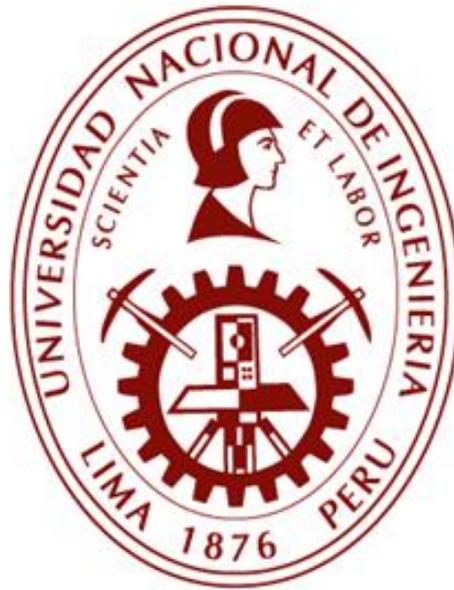


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



TESIS

**“Conversión del nitrógeno en un filtro percolador de baja tasa en  
el distrito de San Andrés de Tupicocha”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
SANITARIO

ELABORADOR POR:

PANTOJA VILCHEZ CÉSAR JESÚS

 [0009-0001-8535-3395](https://orcid.org/0009-0001-8535-3395)

ASESORA:

DRA. ING. ROSA ELENA YAYA BEAS

 [0000-0002-6140-4266](https://orcid.org/0000-0002-6140-4266)

LIMA - PERÚ

2024

---

Citar/How to cite	Pantoja Vilchez [1]
Referencia/Reference	[1] C. Pantoja Vilchez, " <i>Conversión del nitrógeno en un filtro percolador de baja tasa en el distrito de San Andrés de Tupicocha</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---

---

Citar/How to cite	(Pantoja, 2023)
Referencia/Reference	Pantoja, C. (2023). <i>Conversión del nitrógeno en un filtro percolador de baja tasa en el distrito de San Andrés de Tupicocha</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

### ***Dedicatoria***

*A mis padres María, Andrés y a mi hermana. Por su amor y apoyo incondicional en toda esta etapa para culminar la presente tesis. A todas las personas que me acompañaron directa o indirectamente, muchas gracias.*

## **Agradecimientos**

A mi familia, en especial a mi madre por su apoyo incondicional y sus consejos para ser perseverante y poder culminar la presente investigación.

Mi especial agradecimiento a la Dra. Rosa Yaya Beas por todo el apoyo brindado, las recomendaciones y el asesoramiento en el desarrollo del tema de investigación durante cada etapa.

A todo el equipo de la Universidad de Stuttgart, al Dipl.-Ing. Christian D. León, a la Dr. Hannah Kosow y al Dr. Stephan Wasielewski, quienes hicieron posible la instalación de la planta de tratamiento piloto y me orientaron a través de todo el proceso; en especial al Dr. Stephan Wasielewski por todo el apoyo y la guía que me brindó a lo largo de la elaboración de la presente tesis.

A las autoridades del distrito de San Andrés de Tupicocha, por brindarme todas las facilidades y el apoyo para poder mantener la planta piloto en buenas condiciones a lo largo del desarrollo de toda la investigación.

Un agradecimiento especial a todos mis amigos y compañeros que me apoyaron con sugerencias y consejos durante la elaboración de la presente tesis.

## Resumen

El tema de investigación de la presente tesis tuvo como finalidad analizar la conversión de los nutrientes, tanto las formas del nitrógeno como del fósforo, en el tratamiento de aguas residuales. Para esto se utilizó una tecnología de bajo costo tanto en la construcción como en la operación y mantenimiento.

El sistema de la planta piloto está conformado por dos sedimentadores primarios, un filtro percolador con un medio de soporte, seguida de un sedimentador. La planta fue alimentada por las aguas residuales municipales del distrito de San Andrés de Tupicocha ubicada a una altitud de 3606 msnm, mediante una derivación de la matriz de la red de alcantarillado. La investigación se dividió en 3 etapas, la etapa de arranque, la etapa 1 y la etapa 2; esto debido a las variaciones estacionarias y también por la cantidad de pruebas realizadas.

Finalmente, los resultados obtenidos del filtro percolador con un tiempo de retención promedio de 5 a 6 horas, demostró una variación de la eficiencia en la eliminación de la DQO total de 63.56 a 77.34%, en nitrógeno total de 13.33 a 44.44%, en el fosfato total del 47.64%. y en turbiedad de 87.78 a 90.08%. Así mismo se obtuvo en el afluente y en el efluente del tren de tratamiento una concentración promedio de DQO de 506.5 mg/L y 105.48 mg/L respectivamente.

Palabras claves – Filtro percolador, nutrientes, sedimentador primario, demanda química de oxígeno.

## **Abstract**

The purpose of the research topic of this thesis was to analyze the conversion of nutrients, both in the forms of nitrogen and phosphorus, in the treatment of wastewater. For this, low-cost technology was used both in construction and in operation and maintenance.

The pilot plant system consists of two primary settlers, a trickling filter with a support medium, followed by a settler. The plant was fed by municipal wastewater from the San Andrés de Tupicocha district located at an altitude of 3,606 meters above sea level, through a derivation of the sewer network matrix. The investigation was divided into 3 stages, the start-up stage, stage 1 and stage 2; this due to stationary variations and also due to the number of tests carried out.

Finally, the results obtained from the trickling filter with an average retention time of 5 to 6 hours, showed a variation of the efficiency in the elimination of the total COD of 63.56 a 77.34%, in total nitrogen from 13.33 to 44.44%, in the total phosphate of 47.64%. and in turbidity from 87.78 to 90.08%. Likewise, an average COD concentration of 506.5 mg/L and 105.48 mg/L respectively was obtained in the influent and effluent of the treatment train.

Keywords – Trickling filter, nutrients, primary sludge, chemical oxygen demand.

## Tabla de Contenido

Resumen .....	v
Abstract .....	vi
Introducción .....	xiv
Capítulo I: Parte introductoria del trabajo .....	1
1.1.    Generalidades .....	1
1.2.    Descripción del problema de investigación .....	1
1.3.    Objetivo del estudio .....	1
1.3.1.    Objetivo general .....	1
1.3.2.    Objetivos específicos .....	1
1.4.    Antecedentes investigativos .....	2
1.5.    Hipótesis de la investigación .....	4
Capítulo II: Marco teórico y legal .....	5
2.1.    Marco teórico .....	5
2.1.1.    Filtro percolador .....	5
2.1.1.1.    Descripción general .....	5
2.1.1.2.    Clasificación del filtro percolador .....	6
2.1.1.3.    Ventajas y desventajas de los filtros percoladores .....	7
2.1.1.4.    Características del medio filtrante .....	8
2.1.1.5.    Sistemas de distribución .....	10
2.1.1.6.    Sistema de recolección .....	11
2.1.1.7.    Desarrollo de la biopelícula .....	11
2.1.1.8.    Ventilación .....	13
2.1.1.9.    Temperatura .....	14
2.1.1.10.    Proceso de eliminación de DBO y nitrificación .....	14
2.1.2.    Nitrógeno en las aguas residuales .....	16
2.1.2.1.    Ciclo biológico del nitrógeno .....	16
2.1.2.2.    Nitrificación .....	18

2.1.2.3.	Desnitrificación .....	20
2.1.3.	Fósforo en las aguas residuales .....	22
2.1.3.1.	Fósforo .....	22
2.1.3.2.	Eliminación biológica del fósforo.....	23
2.2.	Marco conceptual .....	25
2.2.1.	Limites máximo permisibles para efluentes de planta de tratamiento de aguas residuales domésticas .....	26
2.2.2.	Estándares de calidad ambiental del agua (ECA).....	26
Capítulo III:	Desarrollo del trabajo de investigación .....	28
3.1.	Ubicación de la planta piloto .....	28
3.2.	Descripción del sistema .....	28
3.2.1.	Agua residual del afluente .....	28
3.2.2.	Componentes del sistema .....	28
3.3.	Etapas de la investigación .....	34
3.4.	Análisis realizados .....	35
3.4.1.	Puntos de monitoreo.....	35
3.4.2.	Parámetros monitoreados.....	36
3.4.2.1.	Oxígeno disuelto y Temperatura.....	37
3.4.2.2.	Temperatura ambiental.....	37
3.4.2.3.	Conductividad eléctrica.....	37
3.4.2.4.	pH.....	37
3.4.2.5.	Turbiedad .....	37
3.4.2.6.	Solidos sedimentables.....	37
3.4.2.7.	Demanda química de oxígeno .....	38
3.4.2.8.	Nitrógeno total .....	38
3.4.2.9.	Amonio .....	38
3.4.2.10.	Nitrito .....	39
3.4.2.11.	Nitrato.....	39
3.4.2.12.	Ortofosfato y Fosfato total.....	39

3.4.3.	Procedimiento para el muestreo .....	40
3.4.4.	Frecuencia de monitoreo .....	40
3.5.	Modificaciones realizadas a lo largo de la investigación .....	43
Capítulo IV:	Análisis y discusión de resultados .....	44
4.1.	Observaciones realizadas a lo largo de la investigación .....	44
4.2.	Resultados de cada parámetro .....	44
4.2.1.	Temperatura ambiental.....	49
4.2.2.	Temperatura del agua residual .....	49
4.2.3.	pH.....	50
4.2.4.	Oxígeno disuelto.....	51
4.2.5.	Turbiedad .....	51
4.2.6.	Sólidos sedimentables.....	52
4.2.7.	Demanda química de oxígeno total .....	53
4.2.8.	Nitrógeno total, amonio, nitritos y nitratos .....	54
4.2.9.	Fosfato total y ortofosfatos.....	55
4.3.	Verificación de la hipótesis.....	55
4.3.1.	Variación de los compuestos nitrogenados.....	56
4.3.2.	Efecto del oxígeno disuelto.....	61
4.3.3.	Efecto del pH en el proceso de nitrificación .....	63
4.3.4.	Relación entre la DQO y la turbiedad .....	64
4.3.5.	Efecto de la temperatura en la remoción de DQO .....	67
4.3.6.	Variación del fosfato total y los ortofosfatos .....	68
Conclusiones	.....	71
Recomendaciones	.....	73
Referencias bibliográficas	.....	74
Anexos	.....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ciclo general del nitrógeno en el medio ambiente. ....	17
<b>Figura 2.</b> Distribución de las especies del nitrógeno a lo largo del tratamiento de las aguas residuales con nitrificación. ....	19
<b>Figura 3.</b> Distribución de formas de fósforo en aguas residuales no tratadas. ....	23
<b>Figura 4.</b> Derivación de la tubería matriz hacia la planta piloto. ....	28
<b>Figura 5.</b> Esquema de la planta piloto. ....	29
<b>Figura 6.</b> Tanque de sedimentación 1. ....	30
<b>Figura 7.</b> Tanque de sedimentación 2. ....	31
<b>Figura 8.</b> Filtro percolador y discos de distribución con sus respectivas dimensiones. El diámetro de los orificios perforados (ventanas) tenían un diámetro de 1½". ....	32
<b>Figura 9.</b> (a) Ingreso y distribución del agua residual, (b) Tapa de polietileno agujereada, (c) Parrilla de fierros y ladrillos, (d) Agujeros para oxigenación. ....	33
<b>Figura 10.</b> Tanque de sedimentación 2. ....	34
<b>Figura 11.</b> Puntos de muestreo en la planta piloto ....	35
<b>Figura 12.</b> Algas en los sedimentadores 1 y 2. ....	44
<b>Figura 13.</b> Variación de la temperatura ambiental a lo largo del desarrollo de la investigación. ....	49
<b>Figura 14.</b> Variación de la temperatura del agua residual en los cuatro puntos en las tres etapas de la investigación. ....	50
<b>Figura 15.</b> Variación de la turbiedad del agua residual en los cuatro puntos en las tres etapas de la investigación. ....	52
<b>Figura 16.</b> Variación de los sólidos sedimentables del agua residual en los cuatro puntos en las tres etapas de la investigación. ....	53
<b>Figura 17.</b> Variación de la demanda química de oxígeno en los cuatro puntos en las tres etapas de la investigación. ....	54
<b>Figura 18.</b> Variación del nitrógeno total y demás formas del nitrógeno en los puntos Pm P4 de la etapa de arranque. ....	57
<b>Figura 19.</b> Variación del nitrógeno total y demás formas del nitrógeno en todos los puntos de la etapa 1. ....	59

<b>Figura 20.</b> Variación del nitrógeno total y demás formas del nitrógeno en todos los puntos de la etapa 2.	61
<b>Figura 21.</b> Variación del oxígeno disuelto en los cuatro puntos en las tres etapas de la investigación.....	62
<b>Figura 22.</b> Variación promedio del pH en los cuatro puntos en las tres etapas de la investigación.....	64
<b>Figura 23.</b> DQO y turbiedad en la etapa de arranque.....	65
<b>Figura 24.</b> DQO y turbiedad en la etapa 1.....	66
<b>Figura 25.</b> DQO y turbiedad en la etapa 2.....	67
<b>Figura 26.</b> Temperatura promedio del agua residual y eficiencia de la remoción de DQO en todas las etapas para todos los puntos de monitoreo. ....	68
<b>Figura 27.</b> Porcentaje de remoción de fósforo en la etapa 3 para todos los puntos de monitoreo.	70

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Aplicaciones y parámetros de diseño representativos del filtro percolador al tratar efluentes primarios. ....	7
<b>Tabla 2.</b>	Definición de los diversos términos utilizados para ver las formas del nitrógeno. 18	
<b>Tabla 3.</b>	Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR. ....	26
<b>Tabla 4.</b>	Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.....	27
<b>Tabla 5.</b>	Resumen de las características físicas del filtro percolador calculadas según la DQO y el caudal promedio.....	32
<b>Tabla 6.</b>	<i>Diferentes etapas del experimento</i> .....	34
<b>Tabla 7.</b>	<i>Descripción de los puntos monitoreados</i> .....	36
<b>Tabla 8.</b>	Frecuencia de monitoreo de todos los parámetros.....	42
<b>Tabla 9.</b>	Resultados promedio de todos los parámetros en la etapa de arranque. ....	45
<b>Tabla 10.</b>	Resultados promedio de todos los parámetros en la etapa 1. ....	45
<b>Tabla 11.</b>	Resultados promedio de todos los parámetros en la etapa 2. ....	46
<b>Tabla 12.</b>	Valores máximos y mínimos de todos los parámetros en las distintas etapas. 48	

## GLOSARIO

FP: Filtro percolador

DQO<sub>Total</sub>: Demanda química de oxígeno total

TN: Nitrógeno total

NH<sub>4</sub>-N: Amonio

NO<sub>2</sub>-N: Nitrito

NO<sub>3</sub> -N: Nitrato

FT: Fosfato total

PO<sub>4</sub>-P: Orto Fosfato

T: Temperatura

T<sub>A</sub>: Temperatura ambiental

CE: Conductividad eléctrica

OD: Oxígeno disuelto

Tb: Turbiedad

SS: Sólidos Sedimentables

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico

## Introducción

Actualmente existe un gran problema a nivel nacional en relación al tratamiento de las aguas residuales, las plantas de tratamiento de aguas residuales no llegan a cubrir el déficit de la cobertura y además no pueden brindar una correcta operación y mantenimiento de las mismas. Por ello es necesario encontrar una tecnología de tratamiento de aguas residuales en el ámbito rural que sea de bajo costo, que tenga una operación sencilla y que sea sostenible en el tiempo.

Así mismo la eliminación de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales es necesaria para reducir la eutrofización de las aguas receptoras. Por lo que es necesario realizar investigaciones relacionadas a la remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en filtros percoladores a temperaturas bajas, a fin de poder obtener información necesaria en diversos pisos altitudinales asociados a la geografía peruana, con el fin de promover el reúso de las aguas residuales tratadas.

La presente investigación se realizó en un periodo de 8 meses donde se evaluó el comportamiento del filtro percolador como tratamiento secundario de las aguas residuales de la localidad de San Andrés de Tupicocha.

Se evaluó diversos parámetros fisicoquímicos y la remoción de la materia orgánica en forma de la DQO. Se enfatizó el comportamiento de los nutrientes, tanto en las formas del nitrógeno (nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno total) como del fósforo (fosfato total y ortofosfatos).

Las etapas de la investigación se plantearon con el fin de observar los cambios entre el arranque de la planta piloto y cuando la planta ya trabajaba en óptimas condiciones. Para esto se incrementó la frecuencia de medición de los principales parámetros mencionados, con el fin de determinar con mayor exactitud las eficiencias y además obtener mayor información de los cambios que se realizaron para mejorar el sistema.

# **Capítulo I: Parte introductoria del trabajo**

## **1.1. Generalidades**

La presente investigación permitirá determinar el comportamiento de los nutrientes y la remoción de carga contaminante del filtro percolador, en la localidad de San Andrés de Tupicocha (provincia de Huarochirí y departamento de Lima). También se podrá determinar si la tecnología usada es recomendable bajo las condiciones críticas que se encuentra, ya que la planta piloto se encuentra a gran altitud (3606 msnm) donde la baja concentración de oxígeno puede llegar a ser un factor limitante para el proceso de nitrificación.

## **1.2. Descripción del problema de investigación**

La presente investigación tiene como propósito estudiar un tratamiento de bajo costo conformado por filtros percoladores, para determinar su comportamiento en la eliminación de contaminantes con particular énfasis en la remoción de nutrientes en un rango de temperatura ambiental de 3°C a 15°C y su posterior reutilización.

## **1.3. Objetivo del estudio**

### **1.3.1. Objetivo general**

- Evaluar los porcentajes de conversión del nitrógeno y fósforo presente en las aguas residuales domésticas.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Medir los nitritos, nitratos, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, fosfato total y ortofosfatos.
- Monitorear el pH, temperatura, oxígeno disuelto y la demanda química de oxígeno (DQO).
- Conocer los problemas operativos en un filtro percolador de baja tasa.
- Evaluar las relaciones de resultados del nitrógeno con el pH, temperatura, oxígeno disuelto y la DQO.

#### 1.4. Antecedentes investigativos

En 1999, se realizó una investigación en Pakistán acerca de la eficiencia de los filtros percoladores según el tipo de medio. Se probaron tres tamaños de arcilla expandida seca y tres tipos de medios plásticos (anillos Kaldnes, anillos Norton y una estera enrollada de césped artificial Finturf) en columnas de 1.5 m de altura y 11 cm de diámetro. Se añadió agua sintética que contenía 1.5 mg de nitrógeno amoniacal total y 1 mg de  $\text{PO}_4^{3-}$  a una velocidad de 0.5 l/min y una temperatura de 15°C. Al final del período experimental, la tasa de nitrificación fue del 100% en las columnas de fracción de Leca, el 80% en las columnas de anillo de Kaldnes, el 60% en las columnas de anillo de Norton y el 40% en las columnas de césped artificial. La velocidad de nitrificación fue de entre 0.1 y 0.2g de nitrógeno amoniacal total  $\text{m}^2/\text{d}$  en las diferentes columnas, y la carga hidráulica fue inferior a 0.25  $\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{d})$  (Lekang O-I, 1999).

En Estados Unidos (2018), se realizó una investigación sobre el tratamiento de efluentes de un digestor anaerobio de alta resistencia en filtros percolador a escala de laboratorio para nitrificación con posterior uso de filtros anaerobio para desnitrificación. Se investigaron cinco tipos de medios en los filtros de goteo: biocarbon, carbón activado granular, zeolita, anillos de Pall y grava. Además, se probaron tres medios en cinco filtros desnitrificantes: arena (S), astillas de madera de bambú (B), astillas de madera de eucalipto (E), bambú con arena (B + S) y eucalipto con arena (E + S). Como resultado el biochar, el GAC, la zeolita, los anillos Pall y los medios de grava tuvieron eficiencias de eliminación de amoníaco de 83, 87, 85, 30 y 80%, respectivamente, que fue principalmente por nitrificación a nitrato. Para los filtros anaerobios, S, B, B + S, E y E + S tuvieron eficiencias de eliminación de nitrato de 30, 66, 53, 35 y 35%. De esto se seleccionó el biocarbon y las astillas de madera de bambú como la mejor combinación de medios para el filtro secuencial y el tratamiento secuencial del filtro anaerobio (Forbis-Stokes, 2018).

En ese mismo año, Perez Hiraida (2018) estudió la combinación de filtro percolador y filtración de arena lenta para aguas residuales municipales. El sistema funcionó con una

carga hidráulica de  $1.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$  y tres cargas orgánicas diferentes (0.9, 0.64 y 0.67  $\text{kgDBO}/(\text{m}^3.\text{d})$ ) para tres fases diferentes, un filtro de arena rápido y tres filtros de arena lentos de 0,10 m de diámetro, 0,6 m de columna de arena y tres cargas hidráulicas diferentes de 0,15, 0,3 y 0,6 m/h. Como resultado, el filtro percolador mostró tasas de eliminación de DQO, TN, y TP de entre 80-88%, 30-40% y 16-32% respectivamente.

A nivel nacional, Jaramillo y Paredes (2019) evaluaron la eficiencia de un sistema de dos filtros percoladores en serie para el tratamiento de aguas residuales domésticas. La investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de un sistema de dos filtros percoladores en serie para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Al finalizar el proceso, todos los parámetros cumplieron el LMP. La eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales con dos filtros percoladores en serie, al final del ensayo (40 días) fue de 98.12%, 96.36% y 95.76% para  $\text{DBO}_5$ , DQO y SST, respectivamente.

Por otro lado, Rodriguez Alberth (2014) estudió la eficiencia en un filtro sumergido y un filtro percolador en el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas, en la parte selva de nuestro país. Se realizó dos tratamientos, con y sin inyección de aire artificial. Se determinó que las mejores eficiencias de remoción del filtro sumergido y filtro percolador fueron a los 80 y 60 días respectivamente, desde el inicio de funcionamiento cuando se inyectó aire artificial. Finalmente, para el sistema de tratamiento biológico en serie, formado por filtro sumergido más el filtro percolador con inyección de aire artificial se obtuvo eficiencias de 83%, 95% y 89% para los parámetros SST, DBO y DQO respectivamente.

Conforme a lo mencionado líneas arriba puede concluirse que los filtros percoladores permiten una remoción de 35% del nitrógeno total a condiciones de  $19^\circ\text{C}$  y  $22^\circ\text{C}$  de temperatura.

### **1.5. Hipótesis de la investigación**

El filtro percolador alcanzará eficiencias promedio de 35% del nitrógeno total en temperaturas ambientales que se encuentran en el rango de 3°C a 15°C.

## **Capítulo II: Marco teórico y legal**

### **2.1. Marco teórico**

#### **2.1.1. Filtro percolador**

##### **2.1.1.1. Descripción general**

El filtro percolador es un sistema de tratamiento de aguas residuales que utiliza un medio de soporte fijo de roca o plástico sobre el cual se distribuye continuamente el agua residual. Consiste básicamente de un tanque en el cual hay un material altamente permeable, por donde las aguas residuales se filtran hacia los desagües del fondo, esto permite que haya un crecimiento bacteriano en la superficie del material de soporte denominado biofilm que permite el contacto entre los microorganismos y la materia orgánica. (Von Sperling y Chernicharo, 2005)

Según Metcalf y Eddy (2014) el filtro percolador está clasificado como un proceso aerobio de cultivo fijo, este es un proceso de tratamiento biológico en el que los microorganismos que se encargan de la conversión de la materia orgánica del agua residual en gases y tejido celular; están adheridos a un medio inerte, como piedras, escorias y plásticos diseñados específicamente para cumplir con esta función. Estos tipos de procesos se emplean para eliminar la materia orgánica del agua residual y además también son empleados para llevar a cabo el proceso de nitrificación.

Los filtros percoladores típicos tienen tres características principales; el medio de soporte, el sistema de distribución y el sistema de drenaje subterráneo. El medio filtrante es un material que tiene una alta superficie específica, el cual tiene una alta porosidad y permite una buena ventilación; el medio funciona como una estructura que une y permite el crecimiento de la biopelícula cuando las aguas residuales fluyen sobre este; entre los medios filtrantes más utilizados están los empaques de plástico y las rocas. El sistema de distribución tiene como función aplicar las aguas residuales uniformemente sobre el medio filtrante; uno de los tipos de sistemas de distribución más usados es el distribuidor giratorio

que puede ser impulsado tanto hidráulicamente como mecánicamente, el distribuidor consiste de 2 o más brazos que están unidos al eje de rotación donde giran en un plano horizontal, estos brazos son huecos y contienen boquillas por donde las aguas residuales descargan. Por último, el sistema de drenaje se encarga de recolectar las aguas residuales que atravesaron el filtro y además proporciona un espacio para que el aire ingrese a las aguas residuales (Metcalf y Eddy, 2014).

