



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos (ERIS).

**ESTUDIO DE COEFICIENTES CINÉTICOS DE FILTROS PERCOLADORES
POR ETAPAS, CON MEDIO FILTRANTE DE PIEDRA VOLCÁNICA**

Ing. Zenobio Huamaní Galindo

Asesorado por el M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE COEFICIENTES CINÉTICOS DE FILTROS PERCOLADORES
POR ETAPAS, CON MEDIO FILTRANTE DE PIEDRA VOLCÁNICA**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

ING. ZENOBIO HUAMANI GALINDO

ASESORADO POR EL M.SC. ING. ADÁN ERNESTO POCASANGRE
COLLAZOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADEMICO DE
**MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN CIENCIAS
DE INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Núñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gomez Donis
SECRETARIA	Ing. Lesbia Magali Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis.
EXAMINADOR M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos
EXAMINADOR Dr. Ing. Félix Douglas Aguilar Carrera

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:

ESTUDIO DE COEFICIENTES CINÉTICOS DE FILTROS PERCOLADORES POR ETAPAS, CON MEDIO FILTRANTE DE PIEDRA VOLCÁNICA

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha (18 de junio del 2018).

Ing. Zenobio Huamaní Galindo

Correo electrónico: redesepz@gmail.com.pe.

Carné No. 2017490659



Guatemala, 31 de octubre 2018

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el informe final del Estudio Especial titulado:

**ESTUDIO DE COEFICIENTES CINÉTICOS DE FILTROS PERCOLADORES
POR ETAPAS, CON MEDIO FILTRANTE DE PIEDRA VOLCÁNICA**

Presentado por el estudiante:

Ing. Zenobio Huamaní Galindo

Les manifiesto que el estudiante cumplió en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio. Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

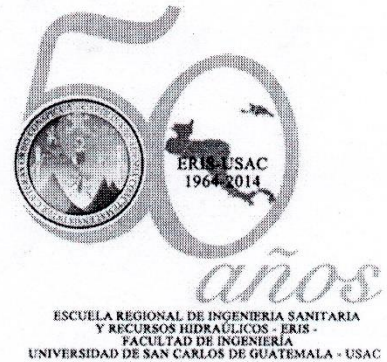
Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría Ingeniería Sanitaria
ERIS / USAC

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos
-ERIS-

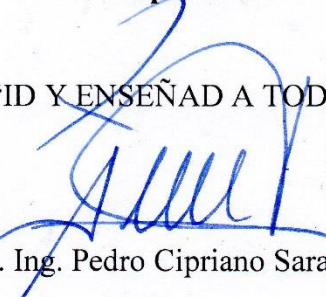


Guatemala, 2 de noviembre de 2018

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: M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis, M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos y , Dr. Ing. Félix Douglas Aguilar Carrera, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Cardona Mazariegos Ruth Nohemi, Colegiada No.12498, al trabajo del estudiante Ing. Zenobio Huamaní Galindo, titulado: **ESTUDIO DE COEFICIENTES CINETICOS DE FILTROS PERCOLADORES POR ETAPAS, CON MEDIO FILTRANTE DE PIEDRA VOLCANICA.** En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala al segundo día del mes de noviembre de 2018.

Imprimase

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

A Dios padre Jehová, por darme la vida a esta gran oportunidad, para llegar a estas instancias nunca previstas a mi alcance muy escaza y pobre.

Jesús

Luz y guía para mi familia y amigos, por darnos su gracia y bendición a todos nosotros para un pueblo pacífico y para compartir la vida en la palabra amistad.

Teodosia

Madrecita, me iluminas del cielo; siempre hemos compartido nuestra pobreza junto. Porque me dejaste sin decirme nada mamá. Estéis en Reino de nuestro Dios padre Jehová; igual hermano Manuel, que goces del reino de nuestro padre Jehová.

Cirilo

Papá, por tus deseos buenos para tus hijos, aún siendo muy pobre me llevaste a Ayacucho y ahí nos has educado; y razón a ello he podido llegar hasta este país. Gracias por ser guía de principios cristianos. Somos de Llacctahurán, Quispillaccta.

Maria Luz

Gracias a tu apoyo, comprensión en nuestra familia, a pesar de nuestras dificultades; por gracia de Dios he concluido este trabajo académico en este país.

Jeanne, Gris y David

Ustedes son mi razón de este estudio; pero ha sido difícil quitarles el tiempo de estar con ustedes; y deseo que también surjan aún con las dificultades.

Mis hermanos y amigos

Cuando inicié este camino, ustedes me han dado confianza; y deseo que logren sus deseos.

AGRADECIMIENTOS A:

USAC – ERIS

Por dirigir, organizar y desarrollar la educación superior de una manera íntegra, formando profesionales con excelencia académica y con principios éticos.

Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos

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

Catedráticos de la ERIS

M. Sc. Ing. Pedro Saravia Celis, M. Sc. Zenón Much Santos, M. Sc. Ing. Julián Duarte, M. Sc. Ing. Joram Gil, M. Sc. Ing. Juan José Sandoval, Dr. Ing. Félix Aguilar, M. Sc. Ing. Elfego Orozco y Dra. Malvina de León, por ser parte de la formación académica superior.

Sr. Adolfo Dubón

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

Los operadores

De la planta de tratamiento de aguas residuales "Ing. Arturo Pazos" de USAC, por su apoyo en las mediciones y toma de muestras.

Mis compañeros

Ingenieros Juan Luis Ochoa y Roberto Huinil Mejia por su apoyo académico y aliento durante el estudio de la Maestría. Así también, a todos mis compañeros de la promoción, por su amistad y generosidad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
JUSTIFICACIÓN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XX
ANTECEDENTES.....	XXIII
ALCANCES Y LIMITACIONES	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Tratamiento biológico del agua residual	1
1.2. Microorganismos.....	4
1.3. Microorganismos que intervienen en el tratamiento biológico	8
1.4. Filtros percoladores	10
1.5. Componentes del filtro percolador	17
1.6. Componentes del filtro percolador	18
2. ÁREA DE TRABAJO	27
2.1. Componentes del filtro percolador	27
2.2. Componentes del filtro percolador	28
2.3. Componentes del filtro percolador	32
2.4. Componentes del filtro percolador	33

2.5.	Componentes del filtro percolador.....	34
3.	METODOLOGIA	37
3.1.	Selección de parámetros de control	37
3.2.	Metodología para determinar el número de muestras	38
3.3.	Puntos de recolección de muestras.....	39
3.4.	Muestreo.....	40
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	43
4.1.	Características de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento de agua residual de la USAC	43
4.2.	Características de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento de agua residual de la USAC, y valores de coeficientes determinados con el Modelo Eckenfelder.....	50
4.3.	Carga orgánica e hidráulica con la que se esté en operación la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC.	51
4.4.	Estudio de coeficientes cinéticos en los filtros percoladores por etapas con medio filtrante de piedra volcánica en la planta de tratamiento de agua residual de la USAC	55
4.5.	Prueba del modelo de la ecuación Eckenfelder, con los coeficientes determinados.....	59
	CONCLUSIONES	65
	RECOMENDACIONES	67
	BIBLIOGRAFÍA	69
	ANEXOS	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de un filtro biológico o percolador típico.....	2
2.	Esquema de las subcapas aerobia y anaerobia de un filtro percolador ...	3
3.	Esquema de la biopelícula en la superficie fija en un filtro biológico.	4
4.	Crecimiento microbiano en cultivos mixtos.....	5
5.	Curva de crecimiento bacteriano.....	6
6.	Valores usuales para la remoción de la dbo y ss en sedimentadores primarios	10
7.	Esquema de la película biológica en un filtro percolador	12
8.	Perfil, del sustrato y oxígeno en un proceso metabólico de la biopelícula	14
9.	Fotografía de una biopelícula, obtenida mediante microscopía electrónica de barrido. Aumento 500x.	16
10.	Esquema de flujo en filtro percolador	21
11.	Cartel en la planta de tratamiento de aguas residuales usac.....	28
12.	Ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC	29
13.	Vista aérea de la localización de las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC.....	30
14.	Esquema de la planta tratamiento de aguas residuales, USAC.....	31
15.	Cámara de ingreso.....	32

16.	Sedimentador primario.....	33
17.	Número aproximado de muestras necesarias para calcular una concentración media.....	39
18.	Puntos de recolección de muestra en los efluentes de las unidades de tratamiento	40
19.	Caudal que ingresa a la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC.	47
20.	Temperatura promedio en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC.....	48
21.	Potencial de hidrógeno promedio en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC.	48
22.	Demanda química de oxígeno (DQO) promedio en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC.	49
23.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) promedio en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC.	49
24.	Logaritmo natural de la fracción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) versus la profundidad (z).....	58
25.	Logaritmo natural de pendiente (m) igual a $\ln(k/qn)$ vs $\ln(q)$	58
26.	Logaritmo natural de pendiente (m) igual a $\ln(k/qn)$ vs $\ln(q)$, para la determinación de k y n.....	59
27.	Corte en perfil del filtro percolador de la planta de agua residual de USAC	60
28.	Sustrato remanente calculado, utilizando los coeficientes determinados con el modelo de eckenfelder.	63

TABLAS

I.	Rendimiento logrado en el tratamiento del agua residual	9
II.	Rendimiento logrado en el tratamiento del agua residual	9
III.	Parámetros de análisis seleccionados	37
IV.	Características del agua residual que ingresa a la planta tratamiento de aguas residuales de la USAC.....	43
V.	Temperatura del agua residual en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC.....	44
VI.	Caudal que ingresa a la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC	44
VII.	Potencial de hidrógeno (ph) del agua residual, en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC.....	45
VIII.	Demanda química oxígeno (dco) del agua residual, en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales.....	45
IX.	Demanda bioquímica de oxígeno (dbo5) en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC.....	46
X.	Sólidos sedimentables en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC.	46
XI.	Sólidos suspendidos en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC.	47
XII.	Valores recomendado de biodegradabilidad.	50
XIII.	Índice de biodegradabilidadde aguas residuales de la USAC.....	51
XIV.	Tabla de carga orgánica y carga hidráulica para filtros percoladores. ...	52
XV.	Tabla de carga orgánica e hidráulica en la planta de aguas residuales de USAC.	53

XVI. Coeficientes cinéticos determinados con el modelo de eckenfelder para agua residual domésticas.	54
XVII. Demanda bioquímica de oxígeno dbo5, según profundidad en el filtro percolador (z).....	56
XVIII. Fracción del sustrato remanente (%).	57
XIX. Logaritmo natural de fracción de sustrato remanente.....	57
XX. Tasa de filtración y pendientes; y logaritmo natural de ambos.	57
XXI. Sustrato remanente calculado con la ecuación de eckenfelder con los coeficientes determinados	62

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CO₂	Bióxido de carbono.
°C	Grados celsius
Kg	Kilogramos
L	Litros
CH₄	Metano
m³	Metros cúbicos
mg/L	Miligramos por litro
%	Porcentaje
Q	Quetzal

GLOSARIO

Afluente	Caudal de agua que llega a una planta o unidad de tratamiento.
Agua residual	Las aguas que han recibido uso y cuyas características han sido modificadas.
(DBO₅)	Medida de la cantidad de oxígeno consumido por un agua residual durante la oxidación (por vía biológica) de la materia orgánica biodegradable (utilizada por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica), bajo condiciones aerobias, en un período de 5 días.
(DQO)	Es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por un agua residual durante la oxidación (por vía química) provocada por un agente químico fuertemente oxidante.
Efluente	Caudal de agua tratada que sale de una planta o unidad de tratamiento.
Filtro percolador	El filtro percolador es una unidad con medio filtrante de piedra y otros materiales; que al atravesar el agua residual por las capas biológicas del medio filtrante, se remueve la materia orgánica.

Coeficientes cinéticos Constantes de los modelos matemáticos de la cinética de reacción dados entre los microorganismos y el sustrato.

USAC Universidad de San Carlos de Guatemala

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el estudio de coeficientes cinéticos de filtros percoladores por etapas, con medio filtrante de piedra volcánica, en el tratamiento del agua residual, el cual es necesario para realizar el diseño de los filtros percoladores por etapas que corresponde a un buen rendimiento en la eficiencia de la remoción de la materia orgánica y microorganismos; no obstante, las unidades diseñadas y que están operando en la mayoría de los países son filtros percoladores de una sola etapa y son complementados por otras unidades para alcanzar la eficiencia en la remoción de materia orgánica y microorganismos que exigen las normas; esto da lugar a hacer una hipótesis que permite definir la necesidad de realizar un estudio de los coeficientes cinéticos del modelo de diseño de los filtros percoladores por etapas, a fin de lograr una mayor eficiencia y rendimiento.

Los análisis realizados son para la caracterización del agua residual de origen doméstico, están determinados en la entrada como afluente a las unidades de filtros percoladores por etapas y en las salidas de las mismas como efluentes, considerando la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y la demanda química de oxígeno (DQO) como los principales parámetros a ser evaluados.

En este estudio se utiliza la ecuación de Eckenfelder, cuyo modelo considera los coeficientes cinéticos de n y K ; y según la metodología se resuelve utilizando los datos determinados de DBO5 y DQO en el laboratorio por método gráfico; según los resultados de los filtros percoladores se logra remover el 89.70 % de la materia orgánica, considerando que el medio filtrante tipo "B" es de piedra volcánica de tamaños de 2 ½", 3" y 3 ½" respectivamente en cada filtro; y el medio

distribuidos Tipo A oscila entre 4" a 5" de tamaño medio; correspondiendo a una profundidad del filtro de 2 m del estrato tipo "B" y 1 m de estrato tipo "A", constituyendo una profundidad útil de tratamiento de 3 m por cada filtro. La característica de la carga orgánica e hidráulica son de carga baja, y la temperatura promedio, según el estudio es de 25 °C.

El efluente tiene una carga orgánica menor a los valores de los límites máximos permisibles según Acuerdo Gobernativo N° 236-2006 y es apta para vertimiento al cuerpo receptor; pero es necesario evaluar los nutrientes, carga de patógenos y de parásitos, siendo estos de importancia ambiental.

Se considera que la alternativa técnica de tratamiento de agua residual por medio de filtros percoladores con medio filtrante de piedra volcánica es eficiente en la remoción de la materia orgánica; así mismo los otros componentes contaminantes se pueden remover con otras unidades que complementen a la planta de tratamiento o con mejoramiento de los filtros estudiados.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el tratamiento de aguas residuales en las plantas de tratamiento tienen limitaciones, principalmente por no tener definido los aspectos técnicos de su concepción y fueron dimensionados con parámetros estimados, dando como resultado que estos no logren la eficiencia esperada. Por otro lado, los procedimientos de operación y, mantenimiento no están bien definidos, en todo caso no se cumple y coadyuva en una mala gestión de tratamiento de agua residual. Según una visión de construir plantas de tratamiento de agua residual que cumplan con los parámetros exigidos por las normas de calidad, se requiere que los diseños sean bien elaborados, los mismos que pueden ser verificados después de la puesta en marcha de las unidades.

Según (BID, 2017), los informes de los volúmenes de tratamiento de agua residual en las ciudades de la América Latina, el 77 % de la población de América Latina y el Caribe carece de acceso a saneamiento seguro. Se estima que únicamente el 28 % de las aguas residuales recolectadas por la red pública recibe algún tipo de tratamiento antes de ser vertida en el ambiente; por lo que el 72 % de agua residuales generados se está vertiendo a los cuerpos de agua sin tratamiento, atentando contra la salud pública; aun se puede mencionar que, de los volúmenes tratados, el mismo porcentaje no son tratados de acuerdo a las normas, por lo tanto los efluentes vertidos no cumplen con los valores máximos permisibles de vertimiento de agua residual tratada a los cuerpos de agua.

No existen estimaciones confiables del nivel de cobertura de tratamiento para las aguas residuales municipales en la región, pero se estima que no más

del 20 % del agua generada entra realmente a una planta de tratamiento (Noyola & Morgan , 2013).

El agua contaminada y el saneamiento deficiente están relacionados con la transmisión de enfermedades diarreicas, la cólera, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis. Los servicios de agua y saneamiento inexistentes, insuficientes o gestionados de forma inapropiada exponen a la población a riesgos prevenibles para su salud. Esto es especialmente cierto en el caso de los centros sanitarios en los que, tanto los pacientes como los profesionales quedan expuestos a mayores riesgos de infección y enfermedad cuando no existen servicios de suministro de agua, saneamiento e higiene. (OMS, 2018)

Considerando los puntos expuestos, es de vital importancia tomar las decisiones de este problema y contribuir al saneamiento ambiental, mediante sistemas de tratamiento que permitan afrontar el problema en sus propias y actuales dimensiones, para mantener y mejorar la calidad de vida en un medio ambiente saludable.

El proyecto de investigación tiene el objetivo de lograr el estudio de los coeficientes cinéticos del filtro percolador por etapas, según el modelo de Eckenfelder para el tratamiento de aguas residuales domésticas, utilizando este proceso unitario de remoción de la materia orgánica por procesos biológicos eficientes, que puede ser una opción técnica fiable y también con generación de costos de operación y mantenimiento bajos; es decir, el tipo de reactor se puede proponer inclusive para las áreas rurales, a fin de atender los problemas de saneamiento que en conjunto de procesos unitarios para el tratamiento de agua residual sea de referencia para la construcción de las nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales; por lo que hay énfasis en los niveles de

tratamiento que debe de lograr con la operación de esta planta propuesta para lograr una mayor eficiencia, con un efluente de calidad apto para reuso, y con bajos efectos contaminantes al cuerpo receptor. Definidos los procesos unitarios que complementen a estas unidades estudiadas el tratamiento de agua residual puede ser una referencia técnica para los futuros proyectos de plantas de aguas residuales en nuestros países.

JUSTIFICACION

En virtud de los elevados costos de operación y funcionamiento intrínsecos de los tratamientos convencionales de las plantas de aguas residuales, la implementación de sistemas de tratamiento de agua residual es un problema que parece no haber alcanzado a un sistema de tratamiento como referencia que considere la eficiencia en tratamiento, costos de construcción y operación y mantenimientos económicos o factibles para el alcance de las entidades que operan; lo cual repercutirían en los resultados que los cuerpos de agua recibirán aguas bien tratadas con niveles de calidad mejor que la calidad del cuerpo receptor o río.

Actualmente esto no ocurre, al contrario, cada vez los cuerpos de agua son más contaminados, y parece que no interesa que el agua es consumidas aguas debajo de las descargas, lo que directamente genera problemas de salud a las personas que consumen o usan estas aguas para los fines domésticos o indirectamente para la producción de los alimentos, entonces el uso y consumo de agua sigue siendo el que genera las enfermedades en la secuencia de la cadena alimentaria y la interacción con el medio ambiente.

Los filtros percoladores instalados como proceso secundario en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, son los filtros percoladores por etapas (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 la capa biológica

donde están las poblaciones de microorganismos que descomponen la materia orgánica a medida que el agua residual discurre sobre la superficie de la biopelícula 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. Entonces el uso de filtros percoladores constituye una importante alternativa para el diseño y construcción de plantas de tratamiento de agua residual con altas eficiencias, y con requerimientos mínimos o ninguno de equipos electromecánicos, así como el bajo costo económico y simplicidad en la operación y mantenimiento, las constituyen en la opción viable para el tratamiento del agua residual en comunidades o países con limitados recursos económicos.

Con la determinación de los coeficientes cinéticos del modelo de Eckenfelder, se podrán tomar las decisiones de naturaleza técnica, operativa y de mantenimiento, que permitan tanto mantener y mejorar la eficiencia de la planta de tratamiento con otros estudios. Así como planificar, diseñar y ejecutar las obras que se requieran para preparar y adecuar los tratamientos del agua residual ante las futuras necesidades de los pueblos sin acceso a los servicios básicos de saneamiento, o también como unidades de mejoramiento para los sistemas de tratamiento de agua residual deficientes.

OBJETIVOS

General

Determinar los coeficientes cinéticos del filtro percolador por etapas con medio filtrante de piedra volcánica, en la planta de agua residual de USAC, para usar en un modelo de cálculo para diseño de filtro biológico por etapas.

Específicos

1. Evaluar la eficiencia de remoción de la materia orgánica como demanda biológica de oxígeno (DBO5) y demanda bioquímica de oxígeno DQO en los filtros percoladores en cada etapa.
2. Evaluar la carga orgánica e hidráulica con que opera la planta de tratamiento de agua residual de USAC.
3. Determinar el modelo matemático de diseño de los filtros percoladores por etapas.

HIPÓTESIS

Los filtros percoladores son los procesos secundarios y corresponde a la remoción de materia orgánica contenido en el agua residual doméstica; luego realizado el estudio de los coeficientes cinéticos de los filtros percoladores por etapas, con medios filtrantes de piedra volcánica, en el sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas; se logrará proponer un modelo matemático para el diseño de estos filtros; entonces el propósito del estudio es a través de los resultados de la eficiencia en la remoción de la materia orgánica, lograr la determinación de los coeficientes cinéticos con el modelo de Eckenfelder; luego este modelo matemático, es posible para el uso en diseño de la planta de agua residual domesticas según las eficiencias logradas por los filtros percoladores por etapas (en serie). El estudio es de naturaleza cuantitativa, entonces los resultados pueden definir las hipótesis como nulas o alternativas.

Hipótesis nula (H_0)

Según el estudio, se determinará los coeficientes cinéticos, el cual no define el modelo matemáticos para el diseño de la planta de los filtros percoladores por etapas, con fines de eficiencia en la remoción de materia orgánica.

Hipótesis alternativa (H₁)

Según el estudio, se determinará los coeficientes cinéticos, el cual define el modelo matemáticos para el diseño de la planta de los filtros percoladores por etapas, con fines de eficiencia en la remoción de materia orgánica.

