen una concentración de fósforo total que oscila entre 4 – 15 mg/L-P con un promedio de 8 mg/L-P según Manual de Referencia de la Ingeniería Medioambiental, 1999.

1.4. Control de nutrientes

Es importante conocer los ciclos de nitrógeno y del fósforo, así como sus transformaciones para permitir con esto, el control de nutrientes en el agua. La reducción de los nutrientes se presenta a continuación:

1.4.1. Reducción de nitrógeno

El nitrógeno puede estar presente en múltiples formas y son numerosas las transformaciones que puede sufrir en los diferentes procesos de tratamiento. Estas transformaciones permiten convertir el nitrógeno amoniacal en productos fácilmente separables del agua residual.

Los dos mecanismos principales que intervienen en el proceso se refieren a la asimilación y la nitrificación-desnitrificación. El nitrógeno en su forma de nitrógeno amoniacal es asimilado por los microbios presentes en el proceso de tratamiento biológico y así lo incorporan a su masa celular. Una parte de este nitrógeno retorna al agua residual con la lisis y muerte de las células.

En el proceso de nitrificación-desnitrificación la reducción del nitrógeno se consigue en dos etapas de conversión. La nitrificación que es donde se reduce la demanda de oxígeno del amoniacal mediante su transformación a nitrato. Sin

embargo, en esta fase el nitrógeno apenas ha cambiado de forma, pero no se ha eliminado. En la desnitrificación, el nitrato se convierte en un producto gaseoso que es eliminado.

1.4.2. Reducción del fósforo

El fósforo se consume por parte de los microorganismos. La eliminación de fósforo se consigue mediante la purga o arrastre de los microbios, esto se da en el tratamiento posterior al tratamiento secundario, en este caso después de los filtros percoladores se deposita en el Sedimentador Secundario.

En el tratamiento biológico el fósforo se incorpora a las células bacterianas removiéndose así cerca del 10 al 20 %.

Los microorganismos toman más fósforo de lo necesario en ciertas condiciones de operación, dándose la remoción de fosfatos cuando las células lo contienen en exceso, para esto se tiene el siguiente fundamento:

Los ácidos polipróticos son los ácidos más hidratados, de la forma H_nA .

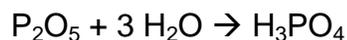
Donde:

H: es hidrógeno

N: debe ser mayor o igual a dos

A: ión poliatómico

De la reacción entre el óxido fosfórico y tres moléculas de agua se obtiene como producto el ácido ortofosfórico:



Al hidrolizarse completamente el ácido ortofosfórico da como resultado una especie aprótica, que es el anión PO_4^{-3} . Las bacterias son capaces de almacenar en sus células grandes cantidades de Fósforo en forma de polifosfatos y bajo condiciones aerobias, la energía producida dentro de las células se incrementa debido a la oxidación de productos de almacenamiento y los polifosfatos (Química para Ingeniería Ambiental, 2000 / Crites & Tchobanoglous, 2000).

1.4.3. Efectos de los tratamientos sobre los compuestos de nitrógeno

Las diversas operaciones y procesos de tratamiento sobre los compuestos de nitrógeno, se muestran a continuación:

Tabla I. Efectos de diversas operaciones y procesos sobre los compuestos del nitrógeno

Operaciones y procesos de tratamiento	Compuestos del Nitrógeno			Eliminación del N_T que entra en el proceso en %
	Nitrógeno Orgánico	$\text{NH}_3 - \text{NH}_4^+$	NO_3^-	
Tratamiento convencional				
Primario	10-20% eliminado	Ningún efecto	Ningún efecto	5-10
Secundario	15-50% eliminado	< 10% eliminado	ligero	10-30

Continuación de la tabla I.

Procesos Biológicos				
Asimilación bacteriana	Ningún efecto	40-70% eliminado	Ligero	30-70
Desnitrificación	Ningún efecto	Ningún efecto	80-90% eliminado	70-95
Cultivo de algas	$\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4^+$	\rightarrow Células	\rightarrow Células	50-80
Nitrificación	Limitado	$\rightarrow \text{NO}_3^-$	Ningún efecto	5-20
Estanques de estabilización	$\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4^+$	Eliminación parcial por arrastre	Eliminación parcial por nitrificación / desnitrificación	20-90
Procesos químicos				
Cloración de breakpoint	Incierto	90-100% eliminado	Ningún efecto	80-95
Coagulación química	50-70% eliminado	Ligero	Ligero	20-30
Adsorción sobre carbono	30-50% eliminado	Ligero	Ligero	10-20
Intercambio iónico selectivo para el amoníaco		80-97% eliminado	Ningún efecto	70-95
Intercambio iónico selectivo para el nitrato	Ligero, incierto	eliminado	75-90% eliminado	70-90
	Ningún efecto	Ningún efecto		

Continuación de la tabla I.

Operaciones físicas				
Filtración	30-95% Nitrógeno suspendido	Ningún efecto 60-95%	Ningún efecto	20-40
Arrastre con aire	Ningún efecto	eliminado	Ningún efecto	50-90
Electrodialisis	100%	30-50%	30-50% eliminado	40-50
Osmosis Inversa	Nitrógeno suspendido 60-90% eliminado	eliminado 60-90% eliminado	60-90% eliminado	80-90
Las flechas indican conversión a (→)				

Fuente: Metcalf & Eddy. p. 786. Modificado.

1.5. DBO por nitrificación

Durante la hidrólisis de proteínas se produce materia no carbonosa como el amoníaco, el cual es oxidado en nitrito y nitrato por bacterias autotróficas, el oxígeno asociado con la oxidación del nitrógeno amoniacal, en el proceso biológico de nitrificación, constituye la llamada demanda bioquímica de oxígeno nitrogenácea, DBO_N .

El efecto del oxígeno requerido por nitrificación, en efluentes de plantas de tratamiento, puede presentarse después de 2 días debido a la presencia de un gran número de bacterias nitrificantes.

1.6. Acción bacteriana en el nitrógeno y el fósforo

El nitrógeno orgánico que proviene de la urea al descomponerse pasa a ser nitrógeno amoniacal, este a su vez al oxidarse se convierte en nitrito (NO_2^-) y posteriormente en nitrato (NO_3^-). Lo que se pretende es que el proceso de desnitrificación volatilice el nitrógeno en forma de nitrógeno gaseoso. Con respecto al fósforo que se encuentra en las aguas residuales en forma orgánica, el cual proviene de los detergentes sintéticos, al hidrolizarse pasan a la forma de ortofosfato (PO_4^{-3}), este se incorpora en las células bacterianas. De esta manera el nitrógeno y el fósforo se remueven, en cierto grado de eficiencia, a través de los proceso de tratamiento biológico en los filtros percoladores.

2. Metodología

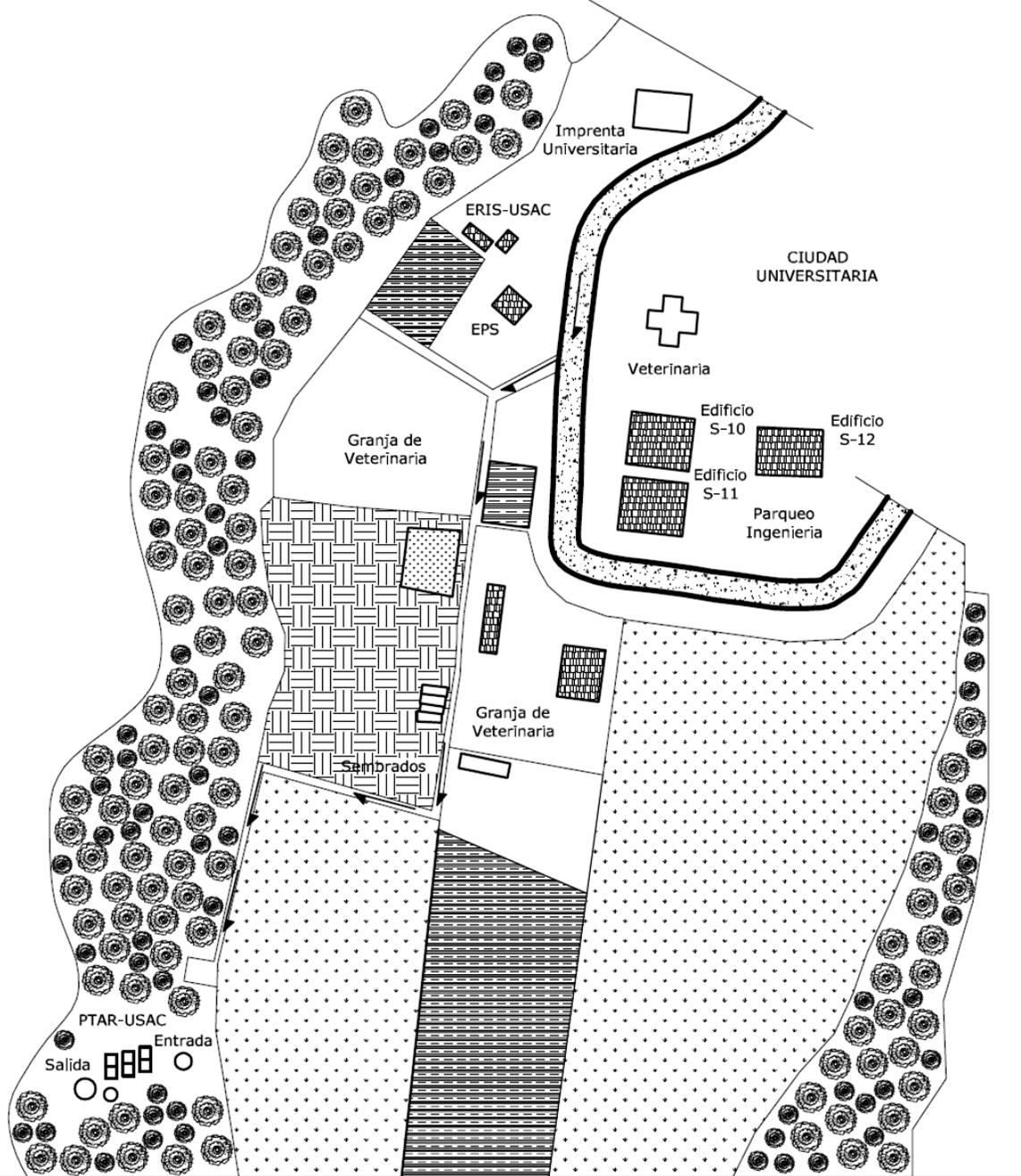
2.1. Localización

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales se encuentra en la ciudad universitaria, Campus Central zona 12 de la ciudad de Guatemala. La entrada se ubica después de la Unidad de EPS y la Granja de Veterinaria. El trayecto se encuentra señalizado hasta la planta de tratamiento como se muestra en la figura 1. El camino está debidamente cercado y sólo puede ingresar personal autorizado.

Las coordenadas geográficas de la planta de tratamiento son las siguientes:

- Latitud: 14° 34' 43" N
- Longitud: 90° 33' 34.8" O
- Altitud: 1456 msnm.