La población de microorganismos que está adherida al medio filtrante descompone el material orgánico presente en el agua residual; en las capas externas la materia orgánica se degrada bajo la acción de microorganismos aerobios. Cuando estos crecen, aumentan el espesor de la película y el oxígeno se consume, por lo tanto, se establece un entorno anaerobio en la superficie del medio filtrante. Por otro lado, los microorganismos aerobios de la parte externa utilizan la materia orgánica que adsorbieron, lo que genera que los microorganismos de la parte interna no dispongan de suficiente sustrato y entren en una fase de crecimiento endógena. En esta fase se pierde la capacidad de adherencia al medio, entonces son arrastrados debido a la acción del lavado del agua residual, ocasionando que se desprendan de la película y dando así el inicio al crecimiento de nuevos microorganismos. Este fenómeno de arrastre de la biomasa está básicamente en función a la carga hidráulica y orgánica del filtro que incide sobre la tasa de metabolismo de la película biológica (Romero, 2010). El crecimiento de la biopelícula tiene que estar en equilibrio con el desprendimiento de esta para evitar la obstrucción del medio filtrante, de tal manera que la biopelícula retenga la suficiente biomasa activa para mantenerse estable (Henze et al., 2008).

#### **2.1.1.2. Clasificación del filtro percolador**

Los filtros percoladores a menudo se clasifican de acuerdo con las tasas de carga orgánica aplicada expresadas como  $\text{kgDBO}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ . Las aplicaciones y las cargas de los filtros de goteo se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Aplicaciones y parámetros de diseño representativos del filtro percolador al tratar efluentes primarios.*

Parámetro de diseño	Unidad	Baja tasa de eliminación de DBO	Alta tasa de remoción de DBO	Alta tasa de remoción de DBO	Remoción de DBO y nitrificación	Remoción parcial de DBO
Eficiencia de remoción de DBO	%	80 - 90	80 - 90	70 - 90	85 - 90	40 - 70
Tipo de material		Roca	Roca	Plástico	Plástico/Roca	Plástico
Ventilación	Tipo	Natural	Aireación forzada	Aireación forzada	Aireación forzada	Aireación forzada
Carga orgánica volumétrica	kg DBO/(m <sup>3</sup> .d)	0.08 - 0.4	0.6 - 1.6	0.6 - 2.4	0.08 - 0.4	1.6 - 3.5
Carga hidráulica	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d)	1 - 4	4 - 40	15 - 75	5 - 16	40 - 100
Relación de recirculación	Qr/Q	0 - 1	1 - 2	1 - 2	1 - 2	0 - 2
Profundidad	m	1 - 2.5	1 - 2.5	3 - 12	3 - 12 / 1 - 2.5	0.9 - 6
Calidad del efluente	DBO, mg/L	< 30	< 30	< 30	< 20	> 30
	NH <sub>4</sub> -N, mg/L	< 5	> 5	> 5	< 3	

Fuente: Metcalf and Eddy (2014).

Las aplicaciones de los filtros de goteo y las tasas de carga correspondientes variarán dependiendo del objetivo del tratamiento (Metcalf y Eddy, 2014).

### 2.1.1.3. Ventajas y desventajas de los filtros percoladores

EPA (2000) nos comenta ciertas ventajas y desventajas respecto al uso de los filtros percoladores, las cuales se explayan a continuación:

#### Ventajas

- Apropiado para comunidades de tamaño pequeño a mediano.
- Al tener una ventilación natural, el sistema requiere de menos energía.

- Eficaz en el tratamiento de altas concentraciones de compuestos orgánicos según el tipo de medio utilizado.
- La operación es más simple, sin problemas de control del desperdicio de lodos.
- No se tiene problemas con respecto a la acumulación de los lodos en las unidades posteriores de clarificación.
- Los lodos tienen mejores propiedades de espesamiento.
- No se necesita un mantenimiento exhaustivo de los equipos.
- Mejor recuperación de cargas tóxicas de choque.

### **Desventajas**

- Mayor DBO y concentración de sólidos en el afluente.
- Dificultad en el mantenimiento de la biopelícula (o biofilm) por exceso de desprendimiento.
- Mayor sensibilidad del sistema a temperaturas más bajas.
- Dificultad para poder lograr una remoción biológica de nitrógeno y fósforo en comparación con diseños de crecimiento suspendido de eliminación biológica de nutrientes de un sistema biológico de lodos individuales.

#### **2.1.1.4. Características del medio filtrante**

El medio filtrante es fundamental para el desempeño del filtro percolador; este sirve como un soporte para el crecimiento de la biomasa, por donde se filtran las aguas residuales. Se produce la oxigenación debido a que el aire atraviesa los espacios vacíos del medio, generando de este modo las reacciones aerobias (Von Sperling y Chernicharo, 2005).

Los tipos de medio filtrantes se pueden dividir, por lo general, en medios de roca y medios de alta velocidad, que son los medios de plástico. Aunque en la actualidad rara vez se construyen filtros percoladores con medios filtrantes de roca.

Los medios de soporte de rocas tienen un peso unitario alto, una superficie específica baja y un espacio vacío reducido; por lo que generan grandes limitaciones operativas y de diseño. Por ejemplo, los requerimientos estructurales serán mayores cuanto mayor sea el peso del medio, por ello debe ser menor la profundidad del material para evitar su aplastamiento. Las profundidades típicas son del orden de los 2 m, lo que restringe la eficiencia del tratamiento; el área superficial relativamente baja y los espacios vacíos restringen las cargas orgánicas que se pueden aplicar; además la baja superficie específica limita la capacidad de crecimiento de la biopelícula y por ende la capacidad de tratamiento (Grady et al., 2011).

Los medios de soporte utilizados en filtros percoladores son de plástico corrugado y anillos de plástico; se caracterizan por tener un peso unitario menor, un área de superficie específica más alta y un mayor vacío que los medios de roca. (Grady et al., 2011). Estos materiales son mucho más ligeros que las rocas, lo que permite que no tengan problemas estructurales y sean mucho más altos, mayores a los 6 m; como consecuencia disminuye el área para su instalación. Esto también se ve influenciado en la aplicación de cargas orgánicas volumétricas mucho mayores que las utilizadas por los medios de roca, pero por otro lado el costo es mayor (Von Sperling y Chernicharo, 2005).

Según Grady et al. (2011) los medios de roca, debido a sus características físicas, ha hecho que generalmente utilicen una carga orgánica total en el rango de 0.5 a 1.5  $\text{kgDBO}_5/(\text{m}^3.\text{d})$ . Por otro lado, los medios de alta tasa, al tener profundidades del medio mayores, se pueden utilizar en una gama más amplia de cargas orgánicas volumétricas de hasta 3.5  $\text{kg DBO}_5/(\text{m}^3.\text{d})$ . Los filtros percoladores de rocas y de medios artificiales de alta tasa son similares cuando se tiene cargas orgánicas relativamente bajas, menores a 1  $\text{kg DBO}_5/(\text{m}^3.\text{d})$ ; pero cuando la carga orgánica total es mayor, el rendimiento del medio de alta tasa es superior.

### **2.1.1.5. Sistemas de distribución**

La función del sistema de distribución es el de distribuir uniformemente las aguas residuales sobre la biopelícula que se forma dentro del medio filtrante, el flujo de las aguas residuales debe aplicarse a una determinada velocidad que haga que el medio se mantenga húmedo y sin obstrucciones. En caso la aplicación sea desigual o las velocidades de flujo insuficientes, darán como resultado una humectación deficiente que genera la aparición de zonas muertas, estas producirán olores a medida que los sólidos se acumulen y aumentarán el crecimiento de organismos molestos (WEF, 2010).

Según Von Sperling y Chernicharo (2005) la alimentación de los filtros percoladores se puede lograr a través de dos tipos de distribuidores, los distribuidores fijos y los distribuidores móviles (rotativos). El estándar para estos procesos es la distribución hidráulica rotatoria, pero los distribuidores fijos también se utilizan, solo que se limitan a instalaciones pequeñas (EPA, 2000).

La distribución uniforme con un distribuidor fijo, es muy difícil de lograr, debido a que las pequeñas aberturas son propensas a obstruirse, lo que interrumpe la distribución del flujo. Por ello los distribuidores fijos tienen una estrecha relación entre la distribución del flujo y el potencial de taponamiento. Los problemas operativos de los distribuidores fijos se pueden mitigar de una forma muy limitada mediante el uso de flujos de recirculación altos para aumentar la carga hidráulica total aplicada (Grady et al., 2011).

El sistema de distribución giratorio está compuesto por uno o más tubos horizontales, los cuales están unidos a una columna central giratoria. Gray (2004) indica que los orificios de salida están espaciados a lo largo del brazo, además estos se empiezan a distanciar más a medida que se alejan del centro para asegurar una carga uniforme. Los orificios deben ser lo suficientemente grandes para garantizar que no se produzcan obstrucciones o en todo caso se prefiere orificios con placas de salpicadura para garantizar la máxima dispersión, estos son preferibles a los chorros o boquillas de aspersión.

Los brazos distribuidores generan su movimiento de rotación mediante la energía del chorro de las aguas residuales que atraviesan el grupo de orificios (Von Sperling y Chernicharo, 2005). Los sistemas accionados por motor eléctrico, son de velocidad fija y variable, de tal forma que proporcionan flexibilidad operativa sobre todo en horas de muy bajo caudal de afluente.

#### **2.1.1.6. Sistema de recolección**

El sistema de recolección consta de drenajes en la parte inferior del filtro percolador las cuales se encargan de recolectar las aguas residuales tratadas además de los sólidos que se pudieron desprender del medio filtrante para poder transportarlas hacia la siguiente unidad (EPA, 2000). Tiene como propósito, además de transportar las aguas residuales, circular el aire a través del medio filtrante para proporcionar el oxígeno necesario para el metabolismo aerobio.

Existen desagües subterráneos convencionales hechos con pilares o vigas de hormigón sobre un contrapiso de concreto reforzado, estos son usados a menudo para filtros percoladores de roca. Por otro lado los sistemas de drenaje con puntales de plástico y rejillas reforzadas con fibra de vidrio son utilizados para otro tipo de medios. (Zhu y Rothermel, 2014).

#### **2.1.1.7. Desarrollo de la biopelícula**

Las biopelículas son capas relativamente delgadas que están compuestas por microorganismos que se adhieren y crecen en las superficies (Bitton, 2005). La comunidad biológica de la biopelícula está conformada por una comunidad compleja de bacterias, hongos, protozoos, algas y otro tipo de mesofauna. Cuando las aguas residuales tienen bajo contenido de carbono, las bacterias nitrificantes pueden estar presentes en grandes cantidades. (Riffat, 2013)

Los microorganismos de la biopelícula forman microcolonias separados por espacios de agua abiertos, de tal manera que el flujo de las aguas residuales transita por

estos espacios para así permitir la difusión de nutrientes y oxígeno al interior de las células (Bitton, 2005). Esta solo se desarrolla si la superficie recibe un suministro constante de nutrientes; por lo tanto, un factor importante que afecta el rendimiento es la eficacia de los medios para redistribuir las aguas residuales, con el fin de evitar la canalización y generar la máxima humectación del medio (Gray, 2004). Según Mara y Horan (2003) el desarrollo de películas se basa en la capacidad de los diferentes organismos para crecer en las superficies. Esta adhesión a las superficies se debe principalmente a la disponibilidad del sustrato; al medio ambiente nocivo, especialmente corrientes de agua de alta velocidad; la interacción de fuerzas físicas como atracción, adsorción y adhesión.

En la etapa de la purificación se da la adsorción de nutrientes orgánicos en la película. Las partículas finas son floculadas por los microorganismos mediante la secreción de polímeros extracelulares y son adsorbidos en la superficie de la película, aquí es donde junto con los nutrientes orgánicos son degradados por enzimas extracelulares secretadas por bacterias y hongos heterótrofos (Gray, 2004). Bitton (2005) nos dice que la estructura de la biopelícula se mantiene debido a que las células microbianas se anclan a la superficie mediante sustancias poliméricas extracelulares. Los microorganismos, que componen la película, adsorben y sintetizan los nutrientes solubles en las aguas residuales y los productos a partir de la actividad enzimática extracelular. (Gray, 2004)

Gray (2004) menciona que la oxigenación de la biopelícula se da cuando el oxígeno se difunde en los intersticios, primero al líquido y luego a la película. Por otro lado, el dióxido de carbono y los productos finales del metabolismo aerobio se difunden en la otra dirección. Es determinante el grosor de la película ya que el oxígeno solo puede difundirse hasta una cierta distancia a través de la película, antes de ser consumido; por ello las áreas mas profundas de la película son anóxicas o anaerobias.

Con el paso del tiempo, aumenta el grosor de la biopelícula en dirección hacia afuera desde el medio; pero los extremos de esta siguen siendo aerobios (Riffat, 2013). A medida que la biopelícula continúa creciendo, la difusión del oxígeno a través de esta se

vuelve un limitante, por lo que se desarrolla una capa anaerobia a lo largo del medio superficial (Mara y Horan, 2003). La mayoría de los nutrientes solubles se utilizan antes que puedan alcanzar los microorganismos inferiores, forzándolos así a entrar en una fase endógena de crecimiento (Gray, 2004). De esta manera la película se desestabiliza porque los microorganismos inferiores pierden su capacidad de adherirse a la superficie del medio y la acción de arrastre de las aguas residuales las desprende del medio; este proceso se conoce como desprendimiento de biopelícula. El crecimiento de la biopelícula se produce rápidamente en los lugares donde hubo el desprendimiento. (Riffat, 2013)

#### **2.1.1.8. Ventilación**

En el tratamiento de las aguas residuales es muy importante la ventilación ya que de esta manera se mantienen las condiciones aerobias necesarias para un tratamiento eficaz (Von Sperling y Chernicharo, 2005). De manera general para llevar a cabo una aireación natural, se tiene una columna de ventilación la cual permite que el aire entre en la zona de drenaje en la parte inferior del filtro percolador y se dirija hacia la parte superior a través del medio filtrante. Cuando los compartimientos de ventilación se ven bloqueados o de alguna manera restringidos, el rendimiento del filtro se ve seriamente afectado ya sea por olores o vectores, por lo que es fundamental una buena ventilación para un correcto funcionamiento de los filtros percoladores (Foster, 2003).

La ventilación de tipo natural funciona siempre y cuando haya una diferencia de temperatura entre el aire del ambiente y el aire dentro de los poros. Cuando las aguas residuales están más frías que el aire del medio ambiente, el aire en los poros estará frío por lo tanto la dirección del flujo será hacia abajo; de igual manera si el aire del ambiente es más frío que las aguas residuales, el flujo será ascendente (Metcalf y Eddy, 2014). A lo largo de un día típico la temperatura de las aguas residuales es relativamente constante, pero la temperatura del aire varía significativamente; por ende, es bastante probable que la temperatura del aire y de la temperatura de las aguas residuales sean iguales. Cuando esto ocurre no existe diferencia de densidad entre el aire dentro y fuera del filtro percolador,

por lo que el aire no fluirá y afectará negativamente al tratamiento aerobio. Esta situación se puede tolerar en casos como un tratamiento incompleto de forma temporal, pero en otros casos se va a requerir de una ventilación forzada (Grady et al., 2011).

Los sistemas de ventilación mecanizado tienen una mayor ventaja que los sistemas de ventilación natural ya que superan las dificultades que estos tienen, pese a que el costo se incrementa este es mínimo en comparación a los beneficios (Metcalf y Eddy, 2014). Según WEF (2010) existen dos tipos de sistemas de ventilación mecanizado, flujo ascendente y descendente; el flujo descendente puede reducir o eliminar los olores del filtro percolador siempre y cuando se integre con un buen sistema hidráulico de lavado. Cuando se utiliza el flujo ascendente se debe cubrir el filtro percolador para poder recoger los gases con malos olores, además estas cubiertas ayudan a mantener la temperatura del agua residual (Metcalf y Eddy, 2014).

#### **2.1.1.9. Temperatura**

La temperatura en los filtros percoladores está relacionado con la tasa metabólica de los microorganismos, esta aumenta con la temperatura y la tasa de tratamiento se llega a duplicar cuando la temperatura aumenta 10°C dentro del rango de 5°C a 30°C (Gray, 2004).

Según Grady et al. (2011), un efecto significativo en la operación de los filtros percoladores es resultado de variaciones fuertes de temperatura. Por ello se debe limitar los cambios de temperatura al rango en tenga poco efecto, de este modo el diseño físico está sujeto a minimizar las pérdidas de calor durante la operación en climas fríos.

Las pérdidas más importantes de calor se dan a consecuencia del viento y la ventilación en climas fríos.

#### **2.1.1.10. Proceso de eliminación de DBO y nitrificación**

La materia orgánica soluble se difunde en la biopelícula formada y posteriormente las bacterias heterótrofas se encargan de metabolizarla para usarla como fuente de

carbono y energía (Grady et al., 2011). Por otro lado, las partículas orgánicas suspendidas son adsorbidas por la superficie de la biopelícula para posteriormente ser degradadas a productos solubles (Riffat, 2013).

Según Mara y Horan (2003) la nitrificación tiene dos etapas importantes, la primera se da cuando el amoníaco se transforma a nitritos con la intervención de las bacterias del tipo *Nitrosomonas* y la segunda es cuando el nitrito se transforma en nitrato por las bacterias *Nitrobacter*.

La tasa de eliminación de DBO depende de muchos factores, entre los principales se encuentran el caudal de las aguas residuales, la tasa de carga orgánica, la temperatura y las tasas de difusión de oxígeno en la biopelícula (Peavy et al., 1985). Como se puede ver en la Tabla 1, con un correcto diseño y dentro de las cargas orgánicas e hidráulicas indicadas, se puede obtener grandes resultados en las concentraciones de DBO, dando efluentes menores a 30 mg/L; y para diseños de remoción de DBO y nitrificación se obtuvieron efluentes menores a 20 mg/L y menores a 3mg/L respectivamente. La carga orgánica se ha correlacionado con el rendimiento del tratamiento tanto para la eliminación de DBO como para la nitrificación en diseños combinados de filtros percoladores de DBO y nitrificación. Se ha podido observar que el rendimiento en un filtro percolador a 20°C con cargas bajas de DBO, la eficiencia de eliminación de DBO era aproximadamente de un 90% e iba disminuyendo conforme la carga orgánica aumentaba (Metcalf y Eddy, 2014). Otro factor importante es saber en que carga orgánica el rendimiento del filtro percolador se ve limitado por la transferencia de oxígeno; la literatura nos dice que para las concentraciones en el afluente entre 400 y 500 mg/L, la transferencia de oxígeno puede volverse un limitante. (Schroeder y Tchobanoglous, 1976 citado en Metcalf y Eddy, 2014).

En un filtro percolador las bacterias heterótrofas se establecen primero que las bacterias nitrificantes; además las bacterias *Nitrosomonas* se forman primero que las *Nitrobacter* debido a que el amoníaco es abundante en las aguas residuales (Gray, 2004). Grady et al. (2011) menciona que la remoción de la materia orgánica ocurre en los niveles

superiores del filtro percolador y en los niveles inferiores la nitrificación, esto se debe a que las bacterias heterótrofas tienen una tasa de crecimiento mayor que las bacterias encargadas de la nitrificación y como en la zona superior del medio filtrante abunda la materia orgánica, predominarán las bacterias heterótrofas.

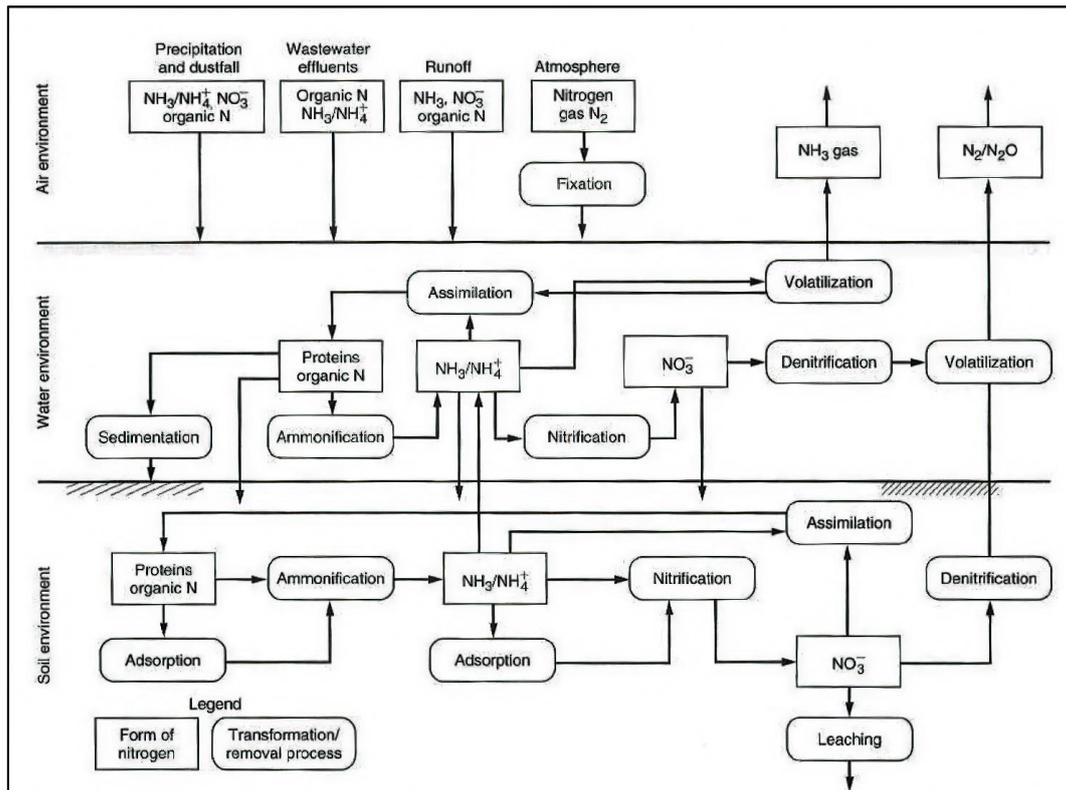
Al igual que con la eliminación de DBO, la tasa de nitrificación está influenciada por muchos factores como el sistema hidráulico, ventilación y tipo de medio (WEF, 2010). Según EPA (2000) las recomendaciones propuestas indican unos límites en la carga de materia orgánica para filtros percoladores de medios rocosos de 0.16 a 0.096 kg DBO/(m<sup>3</sup>.d) requerido para lograr aproximadamente un 75 a 85% de nitrificación. Parker y Richards (1986) confirman la relación entre la nitrificación y la concentración de DBO, encontraron que no se producía nitrato hasta que la concentración de DBO soluble fuese menor a 20 mg/L para medios rocosos.

## **2.1.2. Nitrógeno en las aguas residuales**

### **2.1.2.1. Ciclo biológico del nitrógeno**

El nitrógeno es un elemento necesario para todos los organismos vivos, está presente en la atmósfera y se encuentra en constante transformación.

En una planta de tratamiento se pueden observar las reacciones que involucran al nitrógeno, pero estas ocurren de manera natural en el medio ambiente. Todas estas transformaciones se pueden apreciar en la Figura 1.



**Figura 1.** Ciclo general del nitrógeno en el medio ambiente.

El nitrógeno existe en las aguas residuales en una variedad de formas, desde la forma más reducida, en la cual se disuelve en el agua como amoníaco, hasta la forma más oxidada, que es el nitrato; también está presente en moléculas orgánicas como los aminoácidos y compuestos de nitrógeno orgánico como la urea. (Choi et al. 2007).

El nitrógeno amoniacal existe en solución acuosa como ion amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) o gas amoníaco (NH<sub>3</sub>), esto dependerá del pH de las aguas residuales. A niveles de pH superiores se tiene que el amoníaco incrementa su porcentaje de predominio de manera muy limitada y a niveles inferiores de pH si se ve un predominio notable del ion amonio.