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 equipamiento electromecánico mínimo 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. Este proyecto, se propuso un sistema de filtros torre percoladores que operarían por gravedad y el uso de materiales locales como medios filtrantes.

Ante esta situación, en el año 1972, bajo la dirección del Ing. Arturo Pazos Sosa, profesor de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS, se emprendió el programa de investigación para buscar soluciones al tratamiento del agua residual doméstica, mediante el uso de filtros percoladores. (Oakley 2011/ Cruz, 1990).

Para ello, la ERIS ha utilizado las instalaciones de la Planta de Tratamiento Aurora II “Ing. Arturo Pazos”, tanto para actividades didácticas como de investigación de los mismos estudiantes.

Lo cual ha producido una gran variedad de investigaciones relacionadas al uso de filtros percoladores, entre las que se pueden mencionar:

- Proyecto de investigación filtro percolador piloto. Ing. Arturo Pazos. 1972.
- Determinación de la eficiencia del filtro percolador torre construido con duroport como medio filtrante. Ing. Samuel Sánchez. 1978.
- Eficiencia en el tratamiento de aguas servidas, por medio de un sistema de filtros percoladores construidos en serie. Ing. Javier Mayorga. 1980.
- Determinación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de dos filtros percoladores en serie. Ing. Ricardo Berganza. 1982.
- Evaluación de la eficiencia de materia orgánica en la planta de tratamiento de aguas residuales de la colonia el Mezquital. Ing. Edgar Bravatti. 1983.
- Evaluación de filtro vertical de piedra pómez como post-tratamiento del efluente de una planta de filtros percoladores. Ing. Ricardo Alvarado. 1986.
- Evaluación de dos filtros percoladores para tratamiento de aguas negras, Ing. Héctor Cruz Núñez. 1990.
- Implementación del material denominado: “ripio clasificado de concreto”, como material filtrante en filtros percoladores en la planta piloto “Ing. Arturo Pozos Sosa”. Ing. Alex López. 2010.
- Implementación de material de desecho PET como elemento filtrante en filtros percoladores. Ing. Jimmy Obdulio Cáceres. 2010.

Específicamente, en el caso de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos, se han realizado las siguientes investigaciones.

- Evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas negras de la Ciudad Universitaria. Ing. Luis Chávez. 1991.
- Estudio de diagnóstico y plan de rehabilitación de dieciocho plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas; Planta USAC. ECOPLA Consultores Asociados, S.A. 2001.
- 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 *Streptococos* fecales. Ing. Magda López. 2010.
- 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. Ing. Oscar Ramírez, 2012.
- 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. Ing. Ileana Felicia Pierri, 2013.
- Análisis del ciclo de vida de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Ing. Alejandro Rojas, 2017.

ALCANCES Y LIMITACIONES

El alcance del estudio es la disponibilidad de información técnica sobre las eficiencias en la remoción de la materia orgánica en filtros percoladores por etapas, de forma tal que puedan tomar decisiones para el diseño, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Guatemala y especialmente de la USAC.

- Se dispone de autorización de acceso a la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC de lunes a viernes, con un horario de 7:00 am a 4:00 pm.
- La investigación se realizó entre los meses de noviembre del 2017 a junio del 2018.
- La recolección de las muestras compuestas se realizó en un horario de 8:00 am a 12:00 pm.
- Las muestras recolectadas corresponden al afluente del agua residual bajo condiciones de días soleados y sin lluvia. Esto por cuanto el alcantarillado es de tipo combinado.
- No se encuentran disponibles los documentos técnicos, entre ellos los criterios y memoria de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC.

INTRODUCCIÓN

En nuestros países, el objetivo principal del tratamiento de las aguas residuales es la remoción de los contaminantes, así mejorar sus propiedades, que estas puedan cumplir con los requerimientos de las normas de vertimientos de aguas residuales a un cuerpo receptor. De esta manera se pretende disminuir el impacto sobre el ambiente y la salud de las personas.

El requisito fundamental antes de proceder al diseño preliminar o definitivo de una planta de tratamiento de aguas residuales, es conocer la cantidad y el grado de contaminación del agua a tratar, y luego con base a esta información se proyectarán las unidades de tratamiento que se le dará para cumplir principalmente dos aspectos:

- El efluente de la planta de tratamiento de agua residual sea igual o mejor de la ECA (estándares de calidad de agua) del río o cuerpo receptor en todo el horizonte del proyecto.
- Los límites máximos permisibles se tomaran como referencia, solamente cuando los valores de la ECA del río son muy altos, es decir, son mayores que los valores de los límites máximos permisibles.

Teniendo en referencia los aspectos citados, ésta determinará las alternativas técnicas del tren de unidades de tratamiento, para luego producir un efluente que cumpla con los parámetros exigidos por las normas de calidad para vertimiento de aguas residuales tratadas. A fin de realizar un diseño adecuado de las unidades de proceso de una planta de tratamiento de aguas residuales, es

necesario contar con información básica y datos que solo los estudios previos pueden brindarnos; según algunas normas de los países es necesarios realizar estudios con el uso de planta a escala de laboratorio o piloto.

Las aguas residuales presentan características físicas, químicas y biológicas especiales que es necesario conocer para optimizar su manejo (recolección, transporte, tratamiento y disposición final); minimizar los efectos adversos de su vertido en aguas naturales o al suelo y realizar un tratamiento ambiental sustentable de los lodos.

La depuración de aguas residuales domésticos es una combinación de operaciones físicas y de procesos biológicos y químicos que remueven del agua el material suspendido, el coloidal, el disuelto y los organismos patógenos. Los contaminantes orgánicos constituyen los principales componentes del agua residual urbana, para degradarlos se recurre al tratamiento biológico.

Para el diseño de sistemas de tratamiento biológico de efluentes, un parámetro fundamental es la velocidad de oxidación de la materia orgánica por microorganismos; a través de reacciones de catabolismo y anabolismo se oxidan o mineralizan los compuestos orgánicos y se produce la biomasa (Romero, 2010 / Pazos, 1989). La descomposición de la materia orgánica puede efectuarse mediante procesos aeróbicos, anaeróbicos y/o anóxicos, porque existen microorganismos específicos capaces de llevar a cabo la biodegradación en cualquiera de estos ambientes independientemente uno del otro. La degradación aeróbica de la materia orgánica se cumple principalmente, a través de las reacciones biomasa-bacterias en las cuales el oxígeno del aire, es utilizado por las bacterias para descomponer la materia orgánica, a través de las enzimas.

La oxidación bioquímica es un proceso lento que requiere matemáticamente un tiempo infinito para su conclusión (Romero, 1998). La degradación de la materia orgánica produce compuestos carbonosos y no carbonosos, pero la velocidad de reacción de la oxidación del material carbonoso es mayor que la del material nitrogenado, por lo cual la nitrificación comienza generalmente cuando la demanda de oxígeno de la materia carbonosa ha sido prácticamente satisfecha. Los valores de la constante de reacción pueden variar entre $0,05 \text{ d}^{-1}$ a $0,3 \text{ d}^{-1}$ o alcanzar valores superiores a estos ((Metcalf & Eddy, 1997)).

1. MARCO TEÓRICO

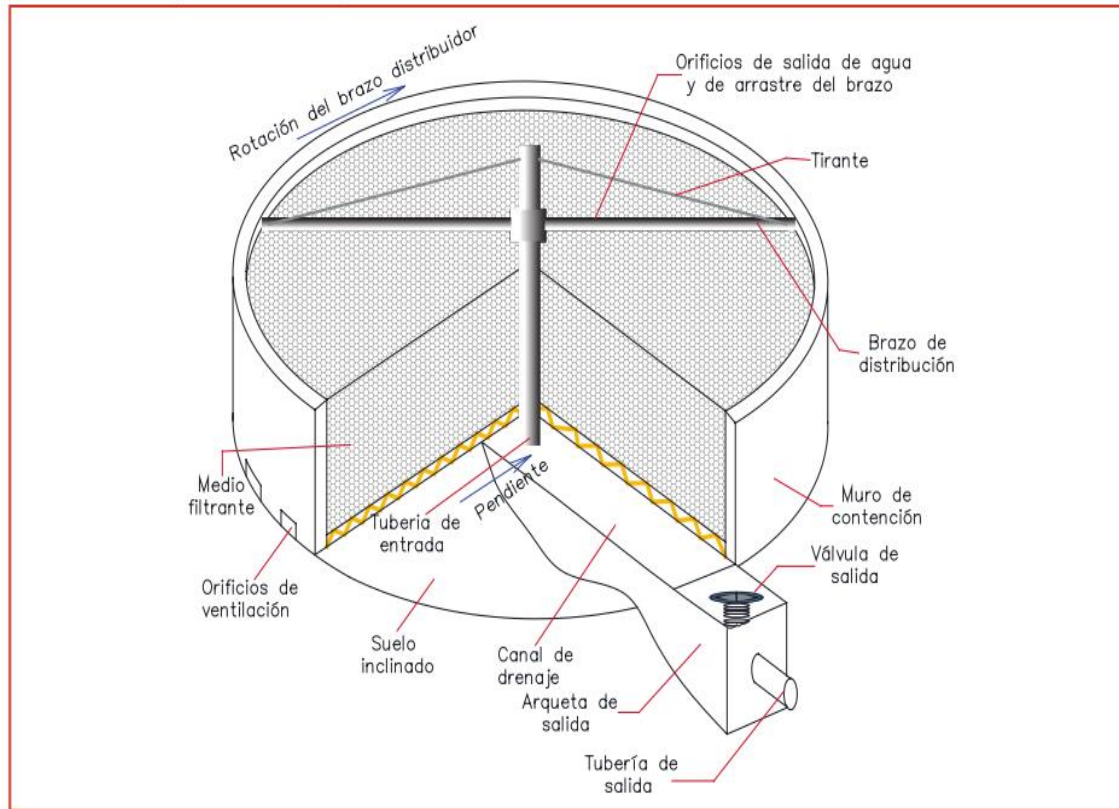
1.1. Tratamiento biológico del agua residual

El tratamiento biológico del agua residual es con fines de remoción de los contaminantes orgánicos denominada como materia orgánica, mediante la actividad biológica. Para esto, se aprovecha la actividad biológica para remover, entre otros, sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas del agua residual, mediante su conversión en gases que escapan a la atmósfera y en biomasa extraíble mediante sedimentación. Asimismo, se usa para remover nitrógeno y fósforo del agua residual de origen doméstico. (Romero, 2010 / Metcalf & Eddy, 1997).

Los reactores biológicos aerobios suponen la presencia de un crecimiento biológico que puede ser en suspensión dentro del reactor. Por esta razón, se denominan reactores de crecimiento biológico en suspensión. Pero se ha desarrollado otro tipo de reactor en el que se utiliza algún tipo de soporte del crecimiento biológico, que se mantiene fijo en él. Estos reactores se denominan reactores de crecimiento biológico asistido o de soporte.

Los filtros biológicos llamados también como filtros percoladores pertenecen a este tipo de reactores de crecimiento asistido. El filtro percolador es un relleno cubierto de limo biológico, a través del cual se percola el agua residual. Normalmente el agua residual se distribuye en forma de pulverización uniforme sobre el lecho de relleno, mediante un distribuidor rotativo del flujo. El agua residual percola en forma descendente a través del relleno y el efluente se recoge en el fondo.

Figura 1. Diagrama de un filtro biológico o percolador típico



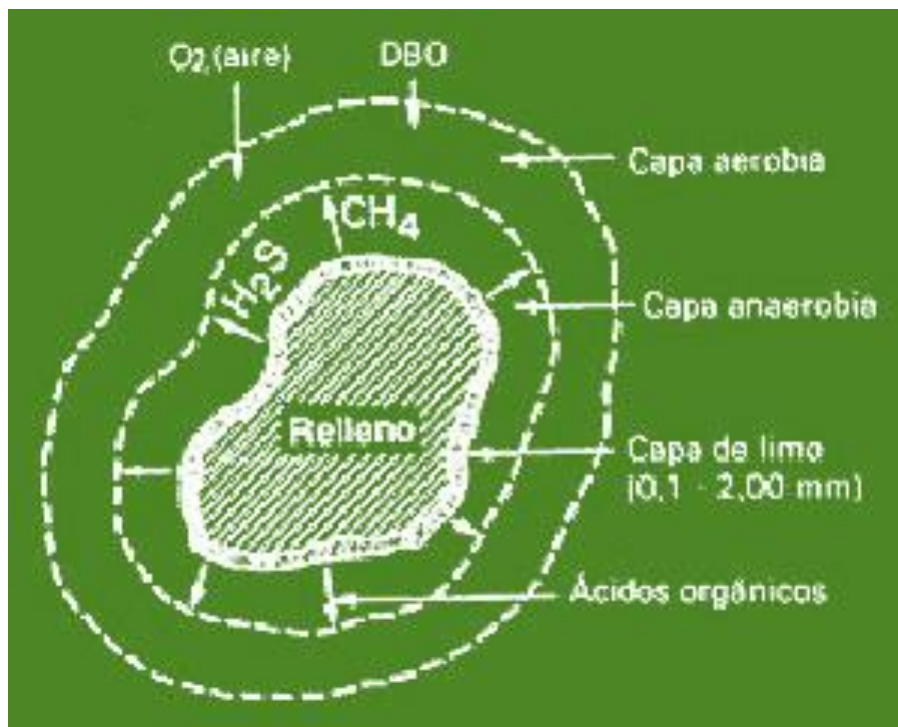
Fuente: (Metcalf & Eddy, 1997)

La capa del limo que se forma junto al relleno tiene un espesor total comprendido entre 0,1 y 2,0 mm está formado de una subcapa aerobia y de otra anaerobia, tal como se presenta en la figura 2.

El espesor de la subcapa aerobia es función del caudal de agua residual aplicado y de su DBO_5 . Cuanto mayor sea la DBO_5 del afluente menor será el espesor de la subcapa aerobia, ya que se presenta un consumo más rápido de oxígeno. Por otra parte, los caudales elevados favorecen el mantenimiento de una subcapa aerobia más espesa, debido al oxígeno disuelto suministrado con el afluente pulverizado. Para las cargas hidráulicas normalmente empleadas en los filtros percoladores, el caudal del agua residual, a través del lecho del filtro se

sitúa en la región laminar. El proceso biológico aerobio que tiene lugar en la subcapa aerobia es típico de figura 3. El sustrato se oxida parcialmente para proporcionar la energía necesaria al proceso biológico y la otra parte del sustrato se utiliza para sintetizar nuevo material constituyendo el limo.

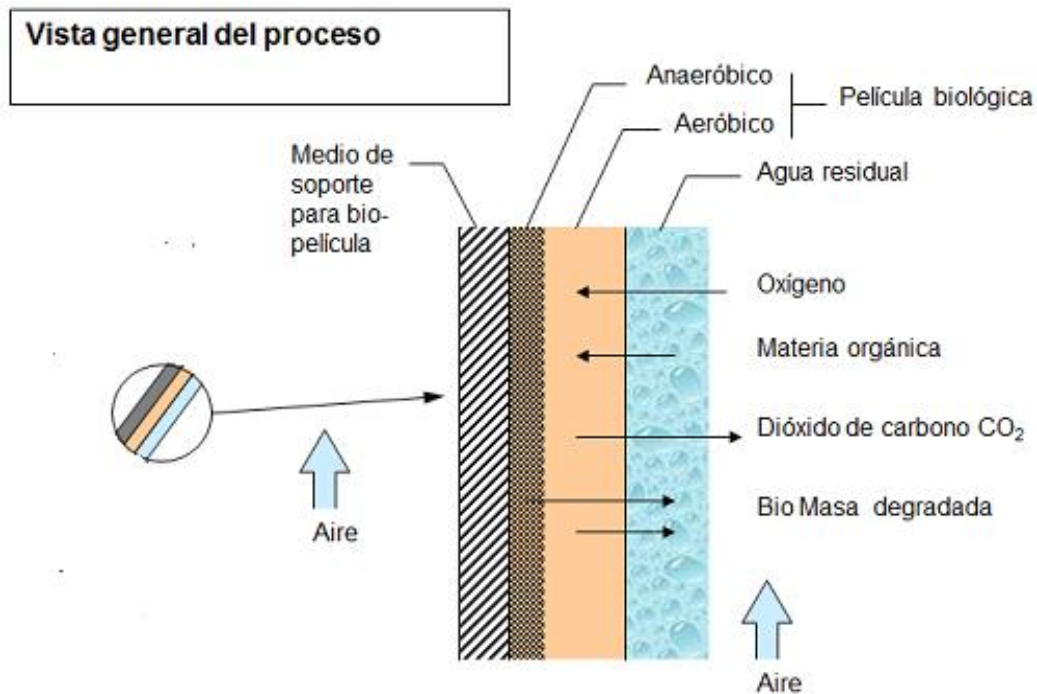
Figura 2. **Esquema de las subcapas aerobia y anaerobia de un filtro percolador**



Fuente: (Noyola & Morgan , 2013)

En la subcapa anaerobia, la degradación tiene lugar con formación de ácidos orgánicos, CH_4 y H_2S . En los filtros percoladores, la materia orgánica y coloidal se separa mediante oxidación aerobia, biosorción, coagulación y descomposición anaerobia; así, no existe disminución de la carga orgánica por filtración mecánica.

Figura 3. **Esquema de la biopelícula en la superficie fija en un filtro biológico**



Fuente: (DIGESA -PERU, 2010)

1.2. Microorganismos

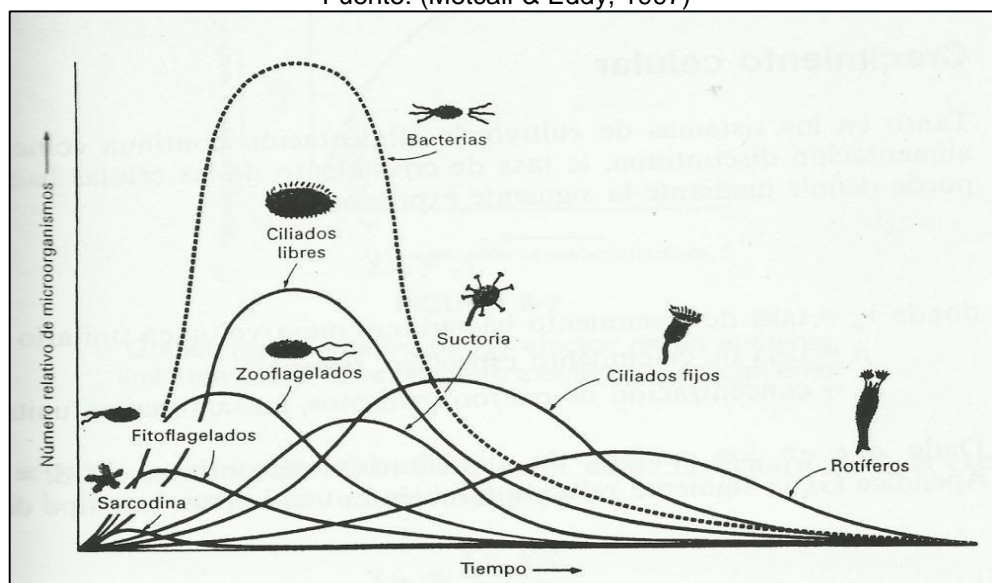
La eliminación de la DBO carbonosa, la coagulación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica se consigue biológicamente por la acción de una gran variedad de microorganismos, principalmente bacterias. Estos microorganismos utilizan la materia orgánica para convertirla en tejido celular, biomasa, que debe ser removido del efluente y formación de gases. La actividad bioquímica y reproducción de los microorganismos importantes para el tratamiento biológico del agua residual, están afectados por una fuente de carbono, energía, necesidades nutricionales y la naturaleza del metabolismo (Metcalf & Eddy, 1997)

1.2.1. Crecimiento de cultivos mixtos de microorganismos

La forma de cada curva depende del tiempo, nutrientes disponibles y factores ambientales como el pH y la temperatura, disponibilidad o ausencia de oxígeno. Tal como se muestra en la siguiente figura 4.

Figura 4. Crecimiento microbiano en cultivos mixtos

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1997)



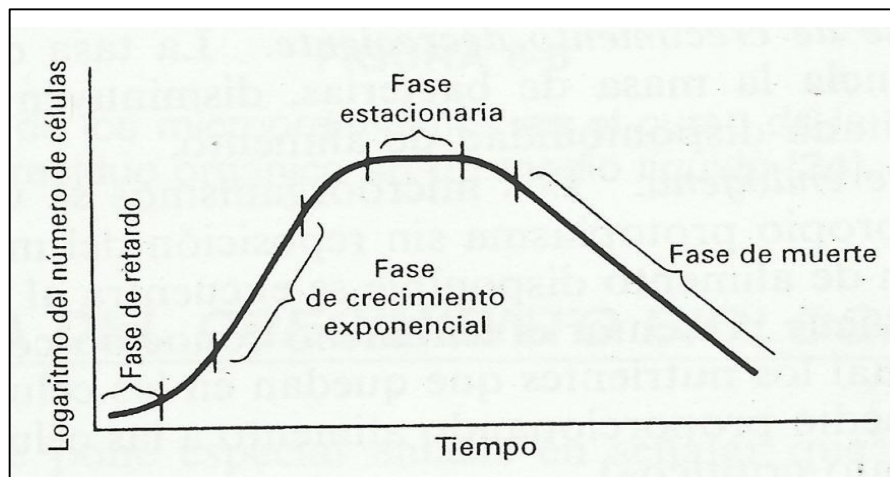
1.2.2. Crecimiento bacteriano

El modelo de crecimiento bacteriano en un cultivo puro discontinuo se ilustra en la figura 5, el cual consta de cuatro fases diferenciadas:

- Fase de retardo: representa el tiempo necesario para que los organismos se aclimaten a las nuevas condiciones ambientales y comiencen a reproducirse.
- Fase de crecimiento exponencial: la célula se divide a una velocidad determinada por su tiempo de generación y su capacidad de procesar el alimento.