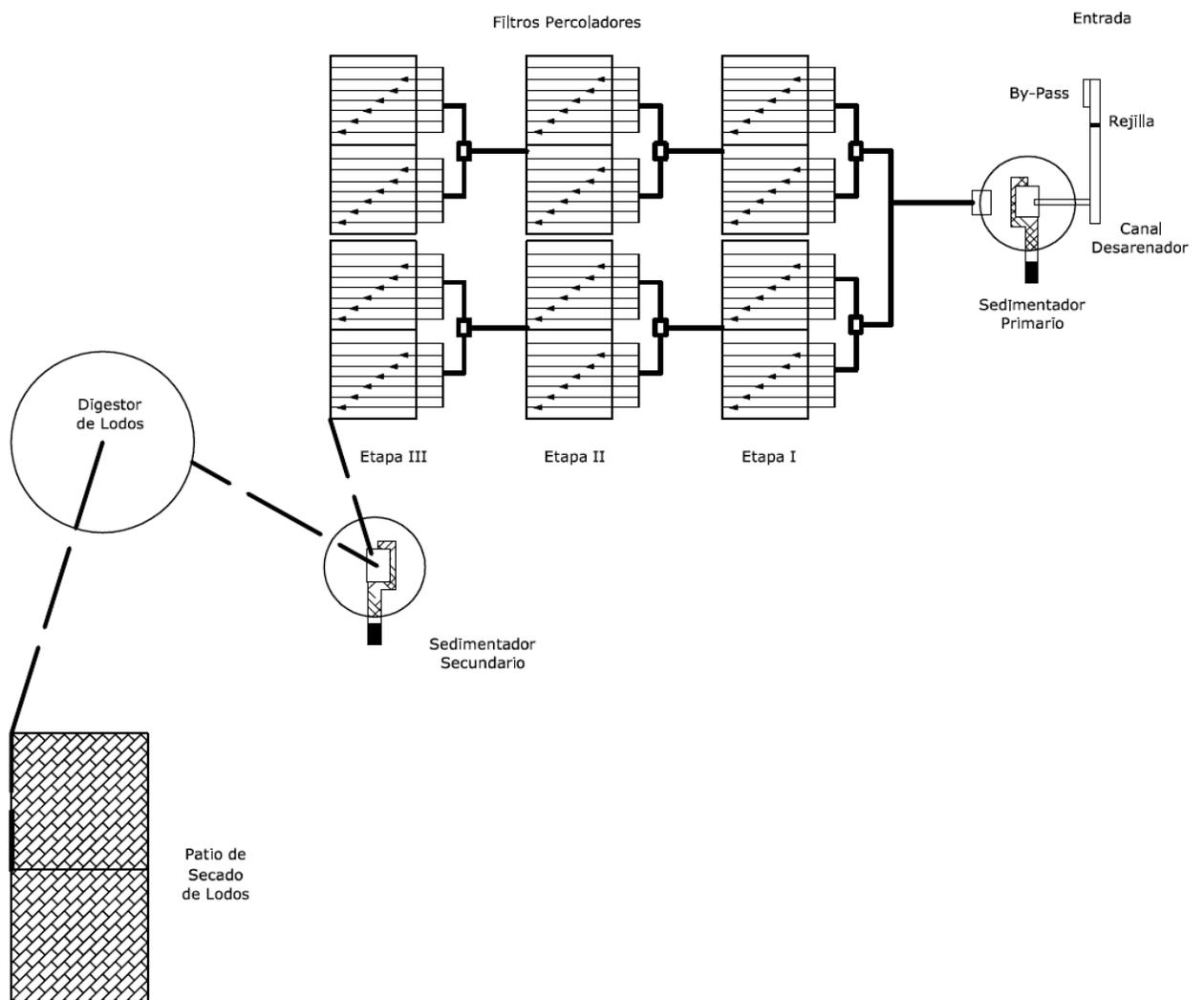
Figura 2. Esquema del recorrido a la entrada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCad 2012.

La siguiente figura muestra en detalle cómo están distribuidas las unidades de la planta de tratamiento, desde la entrada el agua residual que pasa por el canal de rejillas y desarenador para dirigirse al sedimentador primario y posteriormente a los filtros percoladores, seguido va hacia el sedimentador secundario y de este se procede a descargar al cuerpo receptor.

Figura 3. **Esquema de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCad 2012.

2.2. Selección de parámetros de control

Se evaluaron los parámetros representativos para observar la remoción de nitrógeno total y fósforo total que se da en los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento Aguas Residuales de la USAC, así como los que indican en dónde ocurre el proceso de nitrificación-desnitrificación y los parámetros que afectan e influyen en dicho proceso.

A continuación se detallan los parámetros evaluados en cada uno de los tres módulos que componen el Sistema de Filtros Percoladores:

- Nitritos
- Nitratos
- Nitrógeno amoniacal
- Nitrógeno total
- Fosfatos
- Fósforo total
- Temperatura
- DBO₅
- DQO
- pH

2.3. Método estadístico

El método estadístico abarca el número de muestras que se tomaron, así como los puntos para la recolección, la frecuencia con la que se recolectan y analizan las muestras y el tipo de muestra.

2.3.1. Número de muestras

De acuerdo a los parámetros seleccionados y su importancia, se utilizó el método estadístico según Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2002. Donde se tiene que:

$$N \geq \left[\frac{t^*s}{U} \right]^2$$

Donde:

N: es el número sugerido de muestras

s: es la desviación estándar global

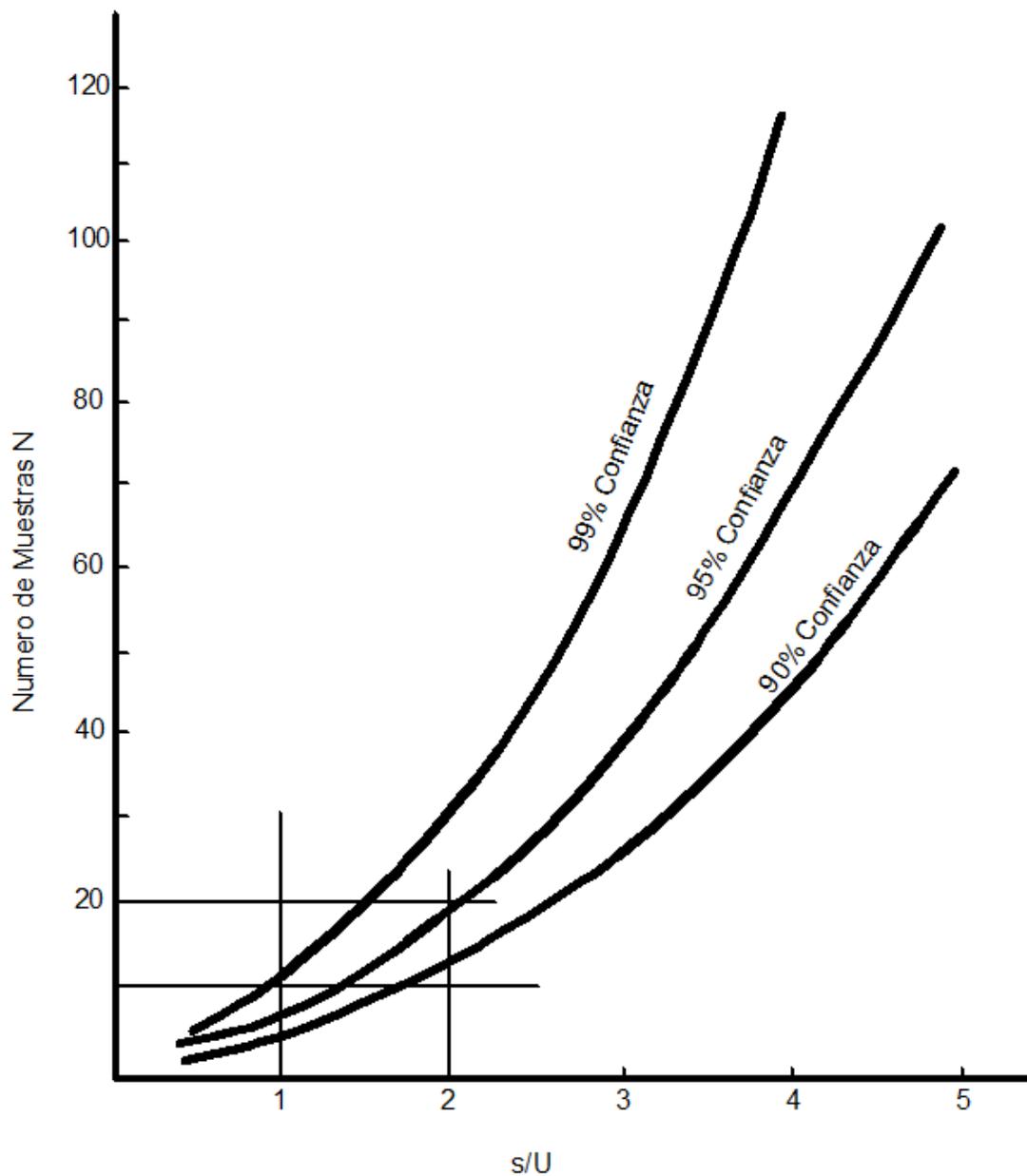
t: es el nivel de confianza, prueba t de student para un nivel de confianza dado

U: es el nivel de incerteza, nivel aceptable de incertidumbre

El nivel de confianza varía entre 90 al 99 % de acuerdo al gráfico que relaciona s/U.

Este método relaciona la desviación estándar con los niveles de confianza e incerteza a los que se desee manejar el parámetro. En la figura 3 se observa la relación s/U y el número de muestras en las curvas de nivel de confianza.

Figura 4. **Número aproximado de muestras requeridas estimando una concentración media**



Fuente: Standard methods for the examination of water and wastewater, 2002. p. 1-21.

Modificado.

Entonces:

- Desviación estándar global de los datos.
Para nutrientes se tiene un nivel de incerteza del 10 al 25 % y un rango de $\pm 20\%$
 $s = 0,02$ (2%),
- Incerteza del método de medición de nitrógeno y fósforo

Tabla II. **Valores para el cálculo de incerteza**

$0,001 \leq U \leq 0,05$ se evalúa $U = 0,015$ y $U = 0,02$

Nivel de confianza	$s/U = 1$	$s/U = 1.33$
90%	5-6	5-6
95%	7-8	10-11
99%	10	16-17

Fuente: elaboración propia.

El rango al 95 % de confianza es de 7 a 11 muestras.

Para la evaluación del número de muestras también se pueden utilizar los valores estimados que proporcionan los métodos químicos autorizados para la obtención del fósforo total y nitrógeno total.

En la tabla II se tienen los valores estimados que proporciona el Método Hach para el fósforo total y en la tabla III los valores que facilita el Método Merck para el nitrógeno total. Con esto se aplicó la fórmula del procedimiento estadístico del Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Tabla III. **Valores estimados de incerteza para el método utilizado en la medición del fósforo**

Standard: 50.0 mg/L PO₄³⁻

Instrument	Program	95% Confidence Limits
DR/3000		46.0–54.0 mg/L PO ₄ ³⁻

Standard: 80.0 mg/L PO₄³⁻

Instrument	Program	95% Confidence Limits
DR/2000	540	78.0–82.0 mg/L PO ₄ ³⁻
DR/3000		78.0–82.0 mg/L PO ₄ ³⁻

Estimated Detection Limit—The Estimated Detection Limit (EDL) for this test is 5.0 mg/L PO₄³⁻. The EDL is the calculated lowest average concentration in a deionized water matrix that is different from zero with a 99% level of confidence. For more information on derivation and use of Hach's estimated detection limit, see *Section I of the DR/2000 Procedures Manual*.

Fuente: Hach, Company. 1999.

Tomando el primer valor de fósforo como 15 mg/L de acuerdo a las concentraciones promedio de las aguas residuales domésticas, se tiene que:

$$S = \pm 3 \text{ mg/L según Manual Standar Methods, 1995}$$

$$U = 5 \text{ mg/L según el Método Hach}$$

$$N = t \text{ de } 99 \% \text{ y } s/U \text{ de } 0.6 = 8 \text{ muestras}$$

Tabla IV. **Valores estimados en control de producción para nitrógeno según método fotométrico**

Desviación estándar del procedimiento (mg/l de N)	± 0,14
Coeficiente de variación del procedimiento (%)	± 1,7
Intervalo de confianza (mg/l de N)	±0,3
Número de lotes	34

Fuente: <http://photometry.merck.de> . Consulta: de 14 de febrero de 2013.