En las aguas residuales sin tratar, el nitrógeno generalmente se compone de amoníaco y nitrógeno orgánico, comúnmente hay poco o nada de nitrógeno oxidado y la presencia de estos suele ser sinónimo de actividades industriales. Se reconoce al nitrógeno Kjeldahl total como la suma del nitrógeno amoniacal total, que es una forma inorgánica del nitrógeno, y el nitrógeno orgánico. El nitrógeno orgánico se deriva de

moléculas complejas como proteínas aminoácidos y urea. Por otro lado el nitrógeno total se puede expresar como la suma del nitrógeno Kjeldahl con nitritos y nitratos. Todo esto se puede apreciar mejor en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Definición de los diversos términos utilizados para ver las formas del nitrógeno.*

Forma de nitrógeno	Abreviatura	Definición
Gas amoniaco	NH <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>
Ion amonio	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Nitrógeno amoniacal total	TAN <sup>o</sup>	NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Nitrito	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
Nitrato	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Nitrógeno inorgánico total	TIN	NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Nitrógeno Kjeldahl total	TKN	Norg + NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Nitrógeno orgánico	N orgánico	TKN - (NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )
Nitrógeno total	TN	Norg + NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>

Fuente: Metcalf y Eddy (2014).

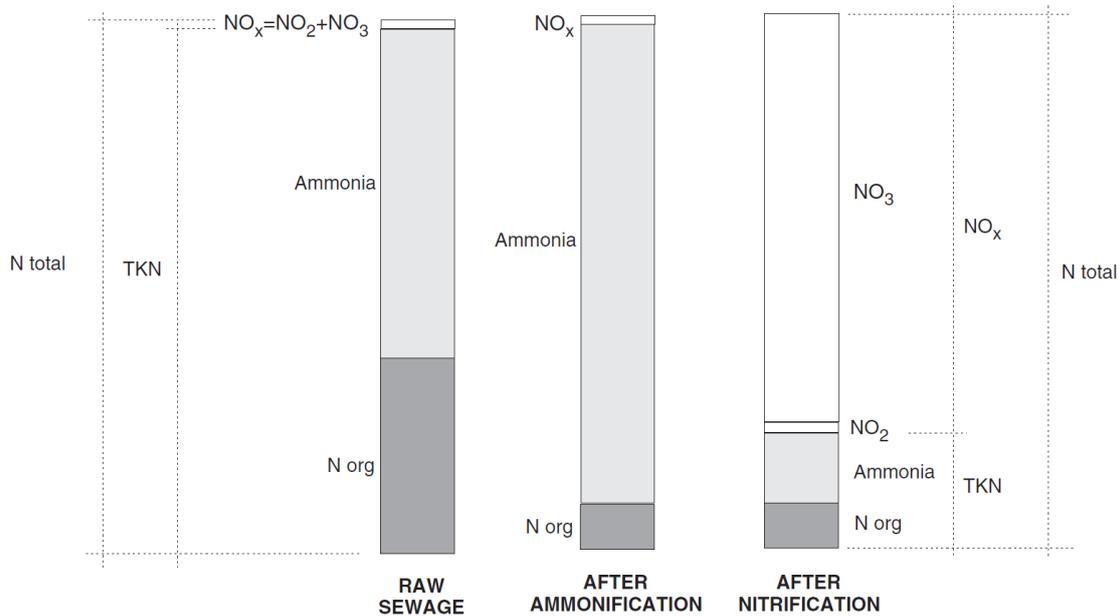
En el proceso de amonificación el nitrógeno se hidrolizará biológicamente, sin embargo, parte del nitrógeno orgánico es no biodegradable por lo que permanecerá como nitrógeno orgánico. La fracción en forma de partículas puede capturarse y eliminarse, pero la parte soluble pasará al efluente. En el afluente de una PTAR una parte del nitrógeno orgánico será no biodegradable por lo que no podrá ser capturado con ningún proceso de filtración o decantación, no obstante los procesos biológicos en la planta de tratamiento ayudan a que el nitrógeno se incorpore en la masa celular, de este modo contribuye con la parte particulada del nitrógeno orgánico no biodegradable (WEF, 2010).

### 2.1.2.2. Nitrificación

#### Descripción del proceso

La nitrificación es un proceso biológico mediante el cual existe una conversión aerobia de compuestos nitrogenados reducidos como el amoniaco libre en productos más

oxidados como el nitrito y nitrato como se ve en la Figura 2. Pese a que se sabe que existe la nitrificación heterotrófica, el mecanismo que predomina en las plantas de tratamiento es de naturaleza autotrófica (Mara y Horan, 2003). Los organismos nitrificantes heterótrofos obtienen sus requerimientos de carbono y energía para la síntesis de biomasa de compuestos orgánicos, mientras que los organismos nitrificantes autótrofos obtienen sus requerimientos de carbono del dióxido de carbono disuelto y su requerimiento de energía a partir de la oxidación del amoníaco a nitrito y de nitrito a nitrato. Por esta razón los organismos nitrificantes autótrofos tienen coeficientes de crecimiento de hasta 5 veces menos que los organismos nitrificantes heterótrofos (Henze et al., 2008). Se sabe que la nitrificación se debe a dos géneros específicos de bacterias autótrofas, los organismos oxidantes del amoníaco que principalmente engloba las bacterias Nitrosomonas y los organismos oxidantes de nitrito que abarca las bacterias Nitrobacter (Choi et al., 2007).



**Figura 2.** Distribución de las especies del nitrógeno a lo largo del tratamiento de las aguas residuales con nitrificación.

### Estequiometría

La ecuación estequiométrica que define las relaciones molares para la oxidación de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) por Nitrosomonas es la siguiente:



Para el caso de la ecuación estequiométrica que describe la oxidación de nitrito a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) por Nitrobacter es la siguiente:



De la expresión estequiométrica general para el proceso de nitrificación en dos pasos combina las 2 ecuaciones anteriores, de la siguiente manera:



### **Factores que influyen en la nitrificación**

Se ha demostrado que la nitrificación se da en un rango de temperatura de 4 a 45°C, siendo la tasa óptima en el rango de 35 a 42°C.

Los organismos nitrificantes son aerobios por lo que solo pueden funcionar en condiciones aerobias, por ello la relevancia de la concentración de oxígeno disuelto.

Se tiene un rendimiento satisfactorio cuando se controla de manera constante el pH en un rango de 6.5 a 8.0.

Las variaciones de caudal y carga pueden ocasionar que el tiempo de retención hidráulico se reduzca significativamente o que pueda entrar una mayor cantidad de contaminantes que incrementen el efluente del amoníaco, el cual puede ser inhibidor de Nitrosomonas y Nitrobacter.

### **2.1.2.3. Desnitrificación**

#### **Descripción del proceso**

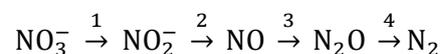
La desnitrificación es un proceso que implica la reducción biológica de nitrato y/o nitrito a gas nitrógeno cuando se somete a condiciones donde hay una ausencia de oxígeno. Cuando se tiene un ambiente biológico donde no hay oxígeno disuelto y con presencia de nitrato o nitrito se denomina anóxico; con estas condiciones se logra que las

bacterias utilicen el oxígeno contenido en las moléculas de nitrito o nitrato para metabolizar el carbono orgánico (Von Sperling, 2007).

La desnitrificación es realizada por una amplia gama de especies de bacterias heterótrofas facultativas. Cuando haya una disponibilidad del oxígeno estos organismos lo usarán como prioridad (entonces no se da la desnitrificación), pero cuando el oxígeno esté ausente cambiarán para usar nitrato o nitrito como aceptor de electrones (WEF, 2010).

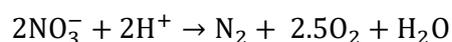
Según Bitton (2011) existen dos mecanismos importantes de reducción biológica de nitrato, la reducción asimilatoria de nitratos y la desnitrificación. En la primera las plantas y microorganismos absorben el nitrato para luego convertirlo en nitrito y finalmente en amonio, este proceso involucra varias enzimas que realizan la conversión para luego incorporarse a las proteínas y ácidos nucleicos. La segunda es una respiración anaerobia donde el nitrato sirve como aceptor de electrones, de esta manera el  $\text{NO}_3^-$  se reduce a óxido nitroso  $\text{N}_2\text{O}$  y gas nitrógeno  $\text{N}_2$ , este gas al tener una baja solubilidad en el agua tiende a escapar en forma de burbujas ascendentes hacia la atmósfera.

Choi et al. (2007) menciona que el nitrato es el sustrato inicial para la desnitrificación y el  $\text{N}_2$  es el producto final, pero se pueden obtener otros intermediarios como  $\text{NO}$  y  $\text{N}_2\text{O}$  si se produce una desnitrificación incompleta cuando se tiene concentraciones de nitrato muy altas y concentraciones de sustrato orgánico relativamente bajas. La reducción del  $\text{NO}_3^-$  se lleva a cabo en 4 pasos que se pueden ver a continuación:



### **Estequiometría**

En el proceso de desnitrificación el nitrato se reduce a nitrógeno gaseoso, según la siguiente reacción:



Con la reacción de desnitrificación se debe tener en consideración que se economiza el oxígeno ya que la materia orgánica se puede estabilizar en ausencia de

oxígeno. Además, el consumo de  $H^+$  implica una capacidad amortiguadora del medio (Von Sperling, 2007).

### **Factores que influyen en la desnitrificación**

La desnitrificación predomina en el rango de pH de entre los 7.0 a 7.5 y aumenta hasta los 35°C, pero si la temperatura está por debajo de los 5°C se inhibe.

#### **2.1.3. Fósforo en las aguas residuales**

##### **2.1.3.1. Fósforo**

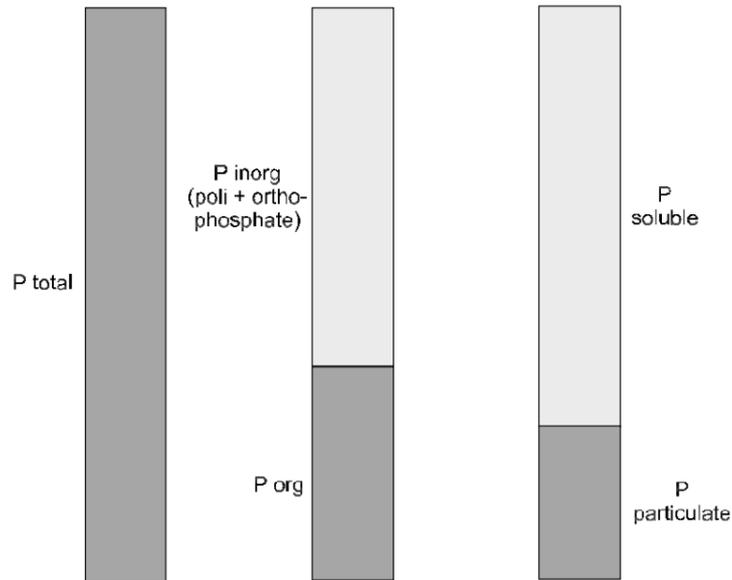
El fósforo total en las aguas residuales domésticas varía en el rango de 6 a 20 mg/L, esto puede variar de acuerdo a las contribuciones de descargas industriales (Romero, 2010). Las formas más comunes de fósforo que se encuentran en las aguas residuales son los ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos (Riffat, 2013). Estos provienen principalmente de los detergentes y otros productos químicos domésticos que pueden representar hasta el 50% del fósforo total presente en las aguas residuales domésticas (Von Sperling, 2007).

Según WEF (2010) la composición del fosforo total se divide en formas orgánicas e inorgánicas. Las formas inorgánicas son solubles e incluyen a los ortofosfatos y polifosfatos. El ortofosfato  $PO_4^{3-}$  es la forma más simple del fósforo representando un 70 a 90% del fósforo total y los polifosfatos son formas más complejas de ortofosfatos inorgánicos, generalmente de naturaleza sintética, que se descomponen en ortofosfatos durante el proceso de tratamiento.

El fósforo orgánico incluye una gran variedad de formas complejas de fósforo que se derivan de proteínas, aminoácidos y ácidos nucleicos. Puede estar tanto en forma soluble como en particulada y se subdivide en fracciones biodegradables y no biodegradables. La fracción soluble no biodegradables que ingresa en el afluente, se descarga con la misma concentración con la que ingresó; por otro lado, la forma particulada no biodegradable, si es que no sedimenta, se eliminará posteriormente con el lodo. En el

tratamiento de aguas residuales, los compuestos orgánicos complejos del fósforo se hidrolizan a ortofosfatos (WEF, 2010).

Toda esta distribución se puede apreciar mejor en la Figura 3.



**Figura 3.** Distribución de formas de fósforo en aguas residuales no tratadas.

El fósforo es de gran importancia ya que es un nutriente esencial para el crecimiento de los microorganismos responsables de los procesos de tratamiento biológico, es así que si está presente en cantidades insuficientes puede inhibir su crecimiento y reducir la eficiencia del tratamiento. Por otro lado, también es un nutriente fundamental para el crecimiento de algas, por lo que eventualmente podría conducir bajo determinadas condiciones a la eutroficación de cuerpos de agua (Von Sperling, 2007).

### 2.1.3.2. Eliminación biológica del fósforo

#### Descripción del proceso

La eliminación biológica del fósforo o como en sus siglas en inglés Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR), basa su proceso en la selección y proliferación de organismos acumuladores de fosfato (PAO); este grupo de organismos tiene la

característica de almacenar ortofosfatos en exceso de sus requisitos de crecimiento biológico. Las condiciones operativas se dan de tal forma que se tiene una zona anaerobia, seguido de un tanque de aireación, de tal forma que se impone una ventaja selectiva temporal frente a otros grupos con respecto al acceso del sustrato (Riffat, 2013). Cuando se logra esto las PAO tienen la ventaja selectiva para crecer y establecerse, dando como resultado una acumulación excesiva de ortofosfatos, para que posteriormente esta biomasa se puede eliminar en el desperdicio de los lodos (WEF, 2010).

En la fase anaerobia las PAO toman las fuentes de carbono y las almacenan ante una posible ausencia de oxígeno a largo plazo; la principal fuente de carbono en las aguas residuales es el acetato (Tarayre et al., 2016). Las PAO asimilan el acetato, usando la energía disponible de los polifosfatos almacenados y producen productos de almacenamiento poli-hidroxicanoato (PHA); los PHA típicos son los polihidroxibutirato (PHB) y polihidroxicvalerato (PHV) (Metcalf y Eddy, 2014). Esta energía se genera por la descomposición de las moléculas de polifosfato, mediante la hidrólisis de ATP se logra obtener ADP y liberación de P; de este modo se da un aumento en la concentración de fosfato en la etapa anaerobia (Tarayre et al., 2016).

En la zona aerobia el PHA que se almacenó inicialmente, se metaboliza, proporcionando energía de oxidación y carbono los cuales se usan para los requisitos de crecimiento y mantenimiento; además se da la reconstitución de las reservas de polifosfatos. El PHA se oxida, lo que conduce a la síntesis de Acetil-CoA, procesada a través del ciclo de Krebs, el cual produce energía a partir de la oxidación y además carbono, necesarios para el crecimiento de nuevas células (Tarayre et al., 2016). Esta energía se utiliza para formar enlaces polifosfato en el almacenamiento celular, lo que lleva a la eliminación de los ortofosfatos de la solución y la incorporación de estos a las células bacterianas (Riffat, 2013). Posteriormente la eliminación neta del proceso se da con la eliminación del lodo excedente en el punto en el cual el fosfato alcanza el nivel más alto en comparación al que fue liberado en la etapa anaerobia (Choi et al., 2007).

## **Factores que afectan la remoción biológica del fósforo**

Para que haya una exitosa eliminación biológica del fósforo es necesario un adecuado suministro de ácidos grasos volátiles (AGV), esto debido a su relevancia en la relación a la liberación o absorción de fosfatos. Los AGV como ácido acético y propiónico, son parte del sustrato fácilmente biodegradable, estos se encuentran en las aguas residuales pero también se forman a partir de la fermentación en la zona anaerobia (WEF, 2010). Las PAO pueden crecer en la zona aerobia si hay suficiente oxígeno disuelto, pero si hay una cantidad significativa de  $O_2$ ,  $NO_2$  o  $NO_3$  en la zona anaerobia pueden servir como aceptores finales de electrones, lo que reduce la cantidad de AGV disponibles para ser absorbidos por las PAO, dando como resultado la reducción de la absorción de fosfato en la zona aerobia (Choi et al., 2007).

La temperatura es un factor que se debe de tomar en cuenta, una disminución en la temperatura puede afectar la zona anaeróbica, reduciendo así la tasa de fermentación, de este modo impactando en la producción de AGV y consecuentemente en las PAO.

La eliminación total de fosfato también se ve afectada por el pH, cuando se tiene valores bajos de pH se necesita más energía para poder absorber acetatos esto debido a que la concentración de acetato no disociado disminuye (Choi et al., 2007).

## **2.2. Marco conceptual**

En base al reglamento nacional, se hace la comparativa de la normativa peruana, tanto de los Límites Máximos Permisibles (LMP) y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para poder determinar si la calidad del efluente de la planta piloto cumple con los parámetros establecidos.

### 2.2.1. Límites máximo permisibles para efluentes de planta de tratamiento de aguas residuales domésticas

Los límites máximos permisibles se definen como la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. El cumplimiento de los LMP es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el Sistema Nacional de Gestión Ambiental.

**Tabla 3.**

*Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR.*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS</b>
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5 - 8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

Fuente: Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM

### 2.2.2. Estándares de calidad ambiental del agua (ECA)

Los Estándares de Calidad Ambiental para agua se define como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente.

Para el caso de la presente investigación se resume en la Tabla 4 los parámetros que se monitorearon y que se encuentran en el listado del ECA categoría 3 relacionado al riego de vegetales y bebida de animales.

**Tabla 4.**

*Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales*

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
<b>FÍSICOS- QUÍMICOS</b>				
Conductividad	( $\mu$ S/cm)	2 500		5 000
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40
Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ -N) + Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ -N)	mg/L	100		100
Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ -N)	mg/L	10		10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	$\geq 4$		$\geq 5$
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5		6,5 – 8,4
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	$\Delta 3$		$\Delta 3$

*Nota.*  $\Delta 3$ : significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

Fuente: Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM.

## Capítulo III: Desarrollo del trabajo de investigación

### 3.1. Ubicación de la planta piloto

La planta piloto de tratamiento de aguas residuales se instaló en el distrito de San Andrés de Tupicocha, departamento de Lima, provincia Huarochirí, a una altitud media de 3606 m.s.n.m.

### 3.2. Descripción del sistema

#### 3.2.1. Agua residual del afluente

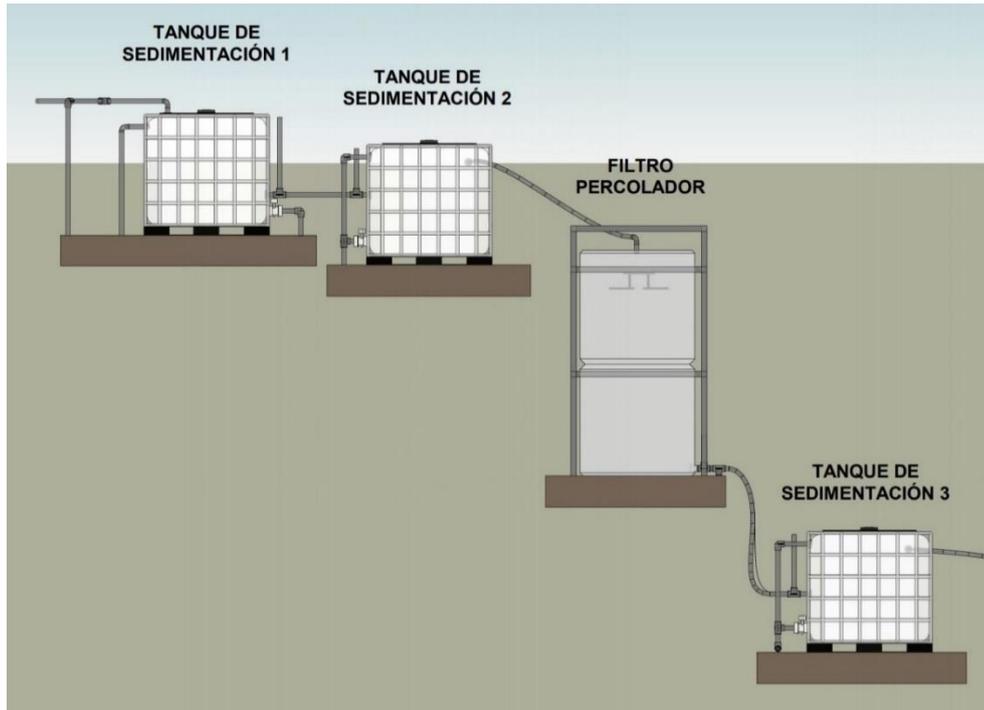
El afluente provenía de las poblaciones del distrito de San Andrés de Tupicocha. El agua residual se captó de la red de alcantarillado existente en donde se realizó una derivación de la tubería matriz de 8" mediante una tubería de 1 ½".



**Figura 4.** Derivación de la tubería matriz hacia la planta piloto.

#### 3.2.2. Componentes del sistema

La planta piloto está compuesta por 4 unidades (ver Figura 5). La primera unidad que es el tanque de sedimentación 1, recibe las aguas residuales; después de esta unidad llega al tanque de sedimentación 2; a continuación, el agua residual entra al filtro percolador de 2 m<sup>3</sup> el cual tiene como medio filtrante tapas de botellas; finalmente el agua residual tratada llega a la siguiente unidad, el tanque de sedimentación 3.



**Figura 5.** Esquema de la planta piloto.

A continuación, se explicará con mayor detalle cada componente del sistema.

**a. Tanque de sedimentación 1 (TS1)**

Consta de un tanque IBC<sup>1</sup> de dimensiones 120 cm x 100 cm x 116 cm, con una capacidad de 1.0m<sup>3</sup> y un tiempo de retención hidráulico promedio de 5.80 horas, ubicado en la parte más elevada al inicio de la planta piloto. El agua residual ingresa mediante una tubería de PVC por la parte superior del tanque. El TS1 tiene una tubería de rebose a 1m del nivel del terreno; una tubería de purga de lodos en la parte más baja del tanque; finalmente una tubería de salida ubicada a 0.40m del nivel del terreno para conectarse al tanque de sedimentación 2. La función de esta unidad es recibir las aguas residuales crudas no tratadas y sedimentar la mayor cantidad de sólidos posibles ya que la planta piloto no cuenta con una cámara de rejillas ni tampoco un desarenador debido a que no había suficiente disponibilidad del terreno para su construcción.