- Fase estacionaria: la población celular permanece constante, debido a que las células han agotado el sustrato o los nutrientes necesarios para el crecimiento y la generación de células nuevas se compensa con la muerte de células viejas.
- Fase de muerte exponencial: debido al agotamiento de nutrientes o condiciones poco favorables para la reproducción de las bacterias, la tasa de mortalidad excede la generación de células nuevas

Figura 5. **Curva de crecimiento bacteriano**



Fuente: (Metcalf & Eddy, 1997)

1.2.3. Fuente de carbono y energía

Los microorganismos que utilizan la materia orgánica como fuente de carbono celular para la formación de tejido celular se denominan heterótrofos y los que utilizan el dióxido de carbono, se llaman autótrofos.

Todo microorganismo necesita de una fuente de energía, una de carbono y elementos inorgánicos o nutrientes para reproducirse y crecer. La materia

orgánica y el dióxido de carbono son de las principales fuentes de carbono que utilizan los microorganismos.

Los organismos autótrofos tienen la capacidad de utilizar materiales inorgánicos para la producción de energía y síntesis celular. La energía la obtiene bien de la luz (fotosintéticos) o bien de las reacciones inorgánicas de oxidación reducción (quimio sintéticos). Dentro de los organismos autótrofos quimio sintéticos, cabe citar las bacterias nitrificantes que efectúan la oxidación del amonio a nitrato (nitrificación). La disminución de la concentración de los microorganismos autótrofos por muerte y lisis de los mismos da lugar a la aparición en la disolución de sustrato lentamente biodegradable, que es hidrolizado y consumido por los organismos heterótrofos originando productos finales. (Ferrer & Seco, 2014)

La energía necesaria para la síntesis celular se obtiene de la luz solar o bien de reacciones químicas de oxidación. Los primeros se denominan microorganismo fotótrofos, ya sean heterótrofos o autótrofos y los segundos quimiótrofos. (Metcalf & Eddy, 1996).

1.2.4. Necesidades nutricionales

Los principales nutrientes inorgánicos necesarios para el crecimiento y reproducción de los microorganismos son: N, S, P, K, Mg, Ca, Fe, Na Y Cl. Siendo los de menor importancia el Zn, Mn, Mo, Se, Co, Cu, Ni, V y W. La presencia y concentración de cada uno de estos nutrientes afectan de diferente manera el crecimiento y, por consiguiente, su uso de la materia orgánica contenida en el agua residual por parte de los microorganismos involucrados en su tratamiento.

Adicionalmente, algunos tipos de microorganismos requieren nutrientes orgánicos para la síntesis de material celular orgánico. Siendo los principales

compuestos los aminoácidos, purinas, pirimidinas y vitaminas. (Metcalf & Eddy, 1997)

El agua residual municipal suele contener cantidades de nutrientes, orgánicos e inorgánicos, adecuados para permitir la acción microbiológica para la eliminación de la DBO₅ carbonosa. (Metcalf & Eddy, 1997)

1.3. Microorganismos que intervienen en el tratamiento biológico

Los microorganismos se pueden clasificar, según su estructura y metabolismo celular, como eucariotas, eubacterias y arqueobacterias. Los grupos procariotas, eubacterias y arqueobacterias, se pueden denominar como bacterias, son primordiales para el tratamiento biológico del agua residual. El grupo de las eucariotas incluye a las plantas, animales y los protistas, siendo los más importantes para el tratamiento biológico los hongos, los protozoos, los rotíferos y las algas.

1.3.1. Tratamiento de agua residual por proceso biológico

El agua residual se puede clasificar como de origen doméstico e industrial. Las características fisicoquímicas y microbiológicas difieren sustancialmente, como resultado los métodos de tratamiento también deben ser diseñados, según cada caso. En el caso del agua residual de origen doméstico sus características son aproximadamente las mismas de una residencia a otra de una región o país. Entre países desarrollados y los que se encuentran en vías de desarrollo, puede relacionarse con factores de tipo tecnológico. (López, 2001)

1.3.2. Composición del agua residual

El agua residual es caracterizada por su composición física, química y biológica, pero se han establecido parámetros de referencia para los principales componentes que permiten la caracterización de las aguas.

Para el agua residual de origen doméstico, la siguiente tabla II muestra los parámetros de control que suelen hacerse de forma frecuente.

Tabla I. Rendimiento logrado en el tratamiento del agua residual

COMPOSICION	UNIDAD	CONCENTRACION		
		Debil	Media	Alta
Solidos totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Solidos disueltos (SDT)	mg/l	250	500	850
Solidos en suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Solidos Sedimentables	mg/l	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno, DBO ₅ (20°C)	mg/l	110	220	400
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/l	250	500	1000
Nitrogeno total en forma de (N)	mg/l	20	40	85
Fosforo total en forma de (P)	mg/l	4	8	15

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1997)

1.3.3. Eficiencias de los tratamientos Primarios y Secundarios

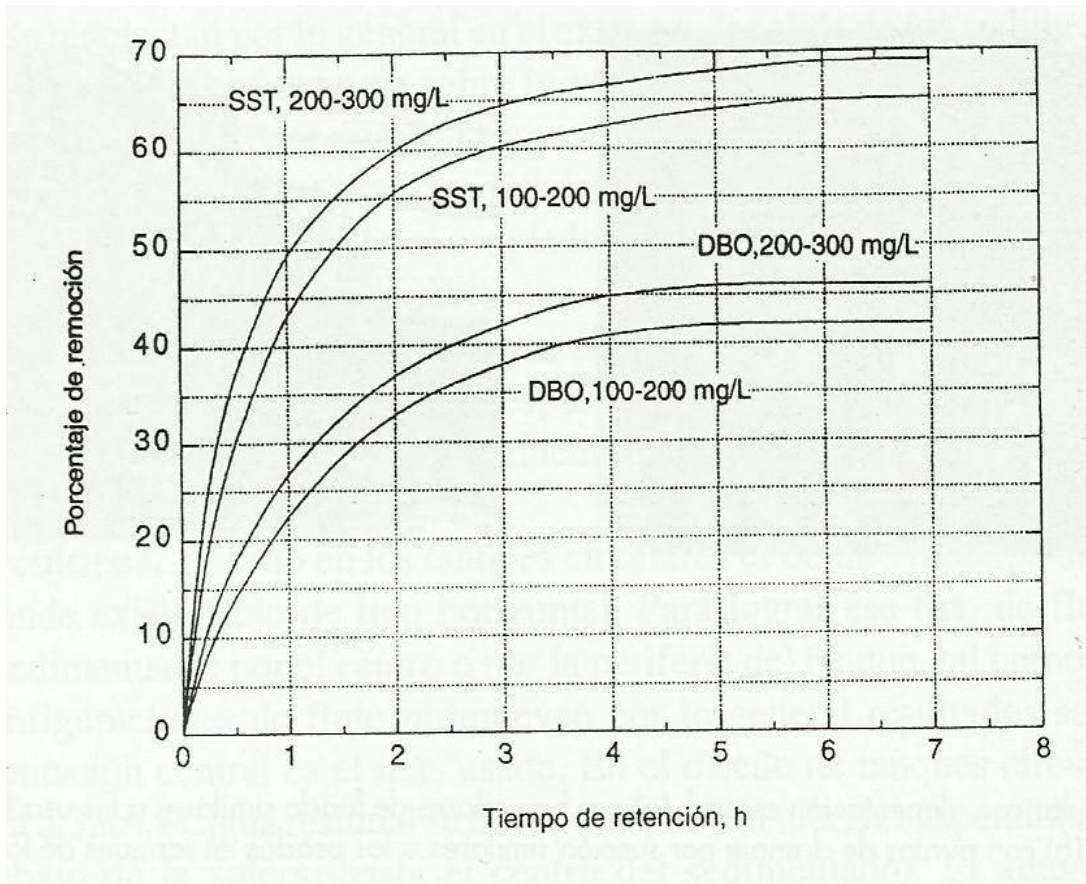
En la tabla II, se muestran rendimientos de los procesos unitarios empleados en el tratamiento primario y secundario del agua residual

Tabla II. Rendimiento logrado en el tratamiento del agua residual

UNIDAD	Rendimiento de eliminación del constituyente (%)					
	DBO	DQO	SS	P	N - org.	N-NH ₃
Desarenador	0 - 5	0 - 5	0 - 10	Nulo	Nulo	Nulo
Sedimentador primario	30 - 40	30 - 40	50 - 65	10 - 20	10 - 20	0
Filtro percolador	65 - 80	60 - 80	60 - 85	8 - 12	15 - 50	8 - 15

Fuente; (Metcalf & Eddy, 1997)

Figura 6. Valores usuales para la remoción de la DBO y SS en sedimentadores primarios



Fuente: (Crites & Tchobanoglous, 2000)

1.4. Filtros percoladores

Los filtros percoladores son utilizados desde hace años para el tratamiento biológico aeróbico de las aguas residuales, de origen doméstico o industrial. Básicamente, consisten de una estructura de geometría circular o cuadrada, la cual responde más a razones económicas-estructurales, que a la eficiencia del tratamiento en sí mismo.

La estructura se llena a una profundidad definida con un material de soporte; piedra, plástico u otro similar que permite la formación de una película biológica.

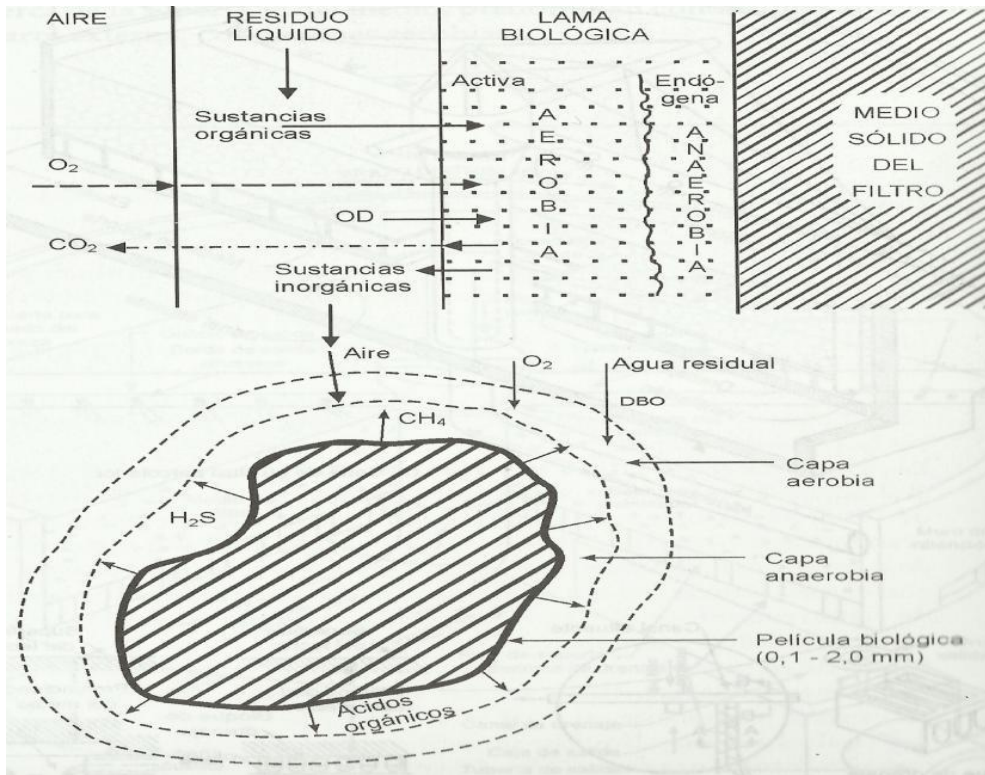
El agua residual se introduce y distribuye por la parte superior de la estructura y se recolecta por la parte inferior, permitiendo un corto tiempo de contacto.

La degradación de la materia orgánica contenida en el agua residual se logra, debido a una variedad de microorganismos contenidos en la piel biológica, dentro los que se incluyen bacterias aerobias, anaeróbicas y facultativas, algas y protozoarios. También se encuentran presentes en el material filtrante animales superiores como los gusanos, larvas de insectos y caracoles. (Metcalf & Eddy, 1996).

Cuando los microorganismos crecen, aumenta el espesor de la película biológica y el oxígeno se consume antes que pueda penetrar en todo el espesor de la película, por lo cual en la proximidad de la superficie del medio, se crea un ambiente anaeróbico. Conforme aumente el espesor de la película biológica, la materia orgánica adsorbida es metabolizada antes que pueda alcanzar los microorganismos más cercanos al medio de soporte o filtrante. Al no disponerse de una fuente de materia orgánica externa de carbono celular, los mismos entran en una fase de crecimiento endógena, en la que pierde la capacidad de adherirse al medio filtrante y por lo tanto, se desprenden, siendo arrastrados en el líquido efluente del filtro percolador.

Al producirse el arrastre de la piel biológica, quedan espacios disponibles en el medio de soporte para el crecimiento de más piel biológica, lo cual consume parte de la materia orgánica contenida en el agua residual. Lo anterior se muestra en la siguiente figura 7.

Figura 7. Esquema de la película biológica en un filtro percolador



Fuente: (Romero, 2010)

En general, los sistemas de filtros percoladores presentan elevadas eficiencias en la remoción de la materia orgánica, medida como la demanda bioquímica de oxígeno o DBO_5 , pero suelen presentar problemas de crecimientos de insectos como las moscas y la producción de olores sépticos, razones por las cuales su ubicación debe ser valorada, a fin de evitar inconvenientes con los habitantes cercanos. Los principales parámetros de diseño de los filtros percoladores son la carga orgánica y la carga hidráulica:

- Fase de retardo: representa el tiempo necesario para que los organismos se aclimaten a las nuevas condiciones ambientales y comiencen a reproducirse.
- La carga hidráulica: se refiere al caudal diario que se puede tratar por área del medio filtrante o sea la carga por unidad de superficie y se expresa en $m^3/m^2/día$, que origina las velocidades de arrastre de la biomasa. (Cruz H. , 1990)

1.4.1. Biopelícula

Los microorganismos generalmente construyen y viven en conglomerados o comunidades celulares conocidas como biopelículas.

La estructura química y la fisiología de las biopelículas varían de acuerdo con la naturaleza de las especies que la conforman y del medio ambiente donde se encuentra.

Las biopelículas ofrecen a los microorganismos beneficios tales como protección contra agentes dañinos y cambios drásticos en el medio ambiente, y contra los depredadores. Sin embargo, los organismos que la conforman deben competir por el espacio y los nutrientes dentro de la biopelícula.

Una biopelícula está formada por pequeños conglomerados celulares sumergidos en una red de polímeros producidos por las mismas células. El carbono que forma estos polímeros extracelulares representa entre el 50 y el 90 % del carbono total en una biopelícula. (Gonzalez & López, 2008)

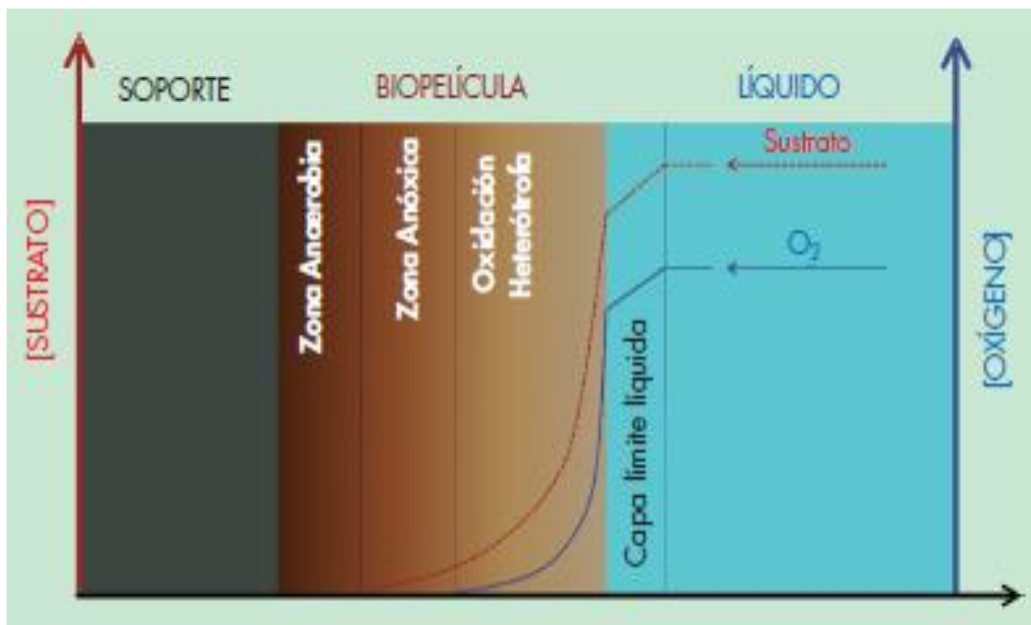
El concepto básico del biofiltro es utilizar soportes de pequeño tamaño con una alta superficie específica, de forma que se produce, tanto biodegradación (en condiciones aerobias, anóxicas o anaerobias) como retención de sólidos. Entre

las soluciones innovadoras basadas en procesos de biopelícula destacan los biofiltros y los reactores de lecho móvil, así como los reactores híbridos.

En la biopelícula, las variables relevantes de la remoción de carga orgánica se pueden obtener analizando la difusión molecular del sustrato dentro de la biopelícula, la carga orgánica, que es digerida en la biopelícula está en relación directa con el coeficiente de difusión efectiva (que incluye la transferencia por difusión molecular y convectiva). (Lara & Mazzoco, 2008)

El comportamiento de los perfiles de oxígeno y sustratos dentro de la biopelícula determina la existencia de varias capas con ambientes distintos, en las que se producen por ende, distintos tipos de reacciones (Figura 8). (Tejero & Esteban, 2012)

Figura 8. **Perfil, del sustrato y oxígeno en un proceso metabólico de la biopelícula**



Fuente: (Tejero & Esteban, 2012)

Hasta 1994, las biopelículas habían sido analizadas utilizando microscopios ópticos y electrónicos, y los resultados obtenidos las mostraban como un agregado de células contenidas dentro de una red de polímeros extracelulares excretados, con espesor y consistencia uniformes, interactuando con el líquido externo que las rodea. Con la utilización simultánea de la espectroscopia confocal y de microsensores para medir oxígeno disuelto, se ha obtenido una imagen diferente, que ha cambiado el concepto inicial que se tenía sobre las biopelículas hasta el grado de considerarlas como estructuras organizadas de microorganismos ensamblados en monocapas, con cualidades comparables a las de tejidos animales. (Costerton, 1995)

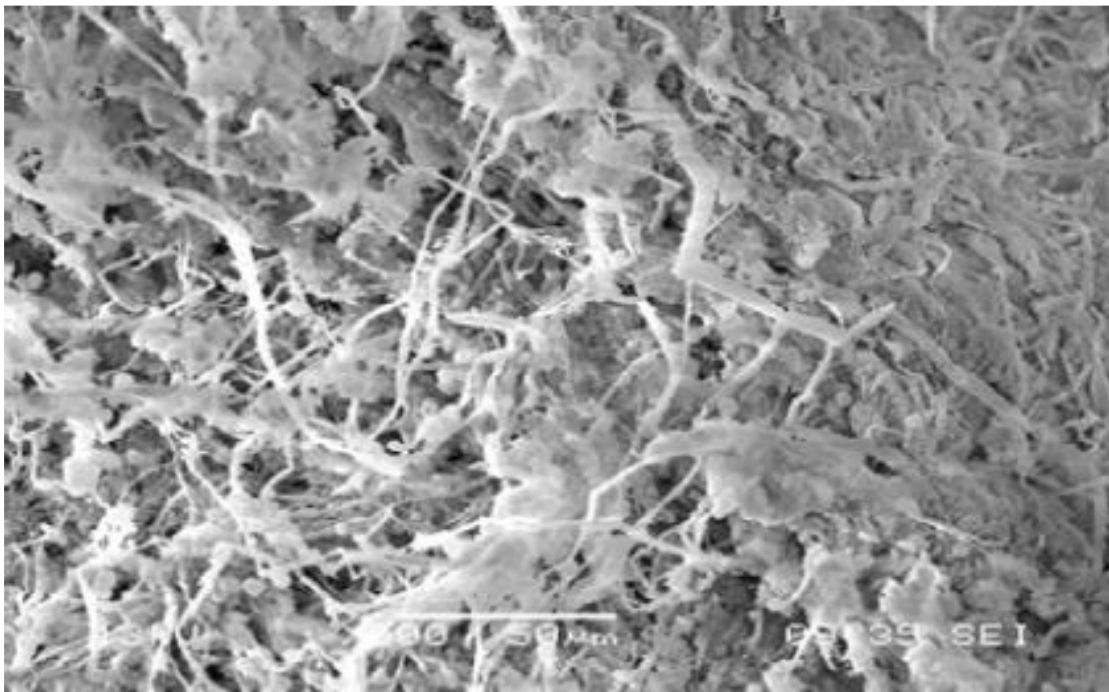
El estudio detallado de la estructura de las biopelículas realizado por diversos investigadores ha revelado una compleja arquitectura, en la cual las células crecen en microcolonias, soportadas por una matriz de polímeros extracelulares, conectadas entre sí por espacios (poros y canales) ocupados por líquido en movimiento, que conforman una estructura heterogénea, la cual interactúa con el líquido externo que las rodea (Lewandowski & Stoodley, 1995).