De acuerdo a la tabla de valores se tiene que:

$$S = \pm 0,14 \text{ mg/L N}$$

$$U = 0,3 \text{ mg/L N}$$

$$N = t \text{ de } 99\% \text{ y } s/U \text{ de } 0,47 = 7 \text{ muestras}$$

Con los métodos seleccionados para las pruebas de laboratorio se observa que el mínimo de muestras es de 7, por lo que se seleccionaron 10. Esto cumple para nitrógeno total y fósforo total en los métodos utilizados y según el rango de 7 a 11 muestras para un nivel de confianza del 95 %, obtenido del Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2002.

2.3.2. Puntos de muestreo

Para la selección de puntos de muestreo se consideró que el Sistema de Filtros Percoladores cuenta con tres etapas. Cada una cuenta con dos filtros que funcionan en paralelo. De modo que en la entrada se encuentran dos cajas de distribución del agua residual que va del sedimentador primario. Después de la etapa I se observan dos cajas de distribución entre los filtros I y II. En seguida está la etapa II donde hay dos cajas de distribución entre los filtros II y III. Al final del sistema se encuentra la etapa III donde se encuentra un canal que recolecta el agua para dirigirla hacia el sedimentador secundario.

Es por esto que se consideraron los puntos de muestreo de la siguiente manera:

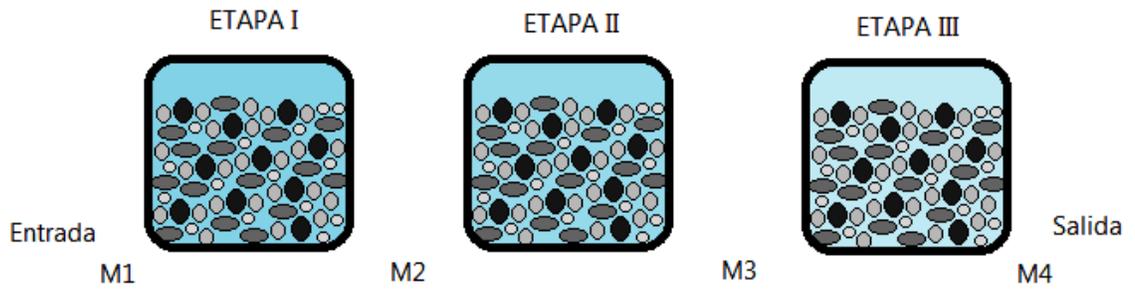
Puntos de muestreo

Entrada de Etapa I → Muestra 1 → M1
Salida de Etapa I y Entrada a Etapa II → Muestra 2 → M2
Salida de Etapa II y Entrada a Etapa III → Muestra 3 → M3
Salida de Etapa III → Muestra 4 → M4

Quedando de la siguiente forma, como se muestra en la figura 4:

Entrada a los Filtros → M1
Etapa I y II → M2
Etapa II y III → M3
Salida de los Filtros → M4

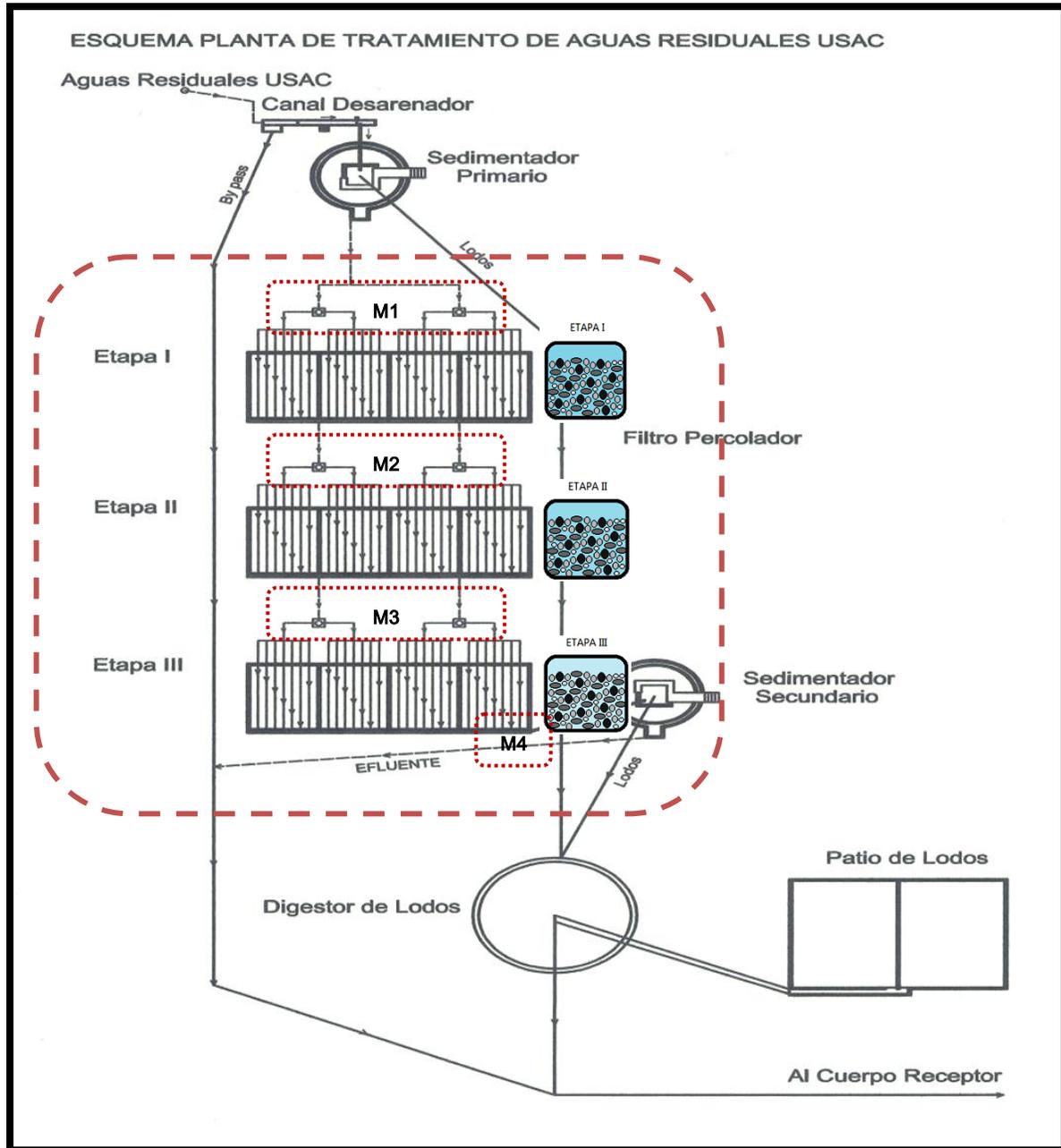
Figura 5. Esquema de los puntos de muestreo en los filtros percoladores de la planta de tratamiento de la USAC



Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se observa dónde se encuentran las etapas de los filtros percoladores, así como las cajas de distribución en un plano más amplio.

Figura 6. Esquema de la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC



Fuente: Ing. RAUDALES, Rommel. 2011. Modificado.

2.3.3. Frecuencia de toma de muestras

En la mayoría de casos, las muestras compuestas se refieren a la mezcla de muestras puntuales recolectadas en el mismo punto en diferente tiempo. Para algunos propósitos, una representación de la muestra compuesta considera un período de 24 horas para su determinación. Bajo ciertas circunstancias, sin embargo, un cambio o un período más corto de tiempo, o un ciclo completo de una operación periódica, puede ser preferible. Se deben evaluar los efectos especiales, variables e irregulares de la descarga y operación, además se recolectan las muestras compuestas representando el período durante el cual la descarga ocurre. (Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater).

En la recolección y los análisis de las muestras se evaluaron las limitaciones para minimizar la desviación en los resultados, siendo una consideración importante que una vez a la semana, los días miércoles, se le da mantenimiento a las unidades instaladas en la planta de tratamiento y de acuerdo a los parámetros seleccionados para el análisis de laboratorio la lectura de la demanda bioquímica de oxígeno DBO_5 se realiza a los cinco días. Por lo que se consideró que los días jueves se recolectaran las muestras para obtener la mayor eficiencia de las unidades. La medición se realizó a cada hora en un período de cinco horas. De manera que después de la recolección se analizaran las muestras.

2.3.4. Tipo de muestra

El muestreo que se realizó fue de forma compuesta, de tal manera que esta contenga volúmenes definidos a cada hora, ya que así se tienen las características promedio de las aguas residuales durante un período de tiempo

y quedan eliminados los efectos de los cambios intermitentes de caudal y concentración. (Cruz, 1990 / López, 2010/ Oakley, 2011 / Romero, 2010).

El volumen de la muestra que fue requerido durante un período de 5 horas de muestreo, se determinó con la siguiente relación: (Romero, 2010).

$$V = \frac{V_t}{Q * N_m}$$

V = volumen de recolección por cada litro por segundo de agua cruda; ml

V_t = volumen total de la muestra compuesta de acuerdo al volumen para cada ensayo; 1500 ml

Q = caudal promedio de agua cruda; considerando 6 l/s en promedio

(Tesis MSc.Ing. Ramírez, 2012)

N_m = número de muestras a recolectar; 5 muestras

$$V = \frac{1\ 500}{6 * 5} = 50\ \text{ml}$$

De la cual se recolectaron 50 ml de agua residual. Para esto, en un período de 7:00 a.m. a 11:00 a.m. se captó un volumen de 250 ml del agua residual en cada punto de muestreo, hasta obtener un volumen total de 1 500 ml de muestra por punto.

Respeto al aforo de caudal se utilizó el vertedero triangular proporcionado en la planta de tratamiento, en el canal desarenador. También se aforó volumétricamente a cada hora, en las dos entradas que tiene el Sistema de Filtros Percoladores ya que trabajan en paralelo.

2.3.5. Procedimientos usados en el Standard Methods

- Temperatura: termómetro de mercurio en grados Celsius. 2500 A.
- pH: Método Electrométrico. 4500-H⁺ B.
- Demanda bioquímica de oxígeno DBO: requerimiento/demanda de ozono. 2350 D.
- Demanda química de oxígeno DQO: Método Colorimétrico de Flujo Cerrado. 5220.
- Amonio: Método de Nessler para 20 µg NH₃-N/L hasta 5 mg NH₃-N/L. 4500-NH₃ NITROGEN (AMMONIA).
- Nitritos: Método de Reducción de Cadmio. 4500-NO₂⁻ E.
Método de Diazotización. 4500-NO₂⁻ B.
- Nitratos: Método de Reducción de Cadmio Automatizado. 4500-NO₃⁻ F.
- Fosfatos: Método de Ácido Ascórbico
- Fósforo total: Método Colorimétrico de Ácido de Molibdo vanadatofosfórico. 4500-P C.
- Nitrógeno total: Método fotométrico. 4500-N. EN ISO 11905-1.

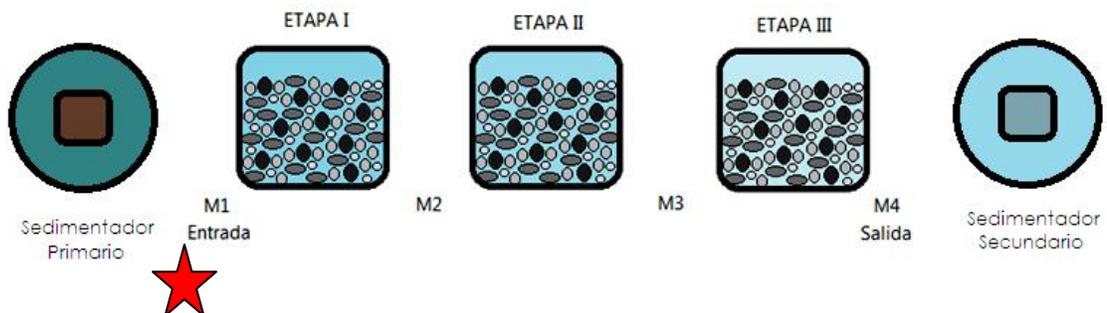
3. Resultados experimentales

Se recolectaron muestras compuestas para su análisis en los puntos entre el Sedimentador Primario, el Sistema de Filtros Percoladores y el Sedimentador Secundario.