**Figura 6.** Tanque de sedimentación 1.

**b. Tanque de sedimentación 2 (TS2)**

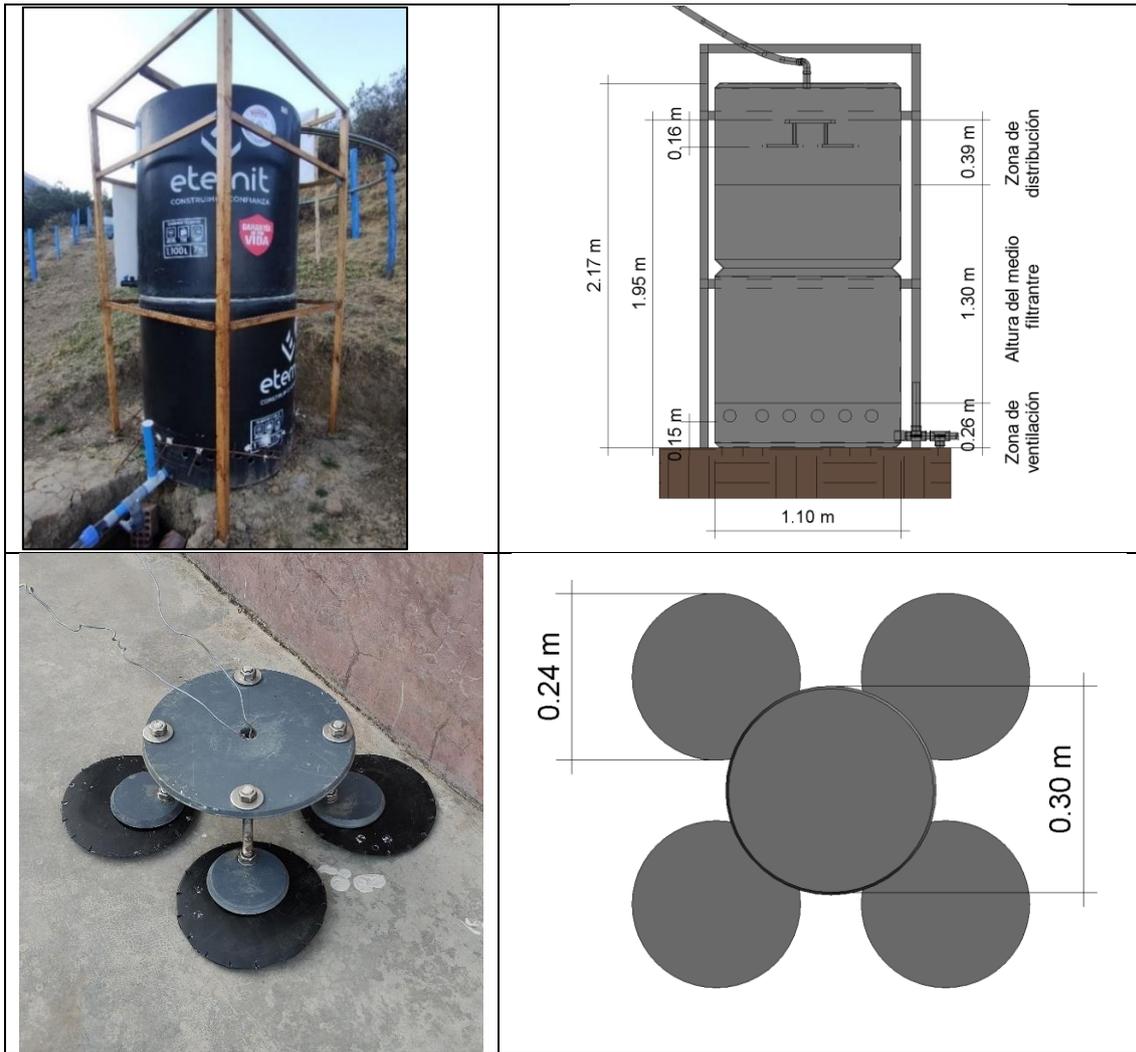
El tanque de sedimentación 2 (TS2) tiene una capacidad de  $1.0\text{m}^3$ , con un tiempo de retención hidráulico de 5.80 horas ubicado a continuación del TS1. El TS2 está conformado por una tubería de ingreso a 0.54m del nivel del terreno; una tubería de rebose a 1.05m del nivel del terreno; una tubería de purga de lodos en la parte más baja del tanque; el agua residual es recogida mediante una tubería perforada con huecos ubicada dentro del tanque; finalmente la tubería de salida ubicada a 0.99m del nivel del terreno para recoger el agua residual hacia el filtro percolador. La función del TS2 es separar las sustancias suspendidas, de tal forma que no exista un exceso de estas que puedan perjudicar el filtro percolador, ya que se puede saturar fácilmente si no hay un buen control.



**Figura 7.** Tanque de sedimentación 2.

### **c. Filtro percolador en serie**

El filtro percolador consta de 2 tanques de agua de polietileno distribuidos uno encima de otro con una capacidad total de  $2.0\text{m}^3$  y con una altura total de 2.17m. El agua residual ingresa mediante una tubería de polietileno por la parte superior del filtro percolador. La distribución del agua residual se realizó mediante una distribución de discos de metal en forma de cascada como se ve en la Figura 8, estos tenían una distancia de separación de 0.16m entre el disco superior y los discos inferiores. Tiene como medio de soporte tapas de botellas las cuales llegan a tener una altura aproximada de 1.30m y se usarán como una superficie de crecimiento para los microorganismos. En la base de este lecho sintético se colocó la tapa del tanque de polipropileno al cual se le hicieron unos agujeros como se ve en la Figura 9; posteriormente a eso se colocó una parrilla de fierros de  $\frac{3}{4}$ " que era soportada por unos ladrillos como se ve en la Figura 9; además se hicieron unos agujeros de  $1\frac{1}{2}$ " a unos 0.15 m del nivel del terreno que sirvieron para oxigenar las aguas residuales; finalmente la tubería de salida está ubicada en la parte más baja del filtro percolador.



**Figura 8.** Filtro percolador y discos de distribución con sus respectivas dimensiones. El diámetro de los orificios perforados (ventanas) tenían un diámetro de 1½”.

Las condiciones de operación del filtro percolador se muestran en la siguiente tabla.

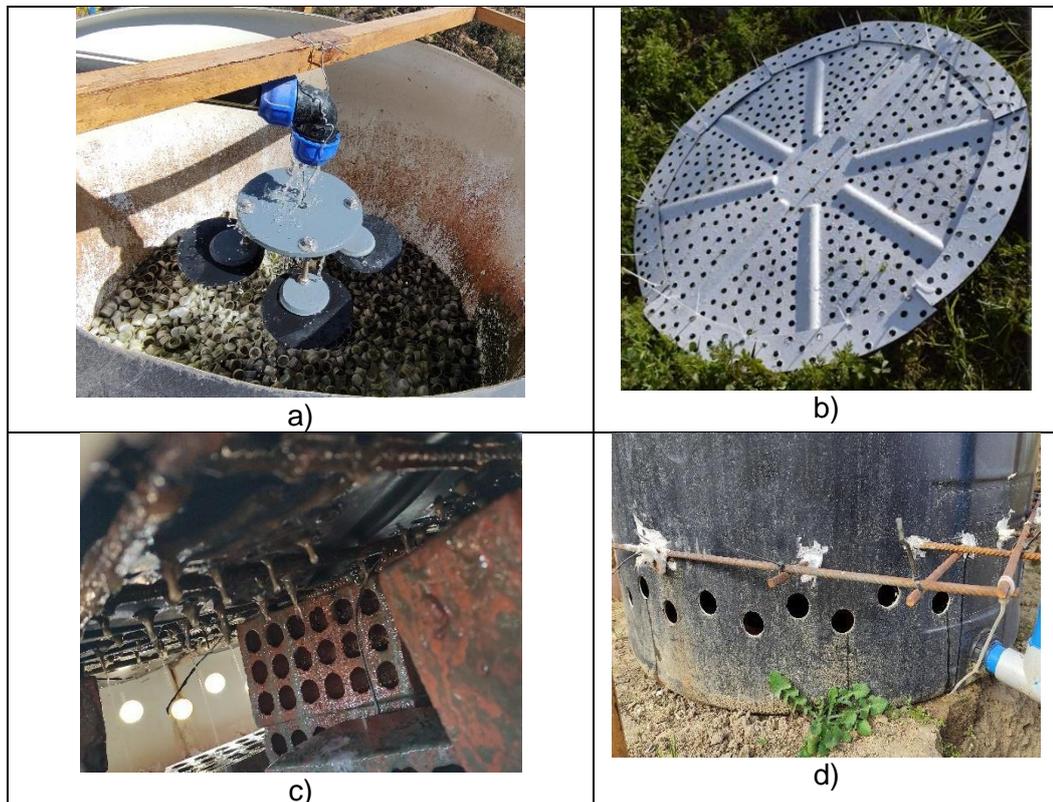
**Tabla 5.**

*Resumen de las características físicas del filtro percolador calculadas según la DQO y el caudal promedio*

Descripción	Unidades	Valor
Número de filtros		1
Diámetro	m	1.10
Profundidad	m	1.30
Área superficial (As)	m <sup>2</sup>	0.95
DQO promedio de ingreso (So)	Kg/m <sup>3</sup>	0.43

Descripción	Unidades	Valor
Volumen del medio de soporte (V)	m <sup>3</sup>	1.24
Área específica del medio de soporte	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	85
Carga orgánica volumétrica promedio (COV)	kgDQO/(m <sup>3</sup> .dia)	1.08
Caudal promedio (Q)	m <sup>3</sup> /d	3.12
Carga hidráulica (CH)	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d)	3.28
TRH	h	9.54
Tasa de recirculación (R)		0
Ventilación		natural

Nota.  $COV=(Q*So)/V$ ;  $CH=Q/As$ ;  $TRH=(V/Q)*24$



**Figura 9.** (a) Ingreso y distribución del agua residual, (b) Tapa de polietileno agujereada, (c) Parrilla de fierros y ladrillos, (d) Agujeros para oxigenación.

#### d. Tanque de sedimentación 3

El tanque de sedimentación 3 fue un tanque IBC con una capacidad de 1.0m<sup>3</sup> de capacidad y un tiempo de retención hidráulico promedio de 5.80 horas, ubicado a continuación del filtro percolador. Estuvo conformado por una tubería de ingreso a 0.60m del nivel del terreno; una tubería de rebose a 1.05m del nivel del terreno; una tubería de purga de lodos en la parte más baja del tanque. El agua residual que viene del filtro percolador ingresa por la tubería de entrada mediante una tubería flexible de polietileno; finalmente es recogida mediante una tubería perforada con huecos ubicada dentro del tanque a 0.98m del nivel del terreno. Tiene la función de extraer el exceso de partículas sedimentables que el filtro percolador elimina debido al desprendimiento del biofilm que crece en exceso.



Figura 10. Tanque de sedimentación 2.

### 3.3. Etapas de la investigación

Las diferentes etapas de experimentación se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6.

*Diferentes etapas del experimento*

Etapa	Días	Descripción
Etapa de puesta en marcha	1-91 [91]	Se monitoreó el filtro percolador para saber si el sistema se había adaptado a la carga orgánica. Se implementó un punto de monitoreo adicional el día 67.

Etapa	Días	Descripción
Etapa 1	91-140 [49]	El sistema terminó de arrancar por ende se incrementó la cantidad y la frecuencia de pruebas en todos los puntos. Además se implementó mejoras para aumentar el oxígeno disuelto en el filtro percolador.
Etapa 2	140-229 [90]	Se adicionó los parámetros de fosfato total y ortofosfatos en todos los puntos y además se incrementó la frecuencia de todas las pruebas en todos los puntos.

### 3.4. Análisis realizados

#### 3.4.1. Puntos de monitoreo

La planta piloto se monitoreó desde el 13.06.21 hasta el 16.01.22. En la etapa de arranque se hizo la medición de los nutrientes en los puntos Pm y P4. Para la etapa 1 y 2, se hizo mediciones de nutrientes en todos los puntos y se incrementó la frecuencia de monitoreo; además se cambió el punto de medición Pm por el punto P1.

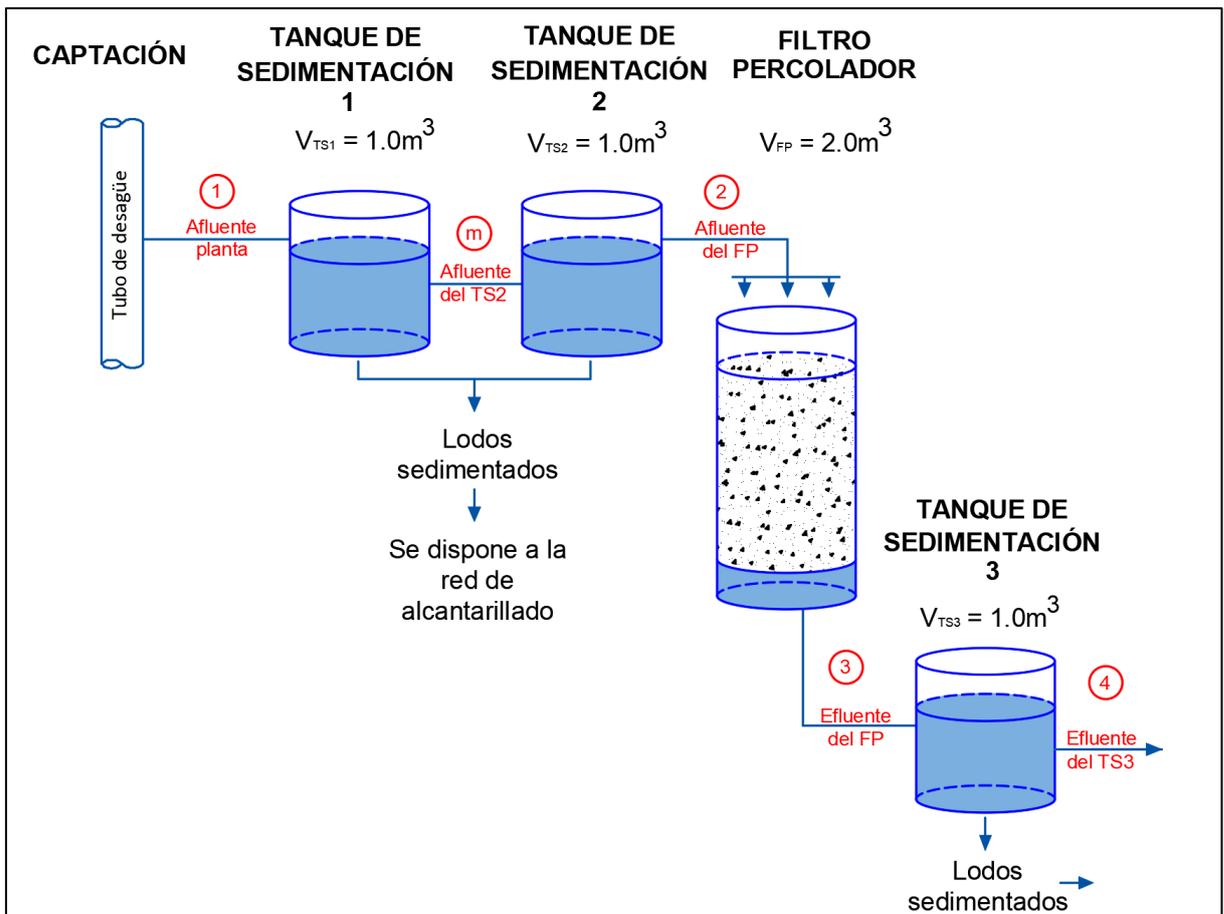


Figura 11. Puntos de muestreo en la planta piloto

La toma de muestras se realizó entre las 8 y las 9 de la mañana y el análisis de los parámetros pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y turbiedad se hizo in situ. Los análisis de los parámetros de nutrientes se llevaron a un cuarto a 15 minutos de la planta para poder realizar los procedimientos adecuados.

**Tabla 7.**

*Descripción de los puntos monitoreados*

<b>Puntos de monitoreo</b>	<b>Descripción</b>
Afluente de la planta piloto (P1)	Agua residual cruda que se recoge directamente del alcantarillado existente. El punto se integró para determinar la calidad de agua residual que entraba a la planta piloto
Afluente del tanque de sedimentación 2 (Pm)	Agua residual a la salida del tanque de sedimentación 1 y antes de ingresar al tanque de sedimentación 2. Este punto se implementó para poder medir solo sólidos sedimentables.
Afluente del filtro percolador (P2)	Agua residual a la salida del tanque de sedimentación 2 y antes de ingresar al filtro percolador. El punto determina si las condiciones de las aguas residuales tienen las características necesarias para que el filtro percolador trabaje sin problemas.
Efluente del filtro percolador (P3)	Agua residual tratada del filtro percolador y antes de ingresar al tanque de sedimentación 3.
Efluente del tanque de sedimentación 3 (P4)	Agua residual tratada después del tanque de sedimentación 3. Este punto se usó para determinar la eficiencia de la desnitrificación.

### **3.4.2. Parámetros monitoreados**

La metodología para la toma de muestras y los análisis del agua residual se realizó siguiendo las recomendaciones de la APHA et al. (1992). Las muestras de agua residual para los parámetros, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y turbiedad se recogieron en vasos de precipitado de polipropileno de 500 ml y la medición se realizó in situ. Los métodos utilizados para cada uno de los parámetros se detallan a continuación.

#### **3.4.2.1. Oxígeno disuelto y Temperatura**

Para la medición del oxígeno disuelto y la temperatura del agua residual se realizó la medida por un método potenciométrico; se utilizó el medidor multiparámetro alemán G7500 de la marca Greisenger y se usó el sensor GWO 5610.

#### **3.4.2.2. Temperatura ambiental**

Para la medición de la temperatura ambiental se utilizó un termómetro de vidrio cuyo elemento termométrico es el alcohol, el cual tiene rangos de medición de -40°C a 50°C.

#### **3.4.2.3. Conductividad eléctrica**

Para la medición de la conductividad eléctrica del agua residual se realizó la medida por un método potenciométrico; se utilizó el medidor multiparámetro alemán G7500 de la marca Greisenger y se usó el sensor LF 425; tiene un rango de medición de 0 a 5000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### **3.4.2.4. pH**

Para la medición del pH del agua residual se utilizó el equipo alemán G7500 de la marca Greisenger y se usó el sensor GE 100 BNC, este tiene un rango de medición de 0 a 14 pH.

#### **3.4.2.5. Turbiedad**

Para la medición de la turbiedad del agua residual se realizó la medida por el método nefelométrico, donde se utilizó el equipo alemán PF-12Plus de la marca Macherey-Nagel, el cual tiene un LED de 860nm para la medición de NTU según ISO 7027; tiene un rango de medición de 1 a 1000 NTU.

#### **3.4.2.6. Sólidos sedimentables**

Para la medición de sólidos sedimentables del agua residual se realizó la medida mediante la prueba volumétrica donde se utilizó un cono Imhoff el cual se llenó hasta llegar a un litro, luego se dejó sedimentar por 45 minutos para después remover con cuidado las

paredes del cono con una varilla, después se dejó 15 minutos más sedimentando, para finalmente registrar el volumen de sólidos sedimentables del cono como ml/L.

#### **3.4.2.7. Demanda química de oxígeno**

Para la medición de la demanda química de oxígeno del agua residual se hizo una determinación fotométrica. La muestra de agua residual se oxida calentándola a 150°C con una solución de dicromato de potasio y ácido sulfúrico por dos horas, para finalmente ser medido en el equipo PF-12Plus.

Se utilizaron viales de alto rango de 20 a 800 mg/L y viales de bajo rango de 2 a 80 mg/L. En las primeras etapas, las cuales comprenden la puesta en marcha y la fase en operación, se usaron viales de alto rango para los análisis en todos los puntos de medición. Cuando la planta empezó a mejorar la calidad del agua residual se midió los puntos P1 y P2 con viales de alto rango y los puntos P3 y P4 con viales de bajo rango.

#### **3.4.2.8. Nitrógeno total**

Para la medición del nitrógeno total del agua residual se utilizó pruebas de tubo marca NANOCOLOR, esta prueba es una determinación fotométrica con 2,6-dimetilfenol en una mezcla de ácido sulfúrico y ácido fosfórico, se calienta a 120°C por 30 minutos, para finalmente ser medido en el equipo PF-12Plus.

Se utilizó dos tipos de pruebas rápidas con diferentes rangos: Nitrógeno total TN<sub>b</sub> 22 con un rango de 3 a 60 mg/L N y Nitrógeno total TN<sub>b</sub> 60 con un rango de 0.5 a 22 mg/L N.

#### **3.4.2.9. Amonio**

Para la medición del amonio del agua residual se utilizó pruebas de tubo marca NANOCOLOR, esta prueba es una determinación fotométrica con un colorante azul de indofenol sobre la base de una reacción con hipoclorito y salicilato a un pH de 12,6 en presencia de nitroprusiato de sodio, para finalmente ser medido en el equipo PF-12Plus.

Se utilizó dos tipos de pruebas rápidas con diferentes rangos: Amonio 10 con un rango de 0.2 a 8 mg/L  $\text{NH}_4\text{-N}$  y Amonio 100 con un rango de 4 a 80 mg/L  $\text{NH}_4\text{-N}$ .

#### **3.4.2.10. Nitrito**

Para la medición del nitrito del agua residual se utilizó pruebas de tubo marca NANOCOLOR, esta prueba es una determinación fotométrica mediante sulfanilamida y N-(1-naftil) etilendiamina, finalmente es medido en el equipo PF-12Plus.

Se utilizó la prueba rápida Nitrito 2, cuyo rango de medición es de 0.003 a 0.46 mg/L  $\text{NO}_2\text{-N}$ .

#### **3.4.2.11. Nitrato**

Para la medición del nitrito del agua residual se utilizó pruebas de tubo marca NANOCOLOR, esta prueba es una determinación fotométrica con 2,6-dimetilfenol, en una mezcla de ácido sulfúrico y ácido fosfórico, finalmente es medido en el equipo PF-12Plus.

Se utilizó dos tipos de pruebas rápidas con diferentes rangos: Nitrato 8, cuyo rango de medición es de 0.3 a 8 mg/L  $\text{NO}_3\text{-N}$  y Nitrato 250 con un rango de 4 a 60 mg/L  $\text{NO}_3\text{-N}$ .

#### **3.4.2.12. Ortofosfato y Fosfato total**

Para la medición del fosfato total del agua residual se utilizó pruebas de tubo marca NANOCOLOR, esta prueba es una determinación fotométrica con azul de molibdeno tras hidrólisis ácida y oxidación a 120°C por 30 minutos, finalmente es medido en el equipo PF-12Plus.

Se utilizó dos tipos de pruebas rápidas con diferentes rangos: orto Fosfato y Fosfato total 1, cuyo rango de medición es de 0.01 a 1.5 mg/L para P y  $\text{PO}_4\text{-P}$ ; orto Fosfato y Fosfato total 15 con un rango de 0.3 a 15 mg/L para P y  $\text{PO}_4\text{-P}$ .

Para el caso de amonio, nitritos, nitratos, y ortofosfatos se filtró la muestra con una membrana de 0.45 $\mu\text{m}$ . Para el caso de nitrógeno total, fosfato total y DQO la muestra no se filtró.

### **3.4.3. Procedimiento para el muestreo**

El procedimiento para la toma de muestras de los 4 puntos de muestreo se realizó de la siguiente manera:

Se instaló una tee unida a una válvula de bola de 1 ½" en la tubería que transporta las aguas residuales y se instalaron en los puntos P1 y P3, estos representan el afluente de la planta piloto y el efluente del filtro percolador respectivamente. Por otro lado, se instaló una manguera flexible de ½" donde se hizo un sifón para poder extraer las muestras para los puntos P2 y P4, que representan el efluente del tanque de sedimentación 1 y el efluente del tanque de sedimentación 3 respectivamente.

Al momento de hacer la muestra se dejó purgar un tiempo adecuado con la finalidad de extraer los residuos que se pudieron acumular en la tubería. Se usaron vasos de precipitado de polipropileno de 500 ml, los cuales se enjuagaron tres veces con el agua residual antes de recoger la muestra de todos los puntos, esto se hizo para la toma de muestras de los parámetros pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y turbiedad. En relación a los parámetros como DQO, nitrógeno total, amonio, nitrito, nitrato, fosfato total y ortofosfatos se tomaron las muestras en envases de polipropileno de 1 litro, los cuales se enjuagaron tres veces antes de recoger la muestra de todos los puntos; inmediatamente después se llevó las muestras para realizar las respectivas mediciones.

### **3.4.4. Frecuencia de monitoreo**

La frecuencia de monitoreo se puede resumir en 3 etapas. La etapa de arranque abarca la puesta en marcha del sistema, desde el día 1 hasta el día 91, en esta etapa se midió solo en los puntos P2 y P4. En el punto del afluente del filtro percolador se midió de la siguiente manera: los parámetros amonio, nitrógeno total y DQO se midieron de manera quincenal; por otro lado, los parámetros nitratos y nitritos se midieron de manera mensual. En el punto del efluente del tanque de sedimentación 3 se midió todos los parámetros mencionados quincenalmente.

La segunda etapa abarcó del día 91 hasta el 140, donde el sistema entró en total funcionamiento, en esta etapa los parámetros como nitrógeno total y amonio se midió semanalmente en todos los puntos; el parámetro DQO se midió quincenalmente en todos los puntos; los parámetros nitrito y nitrato se midieron semanalmente en los puntos P2 P3 y P4, pero mensualmente en el punto P1.

La última etapa se desarrolló entre los días 141 al 229, donde se midieron los parámetros de fosfato total y ortofosfatos; en esta etapa final se midieron todos los parámetros en todos los puntos semanalmente.