La fotografía que se muestra en la Fig. 9 fue obtenida por microscopía electrónica de barrido (MEB). Otros estudios (Klapper & Rupp, 2002) estas encontrado que las biopelículas se comportan como polímeros viscoelásticos ante los esfuerzos de corte ocasionados por el campo de velocidad externo, que poseen una superficie suave y en la mayoría de los casos filamentosa, y cuyo desprendimiento se debe tanto a los esfuerzos de corte como a cambios en la estructura, debido al envejecimiento de la biopelícula.

Una de las principales consecuencias de la naturaleza heterogénea de una biopelícula es la diferente magnitud de los gradientes de concentración de sustratos utilizados en el crecimiento de los microorganismos alojados en las

micro-colonias, dado que la concentración dentro de éstas es diferente a la que se encuentra en el líquido en poros y canales, y esto propicia un intercambio de materia (Lewandowski & Stoodley, 1995).

Figura 9. Fotografía de una biopelícula, obtenida mediante microscopía electrónica de barrido. Aumento 500x.



Fuente: (Gonzalez & López, 2008)

Asumiendo que el sustrato influente se mezcla con el agua de recirculación y entra al filtro por encima, y que además no hay limitaciones de difusión del sustrato dentro de la biopelícula. El descenso se puede aproximar a una lámina de sustrato que fluye al mismo tiempo a través del filtro, muy similar a como ocurre el avance de un elemento del fluido en un reactor de flujo pistón. (Orozco, 2014).

A fin de lograr el modelo matemático sobre la degradación de la materia orgánica al pasar por un filtro biológico como lo es el filtro percolador, hay varios

estudios realizados, cuyos modelos obtenidos son más específicos a los parámetros de estudiados; es decir, todavía no hay modelo matemático considerando las ecuaciones cinéticas y que esta sea establecida como un modelo universal para el diseño de los filtro percoladores; entonces, el modelo matemático y empírico propuesto por Eckenfelder. W. (1963), sigue siendo importante para el diseño de estas unidades de tratamiento de agua residual.

Los filtros percoladores se clasifican en carga baja o normal, media carga, alta o muy alta carga y de desbaste. Puede emplearse sistemas de filtros por etapas en los que se conectan en serie los filtros percoladores.

1.5. Componentes del filtro percolador

El filtro biológico incluye un sistema de distribución de agua residual sobre el medio filtrante de manera homogénea en todo el área del filtro, y ello puede pasar a través de las capas biológicas en las superficies fijas cargas uniformes, esto puede evitar un desgajamiento y ruptura; así mismo esto permite los espacios para la circulación del aire que contiene el oxígeno para que estos sean aprovechados por los microorganismos aerobios para la oxidación.

El medio filtrante que puede utilizarse en el filtro percolador son materiales inertes a la acción corrosiva de agua residual, que generalmente son piedras de tipo volcánico con porosidad alta, piedras de río, materiales tratados como son los ripios, materiales de tipo plástico con diferente configuración. Lo importante, el medio filtrante es la capacidad de superficie específica que cada medio filtrante puede ofrecer, y cuanto mayor esta sea, la eficiencia es mayor. Los tamaños debe ser de 2" a 4", según se realice las pruebas de tratamiento; y por otra parte, en los materiales sintéticos que generalmente son estructurados, estos tienen un alto capacidad de superficie específica. Los filtros percoladores de menor

profundidad, son de tre metros y suele utilizar medios rocosos, pero para los de mayor profundidad, hasta 12 metros, o tipo torre, se utilizan materiales livianos en diferentes conformaciones o geometrías, como los plásticos. (Metcalf & Eddy, 1996).

El sistema de recogida del agua residual, en los filtros percoladores, consiste en unos dispositivos de drenaje inferior para la recogida del agua residual filtrada y de los sólidos desprendidos del medio filtrante, y su conducción al tanque de sedimentación final sea sin acumular los sidementos y sin producir las obstrucciones al paso del fluido líquido y del aire; generalmente estas abertura es $\frac{1}{2}$ " menor al tamaño de la capa por encima de la parrilla viga de soporte del medio filtrante.

La ventilación debe diseñarse en el contorno del filtro siendo estas de forma rectangular o circular, y el aire por las diferencias de temperatura entre el agua y el líquido en el filtro, variará la presión produciendo el sentido del flujo de aire.

Si el agua residual tiene una temperatura inferior a la del aire ambiente, el aire de los poros será frío y su movimiento se producirá en sentido descendente. Se producirá un movimiento ascendente del aire cuando el medio ambiente tenga una menor temperatura que el agua residual. Siendo esta última condición la más favorable para la estabilización de la materia orgánica, ya que la presión parcial del oxígeno es menor en la zona de mayor demanda de oxígeno. (Metcalf & Eddy, 1996).

1.6. Componentes del filtro percolador

Modelos matemáticos para el diseño de filtros percoladores fueron propuestos por varios autores, todos ellos tratando de considerar la cinética de

reacciones dados en el sistema biológico de la biopelícula adherida en la superficie fija; pero estos modelos no se han definido el verdadero comportamiento del filtro percolador en la remoción de la materia orgánica, sino, más bien los modelos empíricos han mostrado mayor consistencia con los datos determinados en las pruebas, así como también con los datos reales de operación. Para el diseño de filtros percoladores existen diferentes ecuaciones propuestos, a través de los años, por diferentes autores. Veltz (1948), Rankin (1955), Schulze (1960), Eckenfelder (1963), Galler y Gotas (1964) Bruce y Merkens (1973), Kinkannon y Stover (1982) y otras (Romero, 2010).

Como se ha comentado, no existe una ecuación universal para el diseño de filtros percoladores. Sin embargo, se ha comprobado que la Ecuación 1.1 resulta apropiada para describir los rendimientos de eliminación observados en filtros percoladores rellenos de materiales de plástico:

$$\frac{S_e}{S_a} = \exp[-k_{20} Z(Q_v)^{-n}] \quad (1.1)$$

Donde:

S_e = DBO₅ total del efluente del filtro decantado, mg/l.

S_a = DBO₅ total del agua residual afluente al filtro, mg/l.

k_{20} = constante de tratabilidad correspondiente a una determinada profundidad del medio filtrante (Z) a 20 °C.

Z = profundidad del filtro, m.

Q_v = caudal volumétrico aplicado por unidad de superficie del filtro, (Q/A), m³/h · m².

Q = caudal total aplicado al filtro sin tener en cuenta la recirculación, m³/h.

A = superficie del filtro, m².

n = constante empírica, normalmente 0,5.

En las ocasiones en las que se pretenda emplear el valor de una constante de tratabilidad medida para un filtro de una determinada profundidad para el diseño de un filtro de diferente profundidad, la corrección del valor de la constante para adaptarlo a la nueva profundidad se puede llevar a cabo, mediante la siguiente expresión:

$$k_2 = k_1 \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^x \quad (1.2)$$

Donde:

S_e = DBO₅ total del efluente del filtro decantado, mg/l.

k_1 = constante de tratabilidad para un filtro de profundidad D_1 .

Z_2 = profundidad del segundo filtro.

X = 0,5 para filtros verticales y de medio rocoso.

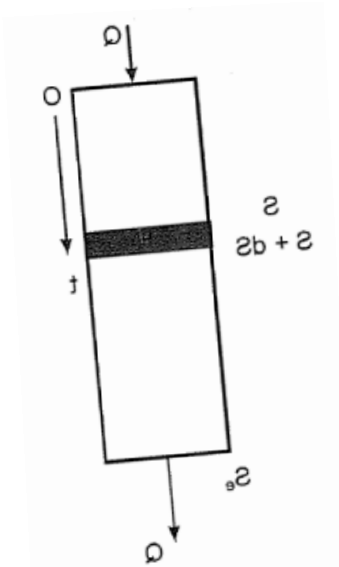
X = 0,3 para filtros de plástico de "flujo transversal".

1.6.1. Biopelícula

El crecimiento microbiano hace referencia al aumento del número de microorganismos a lo largo del tiempo y no al aumento de su tamaño. El aumento del número de microorganismos permite la formación de colonias o de poblaciones; Es por eso que, en microbiología el crecimiento se estudia por poblaciones y no en microorganismos individuales. Las bacterias se reproducen generalmente por fisión binaria y el resultado de la fisión binaria son dos células hijas por cada célula madre, así, una célula se divide en dos, dos en cuatro, así sucesivamente este crecimiento es logarítmico; pero este crecimiento es afectado por el crecimiento endógeno, estos son los factores como la muerte y la

degradación, con el cual se produciría un equilibrio en las condiciones de carga orgánica e hidráulicas que se encuentre.

Figura 10. **Esquema de flujo en filtro percolador**



Fuente: (Metcalf & Eddy, 1997)

1.6.2. Modelo general de diseño de filtros percoladores

Es importante tener en cuenta que, el agua residual sigue una trayectoria vertical, con poco movimiento lateral, se puede considerar al filtro percolador como un ejemplo de proceso con flujo en pistón. Aunque se reconoce que la remoción de DBO es función de muchas variables (profundidad, textura, permeabilidad, configuración y área superficial específica del medio; naturaleza del agua residual, carga hidráulica superficial, carga orgánica, relación de recirculación, tiempo de contacto y temperatura, principalmente) se utilizan aproximaciones y se ignoran variables, o se da mayor énfasis a un parámetro sobre otro, para formular los diferentes modelos matemáticos de diseño. Para un filtro biológico, sin recirculación, suponiendo modelo de flujo en pistón y tasa de remoción de DBO, según la cinética de reacción de primer orden, se tiene:

$$\frac{dS}{dt} = -c S \quad (1.3)$$

Donde:

S = concentración de sustrato, generalmente mg/L de DBO soluble.

c = constante de remoción de sustrato, d⁻¹

t = tiempo de contacto, d

De la ecuación 1.3 se obtienen las ecuaciones 1.4 y 1.5

$$\int_{S_a}^{S_e} \frac{dS}{S} = -c \int_0^t dt \quad (1.4)$$

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-c t} \quad (1.5)$$

Donde:

S_e = DBO soluble del efluente del filtro, mg/L.

S_a = DBO soluble del afluente del filtro, mg/L.

Para filtros percoladores con recirculación, es decir, cuando la DBO del caudal afluente Q es diluida con un caudal recirculado Q_R, se tiene:

$$Q S_o + Q_R S_e = (Q + Q_R) S_a$$

Si la recirculación R es :

$$R = \frac{Q_R}{Q} \quad (1.6)$$

Reemplazando:

$$S_o + R S_e = (1 + R) S_a \quad (1.7)$$

Luego,

$$S_a = \frac{S_o + R S_e}{1 + R} \quad (1.8)$$

En la ecuación anterior si la recirculación: $R = 0$ y $S_a = S_o$; luego reemplazando:

$$\frac{S_e (1+R)}{S_o + R S_e} = e^{-c t} \quad (1.9)$$

La recirculación no es necesaria ni es prerequisite del proceso, a menos que los estudios con planta piloto así lo demuestren, para mantener una película biológica apropiada durante períodos de flujo mínimo. En algunos casos, el uso de cargas hidráulicas grandes con recirculaciones grandes da como resultado, en la práctica, eficiencias menores de remoción de DBO. Modelo de Eckenfelder modifica la ecuación 1.5 así:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-c S t} \quad (1.10)$$

Donde:

S_e = concentración de sustrato soluble del efluente, mg/L.

S_a = concentración de sustrato soluble del afluente, mg/L.

c = constante de remoción, m/d

S = área superficial específica del medio, m^2/m^3

t = tiempo de contacto, d

Eckenfelder toma el tiempo de contacto, o tiempo de retención en el filtro biológico, igual que Velz, Shulse, Howland, Sinkoff y otros así:

$$t = \frac{C Z}{q^n} \quad (1.11)$$

Donde:

Z = profundidad del filtro, m

q = carga hidráulica superficial, m/d

c y n = constante que caracteriza el medio y cuyos valores dependen de las unidades utilizadas para cuantificar t .

S = área superficial específica del medio, m^2/m^3

Luego reemplazando la ecuación 1.11 en 1.10 resulta:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-K S Z / q^n} \quad (1.12)$$

Donde:

$K = c$; $C =$ constante modificada de remoción de sustrato, base natural
 $(1/m*d)^n$

En la ecuación 1.12, K tiene unidades de m/d y C es adimensional. Sin embargo, los valores de K son función de las unidades usadas para expresar las diferentes variables y del valor de n . La ecuación anterior es la ecuación recomendada por Eckenfelder para predecir la remoción de materia orgánica en un filtro biológico. Para la ecuación modificada de Velz y la de Eckenfelder el coeficiente (n) es una constante determinada experimentalmente dependiendo de las características de cada filtro, generalmente toma el valor de 0.5 según (Metcalf & Eddy, 1997 / Romero, 2010); luego puede ser expresado con base decimal:

$$\frac{S_e}{S_a} = 10^{-k S D / q^n} \quad (1.13)$$

Donde:

$k =$ constante modificada de remoción de sustrato, base decimal
 $(1/m*d)^n$

1.6.3. Procedimiento de determinación de los coeficientes cinéticos para filtros percoladores

Según la literatura, generalmente hay información sobre el procedimiento de la determinación de la constante de tratabilidad a una profundidad determinada del filtro. Pero actualmente, hay modelos matemáticos que consideran parámetros de carga orgánica e hidráulica para cada tipo de material de medio filtrante utilizado en función a la profundidad del filtro percolador para una determinada temperatura; cuyo modelo requiere determinar los valores de los coeficientes cinéticos para cada tipo de agua residual.

El procedimiento para la determinación de los coeficientes cinéticos está recomendado, según el modelo matemático dado por Eckenfelder. (Romero, 2010) también hay un procedimiento de cálculo similar, dado por (Orozco, 2014)

2. ÁREA DE TRABAJO

2.1. Componentes del filtro percolador

La planta de tratamiento fue diseñada por el Ing. Arturo Pazos en el año 1989, como un sistema de tratamiento biológico de un filtro percolador de tres etapas en serie, con una capacidad para 50,000 estudiantes. Fue construida por la Compañía Constructora de Obras Civiles (COCISA) en el año 1990.

Para el curso universitario 2012, se cuenta con una matrícula de 98,699 estudiantes y 7,146 personas entre funcionarios administrativos, docentes, investigadores y temporales. La planta de tratamiento tiene una capacidad para 105,845 personas. (Oficina de Estadística-USAC, 2017).

De acuerdo con la información suministrada por el Sr. Arturo González, operador del sistema, el caudal del agua residual que ingresa es 17 l/s. Sin embargo, el caudal aforado en diferentes estudios es de aproximadamente 6 l/s. (Chávez, 1991/ ECOPLAN, 2001/ Ramírez, 2012).

El sitio seleccionado para la construcción es un terreno de topografía irregular, que permite aprovechar la fuerza de gravedad como mecanismo para el movimiento del agua residual en las unidades de proceso.

La siguiente fotografía, muestra el rótulo colocado en el acceso de las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC, Guatemala.

Figura 11. Cartel en la planta de tratamiento de aguas residuales USAC



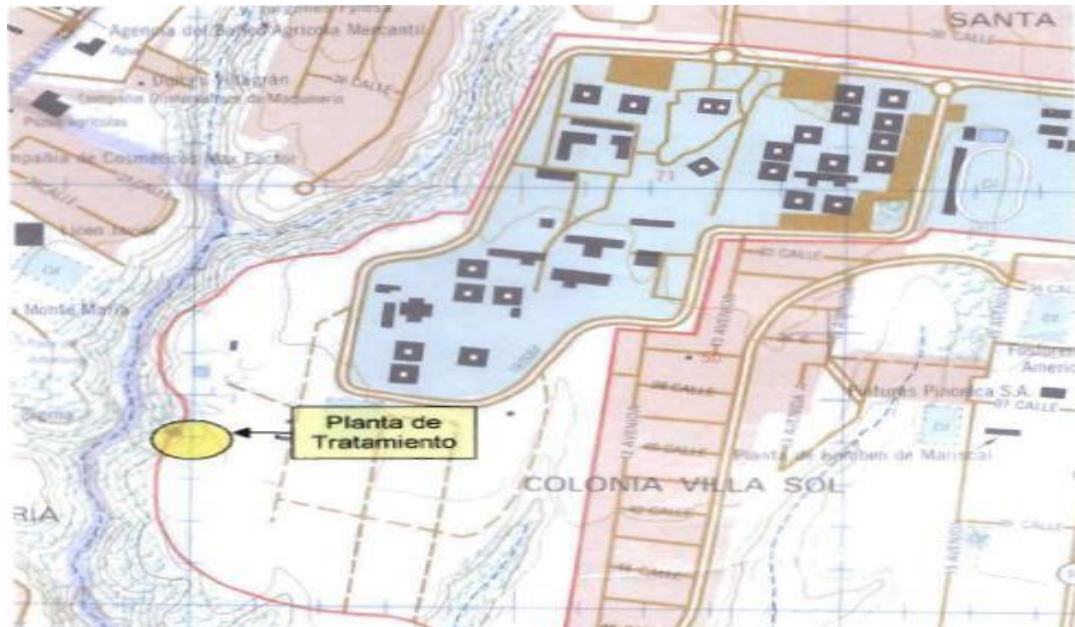
Fuente: Elaboración Propia.

2.2. Componentes del filtro percolador

La planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC, se encuentra localizada en la ciudad universitaria ubicada en la Zona 12 de la ciudad de Guatemala. Al norte, este y sur colinda con los predios de la ciudad universitaria y al oeste, con la colonia El Carmen y una quebrada de por medio, que se origina a inmediaciones de la ciudad universitaria.

La siguiente figura permite observar la ubicación de la planta de tratamiento con respecto a la ciudad universitaria.

Figura 12. **Ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



Fuente: (ECOPLAN, 2001)

La siguiente es la localización geográfica de la planta de tratamiento.

- Longitud: 90°33'34.50" O
- Latitud: 14°34'42.71" N
- Altitud: 1457 m.s.n.m

En la figura 13, se puede observar una vista aérea de las instalaciones de la planta de tratamiento.

La planta de tratamiento posee las siguientes unidades de tratamiento:

- Cámara de ingreso
- Rejilla separadora
- Canal desarenador

- Sedimentador primario
- Filtro biológico, tres etapas en serie
- Sedimentador secundario
- Digestor de lodos
- Patio de secado

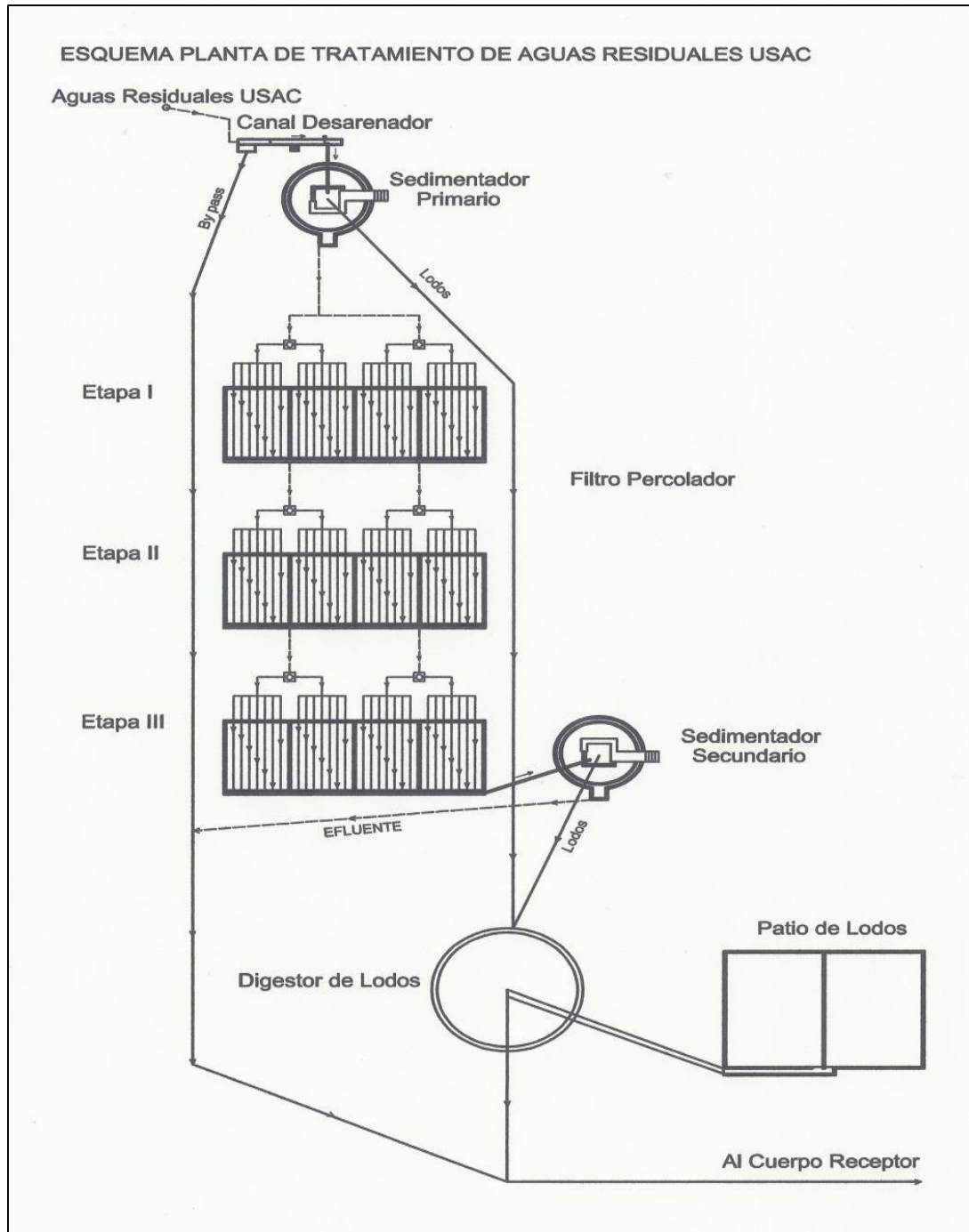
Figura 13. Vista aérea de la localización de las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC



Fuente: (Ramírez, 2012)

El esquema muestra la distribución espacial de las diferentes unidades de tratamiento existentes en la planta de tratamiento del agua residual.