3.1 Características del agua residual afluyente a los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

La toma de las muestras compuestas del agua residual que ingresa a las tres etapas de los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, fue realizada posterior al tratamiento primario de sedimentación.

Figura 7. Esquema de toma de muestras para caudales



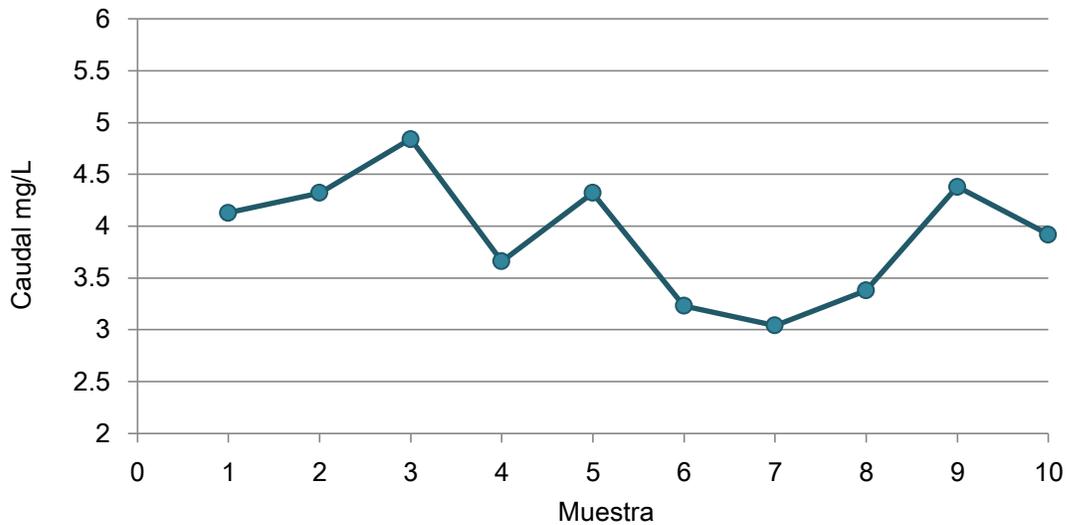
Fuente: elaboración propia, con programa de Paint.

Tabla V. **Caudal que ingresa a las etapas de filtración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**

Número de muestreo	Fecha de recolección	Caudal Promedio (mg/L)	Desviación Estándar
1	11/10/2012	4,13	0,17
2	18/10/2012	4,32	0,13
3	25/10/2012	4,84	0,13
4	07/11/2012	3,66	0,14
5	15/11/2012	4,32	0,11
6	22/11/2012	3,23	0,13
7	28/11/2012	3,04	0,07
8	17/01/2013	3,38	0,05
9	24/01/2013	4,38	0,09
10	01/02/2013	3,92	0,04
Promedio		3,92	0,11

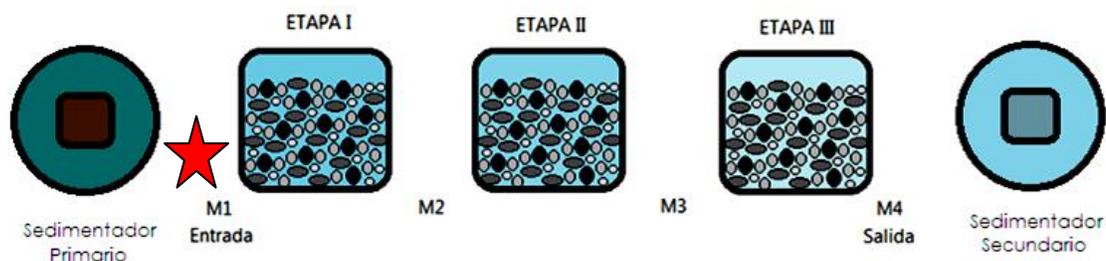
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Caudal que ingresa a las etapas de filtración de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Esquema de toma de muestras para las características generales del agua que ingresa a los filtros



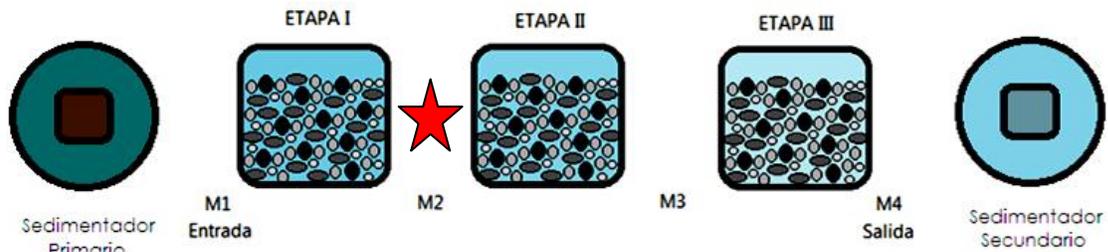
Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. Características generales del agua residual que ingresa a la Etapa I de la filtración en la PTAR de la USAC

ENTRADA A LOS FILTROS					
Número de muestreo	Fecha de recolección	Temperatura T (°C)	pH	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)
1	11/10/2012	25,4	8,10	52,8	145
2	18/10/2012	27,3	8,13	87,2	147
3	25/10/2012	25,2	8,09	128,8	161
4	07/11/2012	23,3	8,07	100,6	134
5	15/11/2012	22,9	7,96	84,0	120
6	22/11/2012	24,7	8,03	88,6	171
7	28/11/2012	22,1	7,96	96,6	151
8	17/01/2013	24,1	8,10	87,6	144
9	24/01/2013	21,6	8,39	84,6	174
10	01/02/2013	25,2	7,86	66,2	115
Mínimo		21,6	7,86	52,8	115
Máximo		27,3	8,39	128,8	174
Promedios		24,41	8,05	91,23	147,00
Desviación Estándar		1,73	0,14	20,11	19,57

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Esquema de toma de muestras para las características generales del agua entre la Etapa I y Etapa II



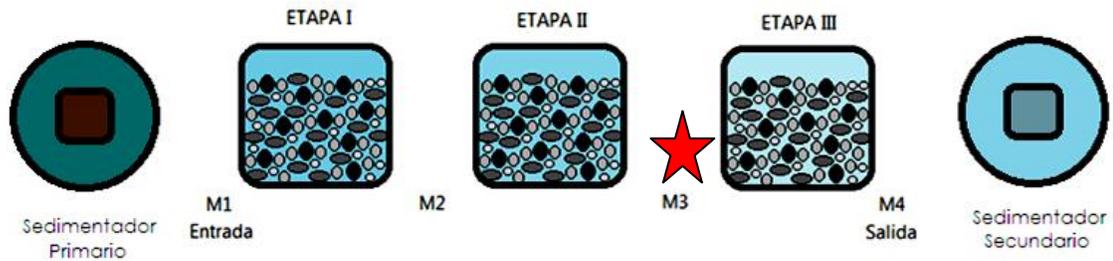
Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Características generales del agua residual que sale de la Etapa I e ingresa a la Etapa II de la filtración en la PTAR de la USAC

FILTROS I-II					
Número de muestreo	Fecha de recolección	Temperatura T (°C)	pH	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)
1	11/10/2012	22,5	8,15	26,12	51
2	18/10/2012	25,3	8,24	24,80	84
3	25/10/2012	24,3	8,06	25,56	60
4	07/11/2012	21,9	8,19	24,32	64
5	15/11/2012	22,4	8,14	26,64	61
6	22/11/2012	24,1	8,15	21,32	68
7	28/11/2012	21,2	8,08	27,24	95
8	17/01/2013	22,7	8,12	27,4	92
9	24/01/2013	21,3	8,30	26,76	84
10	01/02/2013	25,7	8,14	25,48	47
Mínimo		21,2	8,06	21,32	47
Máximo		25,7	8,30	27,4	95
Promedios		23,10	8,14	25,14	69,00
Desviación Estándar		1,61	0,07	1,80	17,02

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Esquema de toma de muestras para las características generales del agua entre la Etapa II y Etapa III



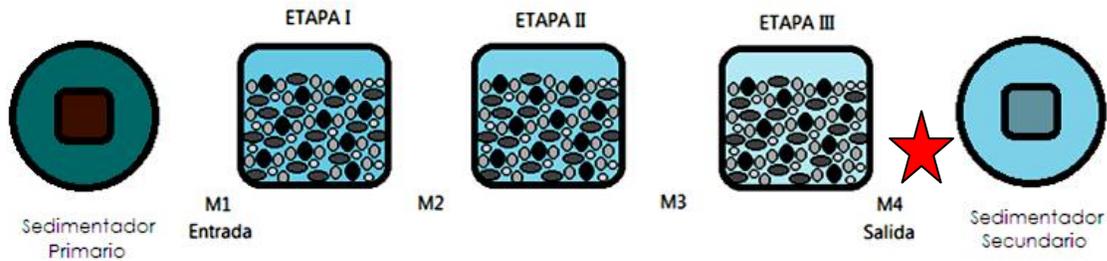
Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Características generales del agua residual que sale de la Etapa II e ingresa a la Etapa III de la filtración en la PTAR de la USAC

FILTROS II-III					
Número de muestreo	Fecha de recolección	Temperatura T (°C)	pH	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)
1	11/10/2012	23,1	8,04	5,73	44
2	18/10/2012	24,7	8,08	5,95	39
3	25/10/2012	23,8	7,91	5,84	31
4	07/11/2012	21,6	7,92	6,58	55
5	15/11/2012	21,8	7,88	6,18	52
6	22/11/2012	23,1	7,92	6,08	55
7	28/11/2012	21,1	7,99	6,12	60
8	17/01/2013	22,4	7,91	6,60	34
9	24/01/2013	20,8	8,11	6,18	28
10	01/02/2013	25,3	8,01	5,63	44
Mínimo		20,8	7,88	5,63	28
Máximo		25,3	8,11	6,6	60
Promedios		22,74	7,96	6,07	48,00
Desviación Estándar		1,51	0,08	0,32	11,11

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Esquema de toma de muestras para las características generales del agua que sale de los filtros



Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Características generales del agua residual que sale de la Etapa III de la filtración en la PTAR de la USAC

SALIDA DE LOS FILTROS					
Número de muestreo	Fecha de recolección	Temperatura T (°C)	pH	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)
1	11/10/2012	24	7,37	8,0	39
2	18/10/2012	24,8	7,35	16,96	68
3	25/10/2012	24	7,33	26,92	31
4	07/11/2012	22,1	7,51	11,96	46
5	15/11/2012	21,8	7,65	21,16	29
6	22/11/2012	23,1	7,55	21,64	32
7	28/11/2012	21,2	7,51	22,4	45
8	17/01/2013	22,4	7,8	25,04	32
9	24/01/2013	20,6	7,99	23,2	36
10	01/02/2013	25,9	7,37	22,24	40
Mínimo		20,6	7,33	8	13
Máximo		25,9	7,99	26,92	68
Promedios		23,00	7,47	18,43	38,86
Desviación Estándar		1,68	0,22	5,93	14,94