**Tabla 8.**

*Frecuencia de monitoreo de todos los parámetros*

Fase	Semanas	Descripción	Puntos de monitoreo	Parámetros	Frecuencia
Etapa de arranque	1-91	Periodo de puesta en marcha del filtro percolador.	Afluyente FP y Efluente del TS3	NT, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, DQO <sub>Total</sub>	Una vez cada 15 días
			Todos los puntos	T, T <sub>A</sub> , CE, pH, OD, T <sub>b</sub>	Todos los días
			Afluyente y efluente del TS2 y TS3	SS	Semanalmente
Etapa 1	91-140	El sistema terminó de arrancar.	Todos los puntos	NT, NH <sub>4</sub> -N	Una vez por semana
			Afluyente planta	NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N	Una vez al mes
			Afluyente FP Efluente FP Efluente TS3	NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N	Una vez por semana
			Todos los puntos	DQO <sub>Total</sub>	Una vez cada 15 días
			Todos los puntos	T, T <sub>A</sub> , CE, pH, OD, T <sub>b</sub>	Todos los días
			Afluyente y efluente del TS2 y TS3	SS	Semanalmente
Etapa 2	140-229	Periodo de implementación de dos nuevos parámetros	Todos los puntos	NT, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N, FT, PO <sub>4</sub> -P, SS	Semanalmente
			Todos los puntos	DQO <sub>Total</sub>	Semanalmente
			Todos los puntos	T, T <sub>A</sub> , CE, pH, OD, T <sub>b</sub>	Todos los días

*Nota:* NT = Nitrógeno total; NH<sub>4</sub>-N = Amonio; NO<sub>2</sub>-N = Nitrito; NO<sub>3</sub>-N = Nitrato; FT = Fosfato total; PO<sub>4</sub>-P = Ortofosfatos; SS = Sólidos sedimentables; T = Temperatura del agua residual; T<sub>A</sub> = Temperatura ambiental; CE = Conductividad eléctrica; OD = Oxígeno disuelto; T<sub>b</sub> = Turbiedad.

### **3.5. Modificaciones realizadas a lo largo de la investigación**

Para poder oxigenar más el agua residual el día 65 se cambió el tamaño de los discos, que se utilizaban para la distribución del agua residual, de tal forma que se colocó discos más grandes (ver Figura 8) debajo de los originales para mejorar la distribución.

El día 67 se implementó el punto P1, el cual está ubicado a la entrada de la planta piloto, esto se hizo con el fin de poder obtener una información más exacta del agua residual que está ingresando a la planta. Hasta ese día se estuvo tomando las muestras en el afluente del tanque de sedimentación 2, el cual se tomó como un punto provisional del punto P1 denominado punto Pm.

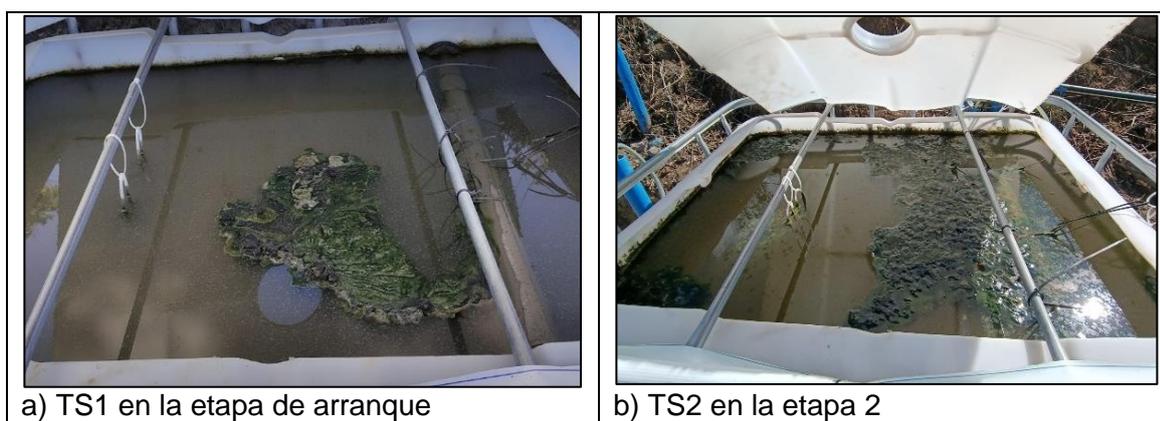
El día 91 la planta piloto entró en la fase de operación y en el día 93 se realizó la introducción de tuberías perforadas de 1.5m colocadas de forma vertical en el medio filtrante para mejorar la oxigenación; las tuberías tenían huecos pequeños en todo su largo, para de este modo mejorar la distribución del aire que ingresa al filtro percolador.

## Capítulo IV: Análisis y discusión de resultados

### 4.1. Observaciones realizadas a lo largo de la investigación

Se observó la presencia de algas en los tanques de sedimentación 1 y 2 en la etapa de arranque. Al respecto se realizó la limpieza y el mantenimiento de las unidades.

También se observó algas en el tanque de sedimentación 1, 2 y 3 en la etapa final y no llegaron a desaparecer pese a que se hizo el mantenimiento respectivo.



**Figura 12.** Algas en los sedimentadores 1 y 2.

En el día 66 en que se realizó el primer mantenimiento a la planta se observó que hasta ese momento se habían formado natas y algas en los tanques de sedimentación, originando la obstrucción de la zona de recolección de agua en cada tanque; además el filtro percolador empezó a saturarse.

### 4.2. Resultados de cada parámetro

Los resultados de los parámetros temperatura, turbiedad, pH, OD, conductividad, sólidos sedimentables, DQO, amonio, nitratos, nitritos, nitrógeno total y caudales, que se obtuvieron en los cuatro puntos a lo largo de la investigación, se detallan a continuación.

**Tabla 9.**

Resultados promedio de todos los parámetros en la etapa de arranque.

Parámetro	Unidades	Pm	P2	P3	P4
		(número de muestras)			
Temperatura	°C	11.2 ± 0.8 (66)	10.5 ± 0.7 (66)	9.7 ± 0.9 (66)	10 ± 0.9 (66)
Turbiedad	NTU	145.8 ± 44 (66)	121.1 ± 71 (66)	88.7 ± 29 (66)	52.3 ± 24 (66)
pH		8.5 ± 0.2 (66)	8.3 ± 0.2 (66)	8.1 ± 0.2 (66)	8.0 ± 0.3 (66)
O.D.	mg/L	1.17 ± 0.19 (66)	0.69 ± 0.14 (66)	1.81 ± 0.4 (66)	1.14 ± 0.53 (66)
Conductividad	ms/cm	558 ± 62 (66)	550 ± 206 (66)	587 ± 191 (66)	553 ± 130 (66)
Sólidos sedimentables	ml/L	0.14 ± 0.18 (11)	0.44 ± 0.42 (11)	0.42 ± 0.49 (11)	0.1 ± 0.2 (11)
DQO	mg/L	ND	194 ± 35 (5)	ND	113 ± 35 (5)
Amonio	mg/L	ND	12.5 ± 2 (5)	ND	14.8 ± 4 (5)
Nitratos	mg/L	ND	< 0.3 (2)	ND	0.33 ± 0.04 (2)
Nitritos	mg/L	ND	0.068 ± 0.021 (2)	ND	0.03 ± 0.01 (2)
Nitrógeno total	mg/L	ND	43 ± 13 (5)	ND	30 ± 4 (5)
Caudales	L/min	2.4 ± 0.5 (11)	ND	ND	ND

Nota. La definición de cada punto se encuentra detallado en la Tabla 7.

ND: No se reportaron datos en los puntos indicados

En la etapa de arranque la eficiencia de remoción de la turbiedad fue de 62.45% y una remoción de la DQO de 46.28%. En el caso del amonio hubo una conversión de 14.39%.

**Tabla 10.**

Resultados promedio de todos los parámetros en la etapa 1.

Parámetro	Unidad	P1	Pm	P2	P3	P4
		(número de muestras)				
Temperatura	°C	13.9 ± 0.7 (42)	ND	13.3 ± 0.6 (42)	12.8 ± 0.8 (42)	13.2 ± 1.1 (42)
Turbiedad	NTU	187.7 ± 78 (42)	ND	59.2 ± 10 (42)	29.1 ± 4 (42)	19.9 ± 3 (42)

Parámetro	Unidad	P1	Pm	P2	P3	P4
		(número de muestras)				
pH		8.2 ± 0.1 (42)	ND	8.1 ± 0.2 (42)	7.9 ± 0.1 (42)	7.8 ± 0.1 (42)
O.D.	mg/L	0.99 ± 0.24 (42)	ND	0.31 ± 0.04 (42)	1.75 ± 0.18 (42)	1.12 ± 0.13 (42)
Conductividad	ms/cm	439 ± 49 (42)	ND	435 ± 19 (42)	454 ± 21 (42)	443 ± 17 (42)
Sólidos sedimentables	mL/L	ND	0.23 ± 0.2 (7)	0.29 ± 0.5 (7)	0.54 ± 0.41 (7)	0 ± 0 (7)
DQO	mg/L	506 ± 215 (4)	ND	189 ± 85 (4)	133 ± 72 (4)	105 ± 48 (4)
Amonio	mg/L	12.7 ± 4 (7)	ND	19.6 ± 4 (7)	21.6 ± 4 (7)	20 ± 6 (7)
Nitratos	mg/L	0.32 (1)	ND	0.35 (1)	0.48 ± 0.04 (7)	- (0)
Nitritos	mg/L	0.05 ± 0.02 (2)	ND	0.04 ± 0.03 (7)	0.071 ± 0.02 (7)	0.063 ± 0.02 (7)
Nitrógeno total	mg/L	30 ± 13 (7)	ND	33 ± 10 (7)	29 ± 8 (7)	26 ± 6 (7)
Caudales	L/min	1.9 ± 0.6 (7)	ND	ND	ND	ND

*Nota.* La definición de cada punto se encuentra detallado en la Tabla 7.

ND: No se reportaron datos en los puntos indicados

En la etapa 1 la eficiencia de remoción de la turbiedad fue de 87.78% y una remoción de la DQO de 63.56%. En el caso del amonio hubo una conversión de 92.83%.

**Tabla 11.**

*Resultados promedio de todos los parámetros en la etapa 2.*

Parámetro	Unidad	P1	Pm	P2	P3	P4
		(número de muestras)				
Temperatura	°C	14.6 ± 0.5 (60)	ND	14.3 ± 0.5 (60)	14.1 ± 0.8 (60)	14.3 ± 0.7 (60)
Turbiedad	NTU	279.8 ± 55 (60)	ND	63.9 ± 27 (60)	38 ± 15 (60)	27.1 ± 8 (60)
pH		8.2 ± 0.3 (60)	ND	7.8 ± 0.3 (60)	7.7 ± 0.1 (60)	7.7 ± 0.1 (60)
O.D.	mg/L	0.6 ± 0.22 (60)	ND	0.26 ± 0.1 (60)	1.42 ± 0.2 (60)	1.19 ± 0.2 (60)

Parámetro	Unidad	P1	Pm	P2	P3	P4
		(número de muestras)				
Conductividad	ms/cm	617 ± 175 (60)	ND	455 ± 100 (60)	478 ± 109 (60)	470 ± 103 (60)
Sólidos sedimentables	mL/L	ND	0.29 ± 0.15 (10)	0.25 ± 0.42 (10)	0.68 ± 0.42 (10)	0.01 ± 0.03 (10)
DQO	mg/L	506 ± 215 (8)	ND	189 ± 85 (8)	133 ± 72 (8)	105 ± 48 (8)
Amonio	mg/L	24.6 ± 16 (12)	ND	20 ± 11 (12)	22.3 ± 11 (12)	21 ± 10 (12)
Nitratos	mg/L	0.74 (1)	ND	0.36 (1)	0.33 ± 0.05 (9)	- (0)
Nitritos	mg/L	0.087 ± 0.06 (12)	ND	0.024 ± 0.02 (12)	0.067 ± 0.03 (12)	0.047 ± 0.02 (12)
Nitrógeno total	mg/L	45 ± 16 (12)	ND	29 ± 12 (12)	27 ± 11 (12)	25 ± 11 (12)
Fosfato total	mg/L	8.1 ± 4.2 (12)	ND	3.6 ± 1.4 (12)	3.5 ± 1.2 (12)	3.2 ± 1 (12)
Ortofosfatos	mg/L	3.9 ± 2.2 (11)	ND	2.7 ± 1 (11)	2.9 ± 0.9 (11)	2.9 ± 0.9 (11)
Caudales	L/min	2.1 ± 0.6 (10)	ND	ND	ND	ND

*Nota.* La definición de cada punto se encuentra detallado en la Tabla 7.

ND: No se reportaron datos en los puntos indicados

En la etapa 2 la eficiencia de remoción de la turbiedad fue de 90.08% y una remoción de la DQO de 77.34%. En el caso del amonio hubo una conversión de 15.66%.

**Tabla 12.**

Valores máximos y mínimos de todos los parámetros en las distintas etapas.

Parámetro		Etapa de arranque				Etapa 1				Etapa 2			
		Pm	P2	P3	P4	P1*	P2	P3	P4	P1*	P2	P3	P4
Temperatura (°C)	Max	12.4	11.7	11.3	11.5	14.8	14.1	13.8	11.5	15.4	14.8	15.6	15.5
	Min	10.3	9.6	8.1	8.9	12.9	12.2	11.3	8.9	14.1	13.2	12.6	13.0
Turbiedad (NTU)	Max	207.5	284.2	145.2	105.5	289	78.3	34.8	23.8	389	128.3	75.0	43.0
	Min	91.8	44.0	45.0	23.5	109.8	49.3	25.0	15.3	205	44.5	24.8	19.0
pH	Max	8.9	8.8	8.8	8.7	8.3	8.4	8.1	7.9	8.6	8.2	8.0	7.9
	Min	8.0	8.0	7.9	7.6	7.9	7.9	7.8	7.7	7.8	7.4	7.5	7.4
OD (mg/L)	Max	1.37	0.94	2.36	1.76	1.32	0.41	2.11	1.25	0.97	0.45	1.70	1.50
	Min	0.78	0.44	1.16	0.29	0.68	0.29	1.59	0.95	0.23	0.16	1.13	0.93
Conductividad (ms/cm)	Max	659.6	1120.5	1089.9	872.2	521.6	466.2	494.3	473.4	1005	653.8	683.1	644.9
	Min	467.0	361.2	395.8	407.1	379.5	414.4	431.3	424.6	361	355.6	354.4	343.2
Sólid. Sedim. (mL/L)	Max	0.6	1.5	1.8	0.6	0.6	1.4	1.2	0.0	0.5	1.4	1.3	0.1
	Min	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
DQO (mg/L)	Max	ND	238	ND	143	385	284	174	126	800	370	298	202
	Min	ND	163	ND	54	285	137	56	79	265	97	78	62
Amonio (mg/L)	Max	ND	14	ND	19	18	27	29	32	51	49	53	47
	Min	ND	10	ND	10	6	16	17	16	8	9	13	10
Nitrato (mg/L)	Max	ND	0.00	ND	0.35	0.32	0.35	0.51	0.00	0.74	0.36	0.44	0.00
	Min	ND	0.00	ND	0.30	0.32	0.35	0.42	0.00	0.74	0.36	0.30	0.00
Nitrito (mg/L)	Max	ND	0.083	ND	0.042	0.113	0.088	0.100	0.113	0.070	0.103	0.091	0.216
	Min	ND	0.053	ND	0.019	0.012	0.039	0.035	0.012	0.009	0.027	0.015	0.009
Nitrógeno Total (mg/L)	Max	ND	60	ND	33	49	49	45	35	60	60	60	55
	Min	ND	24	ND	23	14	24	21	19	22	18	17	13
Fosfato Total (mg/L)	Max	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	15	7.03	6.74	5.61
	Min	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	4.26	1.96	2.14	1.72
Ortofosfatos (mg/L)	Max	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	8.94	5.0	4.9	4.6
	Min	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.65	1.6	1.7	1.5

Nota: La definición de cada punto se encuentra detallado en la Tabla 7.

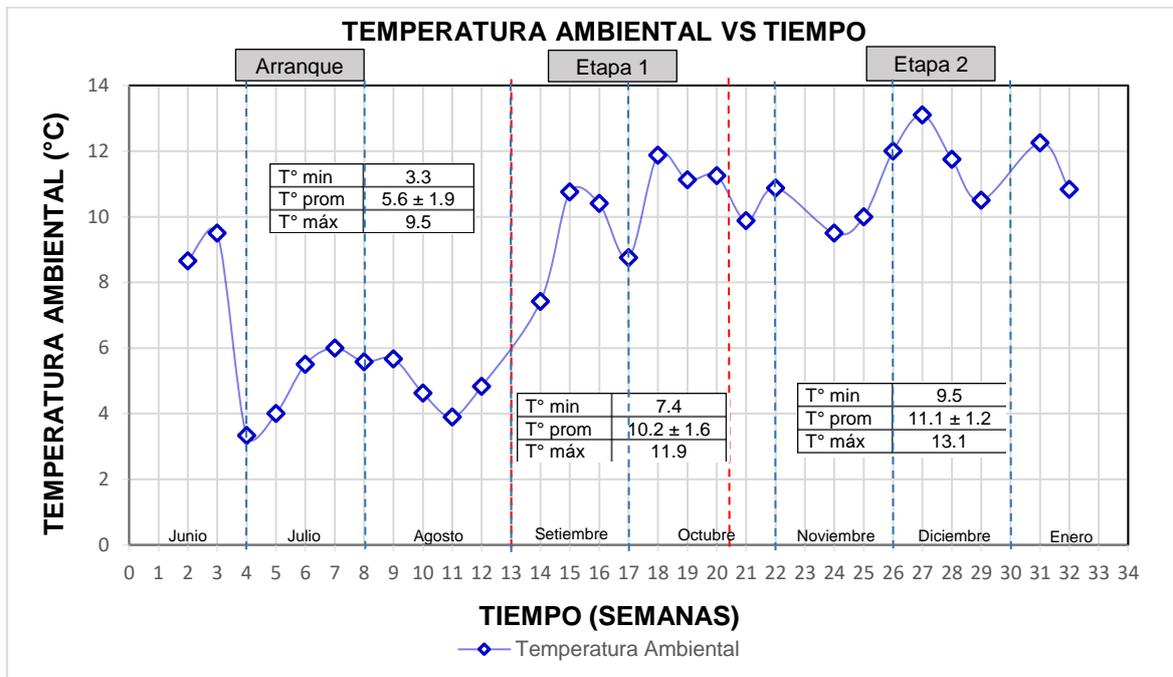
P1\*: En el caso de los sólidos sedimentables se midió en el punto Pm.

ND: No se reportaron datos en los puntos indicados

#### 4.2.1. Temperatura ambiental

La variación de la temperatura ambiental se puede observar de manera detallada en la Figura 13. El filtro percolador trabajó a una temperatura ambiental promedio total de  $8.71^{\circ}\text{C}$  con un máximo de  $13.1^{\circ}\text{C}$  y una temperatura mínima de  $3.3^{\circ}\text{C}$ .

El sistema empezó su etapa de arranque con una temperatura promedio de  $5.6^{\circ}\text{C} \pm 1.9^{\circ}\text{C}$ . En la etapa 1 se observa que se empieza a inicios de setiembre hasta finales de octubre con una temperatura promedio de  $10.2^{\circ}\text{C} \pm 1.6^{\circ}\text{C}$ . Finalmente, la etapa 2 empieza a finales de octubre hasta el mes de enero donde termina la investigación, teniendo en promedio temperaturas de  $11.1^{\circ}\text{C} \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ .



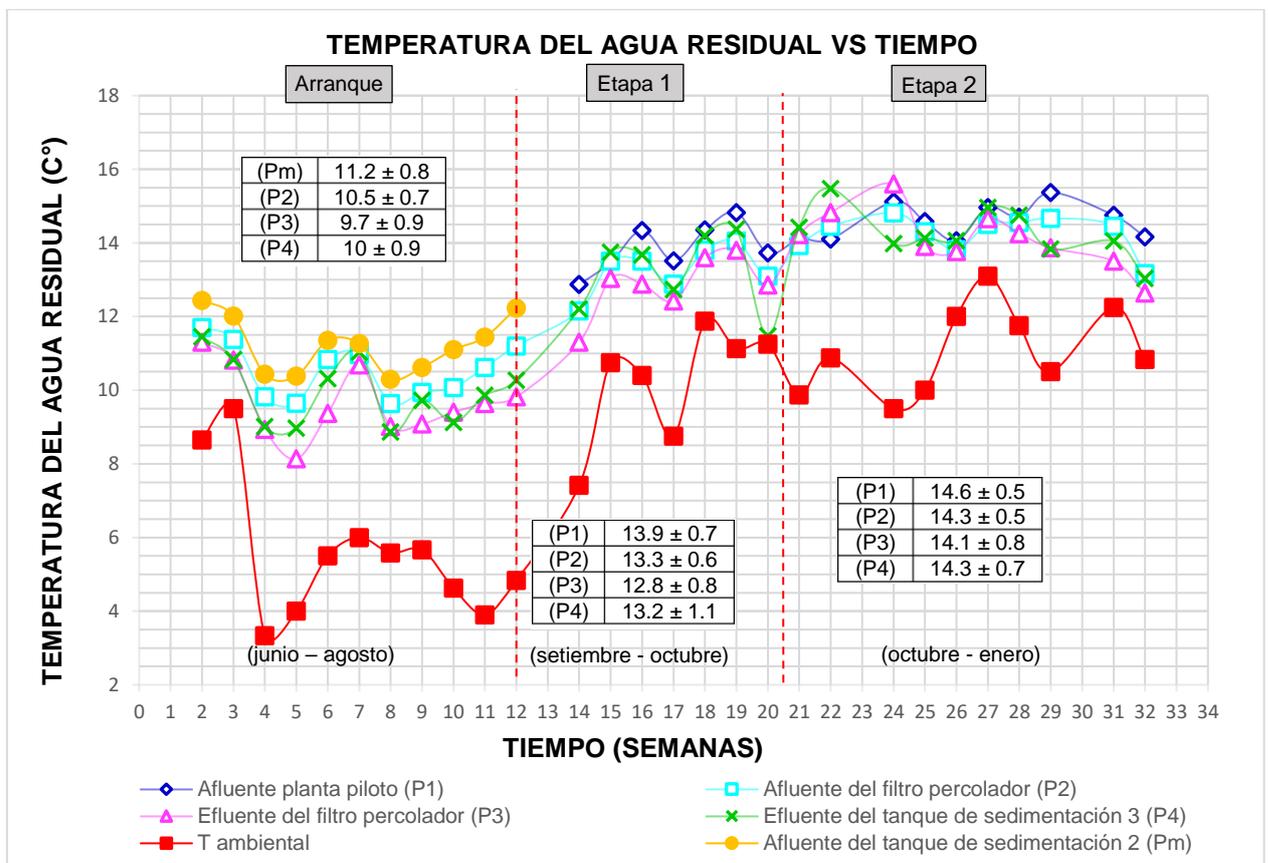
**Figura 13.** Variación de la temperatura ambiental a lo largo del desarrollo de la investigación.

#### 4.2.2. Temperatura del agua residual

La variación de la temperatura del agua residual a lo largo del desarrollo de la investigación se puede apreciar en la Figura 14. Las temperaturas mínimas promedio registradas fueron en el punto P3, en la etapa de arranque, en la etapa 1 y en la etapa 2 tuvieron promedios de  $9.7 \pm 0.9$ ,  $12.8 \pm 0.8$  y  $14.1 \pm 0.8$  respectivamente. Por otro lado, las

mayores temperaturas que se registraron fueron en el punto P1, en la etapa de arranque, en la etapa 1 y en la etapa 2 tuvieron promedios de  $11.2 \pm 0.8$ ,  $13.9 \pm 0.7$  y  $14.6 \pm 0.5$  respectivamente.

Se observa que la temperatura ambiental es más fría que la temperatura dentro del filtro percolador, esto se puede ver por los resultados de las temperaturas del agua residual como del medio ambiente, esta diferencia de temperatura hace que exista un flujo de aire que oxigena las aguas residuales.



**Figura 14.** Variación de la temperatura del agua residual en los cuatro puntos en las tres etapas de la investigación.

#### 4.2.3. pH

Los resultados de los promedios de pH de todos los puntos medidos a lo largo de las 3 etapas de la investigación se ven detallados en la Tabla 9,10 y 11.