Figura 14. Esquema de la planta tratamiento de aguas residuales, USAC.



Fuente: (Ramírez, 2012)

2.3. Componentes del filtro percolador

Las unidades donde se realiza el tratamiento preliminar son la cámara de ingreso, las rejillas y el canal desarenador, donde ocurren procesos físicos de separación de sólidos groseros, material inerte y regulación de caudal. Esta unidad tiene una longitud de 12 metros y una sección útil de 40 centímetros de ancho. En esta sección, el olor del agua residual es fácilmente perceptible.

2.3.1. Procedimiento de determinación de los coeficientes cinéticos para filtros percoladores

En la cámara de ingreso de las aguas residuales existe un sistema de compuertas para el desvío del caudal con los siguientes fines:

- Regulación de la cantidad de agua que ingresa a la planta por cuanto el sistema de alcantarillado es combinado y el flujo aumenta con las lluvias.
- Desfogue, para cuando se requiera realizar actividades de mantenimiento en las estructuras de tratamiento.

Figura 15. **Cámara de ingreso**



Fuente: (Ramírez, 2012)

2.4. Componentes del filtro percolador

2.4.1. Sedimentador primario

Para remover los sólidos que no son retenidos en las etapas previas, se cuenta con un sedimentador primario, el cual es una estructura de concreto armado en forma de cono truncado de 10.66 m de diámetro mayor, un diámetro menor de 0,50 m, una profundidad es de 9,30 m, para un volumen de 290 m³.

El caudal proveniente del desarenador ingresa hasta el centro del sedimentador por medio de una tubería de PVC de 8" de diámetro, la cual reparte el agua residual por la parte superior de la estructura. Dispone de una pantalla en el centro de la estructura que permite forzar el flujo descendente del agua residual y que además retiene natas y material flotantes, que son removidos manualmente y trasladados a la fosa.

Figura 16. **Sedimentador primario**



Fuente: (Ramírez, 2012)

En el anillo exterior de la estructura existe un vertedero de decantación, que permite que solamente el agua residual sobrenadante sea decantada y

recolectada en un canal que la conduce al filtro percolador; la evacuación de los lodos acumulados en el sedimentador se realiza aproximadamente cada seis meses o cuando se observan emanaciones de gases en la superficie, indicativo de condiciones anaerobias en los mismos.

2.5. Componentes del filtro percolador

La unidad que lleva a cabo el tratamiento secundario es el filtro percolador de tres etapas en serie, seguido de un sedimentador secundario.

2.5.1. Filtro biológico

Está compuesto por tres etapas conectadas en serie de igual dimensión constructiva y medio filtrante de roca volcánica porosa. Cada una de las etapas esta subdivida en cuatro secciones, con un dimensionamiento útil de 3,80 x 6.20 x 4.0 m. El filtro percolador tiene una área superficial de 94.24 m² y un volumen de 1130.88 m³.

De acuerdo con la información disponible, el medio filtrante por cada etapa es de 3.5, 3.0 y 2.5 pulgadas para filtros I, II y III respectivamente, según los planos originales de construcción

Sin embargo, en cada etapa se observa una gran variedad de tamaños en las rocas volcánicas, con diámetros desde los 7 hasta los 16 centímetros (Ramírez, 2012)

El sistema de distribución del agua sobre los lechos filtrantes en cada una de las etapas del filtro percolador es mediante un sistema Manifold de 7 tuberías de HG de 6 cm de diámetro, con orificios a cada 50 cm. Algunos de los tubos

cuentan con válvula para la regulación del flujo y diferentes longitudes en su construcción.

El medio filtrante es soportado por un sistema de fondo falso, el cual consta de 24 tuberías perforadas de sección parcial, que permite tanto la ventilación del medio filtrante como la recolección del agua percolada. El área de ventilación es de aproximadamente 3.4 m² y la canaleta de recolección tiene una pendiente del 1 %, con dos salidas.

2.5.2. Sedimentador secundario

El sedimentador secundario tiene como principal función retener la biomasa y sólidos que se han desprendido o superado las etapas del filtro percolador. Las dimensiones son similares al primario, ya que su diámetro mayor es de 10 m, pese a que se menciona que es de 11.5 m. (Chávez, 1991). Los lodos sedimentados son trasladados al digestor de lodos.

En este punto, el agua tratada se nota cristalina, sin material flotante o pocos sólidos visibles y el olor es prácticamente imperceptible. Características que nos indican con toda claridad, desde un punto de vista cualitativo, que la planta de tratamiento debe estar teniendo una eficiencia sumamente alta.

Posterior a esta última etapa, el agua se descarga al cuerpo de agua que existe en las cercanías de las instalaciones, pese a que podría ser reusada en actividades permitidas.

2.5.3. Digestor de lodos

El digestor de lodos es una estructura de concreto armado en forma de cono truncado. Tiene 17 m de diámetro mayor, 0.50 m de diámetro menor y 14 m de altura total.

Los sólidos producidos en los dos sedimentadores son tratados en el digestor de lodos, proceso anaeróbico, en el cual son estabilizados con la consiguiente formación de gases, metano, que deberían ser lodos estables, inodoros, y fáciles de drenar para su deshidratación.

Una vez que los lodos están estabilizados, son trasladados al patio de secado, el cual básicamente son dos áreas de 336 m², recubiertas con concreto para su secado, deshidratado; cuando los lodos se encuentran deshidratados, son extraídos y aprovechados como abono orgánico.

3. METODOLOGIA

3.1. Selección de parámetros de control

Para el análisis químico, se utilizarán los procedimientos descritos en los folletos del curso de Química y Microbiología Sanitaria, y casa fabricantes de los reactivos químicos. El pH y temperatura, se analizan *in situ*.

La siguiente tabla muestra los parámetros seleccionados y su importancia de análisis.

Tabla III. **Parámetros de análisis seleccionados**

Parámetro	Importancia
Sólidos suspendidos	Pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte el agua residual sin tratar al entorno acuático.
DBO / DQO	Si se descarga la materia orgánica biodegradable al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y desarrollo de condiciones sépticas.
Nitrógeno / Fosforo	Junto con el carbono son nutrientes esenciales para el crecimiento de vida acuática no deseada, favoreciendo la eutrofización de los cuerpos de agua.
pH / Temperatura	Importantes para conocer si las condiciones son adecuadas para el crecimiento bacteriano.

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1997)

3.2. Metodología para determinar el número de muestras

Para determinar el número de muestras por recolectar en cada uno de los 6 puntos de muestreos, se hará de acuerdo con el Método 1060B indicado en Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales.

Se utilizaron las curvas de niveles de confianza establecidos, a partir de la siguiente fórmula. (*Standard methods for the examination of water and wastewater, 2002*).

$$N \geq \left(\frac{t * s}{U} \right)^2$$

Donde:

N = número de muestras

t = es la t de student para un nivel de confianza determinado

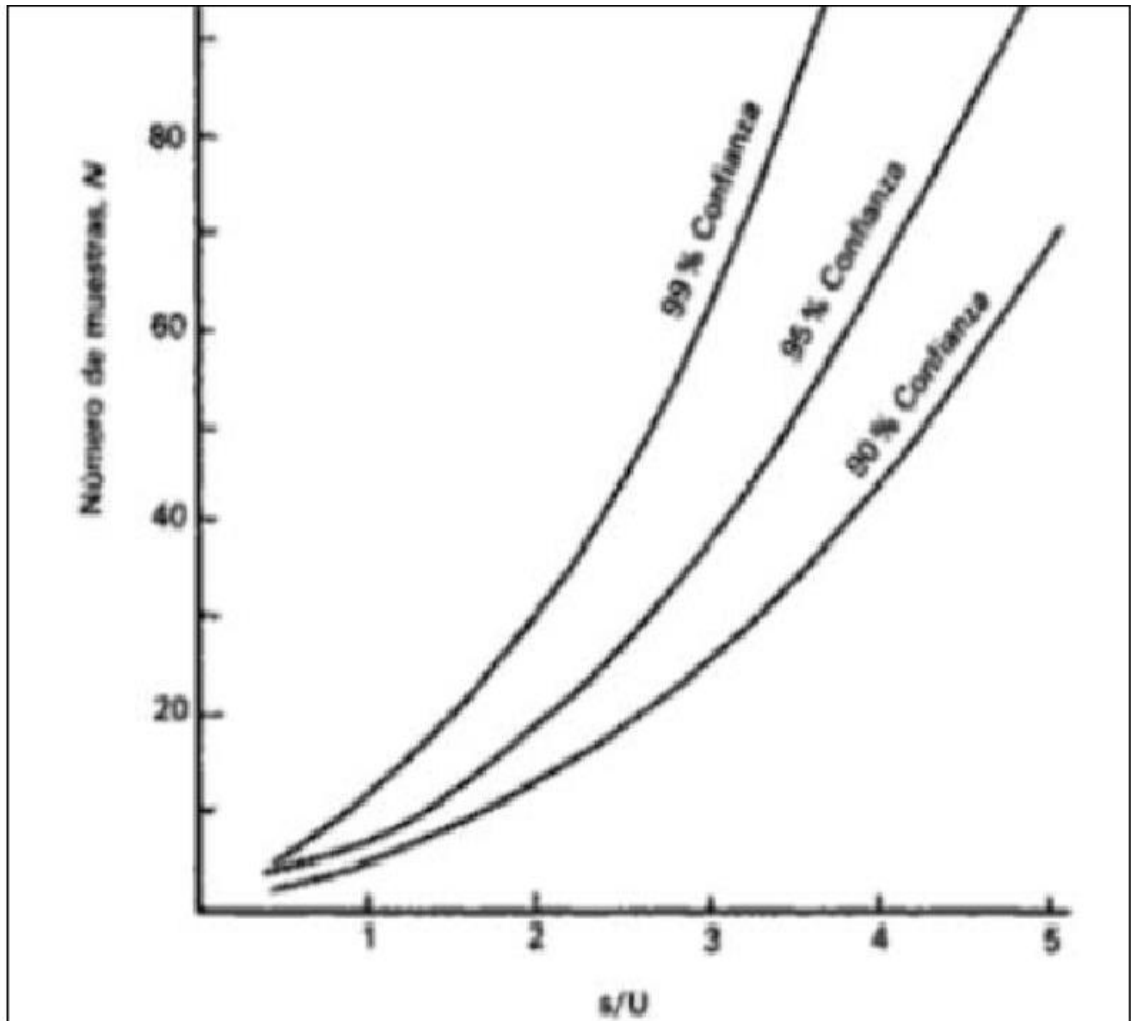
s = desviación estándar global

U = nivel de confianza aceptable

Para una desviación estándar, s, de 0.020 y un nivel de confianza, U, de 0.015, se obtiene un valor de 1.33 para la relación s/U.

A partir de este resultado, se interpola en la siguiente figura para un nivel de confianza del 95 % y se establece que el número de muestras por recolectar debe ser mayor o igual a 10. Para efectos de este estudio, se recolectarán 10 muestras en cada uno de los puntos de muestreo, según los resultados de la fórmula de muestreo.

Figura 17. Número aproximado de muestras necesarias para calcular una concentración media



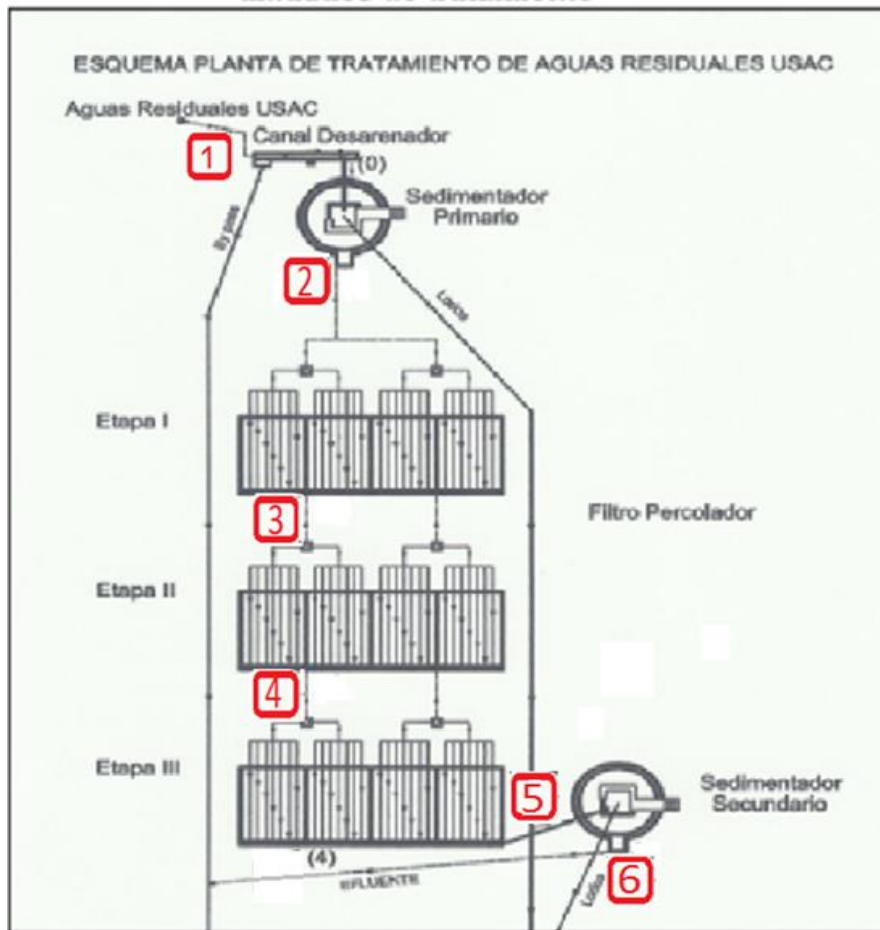
Fuente: (American Water Works Association, 2002)

3.3. Puntos de recolección de muestras

Los puntos definidos para la recolección de las muestras de agua residual son seis: entrada (afluente), sedimentador primario, filtros percoladores etapas I, II y III y sedimentador secundario, siendo las muestras de salida (efluente) de

cada unidad. La siguiente figura muestra la ubicación de los puntos de recolección.

Figura 18. **Puntos de recolección de muestra en los efluentes de las unidades de tratamiento**



Fuente: (Rommel Raudales, 2012)

3.4. Muestreo

Se utilizó el método de muestreo compuesto, con base en el tiempo, ya que indica las características promedio de las aguas residuales durante un lapso y quedan eliminados los efectos de los cambios intermitentes de caudal y

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

$$V = \frac{(VT)}{Q * NM} \quad (3.1)$$

Donde:

V = volumen a recolectar por cada L/s de agua cruda; ml

VT = volumen total de la muestra compuesta; 1000 ml

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

NM = número de muestras a recolectar; 5 muestras

De la cual se obtiene que se requiere recolectar 33.33 ml por cada l/s de agua residual. Para esto, cada hora se captará un volumen de 200 ml del agua residual en cada punto de muestreo, hasta obtener un volumen total de 1000 ml de muestra por punto.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Características de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento de agua residual de la USAC

Los análisis físicos químicos realizados para fines del estudio, se han tomado las muestras compuestas, así también la cantidad de muestras es determinada, según la metodología para la determinación de la cantidad de muestras. A continuación se muestran en las tablas (IV a XI).

Tabla IV. Características del agua residual que ingresa a la planta tratamiento de aguas residuales de la USAC

Número de Muestreo	Fecha de Muestreo	Caudal de Entrada (l/s)	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	Sólidos Sedimentable (cm ³ /l)	Sólidos Suspendedos (mg/l)	Temperatura (°C)	pH
1	12-10-2017	4.43	765.0	361.0	3.0	147.0	25.1	7.0
2	02-11-2017	4.08	535.0	343.0	3.4	265.0	24.2	7.9
3	21-02-2018	4.60	743.0	448.0	3.6	197.3	24.8	8.4
4	28-02-2018	4.97	692.0	335.0	3.4	198.7	25.1	8.4
5	07-03-2018	6.33	589.0	306.0	3.1	200.0	25.2	8.4
6	14-03-2018	3.48	837.0	472.0	3.5	116.0	24.4	8.3
7	11-04-2018	5.94	812.0	372.0	3.4	148.0	25.8	8.4
8	12-04-2018	5.38	612.0	318.0	3.2	168.0	25.6	8.6
9	18-04-2018	3.77	591.0	312.0	3.0	185.3	25.1	8.3
10	20-04-2018	3.60	622.0	347.0	3.5	153.3	24.8	8.4
	Mínimo	3.5	535.0	306.0	3.0	116.0	24.2	7.0
	Máximo	6.3	837.0	472.0	3.6	265.0	25.8	8.6
	Promedio	4.66	679.80	361.40	3.31	177.87	25.01	8.21
	Desviación estándar	0.99	104.68	56.25	0.22	41.26	0.49	0.47

Fuente: elaboración propia.

Y en las figuras (19 a 29) los resultados obtenidos en el laboratorio de las muestras tomadas, tanto en la entrada y salida de los puntos de muestreo indicados en el plano de muestreo de la planta de agua residual de USAC.

Tabla V. **temperatura del agua residual en las unidades de la planta de tratamiento de aguas Residuales de USAC**

Número de Muestreo	Fecha de Muestreo	Temperatura (°C)					
		Canal de Entrada	Salida del Sedimentador Primario	Salida del Filtro Percolador 1	Salida del Filtro Percolador 2	Salida del Filtro Percolador 3	Salida de Sedimentador Secundario
1	12-10-2017	25.1	25.4	24.6	24.8	24.5	24.3
2	02-11-2017	24.2	23.9	23.8	23.6	23.5	23.5
3	21-02-2018	24.8	24.2	23.9	23.7	23.6	23.7
4	28-02-2018	25.1	25.4	24.6	24.8	24.5	24.3
5	07-03-2018	25.2	25.1	24.8	24.2	23.2	23.4
6	14-03-2018	24.4	24.2	23.8	23.7	23.8	23.4
7	11-04-2018	25.8	24.7	24.5	24.2	24.1	24.0
8	12-04-2018	25.6	25.4	24.3	23.3	23.6	23.8
9	18-04-2018	25.1	25.3	25.0	24.6	24.3	24.2
10	20-04-2018	24.8	24.7	24.1	23.7	23.6	23.5
	Mínimo	24.2	23.9	23.8	23.3	23.2	23.4
	Máximo	25.8	25.4	25	24.8	24.5	24.3
	Promedio	25.01	24.83	24.34	24.06	23.87	23.81
	Desviación estándar	0.49	0.57	0.43	0.54	0.45	0.37

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **caudal que ingresa a la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC**

Número de Muestreo	Fecha de Muestreo	Caudal (l/s)
1	07-03-2018	6.33
2	11-04-2018	5.94
3	12-04-2018	5.38
4	28-02-2018	4.97
5	28-02-2018	4.60
6	12-10-2017	4.43
7	02-11-2017	4.08
8	18-04-2018	3.77
9	20-04-2018	3.60
10	14-03-2018	3.48
	Mínimo	3.48
	Máximo	6.33
	Promedio	4.66
	Desviación estándar	0.99

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Potencial de hidrógeno (pH) del agua residual, en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC**

Número de Muestreo	Fecha de Muestreo	Potencial de Hidrógeno (pH)					
		Canal de Entrada	Salida del Simentador Primario	Salida del Filtro Percolador 1	Salida del Filtro Percolador 2	Salida del Filtro Percolador 3	Salida de Sedimentador Secundario
1	12-10-2017	6.97	6.72	6.88	6.93	7.07	6.92
2	02-11-2017	7.89	7.67	7.44	7.24	7.09	6.89
3	21-02-2018	8.40	8.00	7.70	7.40	6.90	6.70
4	28-02-2018	8.40	8.20	8.00	7.60	7.20	7.00
5	07-03-2018	8.40	8.10	7.80	7.40	7.20	7.20
6	14-03-2018	8.30	8.00	7.70	7.60	7.20	7.10
7	11-04-2018	8.40	8.10	7.80	7.50	7.30	7.40
8	12-04-2018	8.60	8.20	7.80	7.60	7.20	7.20
9	18-04-2018	8.30	7.80	7.70	7.50	6.80	6.70
10	20-04-2018	8.40	8.30	7.80	7.70	7.40	7.10
	Mínimo	6.97	6.72	6.88	6.93	6.8	6.7
	Máximo	8.6	8.3	8	7.7	7.4	7.4
	Promedio	8.21	7.91	7.66	7.45	7.14	7.02
	Desviación estándar	0.47	0.46	0.31	0.22	0.18	0.22

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Demanda Química Oxígeno (DQO) del agua residual, en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales**

Número de Muestreo	Fecha de Muestreo	Demanda Química de Oxígeno: DQO (mg/l)					
		Canal de Entrada	Salida del Simentador Primario	Salida del Filtro Percolador 1	Salida del Filtro Percolador 2	Salida del Filtro Percolador 3	Salida de Sedimentador Secundario
1	12-10-2017	765	448	102	76	35	0
2	02-11-2017	535	251	114	67	42	0
3	21-02-2018	743	488	176	69	41	0
4	28-02-2018	692	395	145	81	49	0
5	07-03-2018	589	326	151	67	43	0
6	14-03-2018	837	477	183	81	40	0
7	11-04-2018	812	372	148	68	44	0
8	12-04-2018	612	348	114	71	50	0
9	18-04-2018	591	342	102	65	47	0
10	20-04-2018	622	345	118	68	51	0
	Mínimo	535	251	102	65	35	0
	Máximo	837	488	183	81	51	0
	Promedio	679.8	379.2	135.3	71.3	44.2	0
	Desviación estándar	104.68	73.96	29.55	5.91	5.05	0.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC