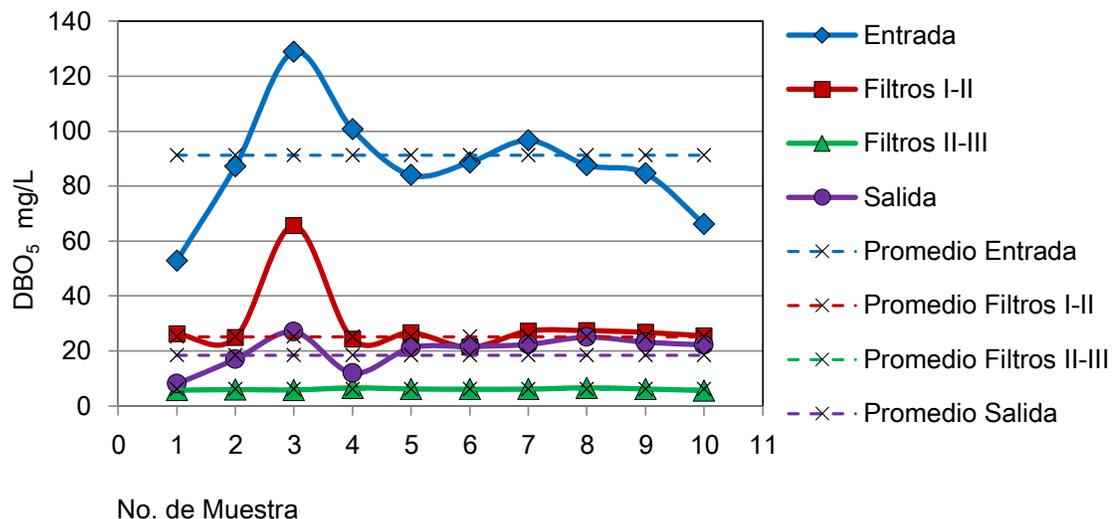
Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Valores de demanda bioquímica de oxígeno de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**

DBO ₅ (mg/L)					
Muestreo	Fecha	Entrada	Filtros I-II	Filtros II-III	Salida
1	11/10/2012	52,8	26,12	5,73	8
2	18/10/2012	87,2	24,8	5,95	16,96
3	25/10/2012	128,8	65,56	5,84	26,92
4	07/11/2012	100,6	24,32	6,58	11,96
5	15/11/2012	84	26,64	6,18	21,16
6	22/11/2012	88,6	21,32	6,08	21,64
7	28/11/2012	96,6	27,24	6,12	22,4
8	17/01/2013	87,6	27,4	6,6	25,04
9	24/01/2013	84,6	26,76	6,18	23,2
10	01/02/2013	66,20	25,48	5,63	22,24
Mínimo		52,80	21,32	5,63	8,00
Máximo		128,8	65,56	6,6	26,92
Promedio		91,23	30,86	6,07	18,43
Desviación Estándar		20,11	12,78	0,32	5,93

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Demanda bioquímica de oxígeno de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**



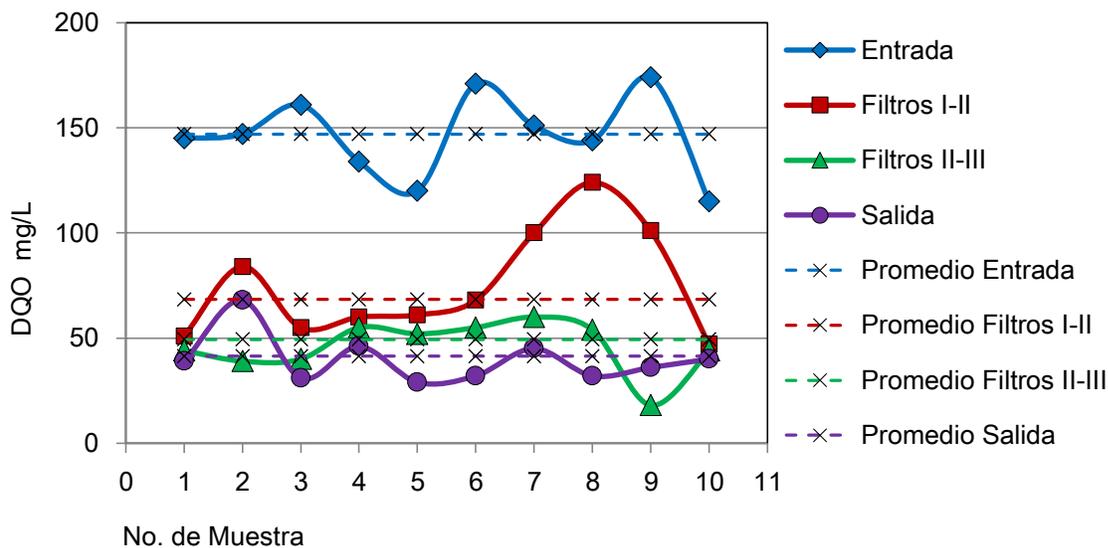
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Valores de demanda química de oxígeno de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**

DQO (mg/L)					
Muestreo	Fecha	Entrada	Filtros I-II	Filtros II-III	Salida
1	11/10/2012	145	51	44	39
2	18/10/2012	147	84	39	68
3	25/10/2012	161	55	40	31
4	07/11/2012	134	60	55	46
5	15/11/2012	120	61	52	29
6	22/11/2012	171	68	55	32
7	28/11/2012	151	100	60	45
8	17/01/2013	144	124	54	32
9	24/01/2013	174	101	18	36
10	01/02/2013	115	47	44	40
Mínimo		115	47	18	29
Máximo		174	124	60	68
Promedio		147,00	68,43	49,29	41,43
Desviación Estándar		19,57	25,85	12,18	11,51

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Demanda química de oxígeno de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**



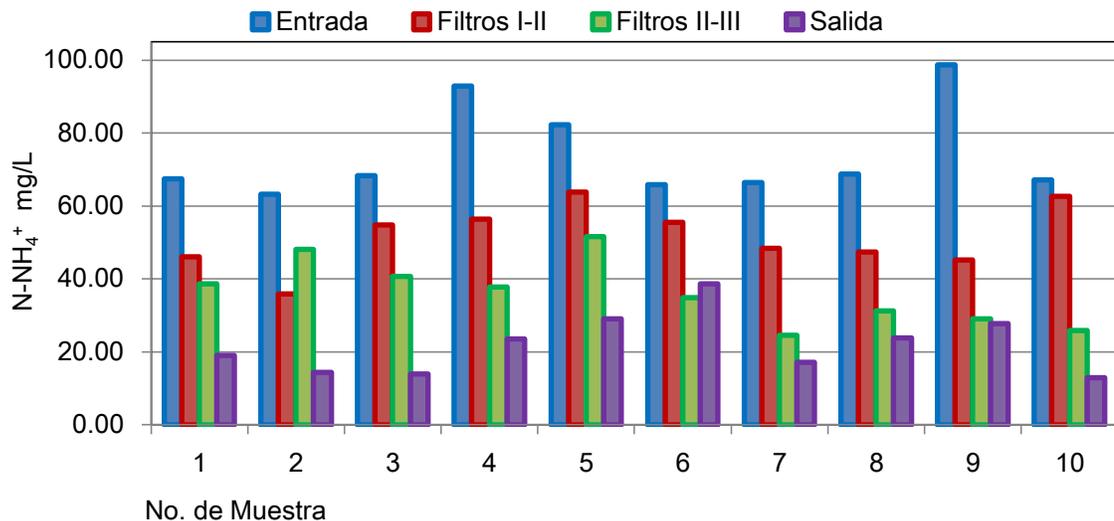
Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Valores de amonio de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC

Amonio N-NH ₄ ⁺ (mg/L)					
Muestreo	Fecha	Entrada	Filtros I-II	Filtros II-III	Salida
1	11/10/2012	67,40	46,12	38,70	19,03
2	18/10/2012	63,21	35,80	48,05	14,38
3	25/10/2012	68,37	54,83	40,64	13,87
4	07/11/2012	92,88	56,44	37,73	23,54
5	15/11/2012	82,24	63,86	51,60	29,03
6	22/11/2012	65,79	55,47	34,83	38,70
7	28/11/2012	66,44	48,38	24,51	17,09
8	17/01/2013	68,69	47,41	31,28	23,87
9	24/01/2013	98,69	45,15	29,03	27,74
10	01/02/2013	67,08	62,57	25,80	12,90
Mínimo		63,21	35,80	24,51	12,90
Máximo		98,69	63,86	51,60	38,70
Promedio		72,33	51,55	39,44	22,23
Desviación Estándar		12,59	8,62	9,00	8,21

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Gráfico de amonio de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC



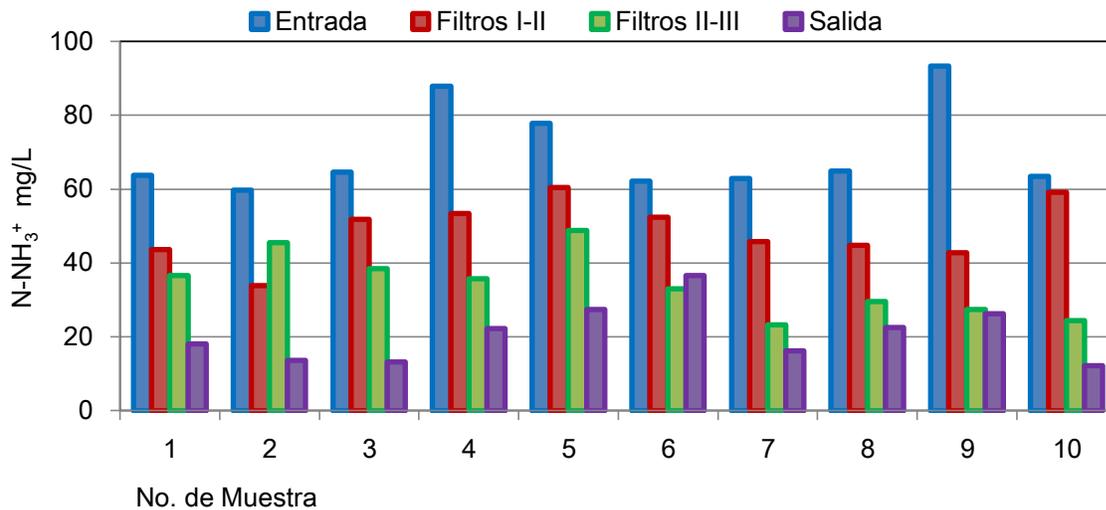
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Valores de amoniaco de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**

Amoniaco N-NH₃⁺ (mg/L)					
Muestreo	Fecha	Entrada	Filtros I-II	Filtros II-III	Salida
1	11/10/2012	63,75	43,62	36,6	18,00
2	18/10/2012	59,78	33,85	45,45	13,60
3	25/10/2012	64,66	51,85	38,43	13,12
4	07/11/2012	87,84	53,38	35,69	22,27
5	15/11/2012	77,78	60,39	48,8	27,45
6	22/11/2012	62,22	52,46	32,94	36,6
7	28/11/2012	62,83	45,75	23,18	16,17
8	17/01/2013	64,97	44,84	29,59	22,57
9	24/01/2013	93,33	42,7	27,45	26,23
10	01/02/2013	63,44	59,17	24,40	12,20
Mínimo		59,78	33,86	23,18	12,20
Máximo		93,33	60,39	48,80	36,60
Promedio		68,41	48,76	37,30	21,03
Desviación Estándar		11,90	8,15	8,51	7,77

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Gráfico de amoniaco de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**



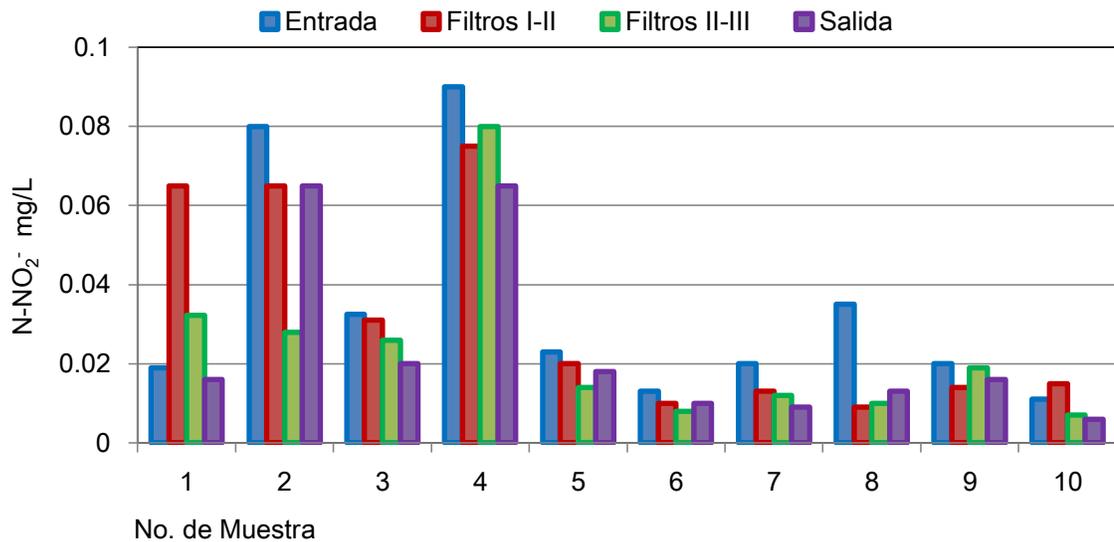
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Valores de nitritos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**