En la etapa de arranque se tiene que el pH tiene un promedio de  $8.5 \pm 0.2$  en el afluente del tanque de sedimentación 2 y en el efluente del tanque de sedimentación 3 fue de  $8.0 \pm 0.4$ . En la etapa 1 se observa que el pH promedio en el afluente de la planta piloto es de  $8.2 \pm 0.1$  y en el efluente del tanque de sedimentación 3 fue de  $7.8 \pm 0.1$ . En la etapa 2 se tiene que en el afluente de la planta piloto es de  $8.2 \pm 0.3$  y en el efluente del tanque de sedimentación 3 fue de  $7.7 \pm 0.1$ . Los valores máximos y mínimos de cada punto en todas las etapas se pueden apreciar en la Tabla 12.

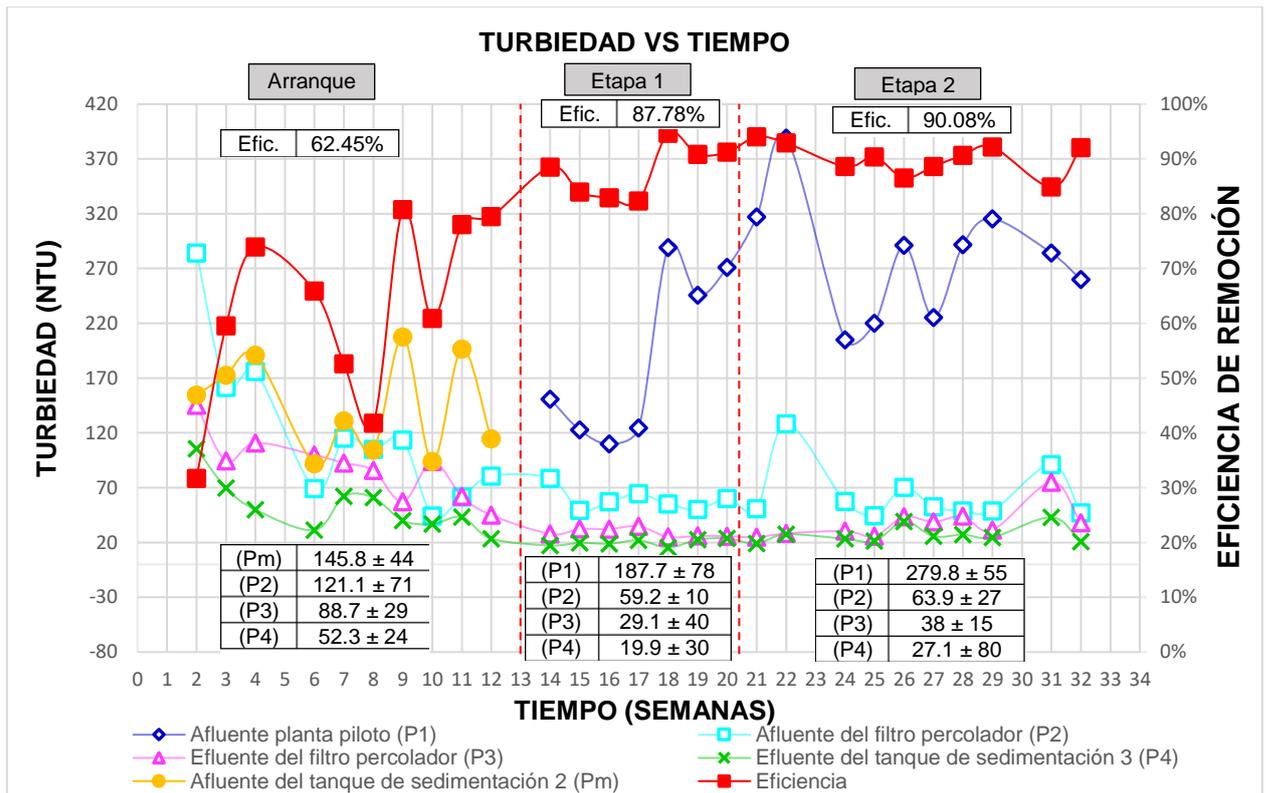
#### **4.2.4. Oxígeno disuelto**

Los resultados de los promedios de oxígeno disuelto de todos los puntos medidos a lo largo de las 3 etapas de la investigación se ven detallados en la Tabla 9,10 y 11.

En todas las etapas el punto que tiene los mayores valores de oxígeno disuelto fue en el punto P3, con un promedio general de  $1.65 \pm 0.34$  mg/L; los valores mínimos se observaron en el punto P2 con valores promedios de  $0.44 \pm 0.23$  mg/L en todas las etapas.

#### **4.2.5. Turbiedad**

El punto que tuvo mayores valores de turbiedad fue el punto P1 con un promedio total de  $206.3 \pm 82$  NTU y el punto con menores valores fue el punto P4 con un valor promedio total de  $34.6 \pm 20$  NTU.

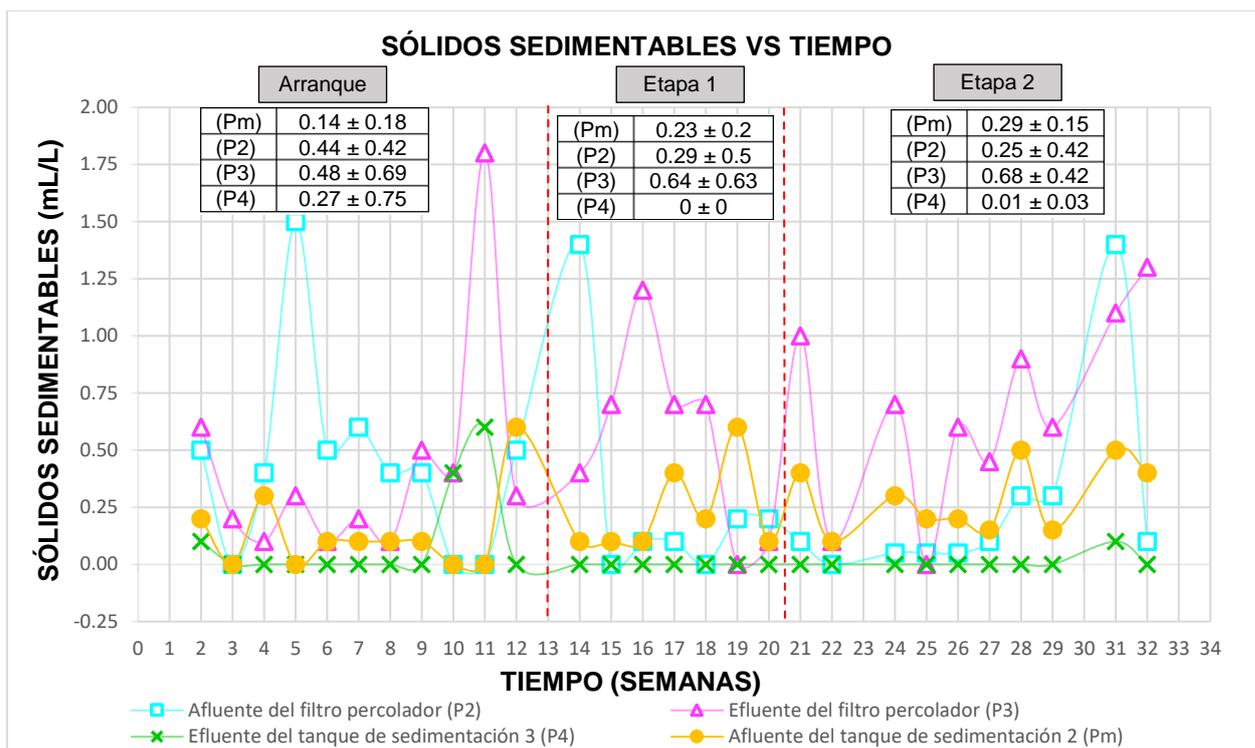


**Figura 15.** Variación de la turbiedad del agua residual en los cuatro puntos en las tres etapas de la investigación.

#### 4.2.6. Sólidos sedimentables

Los resultados de los promedios de sólidos sedimentables de todos los puntos medidos a lo largo de las 3 etapas de la investigación se ven detallados en la Tabla 9,10 y 11.

El punto P1 se reemplazó por el punto Pm, afluente del tanque de sedimentación 2, esto debido a que como la planta piloto no tenía ningún pretratamiento los sólidos se acumulaban en la tubería de ingreso, dando como resultado valores muy variables en el punto P1. El punto Pm y el punto P2 obtuvieron valores que no variaron mucho a lo largo de la investigación.



**Figura 16.** Variación de los sólidos sedimentables del agua residual en los cuatro puntos en las tres etapas de la investigación.

El punto que tuvo mayores valores de sólidos sedimentables fue el punto P3, con un promedio total de  $0.54 \pm 0.44$  mL/L en todas las etapas; esto se debe a que al ser el efluente del filtro percolador se tiene siempre sólidos en suspensión debido al arrastre de la biopelícula, por ello cuando no se realizaba mantenimiento constante al filtro los valores empezaban a aumentar considerablemente.

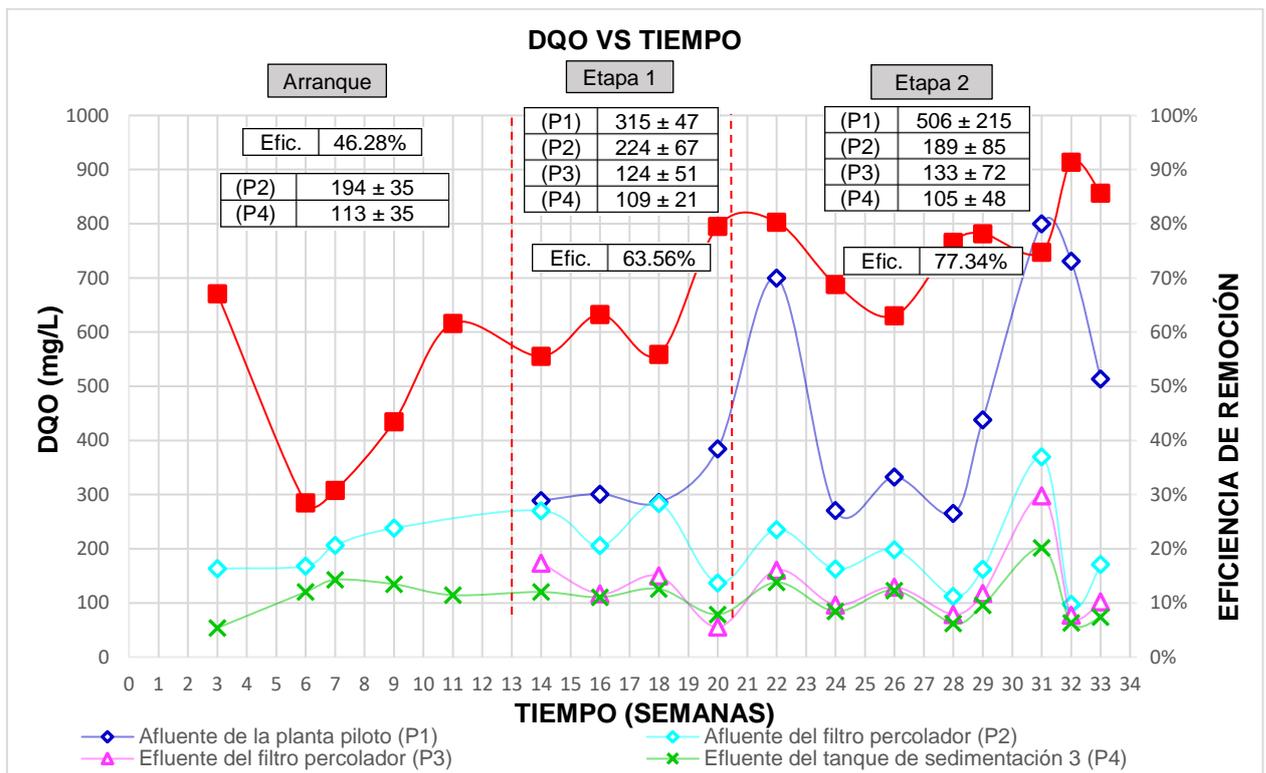
El punto con menores valores fue el punto P4 que tuvo menos variaciones y teniendo una tendencia casi constante, con un valor con un valor promedio total de  $0.04 \pm 0.13$  mL/L.

#### 4.2.7. Demanda química de oxígeno total

Los resultados de los promedios de la demanda química de oxígeno de todos los puntos medidos a lo largo de las 3 etapas de la investigación se ven detallados en la Tabla 9,10 y 11. El punto que tuvo mayores valores de DQO fue el punto P1, con un promedio

total de  $432 \pm 193$  mg/L; el punto con menores valores fue el punto P4 con un valor promedio total de  $108 \pm 37$  mg/L y una eficiencia total de remoción de 64.96%.

El inicio de la fase 1 se determinó cuando la eficiencia en la remoción de DQO alcanzo el valor de 61.64% en la semana 11, de este modo se termina la etapa de arranque y se añadieron los puntos del afluente de la planta piloto y el efluente del filtro percolador, además se incrementó la frecuencia de la mayoría de los parámetros de nutrientes.



**Figura 17.** Variación de la demanda química de oxígeno en los cuatro puntos en las tres etapas de la investigación.

#### 4.2.8. Nitrógeno total, amonio, nitritos y nitratos

El resumen de los valores promedio obtenidos a lo largo de las 3 etapas de la investigación se muestra en la Tabla 9,10 y 11.

Para el caso del nitrógeno total se obtuvo los mayores valores en el punto P1 con un promedio total de  $39 \pm 17$  mg/L y el punto con menores valores fue el punto P4 con un valor promedio total de  $26 \pm 9$  mg/L.

Para el caso del amonio se obtuvo los mayores valores en el punto P3 con un promedio total de  $22 \pm 9$  mg/L y el punto con menores valores fue el punto P4 con un valor promedio total de  $19 \pm 8$  mg/L.

Para el caso de los nitritos se obtuvo los mayores valores en el punto P1 con un promedio total de  $0.082 \pm 0.05$  mg/L y el punto con menores valores fue el punto P2 con un valor promedio total de  $0.033 \pm 0.03$  mg/L.

Para el caso de los nitratos se obtuvo los mayores valores en el punto P3 con un promedio total de  $0.37 \pm 0.08$  mg/L; el punto con menores valores no se pudo registrar concretamente valores fijos ya que los valores registrados fueron menores a 0.3 mg/L, siendo este el límite para poder registrar nitratos; pero como estos valores se encontraron en mayor proporción en el punto P4, se podría deducir que ese fue el punto con menores valores.

#### **4.2.9. Fosfato total y ortofosfatos**

Los resultados de los promedios de fosfato total y ortofosfatos de todos los puntos medidos a lo largo de la etapa 3 de la investigación se ven detallados en la Tabla 9,10 y 11.

Para el caso de los ortofosfatos se obtuvo los mayores valores en el punto P1 con un promedio total de  $8.1 \pm 4.2$  mg/L; el punto con menores valores fue el punto P4 con un valor promedio total de  $3.21 \pm 1$  mg/L y una eficiencia total de remoción de 50.26%.

Para el caso de los ortofosfatos se obtuvo los mayores valores en el punto P1 con un promedio total de  $3.9 \pm 2.2$  mg/L; el punto con menores valores fue el punto P4 con un valor promedio total de  $2.9 \pm 0.9$  mg/L y una eficiencia total de remoción de 2.85%.

#### **4.3. Verificación de la hipótesis**

En la etapa de arranque se obtuvieron valores de nitrógeno total de  $43 \pm 13$  mg/L en el afluente del sedimentador 2 (en el punto Pm) y de  $30 \pm 4$  mg/L luego del tanque de

sedimentación 3 (en el punto P4), por lo que se tuvo una eficiencia en la remoción de 32.5%.

Por otro lado, en la etapa 1 se observó que el nitrógeno total en el punto P1 fue de  $30 \pm 13$  mg/L y en el punto P4 fue de  $26 \pm 6$  mg/L, teniendo de esta manera una eficiencia en la remoción de 13.33%.

En el caso de la etapa 2 se tuvo un promedio de nitrógeno total de  $45 \pm 16$  mg/L en el punto P1 y de  $25 \pm 11$  mg/L en el punto P4, obteniéndose así una eficiencia en la remoción de 44.44%.

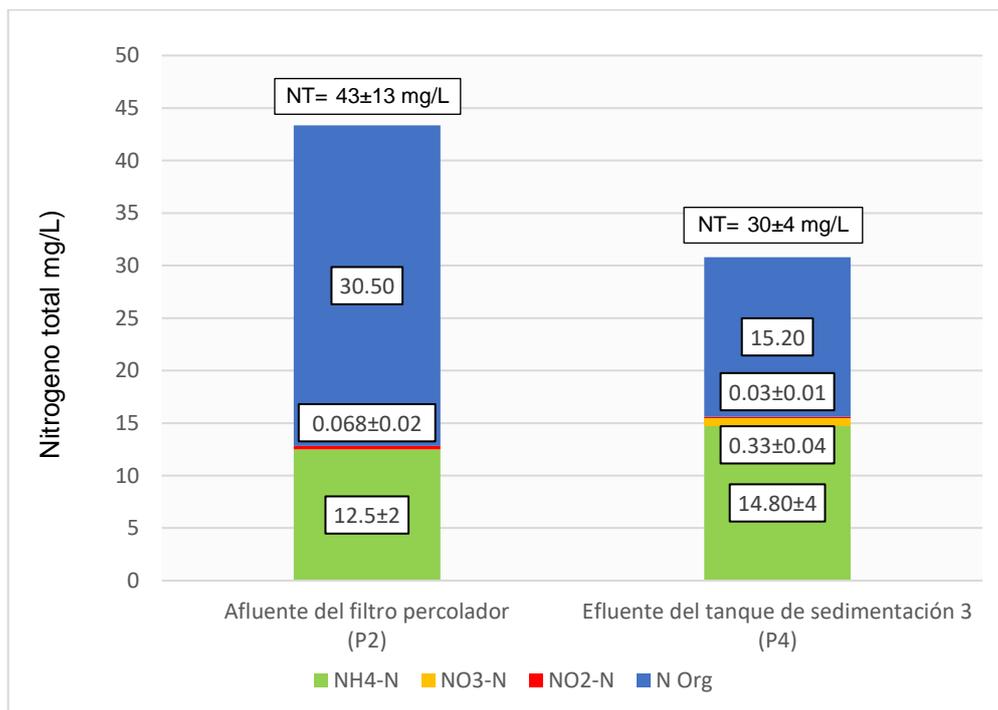
Como se observa en los resultados, se cumplió la hipótesis en la que se planteó una remoción del nitrógeno total del 35% en la etapa II (después del arranque y de la etapa 1), luego de 147 días de operación se alcanzó en esta etapa una remoción promedio de 44.44%. Cabe precisar que esta última remoción de nitrógeno total se incrementó debido a que la mayor cantidad de remoción de nitrógeno que se observó en todas las etapas fue por la síntesis de materia orgánica. Por lo que al incrementarse los valores de nitrógeno total del afluente de la planta (punto P1) en la etapa 2 con respecto a la etapa 1 hace que haya un incremento en la remoción.

#### **4.3.1. Variación de los compuestos nitrogenados**

En la etapa de arranque (ver Tabla 9) se puede observar que en el afluente del filtro percolador (punto P2) la cantidad de nitrógeno total es  $43 \pm 13$  mg/L y en el efluente del tanque de sedimentación 3 (punto P4) es de  $30 \pm 4$  mg/L, dando un porcentaje de remoción de 30.23%. Por lo que probablemente el nitrógeno se utilizó en la síntesis de la materia orgánica. Asimismo, se estima que hubo una nula o despreciable desnitrificación debido a micro zonas anóxicas de los primeros tanques de sedimentación, ya que en el punto 2 se tomaron valores promedio de oxígeno disuelto de  $0.69 \pm 0.14$  mg/L por lo que se trabajaba en condiciones con casi ausencia de oxígeno disuelto. Si bien es cierto se verificó cantidades mínimas de nitritos en el afluente del filtro percolador (punto P2), debido a que

este tanque estaba cerrado y sin aireación pudo existir una desnitrificación de nitritos que podría darse en estas condiciones según Metcalf y Eddy (2014).

Por otro lado, el amonio aumentó en el punto P2 de  $12.5 \pm 2$  mg/L a  $14.8 \pm 4$  mg/L en el punto P4, es decir entre el afluente del filtro percolador y el efluente del tanque de sedimentación 3. Esto puede relacionarse con las bajas temperaturas de la zona y la poca transferencia de oxígeno en el filtro percolador, donde podrían haber predominado zonas anaerobias. La evidencia nos dice que los nitritos y nitratos tuvieron valores mínimos debido a la baja cantidad de oxígeno disuelto, se puede inferir que el amonio no se llegó a transformar; lo que sumado a que el pH fue disminuyendo punto a punto desde un  $8.5 \pm 0.2$  en el punto Pm hasta un  $8.0 \pm 0.3$  en el punto P4, hace que predomine el amonio en comparación al amoniaco y este aumente su valor como se puede ver en los puntos P2 y P4 de la Figura 18.



**Figura 18.** Variación del nitrógeno total y demás formas del nitrógeno en los puntos Pm P4 de la etapa de arranque.

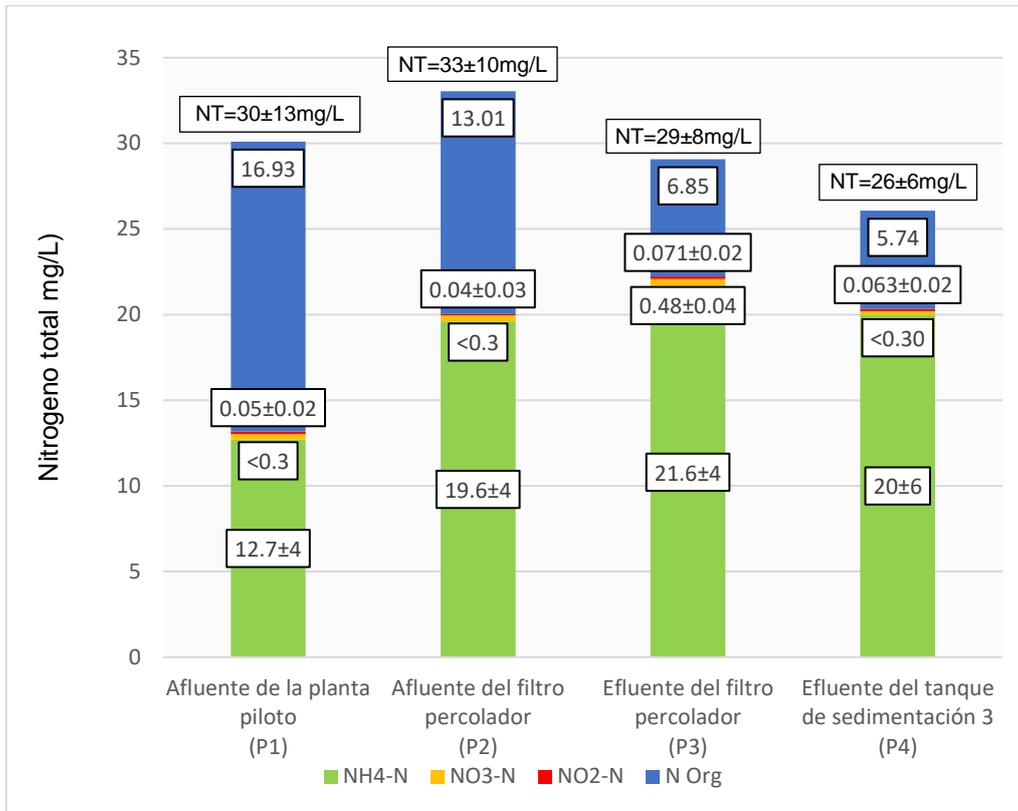
En la etapa 1 se pudo observar que el nitrógeno total en el P1 fue de  $30 \pm 13$  mg/L y en el P2 fue de  $33 \pm 10$  mg/L, en este caso se debe acotar que se hizo el cambio del

punto Pm al punto P1 por lo que la toma de muestras se hizo en el afluente de la planta piloto. El aumento del nitrógeno total del punto P1 al punto P2 se debe al tiempo de retención hidráulico que se tiene en las unidades posteriores al punto P1, ambos tanques de sedimentación tuvieron tiempos de retención hidráulico de 6 horas aproximadamente. Esto hace que exista un arrastre del lodo entre estas unidades, llevando a que se mezcle las aguas residuales tratadas a lo largo del día y haga que el nitrógeno total aumente.