Número de Muestreo	Fecha de Muestreo	Demanda Bioquímica de Oxígeno: DBO ₅ (mg/l)					
		Canal de Entrada	Salida del Sidem entador Primario	Salida del Filtro Percolador 1	Salida del Filtro Percolador 2	Salida del Filtro Percolador 3	Salida de Sedimentador Secundario
1	12-10-2017	361	212	72	30	18	-
2	02-11-2017	343	182	60	32	19	-
3	21-02-2018	448	236	83	31	20	-
4	28-02-2018	335	184	61	35	22	-
5	07-03-2018	306	172	69	28	17	-
6	14-03-2018	472	203	83	30	18	-
7	11-04-2018	372	208	82	28	21	-
8	12-04-2018	318	186	68	28	23	-
9	18-04-2018	312	174	47	28	23	-
10	20-04-2018	347	186	50	28	19	-
	Mínimo	306	172	46.8	27.5	17.3	-
	Máximo	472.0	236.0	83.4	34.9	23.0	-
	Promedio	361	194	67	29	20	-
	Desviación estándar	56.25	20.00	13.11	2.50	2.16	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. sólidos sedimentables en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC

Número de Muestreo	Fecha de Muestreo	Sólidos Sedimentables : (cm ³ /l / Hr)					
		Canal de Entrada	Salida del Sidem entador Primario	Salida del Filtro Percolador 1	Salida del Filtro Percolador 2	Salida del Filtro Percolador 3	Salida de Sedimentador Secundario
1	12-10-2017	3.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
2	02-11-2017	3.4	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
3	21-02-2018	3.6	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0
4	28-02-2018	3.4	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
5	07-03-2018	3.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
6	14-03-2018	3.5	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0
7	11-04-2018	3.4	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0
8	12-04-2018	3.2	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0
9	18-04-2018	3.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
10	20-04-2018	3.5	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0
	Mínimo	3.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
	Máximo	3.6	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0
	Promedio	3.31	0.00	0.10	0.12	0.10	0.00
	Desviación estándar	0.22	0.00	0.07	0.06	0.05	0.00

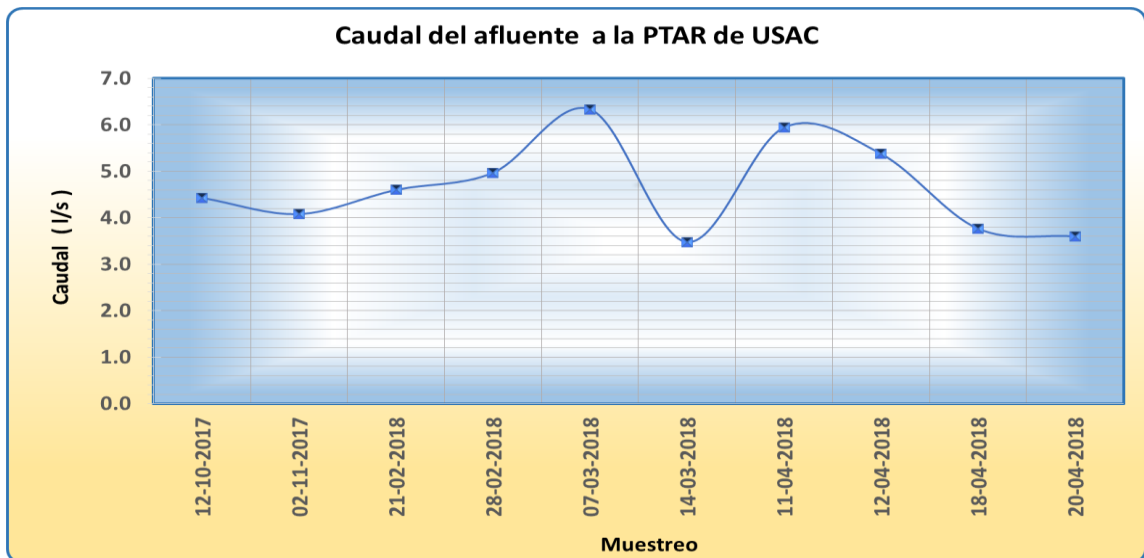
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Sólidos Suspendidos en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC**

Número de Muestreo	Fecha de Muestreo	Sólidos Suspendidos : (mg / l)					
		Canal de Entrada	Salida del Sidimentador Primario	Salida del Filtro Percolador 1	Salida del Filtro Percolador 2	Salida del Filtro Percolador 3	Salida de Sedimentador Secundario
1	12-10-2017	147.0	33.5	16.0	16.0	22.2	2.5
2	02-11-2017	265.0	20.0	48.4	54.0	26.2	3.8
3	21-02-2018	197.3	51.5	9.0	11.7	17.8	5.6
4	28-02-2018	198.7	54.4	23.5	17.7	21.4	10.0
5	07-03-2018	200.0	53.3	18.7	18.3	19.0	5.0
6	14-03-2018	116.0	43.3	22.7	23.7	21.8	7.4
7	11-04-2018	148.0	43.3	23.0	14.0	18.8	7.6
8	12-04-2018	168.0	42.0	23.7	17.0	16.2	6.6
9	18-04-2018	185.3	42.5	29.0	21.7	16.8	9.0
10	20-04-2018	153.3	30.0	30.3	30.7	23.6	6.8
	Mínimo	116.0	20.0	9.0	11.7	16.2	2.5
	Máximo	265.0	54.4	48.4	54.0	26.2	10.0
	Promedio	177.87	41.39	24.42	22.47	20.38	6.43
	Desviación estándar	41.26	10.91	10.43	12.31	3.20	2.28

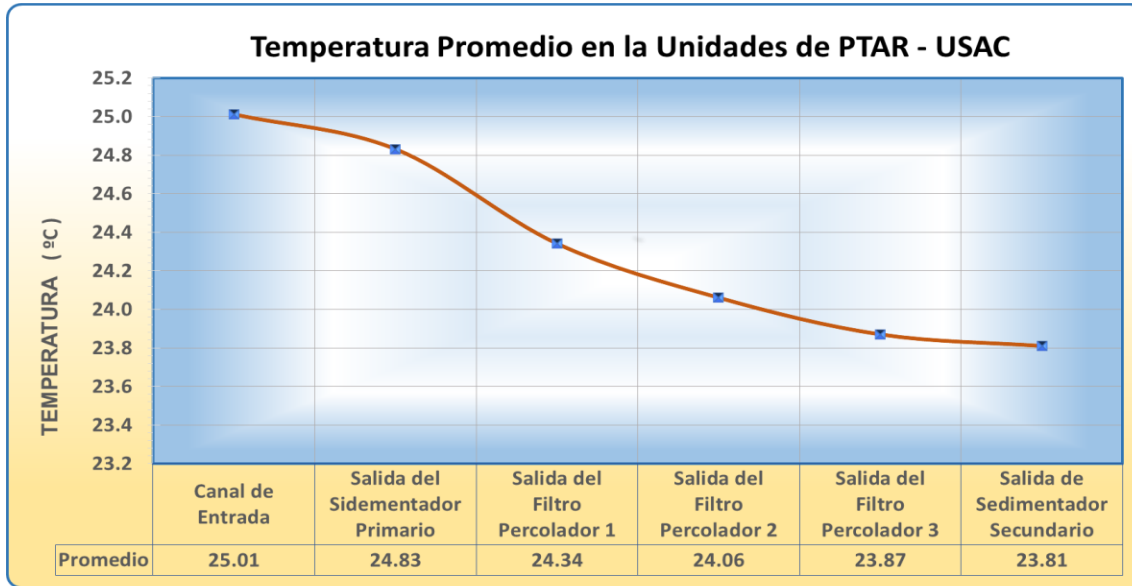
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Caudal que ingresa a la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC**



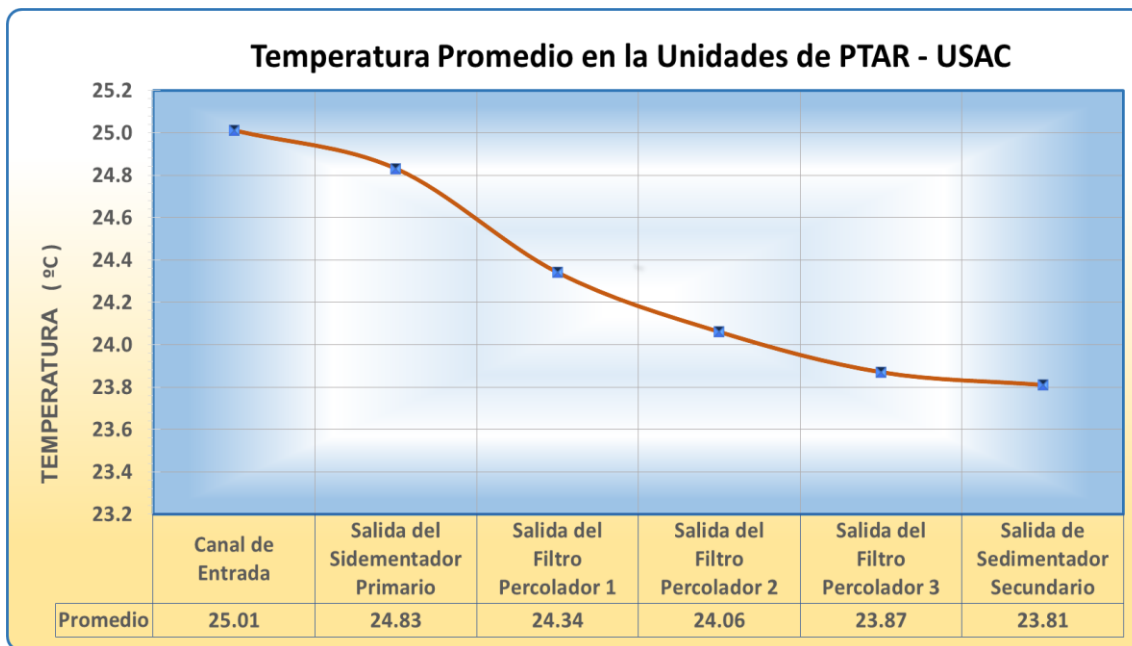
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Temperatura promedio en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC**



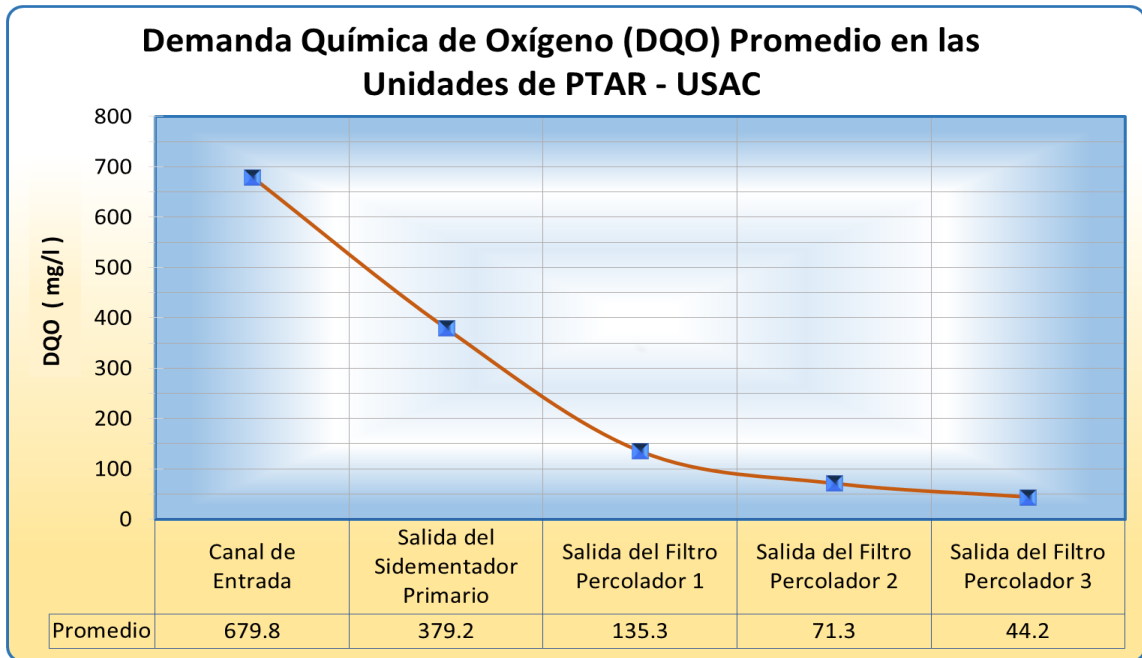
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Potencial de hidrógeno promedio en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC**



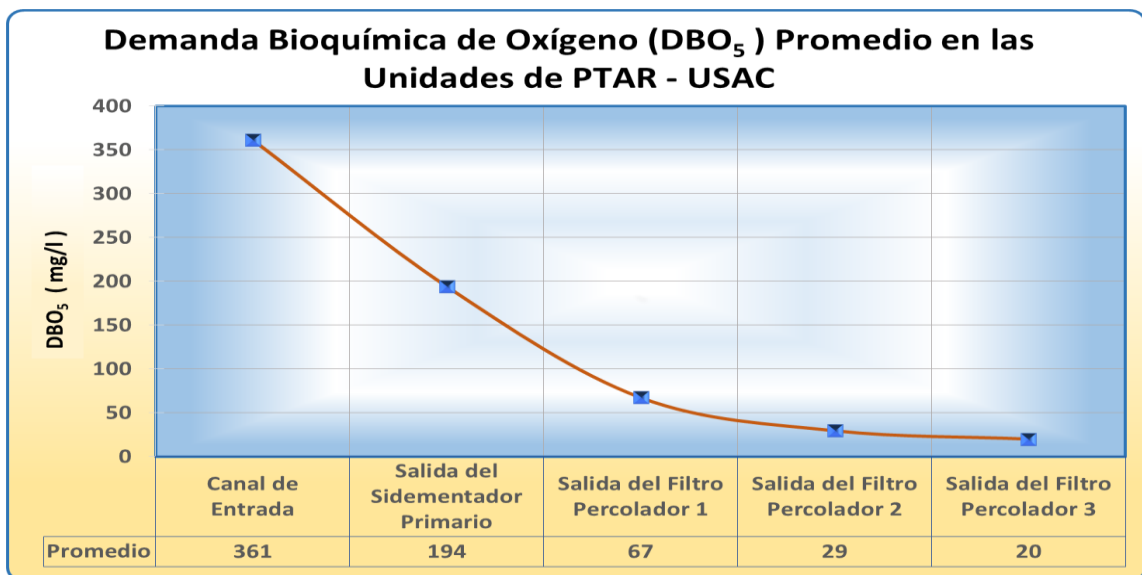
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Demanda Química de Oxígeno (DQO) promedio en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) promedio en las unidades de la planta de tratamiento de aguas residuales de USAC



Fuente: elaboración propia.

4.2. Características de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento de agua residual de la USAC, y valores de coeficientes determinados con el Modelo Eckenfelder.

A partir de los resultados obtenidos en el laboratorio de las concentraciones de la materia orgánica, DBO₅, y la demanda química de oxígeno, DQO, se calcula el Índice de Biodegradabilidad, IB, que presenta el agua residual que ingresa a la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC. La composición de las aguas residuales no es homogénea, sino es variada, según las horas de muestreo e igual, según los días que se realice dicho muestreo; además las aguas residuales domesticas tienen características de calidad establecidas como de baja y alta carga orgánica.

La biodegradabilidad de estas sustancias es la propiedad que permite que las aguas residuales puedan ser depuradas por medio de microorganismos, los que utilizan estas sustancias como alimento y fuente de energía para su metabolismo y reproducción, con producción de la biomasa (Martínez, 2005).

Tabla XII. Valores recomendado de biodegradabilidad.

	Poco Biodegradable	Biodegradable	Muy Biodegradable
DBO ₅ / DQO	< 0.2	0.2 - 0.4	> 0.4

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1997)

Las muestras se realizaron los análisis de DBO₅ y DQO, cuya relación de biodegradabilidad, considerándose biodegradable el agua residual que se trata en la planta de tratamiento de USAC. Se muestra en la siguiente tabla:

Tabla XIII. Índice de biodegradabilidadde aguas residuales de la USAC

Número de Muestreo	Fecha de Muestreo	Índice de Biodegradabilidad
1	12-10-2017	0.47
2	02-11-2017	0.64
3	21-02-2018	0.60
4	28-02-2018	0.48
5	07-03-2018	0.52
6	14-03-2018	0.56
7	11-04-2018	0.46
8	12-04-2018	0.52
9	18-04-2018	0.53
10	20-04-2018	0.56
	Mínimo	0.46
	Máximo	0.64
	Promedio	0.53
	Desviación estándar	0.06

Fuente: elaboración propia.

4.3. Carga orgánica e hidráulica con la que se esté en operación la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC.

La carga orgánica es el flujo másico de materia orgánica por unidad de volumen del filtro. Se expresa como la velocidad a la que se suministra al sistema la materia orgánica disuelta (kg DQO/ m3.día o kg DBO5/m3.día). Entre mayor sea la carga orgánica, mayor será la relación alimento: microorganismos, y más rápido crecerán las bacterias del sistema que consumen el sustrato.

La capa microbiana tiene una parte aerobia que está en contacto con el agua residual, donde se consumen la materia orgánica y el oxígeno, es decir, donde se lleva a cabo el proceso de depuración. La zona de la biopelícula que está en contacto con la pared del empaque o soporte es la anaerobia. Los microorganismos en ella alcanzan una fase de metabolismo endógeno, debido a que no cuentan con una provisión de sustrato externo cuando la biopelícula es gruesa y producen gases; con la desactivación y presencia de gases la

biopelícula es incapaz de mantenerse adherida al material de soporte. Este fenómeno se llama desgajamiento y es función de las cargas orgánica e hidráulica (influye en la velocidad de corte sobre la película y en la de crecimiento de los microorganismos en el seno de la biopelícula en conjunto (Metcalf & Eddy, 1997).

Tabla XIV. Tabla de carga orgánica y carga hidráulica para filtros percoladores

Elemento	Baja carga	Carga intermedia	Carga alta	Muy alta carga	Desbaste
Carga hidráulica, m ³ /m ² . día	1.20 - 3.50	3.50 - 9.40	9.40 - 37.55	11.7 - 70.40	47.0 - 188.0
Carga orgánica, Kg DBO ₅ /m ³ . día	0.08 - 2.40	1.80 - 2.40	0.90 - 1.80	0.48 - 1.60	1.60 - 8.00
Eficiencia de eliminación de DBO ₅ , %	8 - 90	50 - 70	65 - 85	65 - 80	40 - 65

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1997)

La carga hidráulica es equivalente a la velocidad superficial que tiene el agua residual al pasar por el área plana del corte transversal del filtro. Sin embargo, el flujo sobre el medio filtrantes, la velocidad real es mayor; pero el incremento de la carga hidráulica es proporcional a la velocidad real sobre el medio filtrante aunque no se conozca su valor. Como límite superior se debe prever que no haya desprendimiento excesivo de biomasa y que el espacio disponible para el flujo ascendente del aire no se obstaculice. El aumento de la carga hidráulica disminuye el tiempo de residencia del líquido que pasa a través del medio filtrante y simultáneamente aumenta la cantidad del líquido retenido.

Según los resultados obtenidos en laboratorio de las muestras, se tiene las cargas orgánicas calculadas, estos constituyen las cargas orgánicas de operación de la planta de tratamiento de agua residual de USAC; además, se puede precisar que el volumen del medio filtrante se calcula considerando 2.0 m

de medio filtrante más 1.0 m de medio de soporte, es decir, la altura del medio filtrante es de 3.0 m; esto se puede verificarse en los planos originales de construcción, y también el plano adjunto en anexo.

Tabla XV. Tabla de carga orgánica e hidráulica en la planta de aguas residuales de USAC.

Número de Muestreo	Fecha de Muestreo	Carga Orgánica (Kg/m ³ .día)	Carga Hidráulica (m ³ /m ² .día)
1	12-10-2017	0.16	4.06
2	02-11-2017	0.14	3.74
3	21-02-2018	0.21	4.22
4	28-02-2018	0.17	4.56
5	07-03-2018	0.20	5.80
6	14-03-2018	0.17	3.19
7	11-04-2018	0.23	5.45
8	12-04-2018	0.17	4.93
9	18-04-2018	0.12	3.46
10	20-04-2018	0.13	3.30
	Mínimo	0.12	3.2
	Máximo	0.23	5.8
	Promedio	0.17	4.27
	Desviación estándar	0.03	0.90

Fuente: elaboración propia.

4.3.1. Valores de coeficientes cinéticos determinados por otros autores, según el modelo de Eckenfelder.

Generalmente, los coeficientes cinéticos de tratamiento de agua residual son realizados como la constante de tratabilidad a una determinada profundidad del medio filtrante, cuya constante esta expresado en la ecuación 1.1; esta constante no considera, la carga hidráulica ni la superficie especifica del medio filtrante; esto mucho influye en la remoción de la materia orgánica por los filtros percoladores. Según la literatura, revisada, estos coeficientes de Eckenfelder no son regularmente determinados, porque las normas no lo exigen y otro demanda mayor trabajo en la determinación de los parámetros en el laboratorio y en el

campo. A fin de resumir algunos valores determinados por los autores se presente el siguientes cuadro resumen de las constates determinadas, de hecho, cada uno tiene su particularidad en sus prácticas y las condiciones ambientales; pero, se aprecia que hay concordancia relativa en los valores determinados.