Nitritos N-NO ₂ ⁻ (mg/L)					
Muestreo	Fecha	Entrada	Filtros I-II	Filtros II-III	Salida
1	11/10/2012	0,019	0,065	0,032	0,016
2	18/10/2012	0,08	0,065	0,028	0,065
3	25/10/2012	0,033	0,031	0,026	0,02
4	07/11/2012	0,09	0,075	0,08	0,065
5	15/11/2012	0,023	0,02	0,014	0,018
6	22/11/2012	0,013	0,01	0,008	0,01
7	28/11/2012	0,02	0,013	0,012	0,009
8	17/01/2013	0,035	0,009	0,01	0,013
9	24/01/2013	0,02	0,014	0,019	0,016
10	01/02/2013	0,01	0,015	0,01	0,01
Mínimo		0,01	0,01	0,01	0,01
Máximo		0,09	0,075	0,08	0,065
Promedio		0,04	0,04	0,03	0,03
Desviación Estándar		0,028	0,026	0,022	0,022

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Gráfico de nitritos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**



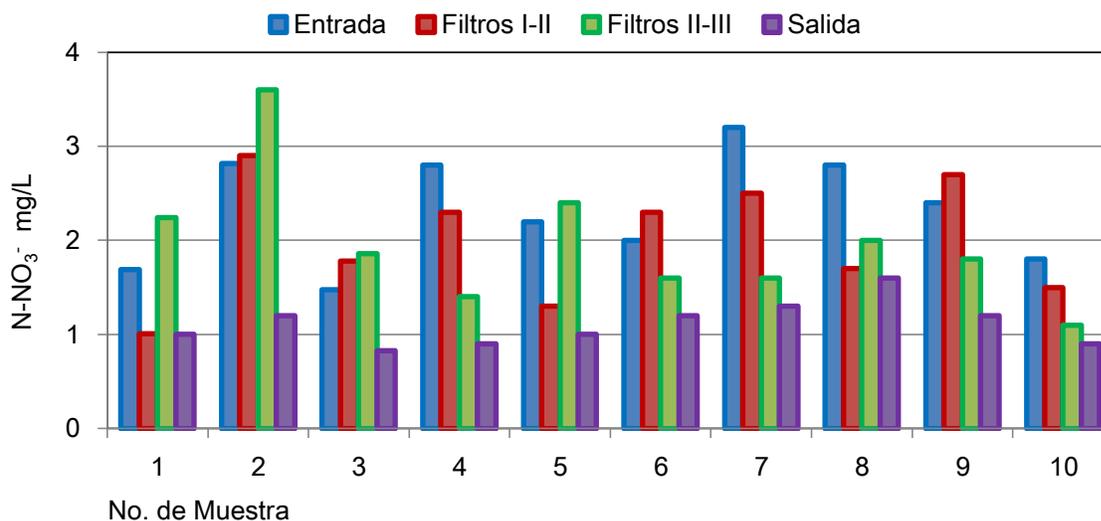
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Valores de nitratos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**

Nitratos N-NO ₃ ⁻ (mg/L)					
Muestreo	Fecha	Entrada	Filtros I-II	Filtros II-III	Salida
1	11/10/2012	1,69	1,01	2,24	1
2	18/10/2012	2,82	2,9	3,6	1,2
3	25/10/2012	1,48	1,78	1,86	0,83
4	07/11/2012	2,8	2,3	1,4	0,9
5	15/11/2012	2,2	1,3	2,4	1,0
6	22/11/2012	2,0	2,3	1,6	1,2
7	28/11/2012	3,2	2,5	1,6	1,3
8	17/01/2013	2,8	1,7	2	1,6
9	24/01/2013	2,4	2,7	1,8	1,2
10	01/02/2013	1,80	1,5	1,10	0,90
Mínimo		1,48	1,01	1,10	0,83
Máximo		3,2	2,9	3,6	1,6
Promedio		2,31	2,01	2,10	1,06
Desviación Estándar		0,58	0,63	0,69	0,23

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfico de nitratos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**



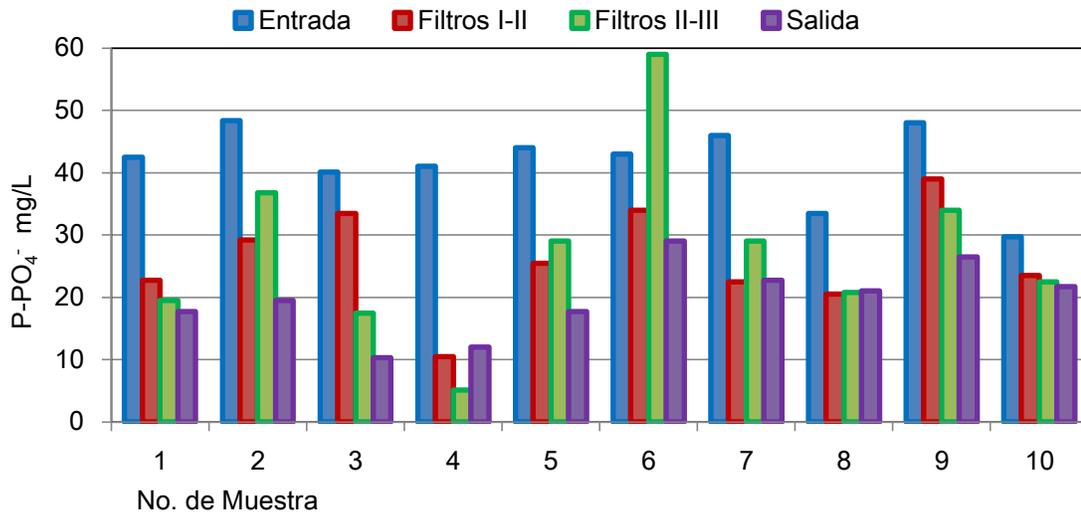
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Valores de fosfatos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**

Fosfatos PO ₄ ⁻ (mg/L)					
Muestreo	Fecha	Entrada	Filtros I-II	Filtros II-III	Salida
1	11/10/2012	42,5	22,75	19,5	17,75
2	18/10/2012	48,4	29,25	36,75	19,5
3	25/10/2012	40,1	33,5	17,5	10,3
4	07/11/2012	41,0	10,5	5,1	12,05
5	15/11/2012	44,0	25,5	29	17,75
6	22/11/2012	43,0	34,0	59	29
7	28/11/2012	46,0	22,5	29	22,75
8	17/01/2013	33,5	20,5	20,75	21
9	24/01/2013	48,0	39,0	34	26,5
10	01/02/2013	29,75	23,5	22,50	21,75
Mínimo		29,75	10,50	5,10	10,30
Máximo		48,4	39,0	59	29
Promedio		43,57	25,43	27,98	18,44
Desviación Estándar		6,00	8,16	14,38	5,80

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Gráfico de fosfatos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**



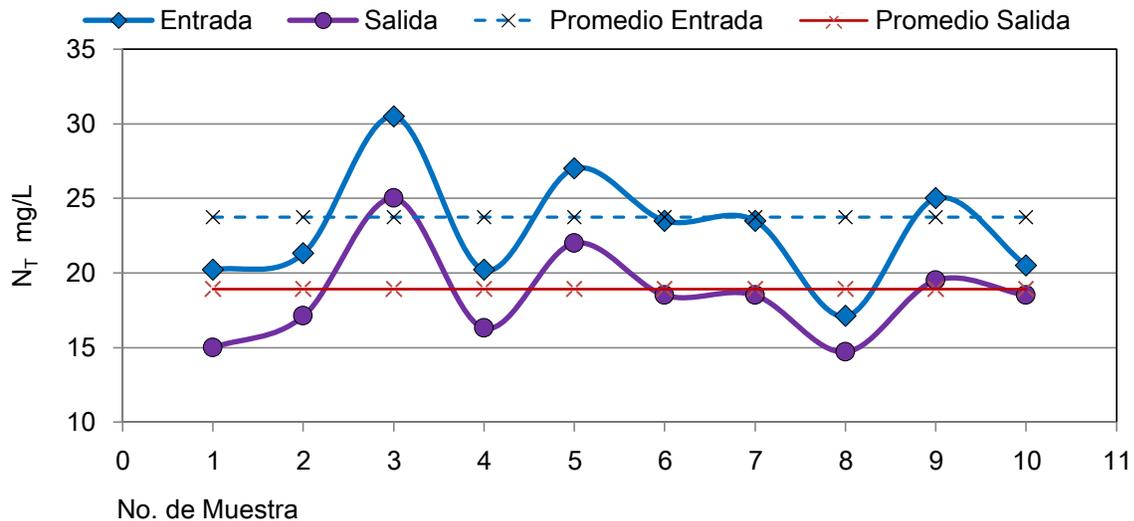
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Valores de nitrógeno total de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**

Muestreo	Fecha	Entrada (mg/L)	Salida (mg/L)
1	11/10/2012	20,2	15
2	18/10/2012	21,3	17,1
3	25/10/2012	30,5	25
4	07/11/2012	20,2	16,3
5	15/11/2012	27	22
6	22/11/2012	23,5	18,5
7	28/11/2012	23,5	18,5
8	17/01/2013	17,1	14,7
9	24/01/2013	25	19,5
10	01/02/2013	20,50	18,50
Mínimo		17,10	14,70
Máximo		30,5	25
Promedio		23,74	18,91
Desviación Estándar		3,89	3,14

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Gráfico de nitrógeno total de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**



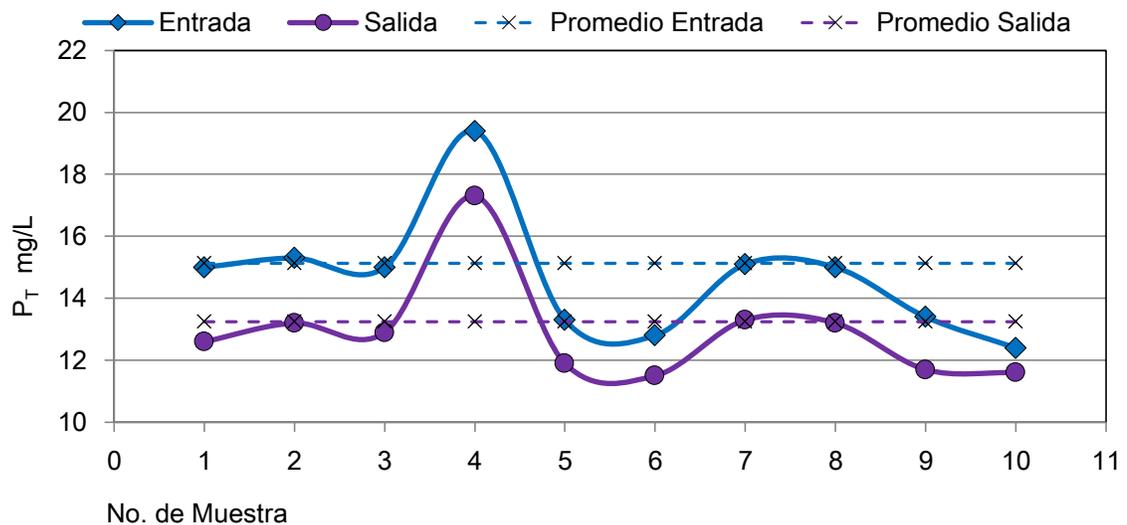
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Valores de fósforo total de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**

Muestreo	Fecha	Entrada (mg/L)	Salida (mg/L)
1	11/10/2012	15	12,6
2	18/10/2012	15,3	13,2
3	25/10/2012	15	12,9
4	07/11/2012	19,4	17,3
5	15/11/2012	13,3	11,9
6	22/11/2012	12,8	11,5
7	28/11/2012	15,1	13,3
8	17/01/2013	15	13,2
9	24/01/2013	13,4	11,7
10	01/02/2013	12,40	11,60
Mínimo		12,40	11,50
Máximo		19,40	17,3
Promedio		15,13	13,24
Desviación Estándar		1,89	1,70

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Gráfico de fósforo total de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**



Fuente: elaboración propia.