Un factor importante para considerar es que la calidad del agua residual es bastante variable a lo largo del día en términos de los compuestos nitrogenados, por lo que todos los días tiende a cambiar. Entonces en algún momento del día el desagüe pudo llegar menos diluido al punto P1 y en el punto P2 al estar más tiempo en los tanques de sedimentación se diluye más ocasionando este incremento en los parámetros como nitrógeno total, amonio, nitrito y nitrato. Adicional a esto el procedimiento en la toma de muestra influye mucho, en el caso del punto P1 este se encuentra antes de las unidades de sedimentación y al no haber un pretratamiento el agua residual llega directamente a los tanques de sedimentación; por ello las muestras que se tomaban estaban menos diluidas al no haber ningún tiempo de retención de las aguas residuales que salían de este punto. También, el tamaño de todas las partículas orgánicas pudo haber sido muy grande para que sea absorbido por las bacterias.

El amonio tuvo un incremento en el punto P1 de  $12.7 \pm 4$  mg/L a  $19.6 \pm 4$  mg/L en el punto P2 y después en el punto P3 a  $21.6 \pm 4$  mg/L. Los valores bajos en el punto P1 se deben al mismo motivo que se explicó anteriormente. En el caso del punto P2 y P3 ocurre lo mismo que en la etapa de arranque, pese a las modificaciones que se realizaron para poder aumentar la oxigenación se logró valores de oxígeno disuelto de  $1.75 \pm 0.18$  mg/L en el punto P3. Al no haber la cantidad necesaria de oxígeno disuelto no llega a haber un grado significativo de nitrificación. Por otro lado, el pH disminuyó en todos los puntos aún más que en la etapa de arranque, en el punto P2 fue de  $8.1 \pm 0.2$  y en el punto P3 fue de  $7.9 \pm 0.1$ ; por lo que nuevamente hay un predominio del amonio sobre el amoniaco. En el

caso del punto P3 al punto P4 no hay cambios realmente significativos, ya que en la mayoría de muestras las variaciones son mínimas entre los dos puntos.



**Figura 19.** Variación del nitrógeno total y demás formas del nitrógeno en todos los puntos de la etapa 1.

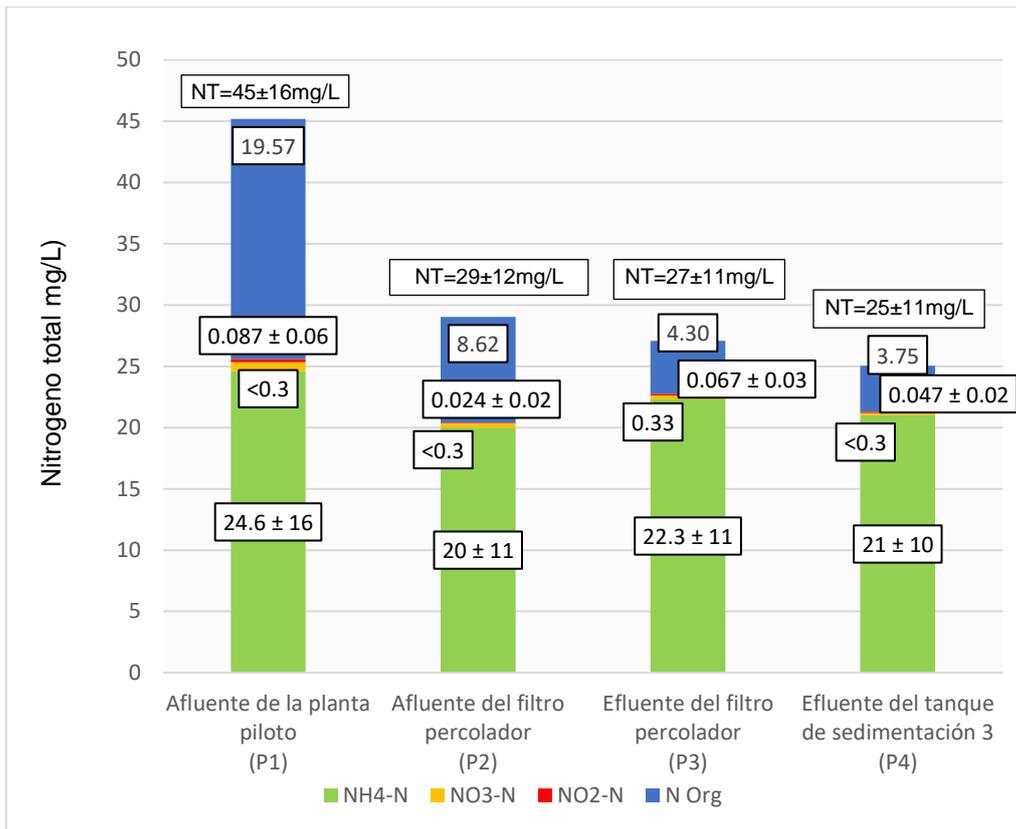
En la etapa 2 se pudo observar que el nitrógeno total en el P1 fue de  $45 \pm 16$  mg/L y en el P2 fue de  $33 \pm 10$  mg/L. En este caso no se ve la tendencia que había en la etapa 1 debido a que se modificó el procedimiento para la toma de muestras del punto P1. Inicialmente se purgaba este punto ya que los sólidos se acumulaban en la tubería de ingreso al sedimentador, pero en esta ocasión no se esperó una muestra tan limpia ya que como se vio en los resultados de la etapa 1 todos los valores disminuyeron considerablemente.

En el caso del nitrógeno total se observa valores promedio de  $45 \pm 16$  mg/L en el punto P1 y de  $25 \pm 11$  mg/L en el punto P4. El tratamiento eliminó nitrógeno total un 44.44%

(20 mg/L). Por lo que se infiere que la mayor cantidad de eliminación de nitrógeno se da por la síntesis de la materia orgánica y en menor cantidad por las reacciones anóxicas en los tanques de sedimentación.

En el caso del amonio se ve la misma tendencia que en la etapa 1, donde hay un aumento del punto P2 con  $20 \pm 11$  mg/L a  $22.3 \pm 11$  mg/L en el punto P3 y posteriormente una pequeña disminución a  $21 \pm 10$  mg/L en el punto P4. Además, se observó nuevamente una disminución de pH en todos los puntos, en el punto P2 se tuvo  $7.8 \pm 0.3$  y en el punto P3,  $7.7 \pm 0.1$ . Nuevamente se tiene un predominio del amonio por el bajo pH y una mínima transformación del amonio a compuestos nitrogenados más oxidados.

Se puede observar un aumento casi despreciable de nitritos del punto P2 al punto P3 debido a la oxigenación que se obtuvo por el filtro percolador y también un aumento de los nitratos de valores menores a 0.3 mg/L a  $0.33 \pm 0.05$  mg/L, por lo que hubo una oxidación mínima que no fue suficientemente significativa para poder observar una disminución en el amonio. Del mismo modo se observó que del punto P3 al punto P4 hubo una disminución de nitritos y nitratos por la baja oxigenación que hubo en el tanque de sedimentación 3, donde se llegó a tener un promedio de oxígeno disuelto de  $1.19 \pm 0.2$  mg/L.

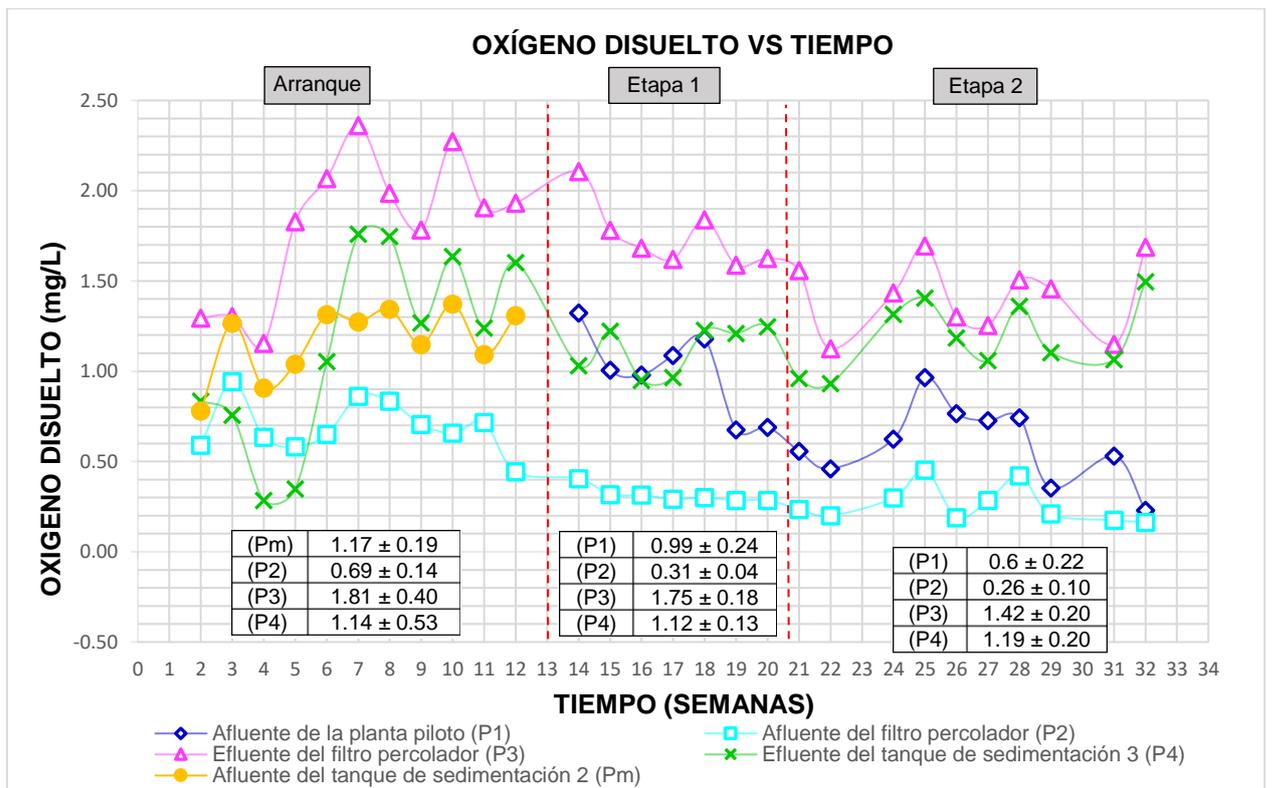


**Figura 20.** Variación del nitrógeno total y demás formas del nitrógeno en todos los puntos de la etapa 2.

#### 4.3.2. Efecto del oxígeno disuelto

La variación del oxígeno disuelto en las tres etapas se detalla en la Figura 17. Como se sabe la ubicación de la planta piloto se encuentra localizada en un lugar de gran altitud, por lo que el oxígeno disuelto en el agua es relativamente bajo en todas las etapas, por ello se intentó implementar modificaciones adicionales para poder oxigenar más el agua residual. La primera modificación que se realizó fue el reemplazo de los discos que se encargaban de distribuir el agua residual por otros de mayor dimensión en la semana 10. La segunda modificación que se hizo fue la instalación de tuberías de 1 ½", las cuales se perforaron con pequeños agujeros a lo largo de todo su eje y se instalaron verticalmente en el filtro percolador la semana 14. A pesar que se hicieron todas estas modificaciones no se pudo observar algún cambio significativo en las semanas siguientes.

Se puede observar que el punto que tiene los mayores valores del oxígeno disuelto en todas las etapas es el punto P3, el cual al ser el efluente del filtro percolador tiene mayor oxigenación con un promedio de  $1.65 \pm 0.34$  mg/L a lo largo de toda la investigación. En la etapa de arranque los valores iniciales del punto P3 hasta la semana 6, como se puede ver en la Figura 20, son bastante bajos ya que no se había realizado ningún tipo de mantenimiento a la planta desde que empezó a funcionar. En la semana 6 se empezó a realizar limpieza de las unidades y finalmente en la semana 10 se hizo el mantenimiento de todas las unidades, es así que a partir del mantenimiento que se pudo observar cómo aumentó el valor del oxígeno disuelto hasta sus valores máximos. A partir de la etapa 1 los valores de oxígeno fueron disminuyendo ligeramente conforme pasaban las semanas y cambiaban las estaciones, llegando en hasta un promedio de  $1.42 \pm 0.2$  mg/L en la etapa final.



**Figura 21.** Variación del oxígeno disuelto en los cuatro puntos en las tres etapas de la investigación.

El segundo punto con mayor cantidad de oxígeno disuelto fue el punto P4 con un promedio total de  $1.15 \pm 0.35$  mg/L. En la etapa de arranque el promedio en este punto fue de  $1.14 \pm 0.53$  mg/L, además los valores iniciales fueron bastante bajos debido al mismo problema que se explicó en el punto P3. Cabe resaltar que al inicio las tomas que se realizaban de este punto fueron directamente del tanque de sedimentación 3 ya que todavía no se implementaba el afluente final, por lo que el agua se acumulaba en el tanque de sedimentación 3 y desfogaba por el rebose.

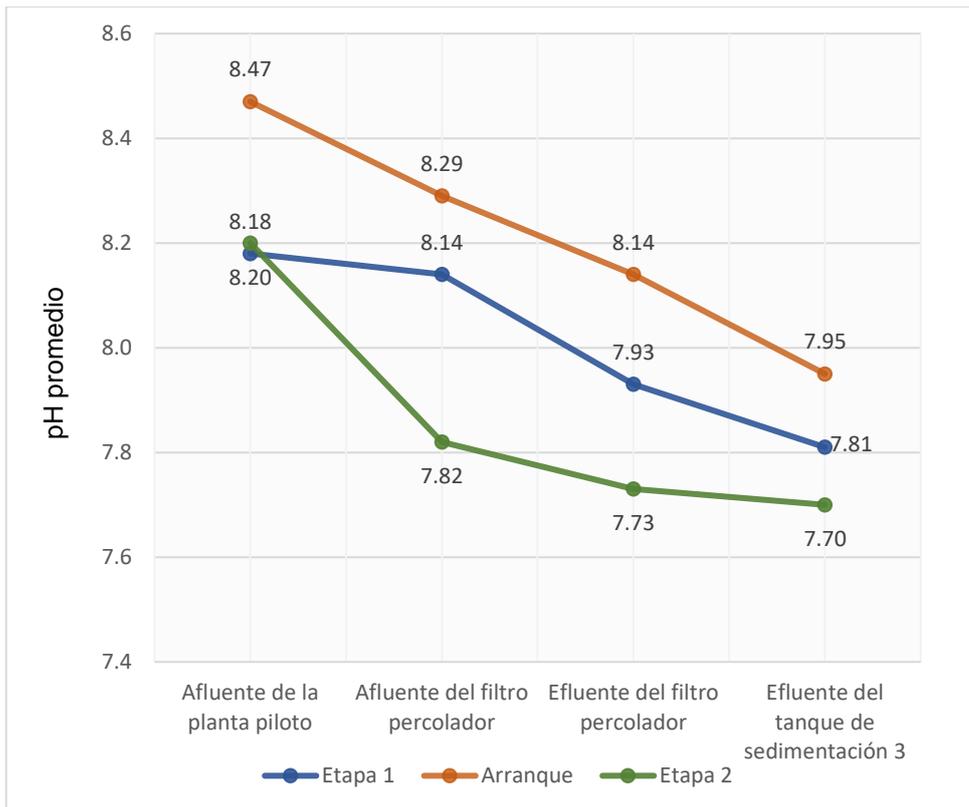
Los valores de los puntos P1 y P2 se mantuvieron relativamente sin grandes alteraciones, al igual que en los demás puntos se tuvo una tendencia a disminuir en cada etapa por el cambio de estaciones.

#### **4.3.3. Efecto del pH en el proceso de nitrificación**

Según WEF (2010) se ha demostrado que grandes cambios de los niveles de pH son perjudiciales para el rendimiento de la nitrificación. Se recomienda que se mantenga un control constante de pH dentro del rango de 6.5 a 8.0. Por otro lado Metcalf y Eddy (2014) menciona que a valores cercanos de 5.8 a 6.0 las tasas de oxidación del amonio pueden ser un 10 a 20% de la tasa de oxidación cuando se tiene un pH de 7.0.

En la etapa de arranque se tiene que el pH tiene un promedio de  $8.5 \pm 0.2$  en el punto P1 y en el punto P4 fue de  $7.9 \pm 0.3$ . En la etapa 1 se observa que el pH promedio en el punto P1 es de  $8.2 \pm 0.1$  y en punto P4 fue de  $7.8 \pm 0.1$ . En la etapa 2 se tiene que en el punto P1 es de  $8.2 \pm 0.3$  y en el punto P4 fue de  $7.7 \pm 0.1$ .

De esta etapa de arranque se sabe que en un inicio el valor del pH en la semana 3 es bastante alto en todos los puntos, por lo que se hizo la calibración del medidor de pH, observándose que después de esa semana los valores fueron más estables.



**Figura 22.** Variación promedio del pH en los cuatro puntos en las tres etapas de la investigación.

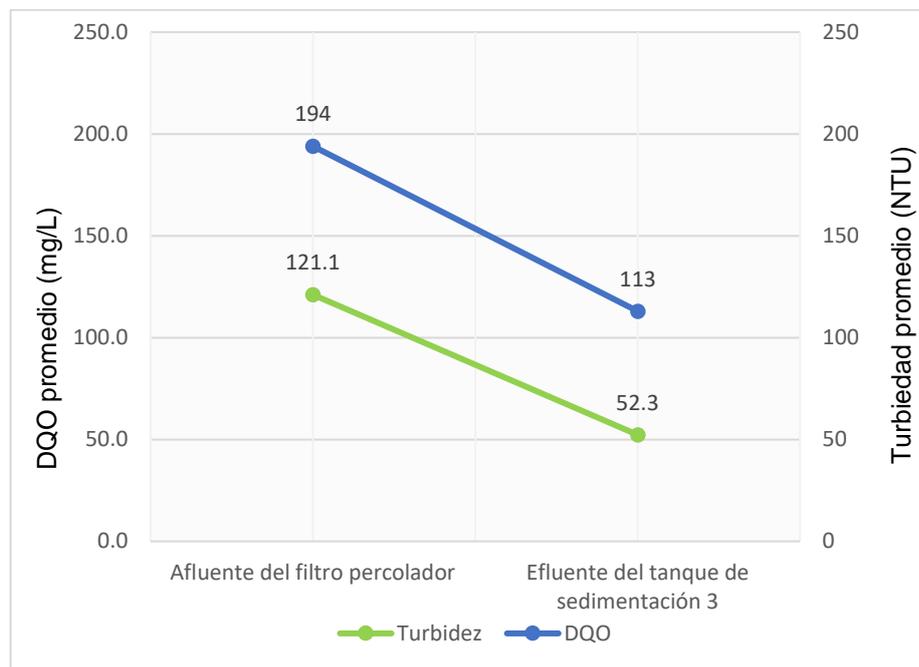
Se puede apreciar una pequeña tendencia del pH a disminuir cuando pasa de unidad a unidad, además pese a que en algunos casos puntuales los valores de pH de todos los puntos se vieron incrementados, la tendencia se mantuvo. Finalmente se puede ver que a medida que van avanzando las semanas y se cambia de estación de invierno a verano el pH promedio en todos los puntos tiende a disminuir levemente.

La disminución del pH se puede explicar debido a que las bacterias que consumen la materia orgánica y el oxígeno disuelto de las aguas residuales producen dióxido de carbono elevando la acidez.

#### 4.3.4. Relación entre la DQO y la turbiedad

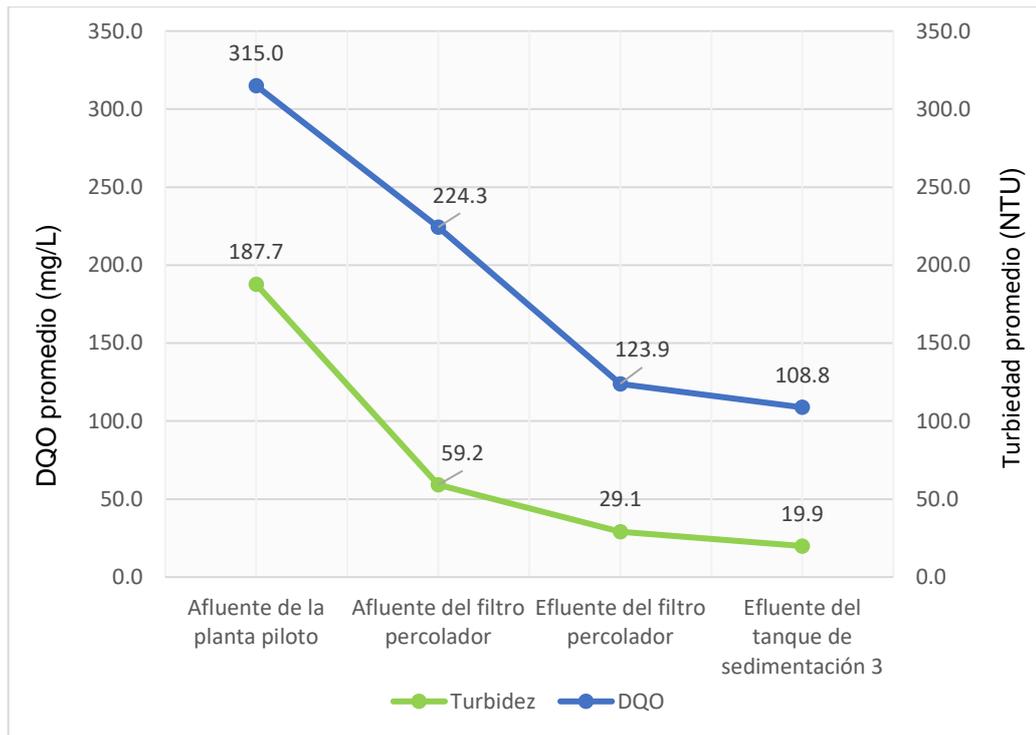
En la etapa de arranque se sabe que el promedio de turbiedad del punto P2 fue de  $121.1 \pm 71$  NTU y el promedio en el punto P4 fue de  $52.3 \pm 24$  NTU, dando una baja eficiencia del 56.81% esto se debe a que inicialmente no hubo ningún tipo de

mantenimiento hasta la semana 10, por lo que las unidades en su gran parte se encontraban con problemas operacionales ocasionando que haya un incremento de turbiedad. Un comportamiento similar se obtuvo en la DQO, ya que en esta etapa los microorganismos se están aclimatando por ello se obtuvo eficiencias de 46.28%. Además, se debe tener en cuenta que se ha tomado los resultados de las muestras de turbiedad del punto P2 y no en del punto Pm, esto para tener una correlación más exacta de los dos parámetros medidos.