Tabla XVI. **Coefficientes cinéticos determinados con el modelo de Eckenfelder para agua residual domésticas**

Coeficiente cinéticos determinados con el modelo de Eckenfelder: $Se = Sa * e^{\left(\frac{-k*Z}{q^n}\right)}$						
Nº	$k = \frac{m^n}{\text{días}^n}$	n (*)	Temp. (°C)	Referencia	Autor	Año
1	$k = \frac{0.080 * m^{0.5}}{\text{días}^{0.5}}$	0.50	28	Proceos para el trtameinto biológico de aguas residuales industriales	Carlos Menéndez Gutierrez	2007
2	$k = \frac{0.003 * m^{0.574}}{\text{días}^{0.574}}$	0.574	26	Evaluación de los parámetros y constantes cinéticas de un modelo experimental para el tratamiento de aguas residuales domésticas	Gonzalo Efrain Alulima Granda	2017
3	$k = \frac{0.062 * m^{0.45}}{\text{días}^{0.45}}$	0.45	23	Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño.	Jairo alberto Romero Rojas	2010
4	$k = \frac{0.08 * m^{0.55}}{\text{días}^{0.55}}$	0.55	26	Bioingeniería de aguas residuales	Alvaro Orozco Jaramillo	2014
5	$k = \frac{0.0294 * m^{0.673}}{\text{días}^{0.673}}$	0.673	25	Estudio de coeficientes cinéticos de filtros percoladores por etapas, con medio filtrante de piedra volcánica	Zenobio Huamani Galindo	2018
(*) Adimensional						

Fuente: elaboración propia.

4.4. Estudio de coeficientes cinéticos en los filtros percoladores por etapas con medio filtrante de piedra volcánica en la planta de tratamiento de agua residual de la USAC

El objetivo principal del estudio es el cálculo de los coeficientes cinéticos de filtros percoladores por etapas (en serie) con medio filtrante de piedra volcánica. Cada filtro por etapa está compuesto por cuatro módulos; los otros dos filtros siguientes también tienen la misma configuración, con excepción de los medios filtrantes de Tipo “B” son de granulometría de 3 ½”, 3” y 2 ½” respectivamente. Según los planos, la estratificación del medio filtrante de piedra volcánica, tiene un arreglo de 0.50 m de capa en la parte superior de granulometría tipo “A”, la cual se considera una capa distribuidor, porque las tuberías manifold no cumple una buena distribución sobre la superficie del filtro; luego, hay una capa intermedia de 2.00 m, con granulometría de tipo “B” y por debajo hay otra capa de 1.00 m con granulometría de tipo “A”; entonces, para el cálculo de los coeficientes se considera una profundidad total de 3.00 m por cada filtro, siendo estas la capa intermedia y de soporte.

La granulometrías del medio filtrante de piedra volcánica fue estudiada, al detalle y los resultados obtenidos son de 4.90, 4.70 y 4.1 pulgadas para los filtros I, II y III respectivamente (Ramírez, 2012); lo cual considero que, este trabajo ha realizado al material superficial (Estrato tipo A), es decir, a la capa de distribución de 0.50 m en cada filtro, y no así los tres estratos que tiene cada filtro.

El estudio de coeficientes cinéticos se realiza solo en la unidad principal de tratamiento de esta planta de tratamiento de agua residual USAC, que es el filtro percolador por etapas con medio filtrante de piedra volcánica sin recirculación; así, los resultados de la remoción de la materia orgánica, reportados como DBO5 a la salida de cada filtro se ha utilizado para el cálculo de los coeficientes

cinéticos; para esto, se ha procesado los datos con la metodología indicado, y en este caso se utiliza la ecuación dado por Eckenfelder. A continuación se muestra el procedimiento de los cálculos realizados para la determinar los coeficientes cinéticos del estudio:

- Se elabora el cuadro de sustrato remanente ($S_a/S_e \cdot 100$).
- Se calculan los valores de $\ln(S_a/S_e \cdot 100)$ para cada profundidad (Z); se determina para cada muestra.
- Se grafica en el eje de abscisa la profundidad (Z) expresado en m, y en el eje ordenada $\ln(S_a/S_e \cdot 100)$. En la grafica se obtiene las curvas respectivas para cada muestreo, y se determina las pendientes respectivas; el pendiente: $m = (-K S Z / q_n)$
- Se calcula $\ln(m)$ y también $\ln(q)$, siendo (q) la carga superficial.
- Se grafica $\ln(m)$ versus $\ln(q)$, cuya pendiente es igual a la pendiente (n) de la ecuación de Eckenfelder; y también en este gráfico, para $q = 1.00$, se puede obtener en el gráfico el valor de K.
- Los cuadros y gráficos ilustrativos es de elaboración propia.

Tabla XVII. Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅, según profundidad en el filtro percolador (Z)

Profundidad en el Filtro Percolador (m)	Demanda Bioquímica de Oxígeno : DBO ₅ (mg/lt)									
	(*)	361	343	448	335	306	472	372	318	312
0.0	211.5	182.0	236.0	183.5	172.0	203.0	207.5	186.0	174.0	186.0
2.0	65.61	58.71	85.59	68.64	75.07	68.16	85.95	69.89	50.90	53.74
4.0	32.3	28.3	43.8	35.8	43.7	29.8	48.5	37.0	23.1	23.9
6.0	16.26	13.53	22.87	19.28	26.01	13.09	26.94	20.24	11.25	10.96
Fecha	12-10-2017	02-11-2017	21-02-2018	28-02-2018	07-03-2018	14-03-2018	11-04-2018	12-04-2018	18-04-2018	20-04-2018
(*) Canal de entrada al PTAR - USAC										

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Fracción del sustrato remanente (%)**

Profundidad en el Filtro Percolador (m)	Fracción de Sustrato Remanente : (%)									
	(*)	361.0	343.0	448.0	335.0	306.0	472.0	372.0	318.0	312.0
0.0	58.6	53.1	52.7	54.8	56.2	43.0	55.8	58.5	55.8	53.6
2.0	18.2	17.1	19.1	20.5	24.5	14.4	23.1	22.0	16.3	15.5
4.0	8.9	8.2	9.8	10.7	14.3	6.3	13.0	11.6	7.4	6.9
6.0	4.5	3.9	5.1	5.8	8.5	2.8	7.2	6.4	3.6	3.2
Tasa (lt/seg/m ²)	0.047	0.043	0.049	0.053	0.067	0.037	0.063	0.057	0.040	0.038
(*) DBO ₅ en Canal de entrada al PTAR - USAC										

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Logaritmo natural de Fracción de sustrato Remanente**

Profundidad en el Filtro Percolador (m)	Logaritmo Natural de Fracción de Sustrato Remanente									
	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.0	2.900	2.840	2.950	3.020	3.200	2.670	3.140	3.090	2.792	2.740
4.0	2.190	2.110	2.280	2.368	2.660	1.841	2.567	2.455	2.000	1.930
6.0	1.505	1.372	1.630	1.750	2.140	1.020	1.980	1.851	1.283	1.150

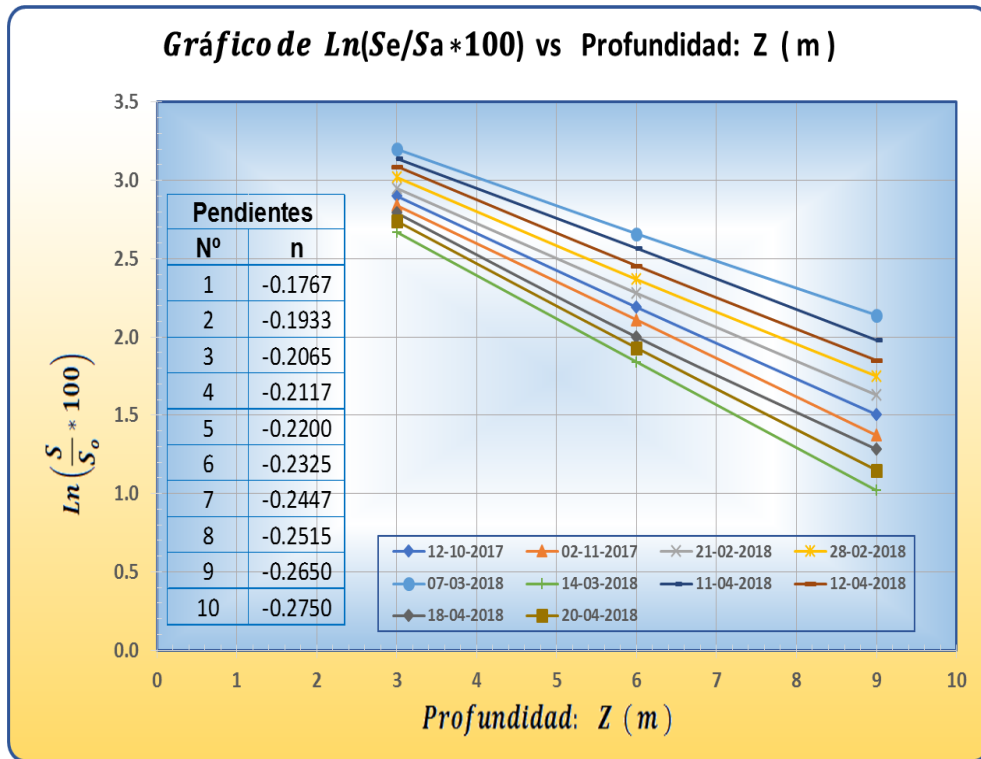
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Tasa de filtración y pendientes; y logaritmo natural de ambos**

Numero de Muestreo	Pendiente (m)	Tasa (q) (lt/seg/m ²)	(m)	(q)
			Ln (m)	Ln (q)
1	0.177	0.067	-1.733	-2.700
2	0.193	0.063	-1.644	-2.764
3	0.207	0.057	-1.577	-2.864
4	0.212	0.053	-1.553	-2.943
5	0.220	0.049	-1.514	-3.020
6	0.233	0.047	-1.459	-3.058
7	0.245	0.043	-1.408	-3.140
8	0.252	0.040	-1.380	-3.220
9	0.265	0.038	-1.328	-3.266
10	0.275	0.037	-1.291	-3.300

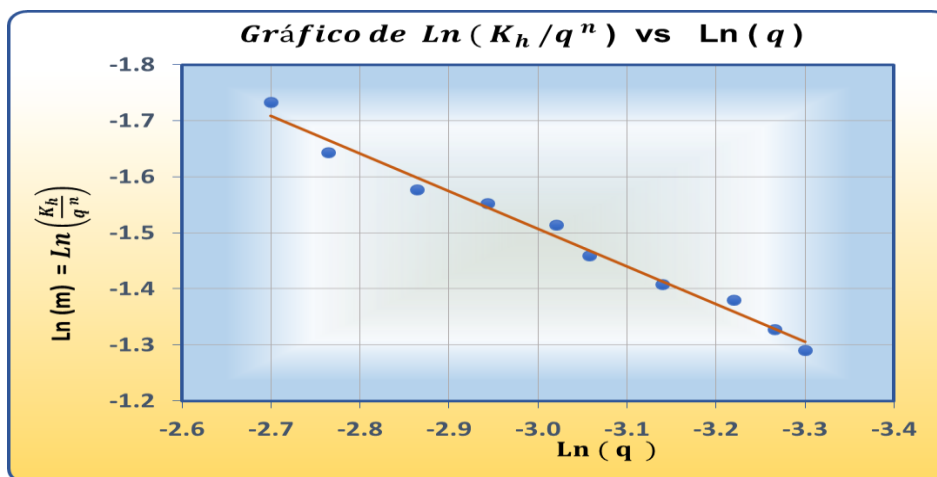
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Logaritmo natural de la fracción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) versus la Profundidad (Z)**



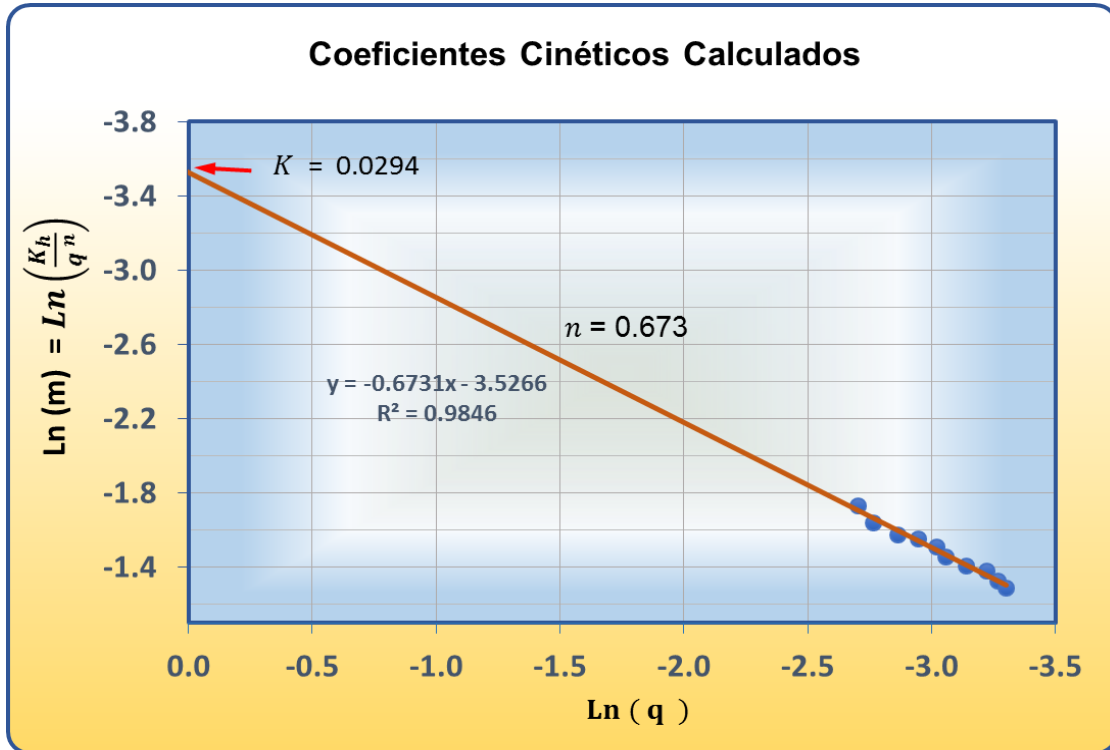
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Logaritmo natural de pendiente (m) igual a $\ln(k/q^n)$ vs $\ln(q)$**



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Logaritmo natural de pendiente (m) igual a $\text{Ln}(k/q^n)$ vs $\text{Ln}(q)$, para la determinación de K y n



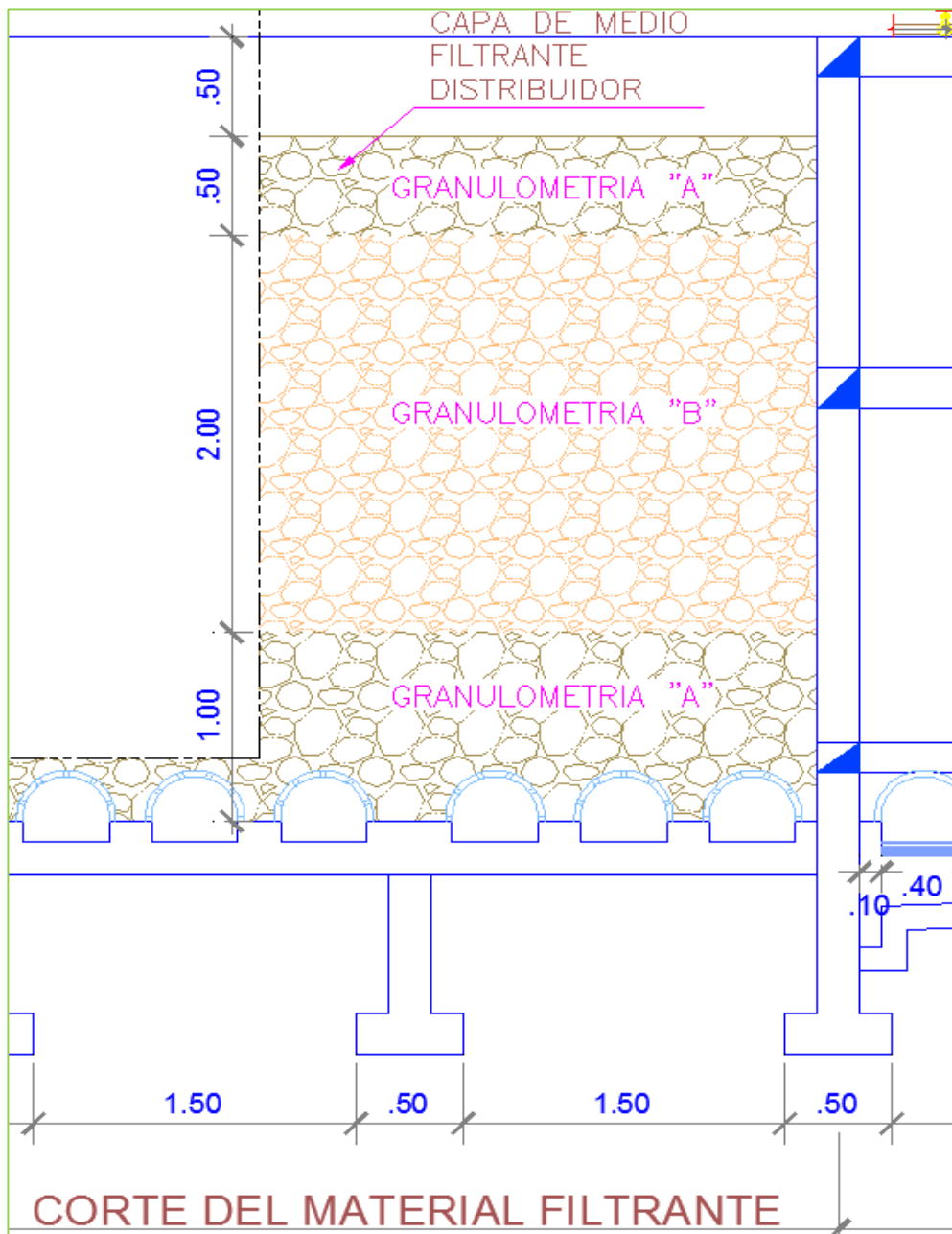
Fuente: elaboración propia.

4.5. Prueba del modelo de la ecuación Eckenfelder, con los coeficientes determinados

A fin de validar el modelo matemático, dado por Eckenfelder, con los coeficientes calculados, se realiza los cálculos de sustrato remanente en función a la profundidad del filtro para cada tasa de filtración que se utilizó en el estudio. Los resultados obtenidos utilizando la ecuación con los coeficientes cinéticos calculados, si es consistente como un modelo matemático para el diseño del filtro percolador con medio filtrante de piedra volcánica, porque los resultados son valores muy próximos a los determinados en la fase experimental; pero se hace constar que el medio filtrante para este modelo debe de ser de piedra volcánica

de 2 ½" a 3 ½", y para una temperatura de 25 °C, y con tasas de carga orgánica e hidráulica bajas.

Figura 27. Corte en perfil del filtro percolador de la planta de agua residual de USAC



Fuente: (Pazos, 1989)

En la figura 27 se muestra el corte en perfil del filtro (Ver también en el plano de anexo), en la que la capa superior de 0.50 cm sirve como distribuidor del agua residual en el medio filtrante, porque los tubos distribuidores no cumplen la distribución uniforme y actualmente está en mal estado.

A continuación se muestra el cuadro de resultados calculados con la ecuación de Eckenfelder con los coeficientes cinéticos calculados; en seguida, se detalla los cuadros y gráficos del estudio, siendo todos ellos una elaboración propia.

El modelo matemático de Eckenfelder resultante con los coeficientes determinados, según la ecuación (1.12) puede expresar como sigue:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-K Z / q^n}$$

Donde:

S_e = concentración de sustrato soluble del efluente, mg/L.

S_a = concentración de sustrato soluble del afluente, mg/L.

K = constante cinético de remoción, m^n/d^n ; este parámetro considera el área superficial específica del medio filtrantes (m^2/m^3).