4. Discusión de resultados

La eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo se analiza en la tabla XIX y tabla XX respectivamente.

En el caso de la nitrificación y desnitrificación en los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de la USAC se observaron los valores de nitritos y nitratos en la entrada, entre la Etapa I-II y la Etapa II-III, así como en la salida del sistema.

Los nitritos y nitratos son los parámetros donde se observan las reducciones y oxidaciones del nitrógeno en sus diferentes formas. Para esto se tienen los gráficos que se presentan en la figura 26 y figura 27.

Para determinar la relación del índice de biodegradabilidad con respecto a la remoción de los nutrientes evaluados, se realizó una correlación entre la DBO_5/DQO con el porcentaje de remoción nitrógeno total y la DBO_5/DQO con el porcentaje de remoción del fósforo total.

De estas evaluaciones se puede conocer el rango donde la eficiencia de remoción alcanza sus valores máximos y en qué módulo se da la fase de nitrificación-desnitrificación.

4.1. Análisis general de eficiencias promedio

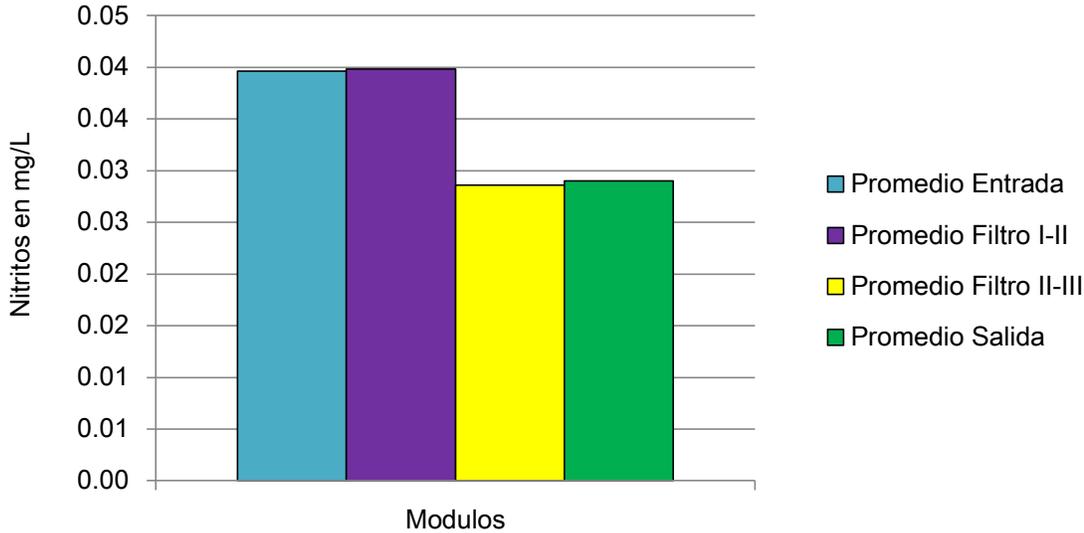
Para las formas analizadas de nitrógeno, se tiene que la remoción promedio de amonio es de 69,27 %, nitritos es de 25 % y nitratos es de 54,11 %.

En el caso de los fosfatos, la eficiencia promedio de remoción es de 57,68 %.

Al analizar el nitrógeno total se obtiene una remoción promedio del 20,35 % y para el fósforo total es de 12,49 %, en el sistema de filtros percoladores, es decir, en las tres etapas de filtración.

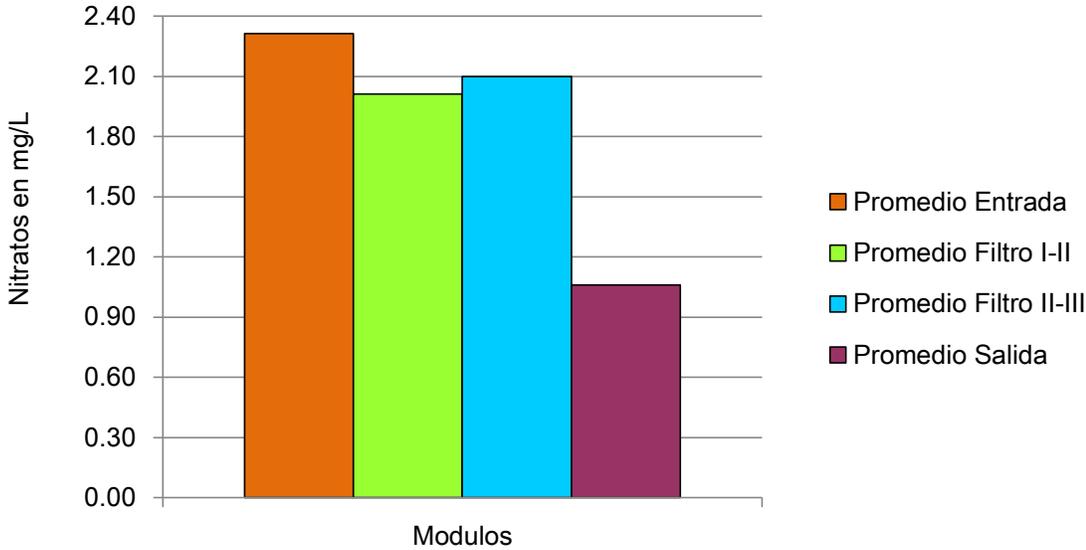
La eficiencia promedio de remoción de materia orgánica es del 79,8 % de DBO₅. En cuanto a la DQO se tiene una eficiencia promedio de remoción del 71,82 %.

Figura 22. **Gráfico del promedio de nitritos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Gráfico del promedio de nitratos de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**



Fuente: elaboración propia.

El resultado de comparar los gráficos de promedio, tanto para nitritos como para nitratos, es que de la entrada al filtro I-II se tiene que los nitritos incrementan y los nitratos se reducen, posteriormente en entre el filtro I-II y el filtro II-III disminuyen los nitritos y aumentan los nitratos. Del filtro II-III a la salida se mantienen los valores de nitritos y disminuyen considerablemente los valores de nitratos.

Existiendo varios parámetros críticos en el proceso de nitrificación, se tiene que la relación de demanda química de oxígeno y el nitrógeno DQO/N vincula el contenido de carbono con el nitrógeno del agua residual, lo que determina la competencia en el crecimiento de microorganismos autótrofos y heterótrofos.

Otro de los parámetros es la temperatura y el oxígeno en el agua, ya que éstos influyen directamente en los microorganismos existentes en la biopelícula que se encuentra en el medio filtrante.

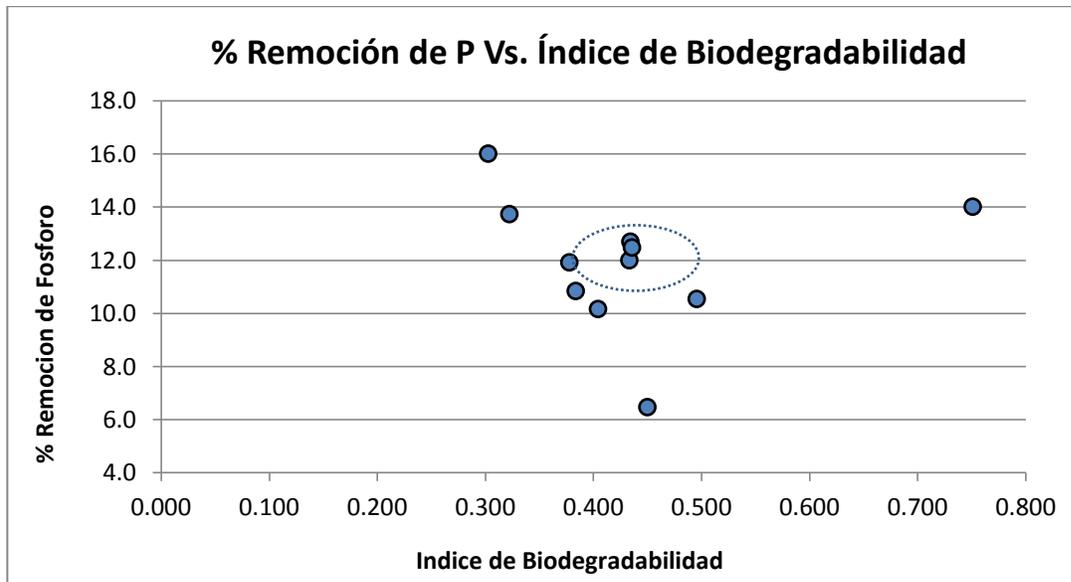
Al relacionar el índice de biodegradabilidad de la materia (DBO_5/DQO), tanto en la entrada como en la salida de los filtros percoladores, con el porcentaje de remoción del nitrógeno y el fósforo, se tiene lo siguiente:

Tabla XIX. **Valores de porcentaje de remoción de fósforo de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**

Muestreo	Fecha	Promedio del Índice de Biodegradabilidad	Porcentaje de Remoción de Fósforo %
1	11/10/2012	0,303	16,0
2	18/10/2012	0,323	13,7
3	25/10/2012	0,752	14,0
4	07/11/2012	0,384	10,8
5	15/11/2012	0,496	10,5
6	22/11/2012	0,405	10,2
7	28/11/2012	0,378	11,9
8	17/01/2013	0,434	12,0
9	24/01/2013	0,435	12,7
10	01/02/2013	0,450	6,5
Mínimo		0,303	6,452
Máximo		0,75	16,00
Promedio		0,436	12,5
Desviación Estándar		0,13	2,60

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Gráfico de relación entre porcentaje de remoción de fósforo y el promedio de índice de biodegradabilidad de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**



Fuente: elaboración propia.

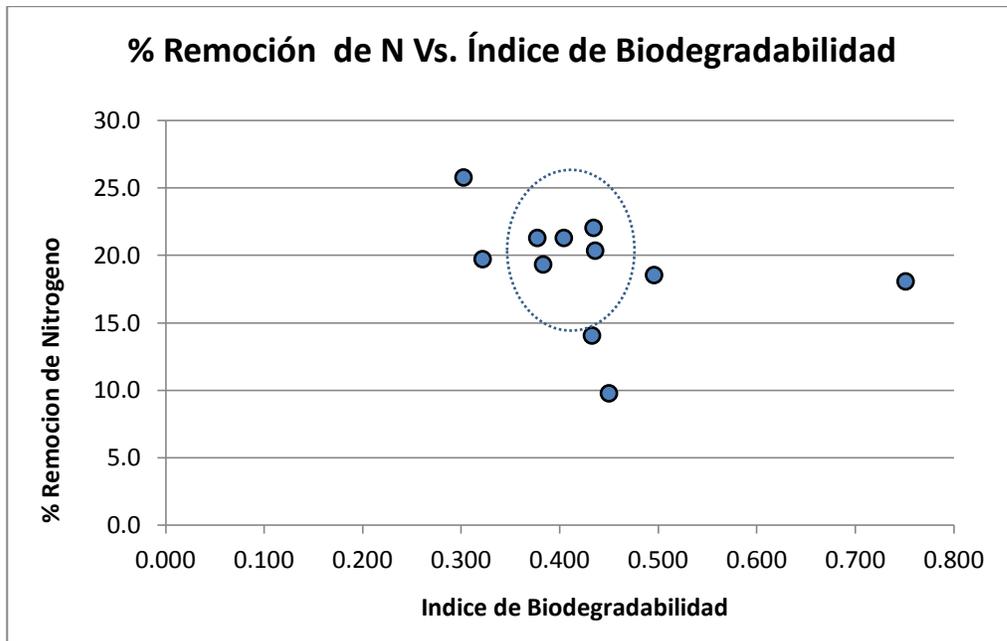
De lo anterior se deduce que en un rango de 0,40 a 0,50 de índice de biodegradabilidad, el porcentaje de remoción de fósforo varía entre 10 al 13 %.

Tabla XX. **Valores de porcentaje de remoción de nitrógeno de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**

Muestreo	Fecha	Promedio del Índice de Biodegradabilidad	Porcentaje de Remoción de Nitrógeno
1	11/10/2012	0,303	25,7
2	18/10/2012	0,323	19,7
3	25/10/2012	0,752	18,0
4	07/11/2012	0,384	19,3
5	15/11/2012	0,496	18,5
6	22/11/2012	0,405	21,3
7	28/11/2012	0,378	21,3
8	17/01/2013	0,434	14,0
9	24/01/2013	0,435	22,0
10	01/02/2013	0,450	9,8
Mínimo		0,303	9,756
Máximo		0,75	25,74
Promedio		0,436	20,3
Desviación Estándar		0,13	4,43

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Gráfico de relación entre porcentaje de remoción de nitrógeno y el promedio de Índice de biodegradabilidad de los filtros percoladores en la PTAR de la USAC**



Fuente: elaboración propia.

En el gráfico se aprecia que en un rango de 0,38 a 0,45 de índice de biodegradabilidad, el porcentaje de remoción de nitrógeno varía entre 18 al 23 %.

4.2. Evaluación del ciclo del nitrógeno

En el caso del amonio (NH_4) se reduce considerablemente en unidades entre la entrada y el filtro I-II en 20, entre el filtro I-II y el filtro II-III en 10, entre el filtro II-III y la salida en 20; siendo sus valores promedio de 72,33 y 22,23 mg/L respectivamente.

Sin embargo, los nitritos (NO_2) se mantienen en valores similares en todo el proceso, variando únicamente entre el filtro I-II y filtro II-III, teniendo promedios entre la entrada y la salida, en un rango promedio de 0,04 a 0,03 mg/L respectivamente.

De otro modo, los nitratos (NO_3) se reducen entre la entrada y el filtro I-II, incrementan su valor entre el filtro I-II y el filtro II-III y posteriormente se reducen considerablemente entre el filtro II-III y la salida; obteniéndose valores promedio de 2,31 y 1,06 mg/L en la entrada y la salida respectivamente.

En el análisis del nitrógeno total (N_T) se observan valores promedio de 23,74 y 18,91 mg/L en la entrada y la salida respectivamente.

4.3. Evaluación del ciclo del fósforo

En el caso particular de los fosfatos (PO_4) se reduce considerablemente en unidades entre la entrada y el filtro I-II en 20, incrementa entre el filtro I-II y el filtro II-III en 3, entre el filtro II-III y la salida disminuye en 10; siendo sus valores promedio de 43,57 y 18,44 mg/L respectivamente.

En el análisis del fósforo total (P_T) se observan valores promedio de 15,13 y 13,24 mg/L en la entrada y la salida respectivamente.

4.4. Evaluación del índice de biodegradabilidad

El índice de biodegradabilidad donde se alcanzan los valores de remoción del 20,3 % para nitrógeno y 12,5 % para fósforo, es de 0,45.

4.5. Evaluación de resultados con estudios anteriores

Según el estudio realizado por el Ing. Oscar Ramírez, el caudal registrado en el período de 7:00 a 16:00 horas, se observó un promedio de 7,06 l/s, un valor mínimo de 2,54 l/s hasta un máximo de 8,55 l/s. En esta investigación en un período de 7:00 a 11:00 horas, se obtuvo un promedio de 3,92 l/s, un valor mínimo de 2,98 l/s hasta un máximo de 4,95 l/s.

Por esto, el mes que ambas investigaciones tienen en común es enero, obteniendo así valores de caudal muy similares. En los meses de febrero y marzo se tienen picos hasta de 10,9 l/s.

Conclusiones

1. Se comprobó que la hipótesis planteada, ya que en el proceso biológico de filtros percoladores para remoción de nitrógeno se obtiene un valor promedio de 20,3 % y para el fósforo se tienen un valor promedio de 12,5 %.
2. Las características promedio del agua residual a la entrada del proceso biológico para DBO₅ es de 91,23 mg/L y DQO de 147,00 mg/L y en la salida del proceso con valores de DBO₅ de 18,43 mg/L y DQO de 38,86 mg/L.
3. El agua residual en el proceso de filtración presenta un índice de biodegradabilidad promedio de 0,55, lo que indica que es apta para tratamientos biológicos.
4. El caudal promedio de agua residual que ingresa al sistema de filtros percoladores en época de octubre a febrero es de 3,92 l/s.
5. La eficiencia del proceso biológico es del 79,9 % en la remoción de la materia orgánica, DBO₅.
6. Por asimilación bacteriana se elimina en promedio un 69,27 % de amoníaco en el proceso biológico.
7. Se remueve en promedio 54,11 % de nitratos y un 25 % de nitritos con el proceso de nitrificación-desnitrificación.

8. La fase de nitrificación-desnitrificación aparece en todo el proceso de la filtración biológica por filtros percoladores.
9. La nitrificación se da entre los filtros I-II, que es donde el amoníaco pasa a nitrito y posteriormente a nitrato.
10. La fase de desnitrificación se da entre los filtros II-III, donde las bacterias consumen el oxígeno existente en los nitratos y lo liberan en forma de nitrógeno gaseoso.
11. De forma general, en un rango de 0,38 a 0,45 de índice de biodegradabilidad se obtienen remociones promedio de 20,5 % de nitrógeno total. Y en un rango de 0,40 a 0,50 de índice de biodegradabilidad un 11,5 % de remoción promedio para fósforo total.

Recomendaciones

1. Conocer los valores de remoción de nitrógeno y fósforo después del tratamiento de filtros percoladores, donde por medio de la purga o arrastre de microorganismos y sedimentos se concentra en los lodos del Sedimentador Secundario.
2. Evaluar uno de los dos sistemas de filtros percoladores en paralelo y otro en serie para observar la remoción de DBO_5 y DQO, además de las fases de nitrificación-desnitrificación y su efecto.
3. Analizar los lodos del Sedimentador Secundario para reuso como abono en investigaciones conjuntas con la Facultad de Agronomía.
4. Realizar un registro de todas las unidades que aportan sus descargas a la planta de tratamiento, así como las características del agua residual, ya que contribuyen los sistemas sanitarios, cafeterías y laboratorios.
5. Proponer un sistema de tratamiento adecuado en los laboratorios, ya que los diferentes químicos y desechos especiales pueden afectar la eficiencia de las unidades de la planta de tratamiento, sobre todo en el proceso biológico.
6. Realizar una investigación que relacione el índice de biodegradabilidad con la remoción de nitrógeno y fósforo, en un rango de índice de biodegradabilidad entre 0,40 a 0,55.

Bibliografía

1. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. *American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21th edition. EUA. 2002. 10-137 p. ISBN 0-87553-207-1.
2. ALVARADO, Ricardo. *Evaluación de filtro vertical de piedra pómez como post-tratamiento del efluente de una planta de filtros percoladores*. Guatemala. USAC. 1987.
3. BERGANZA, Ricardo. *Determinación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de dos filtros percoladores colocados en serie*. Guatemala. Estudio Especial de Maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 1982.
4. CHÁVEZ, Luis. *Evaluación del funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Negras de la Ciudad Universitaria*. Guatemala. Estudio Especial de Maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 1991. 45 p.
5. CLAIR N. Sawyer; MCCARTY, Perry L.; PARKIN, Gene F. *Química para Ingeniería Ambiental*. 4a ed. Colombia: McGraw-Hill, 2001. 713 p. ISBN 958-41-0164-1.

6. COCISA. *Construcción de la Planta de Tratamiento Aguas Negras en la ciudad Universitaria zona 12*. Guatemala. 1990.
 - a. http://www.cocisa.com.gt/main/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=34 Fecha de consulta: 30 de enero de 2013.
7. CRITES, Ron. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: McGraw Hill. 2000. 1 082 p. ISBN 958-41-0044.0, 985-41-0045-9, 958-41-0046-7.
8. CRUZ, Héctor. *Evaluación de dos filtros percoladores para tratamiento de aguas negras*. Guatemala. USAC. 1990. 50 p.
9. González, Arturo. *Comunicación personal; operador de la Planta Tratamiento de la USAC*. Guatemala. USAC. 2012.
10. LÓPEZ, Alex. Implementación del material denominado “Ripio clasificado de concreto”, como material filtrante en filtros percoladores en la planta piloto “Ing. Arturo Pazos Sosa. Estudio Especial de Maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 2010. 89 p.
11. LÓPEZ, Magda. *Evaluación de los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos, a través de la eficiencia en la remoción de Estreptococos fecales*. Guatemala. USAC.2001.
12. MARN. Acuerdo Gubernativo 236-2006. *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Guatemala.

13. MAYORGA, Javier. *Eficiencia en el tratamiento de aguas servidas, por medio de un sistema de filtros percoladores contruidos en serie*. Guatemala. Estudio Especial de Maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 1980. 19 p.
14. METCALF & EDDY. *Ingeniería de las Aguas Residuales, Tratamiento, vertido y reutilización*. Tomo I. México: McGraw Hill. 1996. 461 p. ISBN 0-07-041690-7.
15. MUCH, Zenón. *Apuntes de clase. Química y Microbiología Sanitaria*. Guatemala. USAC. 2011.
16. OAKLEY, Stewart. *Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Centroamérica. Un Manual de Experiencias, Diseño, Operación y Sostenibilidad*. EUA. USAID. 2011.
17. PACHECO RUIZ, Santiago. *Propuesta para aumentar la capacidad de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de ciudad Universitaria*. México, UNAM. 2011.
18. PELCZAR, Michael. *Microbiología*. 2a ed. México: McGraw Hill. 1982. 82 p. ISBN 0-07-049229-8.
19. PÉREZ, Luis. Referencia DUC-S0611-2006. Guatemala. USAC. 2006.
20. POCASANGRE, Adán. *Apuntes de clase. Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales*. Guatemala. USAC. 2011.

21. PORTILLO ESPAÑA, Luis. *Calibración de vertederos de pared delgada para plantas de tratamiento de aguas residuales*. Guatemala. USAC. 2011.
22. RAMÍREZ, Oscar. *Investigación de la Eficiencia de las Etapas En Serie del Filtro Percolador de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad De San Carlos*. Guatemala. Estudio Especial de Maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 2012. 97 p.
23. RAMÍREZ, Oswaldo. *Evaluación de la eficiencia de remoción de bacterias, materia orgánica y nutrientes en un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante filtros percoladores*. México. UNAM. 2007.
24. RECINOS, Clara; BARRIOS, Mario. *Guía para el muestreo y determinación de pruebas de laboratorio de planta-escuela de tratamiento de agua residual del Campus Central, Universidad Rafael Landívar*. Guatemala. 2010.
<http://biblio2.url.edu.gt:8991/Tesis/02/09/Barrios-Arriola-Alberto/Barrios-Arriola-Alberto.pdf>
25. ROMERO, Jaime. *Tratamiento de aguas residuales; Teoría y principios de diseño*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería. 2010.
26. SARAVIA, Pedro. *Contaminación del agua*. Guatemala, USAC. 2010.