Z = profundidad del medio filtrante (m)

q = carga superficial ($m^3/m^2 \cdot \text{día}$)

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-0.0294 * Z / q^{0.673}}$$

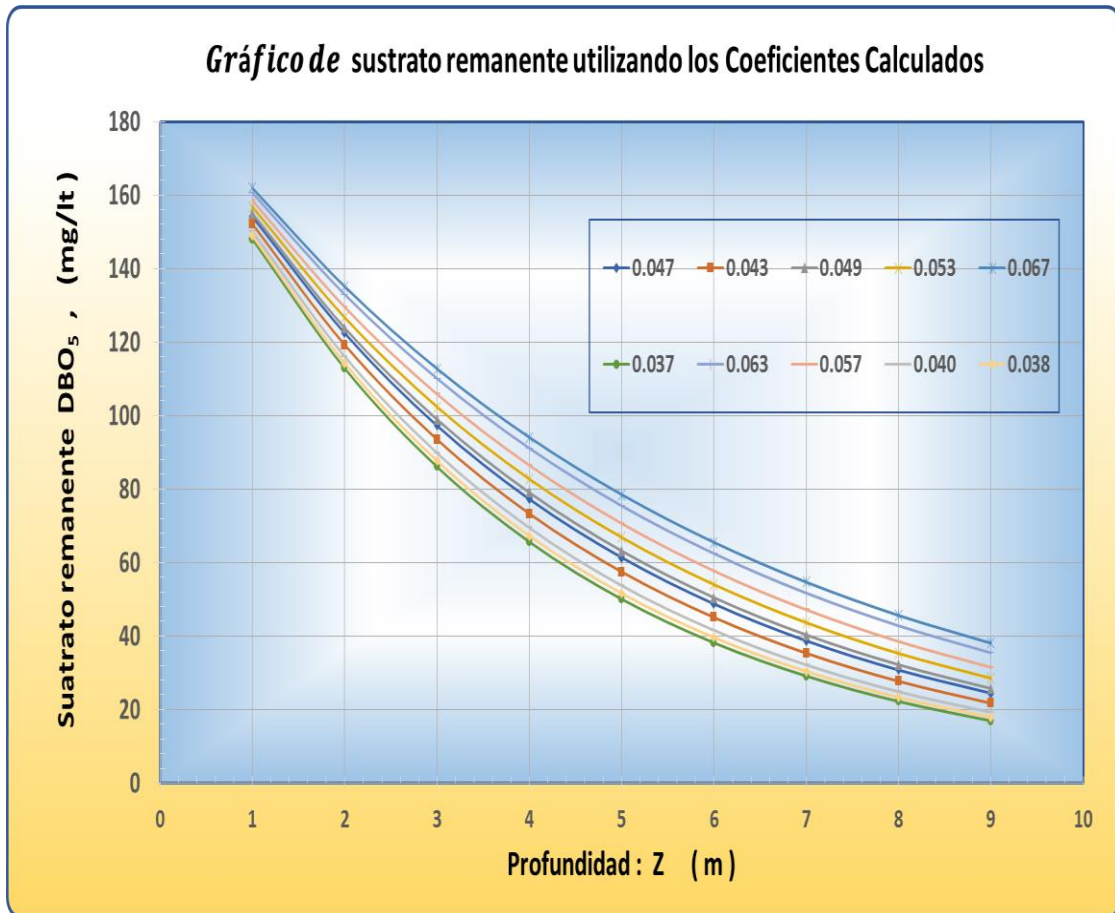
Tabla XXI. **Sustrato remanente calculado con la ecuación de Eckenfelder con los coeficientes determinados**

Demanda Biológica de Oxígeno DBO ₅ Remanente, según Ecuación: $S_e = S_a * e^{\left(\frac{-0.0294 * Z}{q^{0.673}}\right)}$										
Profundidad: Z (m)	Tasa de filtración (lt/seg/m ²)									
	0.047	0.043	0.049	0.053	0.067	0.037	0.063	0.057	0.040	0.038
1	154	152	155	157	162	148	161	159	150	149
2	122	119	124	127	135	113	133	130	116	114
3	97	94	99	102	113	86	110	106	90	88
4	77	73	79	83	94	66	91	86	69	67
5	61	57	63	67	79	50	75	71	54	52
6	49	45	50	54	66	38	62	58	42	40
7	39	35	40	44	55	29	52	47	32	30
8	31	28	32	35	46	22	43	39	25	23
9	24	22	26	29	38	17	35	31	19	18

Nota: Sa = 194 mg/lt

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Sustrato remanente calculado, utilizando los coeficientes determinados con el modelo de Eckenfelder**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. El estudio tiene el objetivo de determinar los coeficientes cinéticos del modelo de Eckenfelder, para el diseño de filtro percolador; lo cual se realizó los análisis de laboratorio para determinar los datos; a través de estos se determinaron los coeficientes cinéticos; luego es válida la hipótesis alternativa.
2. Los filtros percoladores son unidades e proceso de tratamiento de agua residual eficientes, en la remoción de la materia orgánica, lográndose eficiencias altas de remoción; por tanto es una alternativa técnicas muy potencial para su aplicación en los proyectos de saneamiento, por sus ventajas técnicas y económicas, y además estas unidades necesitan un mínimo de mantenimiento en los costos de operación y mantenimiento.
3. Esta planta opera con un tren de tratamiento de las unidades existentes en la planta de USAC, y creo no se ha previsto dos aspectos contaminantes que existe en el agua residual: la remoción de los patógenos y también de los organismos parásitos. Ambientalmente, estos son las condiciones para el vertimiento e inclusive para el reuso de las aguas residuales tratadas. En todo caso, se deberá de implementarse estas unidades para su cumplimiento, más cuando la norma de Acuerdo Gobernativo 236-2006 no precisa estos parámetros
4. Visto la planta, existe las ventanas de ventilación, pero es solo por un lado, lo cual reduce la eficiencia de tratamiento. Si hay una posibilidad de

mejorar se deberá de colorar la ventilación en los 4 lados afín de producir un flujo del aire convectivo.

5. La bibliografía disponible, actualmente no existe otra ecuación que resulte de mayor precisión que la ecuación dada por Eckenfelder. Si bien es cierto que hay bastante estudio en el tema de la biopelícula, pero ninguno de los modelos son utilizados para los diseño de los filtros biológicos o percoladores. En la planta, existe las ventanas de ventilación, pero es solo por un lado, lo cual reduce la eficiencia de tratamiento. Si hay una posibilidad de mejorar se deberá de colorar la ventilación en los 4 lados afín de producir un flujo del aire convectivo.
6. El modelo para la determinación de coeficientes cinéticos, no utiliza los modelos de la reacción o la cinética microbiana aerobia, si no utiliza el modelo de balance de masas de entrada y salida.

RECOMENDACIONES

1. En la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC, a fin de cumplir con la normativa de vertidos a cuerpos receptores vigente, a partir del año 2020, se debe analizar entre el aprovechamiento del efluente, mediante su reuso o la implementación de un sistema de tratamiento terciario para la remoción nutriente.
2. También para la remoción de los parásitos, es necesarios diseñar una laguna de maduración o filtros de arena; solo estas unidades aseguran la remoción de los patógenos. Esto sugiere, porque en normas de otros países, se exige la remoción de los helmintos.
3. Diseñar e implementar una pantalla para la retención de los sólidos flotantes que se ubican en el espejo de agua de los sedimentadores primario y secundario.
4. Gestionar ante las autoridades universitarias que la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC, sea administrada por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, de forma tal que se convierta en un centro de investigación e innovación con tecnologías apropiadas para el tratamiento del agua residual.
5. La unidad de digester de lodos, recibe todas las cargas de sólidos del sedimentador primario y secundario, pero esta está digiriendo en forma anaerobia, por tanto, hay emisión de metano, lo cual debe de estar

protegido y conducido hacia un quemador para no contribuir como un gas invernadero.

6. Si se considera hacer mejoras en las unidades con laguna de maduración o con filtros de arena, los filtros percoladores solo puede trabajar en dos etapas sustituyendo el tercero por una de estas unidades.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Alulima, G. (2017). *Evaluación de los parámetros y constantes cinéticas de un modelo experimental para el tratamiento de aguas residuales doméstica*. Quito - Ecuador.
- 2 Alvarado, R. (1987). *Evaluación de filtro vertical de piedra pómez como post-tratamiento del efluente de una planta de filtros percoladores*. Guatemala: USAC - ERIS.
3. American Water Works Association. (2002). American Public Health Association. *Standar methods for the examination of waterand wastewater* 21 edition, EUA. Estados Unidos.
4. BID. (2017). *Las aguas residuales como un recurso, no un desperdicio: el Foco de América Latina y el Caribe en la Semana Mundial del Agua*. El banco interamericano de desarrollo coordina las sesiones de américa latina y el caribe durante la semana mundial del agua, bid - anuncios.
- 5 Clair, N. S., Perry, L. M., & Gene, F. P. (2000). *Química para Ingeniería Ambiental*. Colombia: Enma Ariza H.
- 6 Costerton, R. B. (1995). *Microbial Biofilms*. Anual review Microbiology.
- 7 Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Quebecor T1-T2-T3.

- 8 Cruz, H. (1990). *Evaluación de los filtros percoladores para tratamiento de aguas negras*. Guatemala: USAC.
- 9 Cruz, H. J. (1990). *Evaluación de dos filtros percoladores para tratamiento de aguas residuales*. Guatemala: USAC - ERIS.
- 10 DIGESA -PERÚ. (2010). *Reglamento de la calidad del agua para consumo humano*. Perú: Ministerio de Salud.
- 11 Ferrer, J., & Seco, A. (2014). *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. México: Alfaomega.
- 12 Gonzalez, M., & López, F. (2008). *Comportamiento de un rector de biopelícula para tratamiento de aguas residual a diferentes velocidades de flujo*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, Vol. 7 N° 3, 11.
- 13 Klapper, I., & Rupp, J. (2002). *Viscoelastic fluid description of bacterial biofilm material properties*. *Biotechnology & Bioengineering*.
- 14 Lara, S., & Mazzoco, R. (2008). *Efecto de la carga hidráulica y orgánica sobre la remoción másica de un empaque estructurado en un filtro percolador*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9.
15. Lee, J. W. (2004). *Relación de agua, el saneamiento y higiene con la salud*. EUA: OMS.
16. Lewandowski, Z., & Stoodley, P. (1995). *Experimental and conceptual studies on mass transport in biofilms*. *Water Science Technology*.
17. López, M. (2001). *Evaluación de filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San*

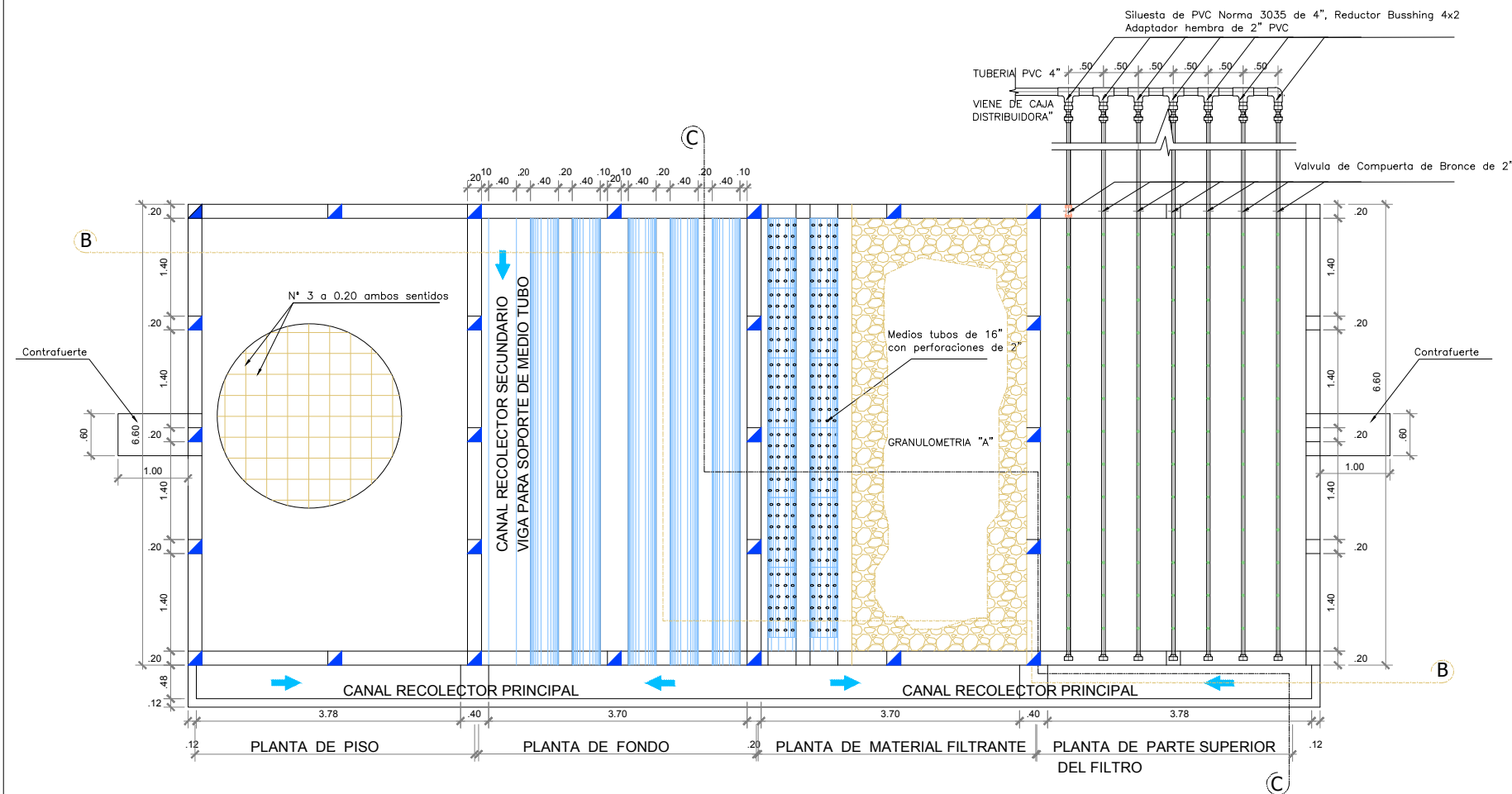
Carlos, a través de la eficiencia de la remoción de Estreptococos fecales. Guatemala: USAC.

18. MARN. (2006). Acuerdo Gubernativo 236-2006. *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos.* Guatemala.
19. Martínez, L. (2005). *Estudio de evaluación de una EDAR para la adecuación legislativa.* España.
20. Menéndez, C., & Pérez, J. (2007). *Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales.* La Habana - Cuba: Editorial Universitaria.
21. Metcalf, & Eddy. (1997). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización;* Tomo 1. México: McGraw - Hill / Interamericana Editores.
22. Much Santos, Z. (2005). *Química y microbiología sanitaria. Manual de laboratorio.* Curso de maestría en Ingeniería Sanitaria. Guatemala, USAC - ERIS: USAC.
25. Noyola, A., & Morgan, S. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas.* Mexico: Instituto de Ingeniería-UNAM.
26. Oakley, S. (2011). *Tratamiento de aguas residuales domésticas en Centroamérica. Un manual de experiencias, diseño, operación y sostenibilidad.* EUA: USAID.

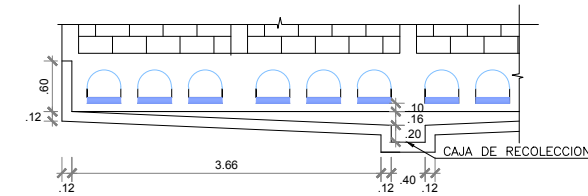
27. OMS. (2017). *Salubridad y calidad del agua* . Agua, saneamiento e higiene, OMS.
28. OMS. (2018). Agua, datos y cifras. Agua, OMS.
29. Orozco, A. (2014). *Bioingeniería de aguas residuales*. Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – ACODAL.
30. Pazos, A. (1989). *Investigación de filtros percoladores*. Guatemala: USAC.
31. Pelczar, M. (1982). *Microbiología*. México : McGraw Hill.
32. Pocasangre, A. (2017). Apuntes de clases. Procesos de tratamiento de aguas residuales. Guatemala: USAC.
33. Ramírez, O. L. (2012). Investigación de la eficiencia de las etapas en serie del filtro percolador de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la USAC. Guatemala: ERIS.
34. Romero, J. A. (2010). Tratamiento de aguas residuales, Teoría y principios de diseño. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
35. Tejero, J. I., & Esteban, A. L. (2012). Tecnologías de biopelícula innovadoras para la depuración de aguas residuales. Veinticinco años de investigación del grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria, 13.

ANEXOS

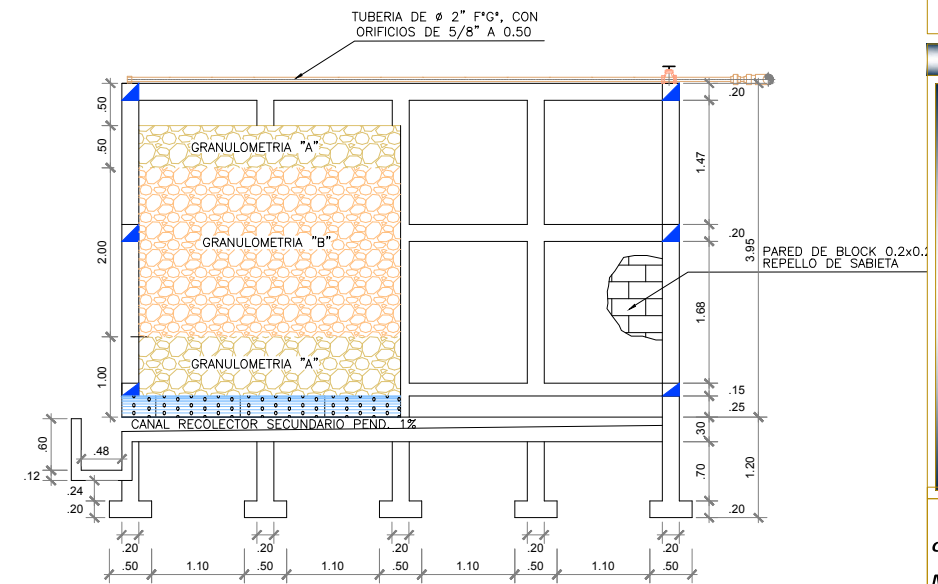
Planos de filtros percolador de la planta de agua residual de USAC.



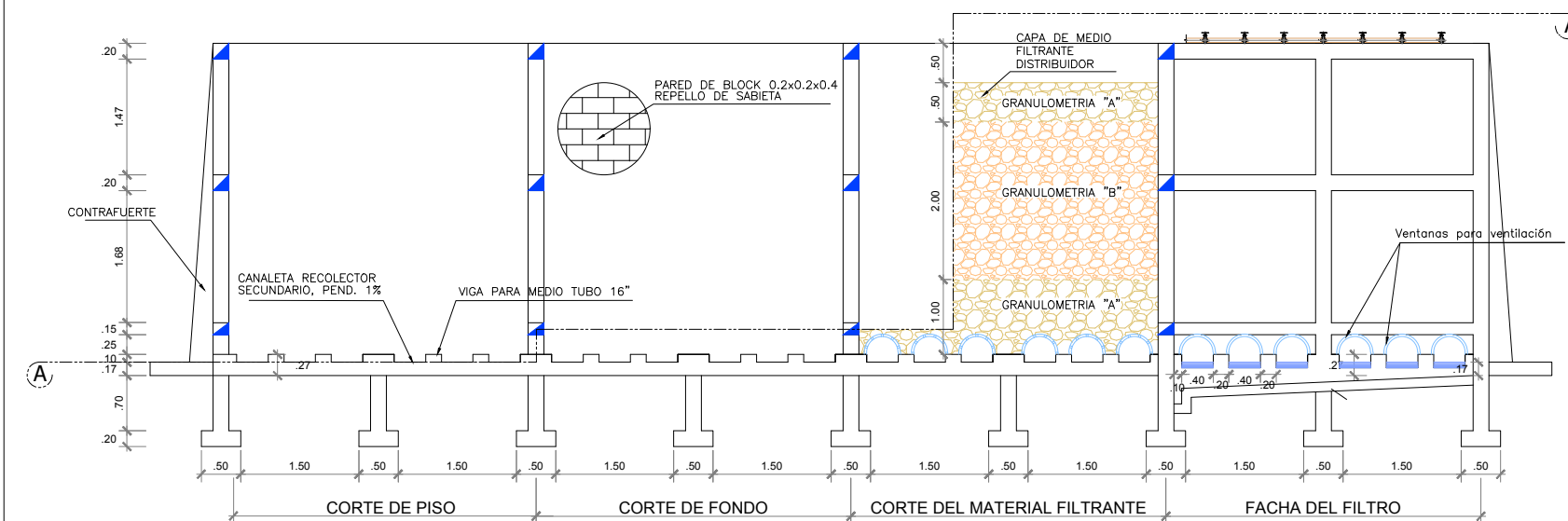
PLANTA CORTE A - A Escala 1:40



CANAL RECOLECTOR PRINCIPAL
Escala 1:40



PLANTA CORTE C - C Escala 1:40



PLANTA CORTE B - B Escala 1:40

NOTA :

ESTE PLANO FUE
TRANSCRITO DE LOS
PLANOS ORIGINALES DE
CONSTRUCCION.

NOTA :

SUPERFICIE ESPECIFICA DE
MEDIO FILTRANTE, PIEDRA :
60 - 70 m²/m³.

NOTA :

- 1) EN ESTE PLANO SE MUESTRA UN FILTRO COMPUESTO DE 4 MODULOS
- 2) EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO CONSISTE EN UN SISTEMA DE TRES FILTROS CONECTADOS EN SERIE, LOS TRES FILTROS TIENEN LAS MISMAS DIMENSIONES Y ÚNICAMENTE VARIA LA GRANULOMETRÍA; LA CUAL SE INDICA EN LA SIGUIENTE TABLA:

FILTRO	GRANULOMETRÍA
I	3 1/2"
II	3"
III	2 1/2"

- 3) LA UBICACION DE LOS TRES FILTROS SE INDICA EN EL PLANO DE PLANTA GENERAL.
- 4) ESPECIFICACIONES DE CONCRETO

$$f'c = 211 \text{ Kg/cm}^2 = 3000 \text{ psi}$$

ACERO DE REFUERZO

$$f'y = 2,800 \text{ kg/cm}^2 = 40,000 \text{ psi}$$

- 5) COTAS DE PLATAFORMA

FILTRO I	: 464.17
FILTRO II	: 459.17
FILTRO III	: 454.27

REVISOR :

MIEMBRO :

MIEMBRO :

CATEDRATICOS:

MSc. ING. PEDRO C. SARAVIA CELIS

MSc. ING. ADAN POCASANGRE COLLAZOS

DR. ING. FELIX AGUILAR CARRERA

ALUMNO :

ZENOBIO HUAMANI GALINDO

**PLANTA DE
TRATAMIENTO DE
AGUAS
RESIDUALES USAC**

PLANO :

PLANTA Y CORTES

LAMINA :

PL - 01

UBICACION :

DEPARTAMENTO : GUATEMALA

DISTRITO : GUATEMALA

FECHA :

JUNIO 2018

ESCALA :

INDICADA