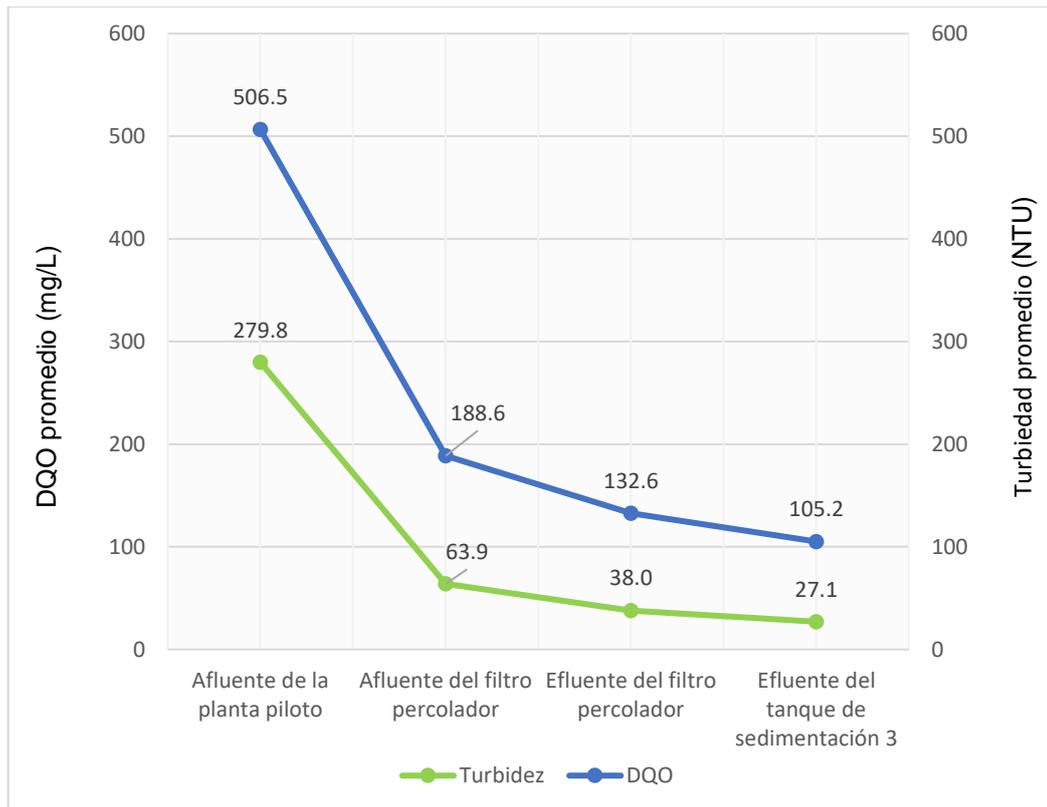
**Figura 23.** DQO y turbiedad en la etapa de arranque.

La etapa 1 se inició a partir de la semana 13 por lo que en esta etapa el sistema se encontraba con un correcto mantenimiento de las unidades y además el punto P1 ya se encontraba implementado; esto se vio reflejado en los resultados tanto de turbiedad como de DQO. En el caso de la turbiedad se obtuvo en el punto P4 un promedio de  $19.9 \pm 3$  UNT, los menores valores registrados en toda la investigación, además se registró un comportamiento más estable en la eficiencia de la turbiedad como de la DQO registrándose eficiencias de 87.78% y 63.56% respectivamente.



**Figura 24.** DQO y turbiedad en la etapa 1.

En la etapa 2 se obtuvo las mayores eficiencias de toda la investigación, la turbiedad disminuyó de  $279.8 \pm 55$  NTU a  $27.1 \pm 8$  NTU, teniendo una eficiencia de 90.08%; la DQO por otro lado disminuyó de  $506 \pm 215$  mg/L a  $105 \pm 48$  mg/L, obteniéndose una eficiencia de 77.34%. El comportamiento nos indica que la gran mayoría de turbiedad y DQO se remueve en el tanque de sedimentación 1 y 2 ya que pese a los picos de más de 800mg/L y 389.0 NTU, los valores en el punto P2 se mantuvieron con la misma tendencia que tenían inicialmente como se observa en la Figura 15 y 17. Por otro lado se puede observar un incremento de turbiedad en el punto P1 con respecto a la anterior etapa, esto se puede explicar debido a que en la semana 21 se empezó a notar la presencia de algas en las dos primeras unidades. Para poder contrarrestar este efecto se realizó la limpieza y el mantenimiento correspondiente de todas las unidades, pero al cabo de un tiempo las algas volvieron a crecer.

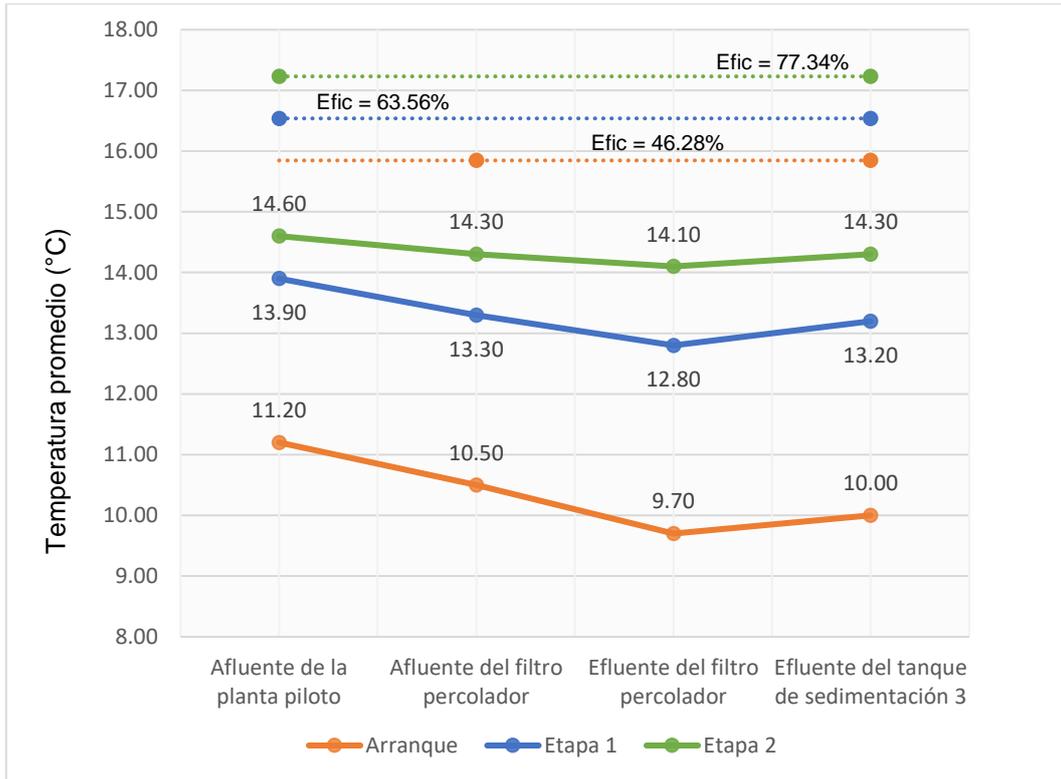


**Figura 25.** DQO y turbiedad en la etapa 2.

La tendencia general de disminuir la turbiedad y la DQO de forma proporcional punto a punto se mantuvo desde la etapa 1 hasta finalizar la investigación. El punto P1 al ser el afluente de la planta piloto es el punto con mayores valores de turbiedad y DQO, posterior a eso el tanque de sedimentación 1 y 2 disminuyen la cantidad de sólidos suspendidos disminuyendo los valores en el punto P2. Estas unidades cumplen su propósito de sedimentar la mayor cantidad de sólidos para que el filtro percolador pueda trabajar sin problemas. En el punto P3 se tiene mayor turbiedad que el punto P4 tanto por el arrastre de la biopelícula que se desprende del filtro percolador y también debido a que el tanque de sedimentación 3 termina de sedimentar los sólidos que se arrastraron de la anterior unidad.

#### 4.3.5. Efecto de la temperatura en la remoción de DQO

En la etapa de arranque la temperatura promedio del agua residual osciló entre 11.2°C a 10.0°C, desde el punto P1 hasta el punto P4. En esta etapa la eficiencia de remoción de la DQO fue de 46.28% tomando como referencia el punto P2 y el punto P4.



**Figura 26.** Temperatura promedio del agua residual y eficiencia de la remoción de DQO en todas las etapas para todos los puntos de monitoreo.

En la etapa 1 la temperatura promedio del agua residual osciló entre 13.9°C a 13.2°C, desde el punto P1 hasta el punto P4. En esta etapa la eficiencia de remoción de la DQO fue de 63.56% tomando como referencia el punto P1 y el punto P4.

En la etapa 2 la temperatura promedio del agua residual osciló entre 14.6°C a 14.3°C, desde el punto P1 hasta el punto P4. En esta etapa la eficiencia de remoción de la DQO fue de 77.34% tomando como referencia el punto P1 y el punto P4.

Se puede observar que la eficiencia en la remoción de la DQO aumentó conforme la investigación avanzaba. En la etapa 2 se alcanzó la mayor eficiencia promedio de remoción de la DQO, cuando se obtuvo el mayor valor promedio de temperatura en el agua residual.

#### 4.3.6. Variación del fosfato total y los ortofosfatos

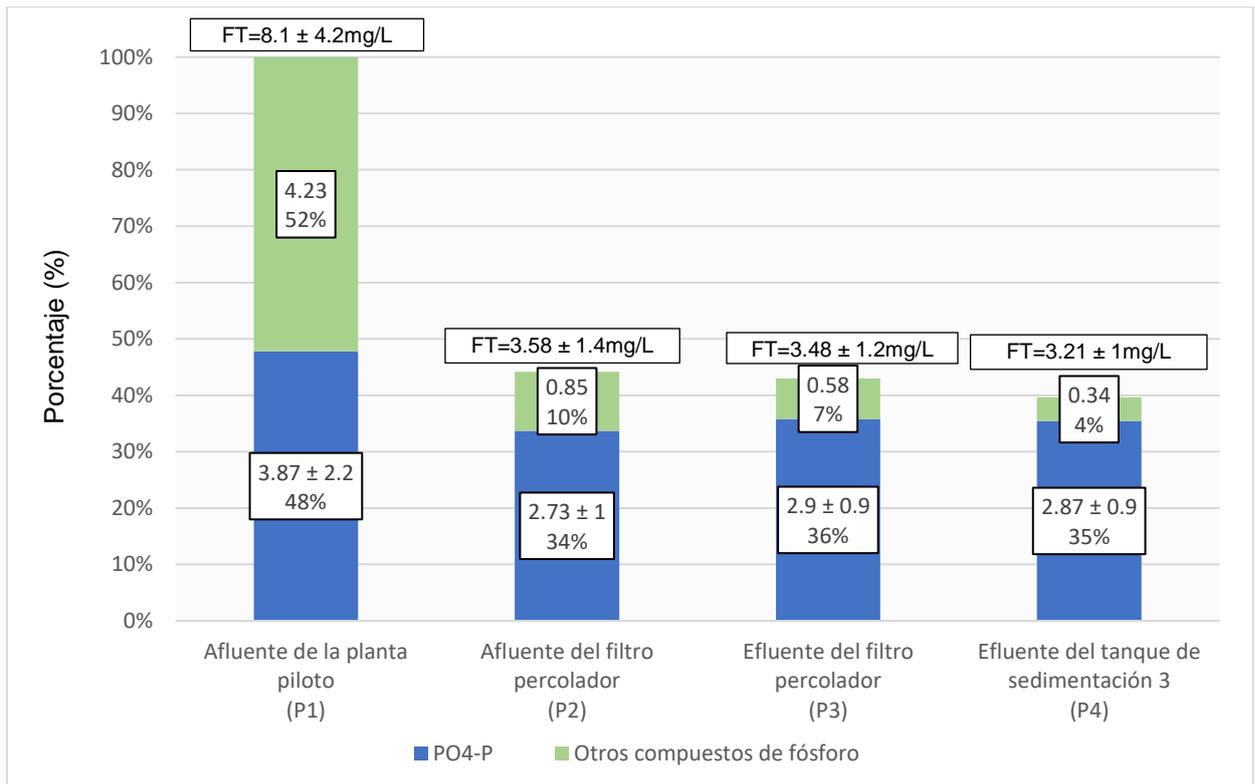
En la etapa 2 se tuvo un promedio de fosfato total de  $8.10 \pm 4.2$  mg/L de 12 muestras, de las cuales 2 muestras estuvieron fuera del rango (>15 mg/L) y un promedio

de  $3.21 \pm 1$  mg/L de 12 muestras en el punto P4, obteniéndose de esta manera una eficiencia promedio en la remoción de 50.26%.

En el caso de los ortofosfatos se tuvo un promedio de  $3.87 \pm 2.2$  mg/L de 11 muestras y un promedio de  $2.87 \pm 0.9$  mg/L de 11 muestras en el punto P4, obteniéndose de esta manera una conversión promedio de 2.85%.

La mayor cantidad de fosfato total que se remueven en todo el sistema fue entre el punto P1 el punto P2 con una eficiencia promedio de 47.64%. Esto nos da a entender que un gran porcentaje de fosfato total que entra al sistema se encuentra como fósforo particulado, ya que se remueve la mayor cantidad de fosfato total en las primeras unidades de sedimentación. Por otro lado, los ortofosfatos en el punto P2 fue de 2.73 mg/L, lo que representó un aporte de 34% del fosfato total y en el punto P3 fue de 2.90 mg/L, el cual representó un 36%. De esta manera el incremento de 0.17 mg/L en la concentración de ortofosfatos se debió a la degradación de polifosfatos por los microorganismos del filtro percolador, aumentando su relación  $PO_4\text{-P/FT}$  en 2%.

La eliminación del fósforo finalmente se realiza debido al desprendimiento de la biopelícula en el filtro percolador, que finalmente sedimenta en el tanque de sedimentación 3. Obteniéndose así una remoción de fosfato total de 0.27mg/L entre los puntos P3 y P4; lo que representa un 7.75% menos entre los dos puntos.



**Figura 27.** Porcentaje de remoción de fósforo en la etapa 2 para todos los puntos de monitoreo.

El día 215 se tuvo el pico más alto de todos los datos registrados, esto se dio en la gran mayoría de los parámetros. El día que se registró estas anomalías hubo una festividad en la provincia por lo que se puede decir que esto cambió drásticamente la calidad del agua residual, dando así estos resultados.

## Conclusiones

- El filtro percolador con medio de soporte de plástico, llegó a alcanzar una eficiencia promedio en la remoción de nitrógeno total de 44.44% mayor a la esperada de 35%, luego de 147 días de operación, en la etapa 2 (después de la etapa de arranque y en la etapa 1 donde se obtuvieron eficiencias de remoción de 30.23 %y 13.33%).
- Hubo una conversión del amonio de un 14.63% en la etapa 2. Donde hubo un promedio de  $24.6 \pm 16$  mg/L en la entrada de la planta piloto y un promedio de  $21 \pm 10$  mg/L a la salida de la plata. Por lo que no se pudo cumplir con la hipótesis de una remoción de 90% de amonio.
- El filtro percolador removió concentraciones de 4 mg/L y 20 mg/L de nitrógeno total en la etapa 1 y en la etapa 2, con un porcentaje de remoción de 13.33% y 44.44% respectivamente. Quedando finalmente en el efluente de la planta piloto una concentración de nitrógeno total de  $26 \pm 6$  mg/L en la etapa 1 y  $25 \pm 11$  mg/L en la etapa 2.
- En caso de la DQO se demostró una eficiencia en la remoción de esta ya que pese a no llegar a la eficiencia esperada del 90%, se obtuvo eficiencias de remoción de 63.56% en la etapa 1 y un 77.34% en la etapa 2. Lo que dio una concentración final en el punto P4 de  $109 \pm 21$  mg/L en la etapa 1 y  $105 \pm 48$  mg/L en la etapa 2.
- La mayor cantidad de remoción del nitrógeno total se evidenciaron entre los puntos P1 (entrada de la planta piloto) y P2 (afluente del filtro percolador) en la etapa 2; una situación similar ocurrió con la remoción de la DQO donde se obtuvo los mayores valores de remoción. Por lo que esta cantidad de nitrógeno total removido se debe en su mayoría a la síntesis de materia orgánica a partir de la eliminación de DQO.
- En su mayor parte el fósforo se removió en las dos primeras unidades de sedimentación un total de 4.52mg/L de fosfato total (55.80%), por lo que hubo una gran cantidad de fósforo particulado en las aguas residuales que ingresaban a la planta. Posterior a eso el filtro percolador llegó a remover 0.10mg/L de fosfato total y

también se detectó un aumento de ortofosfatos debido a una aparente degradación de polifosfatos por los microorganismos del filtro percolador.

- La mínima concentración promedio del oxígeno disuelto fue de  $0.26 \pm 0.10$  mg/L en el punto P2 de la etapa 2 y el valor máximo promedio fue de  $1.81 \pm 0.40$ mg/L en el punto P3 de la etapa de arranque. Por lo tanto, a pesar de las bajas temperaturas se obtuvo al menos una la ventilación natural del filtro percolador para obtener las condiciones aerobias necesarias para la conversión parcial de la materia orgánica pero insuficiente para el proceso de nitrificación.
- La aireación que se produjo en el filtro percolador solo permitió lograr el oxígeno disuelto hasta  $1.81 \pm 0.40$ mg/L en el efluente del filtro percolador. Este valor no permitió la completa conversión del amonio a nitritos y nitratos.
- El aumento de la temperatura del agua residual se dio en un rango de  $10 \pm 0.9$  °C a  $14.6 \pm 0.5$  °C a lo largo de toda la investigación. En estas condiciones de baja temperatura, la eficiencia de remoción de la carga orgánica expresada como DQO varió de 46.28% a 77.34% respectivamente para las temperaturas indicadas.
- El pH y la cantidad mínima de oxígeno afectaron considerablemente el comportamiento del amonio, que en lugar de transformarse a nitritos y posteriormente a nitratos; evidenció un aumento en su concentración final a la salida del filtro percolador.
- Se pudo remover entre un 87.78% y un 90.08% de turbiedad en la etapa 1 y en la etapa 2 respectivamente, de las aguas residuales que ingresaron a la planta piloto. Dando una turbiedad final a la salida de la planta piloto de  $19.9 \pm 3$  NTU en la etapa 1 y  $27.1 \pm 8$  NTU en la etapa 2.
- Las aguas residuales que ingresaron a la planta piloto en esta investigación presentaron un contenido de nitratos, que varió desde valores menores a 0.3 a 0.51 mg de  $\text{NO}_3\text{-N}$  /L que representan valores muy por debajo de lo esperado para las concentraciones típicas en aguas residuales municipales.

## Recomendaciones

- Se recomienda colocar una unidad de pretratamiento para evitar que los sólidos se acumulen en la tubería de ingreso a la planta ya que se pudo observar que los resultados obtenidos de los diferentes parámetros medidos en el punto del afluente de la planta tenían variaciones considerables.
- Se recomienda investigar el filtro percolador estudiado con ventilación forzada.
- Elegir el punto donde se va a hacer la toma de muestras y el procedimiento para realizar la toma es determinante para obtener buenos resultados ya que, como se pudo ver en el punto P1 de la etapa 1 y etapa 2 del experimento, los resultados pueden llegar variar considerablemente.
- Se recomienda realizar investigaciones en las que se pueda considerar una recirculación de las aguas residuales con las mismas condiciones ambientales para poder determinar el grado de nitrificación que se podría alcanzar con los niveles de oxígeno disuelto que se tuvo en la localidad.
- Se debe hacer un mantenimiento constante de la planta para evitar el crecimiento de algas ya que en la etapa final de la investigación se tuvo este problema en las unidades de sedimentación.

## Referencias bibliográficas

- Apha, A., AWWA, R. y WPCF, L. (1992). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Díaz de Santos.
- Bitton, G. (2011). Wastewater Microbiology. (4ta ed). Wiley-Blackwell.
- Blas, A. (2018). Determinación y mejoramiento de la eficiencia del sistema de tanque séptico y filtro biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales de la localidad de Jivia – departamento de Huánuco. [tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio Institucional UNASAM. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2350>
- Choi, I. S., Dombrowski, E. M., y Wiesmann, U. (2007). Fundamentals of biological wastewater treatment. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- EPA. (2000). Wastewater Technology Fact Sheet-Trickling Filters. Environmental Protection Agency.
- EPA. (2000). Wastewater Technology Fact Sheet-Trickling Filter Nitrification. Environmental Protection Agency.
- Forster, C. (2003). Wastewater Treatment and Technology. Thomas Telford Publishing.
- Forbis-Stokes AA., Rocha-Melogno L. y Deshusses MA. (2018). Nitrifying trickling filters and denitrifying bioreactors for nitrogen management of high-strength anaerobic digestion effluent. Chemosphere, 204, 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.137>

Grady, C. P. L., Daigger, G. T., Love, N. G. y Filipe, C. D. M. (2011). *Biological Wastewater Treatment*. (3ra ed.). IWA Publishing

Gray, N. F. (2004). *Biology of Wastewater Treatment*. (2da ed.) Imperial College Press

Henze, M., van Loosdrecht, M. C., Ekama, G. A., y Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment Principles, Modelling and Design*. IWA publishing.

Jaramillio, A. y Paredes, J. (2019). Evaluación de la eficiencia de un sistema de dos filtros percoladores en serie para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la urbanización Santa Lucía – Morales. [tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. Repositorio de tesis UPU. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/1832>

Lekang O-I, Kleppe H. (2000). Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. *Aquacultural Engineering*. 21:181–199. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(99\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(99)00032-1)

Mara, D. y Horan, N. (2003). *Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. Elsevier.

Metcalf y Eddy, (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. (5ta ed.). Mc Graw-Hill

Obst. U. (1990). *Biotechnologie in der Wasseraufbereitung*. Oldenbourg. R. Oldenbourg.

Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la Calidad del Agua Potable: Primer apéndice de la tercera edición*. (3ra ed.). OMS

Parker, D. S., & Richards, T. (1986). Nitrification in trickling filters. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 58(9), 896-902.

Peavy, H. S., Rowe, D. R., y Tchobanoglous, G. (1985). *Environmental engineering*. McGraw-Hill.

Perez, H. R. (2018). Evaluation of slow sand filtration for municipal wastewater with a trickling filter as primary treatment. [tesis de maestría, Universität Stuttgart]. <http://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/785859>

Riffat, R. (2013). *Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering*. CRC Press

Rodriguez A.A. (2014). Estudio de la eficiencia de un filtro sumergido y un filtro percolador en el tratamiento secundario de las aguas residuales domésticas. [tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio Institucional UNSM. <http://hdl.handle.net/11458/256>

Romero, J. A. (2010). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. (3ra ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería.

Von Sperling, M. (2007). *Basic principles of wastewater treatment*. IWA publishing.

Von Sperling, M. (2007). *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. IWA publishing

Von Sperling, M. y Chernicharo, C. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. IWA Publishing.

Water Environment Federation (2010). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants: WEF Manual of Practice No. 8 ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 76. (5ta ed.). McGraw-Hill.

Water Environment Federation (2010). Biological Nutrient Removal (BNR) Operation in Wastewater Treatment Plants WEF Manual of Practice No. 29. McGraw-Hill.

Yucra, R. (2016). Influencia del PET reciclado en las características del agua residual doméstica mediante el proceso de filtro percolador para el distrito de taraco, provincia de Huancane, región Puno. [tesis de pregrado, Universidad Andina Nestor Cáceres Velasquez]. Repositorio de tesis. <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/736>

Zhu, J., & Rothermel, B. (2014). Everything you need to know about trickling filters. Clear Waters, 44(2), 16-19.

## Anexos

Anexo 1: Resultados de los parámetros monitoreados.....	1
1.1. Promedio por semana de los resultados de temperatura, temperatura ambiental, pH y OD .....	1
1.2. Promedio por semana de los resultados de turbiedad, conductividad y solidos sedimentables .....	2
1.3. Promedio por semana de los resultados de amonio, nitrito y nitrato .....	3
1.4. Promedio por semana de los resultados de nitrógeno total, fosfato total y ortofosfatos.....	4
1.5. Promedio por semana de los resultados de DQO.....	5
Anexo 2: Panel fotográfico .....	6
1.1. Equipos utilizados para la medición de los parámetros.....	6
1.2. Pruebas de tubo marca Nanocolor .....	6
1.3. Toma de muestras in situ.....	9
1.4. Problemas de operación y modificaciones en la planta piloto .....	10

## Anexo 1: Resultados de los parámetros monitoreados

### 1.1. Promedio por semana de los resultados de temperatura, temperatura ambiental, pH y OD

Semana	T° amb (C°)	Temperatura (°C)				pH				OD			
		Pm	P2	P3	P4	Pm	P2	P3	P4	Pm	P2	P3	P4
2	8.7	12.44	11.70	11.30	11.45	8.16	8.15	7.95	7.72	0.78	0.59	1.30	0.84
3	9.5	12.02	11.38	10.82	10.83	8.86	8.52	8.15	7.96	1.27	0.94	1.30	0.76
4	3.3	10.43	9.82	8.93	9.02	8.43	8.41	8.06	7.58	0.91	0.64	1.16	0.29
5	4.0	10.38	9.65	8.13	8.97	8.05	8.00	7.87	7.60	1.04	0.58	1.83	0.35
6	5.5	11.35	10.83	9.37	10.32	8.44	8.10	8.00	7.82	1.31	0.65	2.07	1.05
7	6.0	11.27	10.97	10.68	11.03	8.44	8.21	8.15	8.00	1.27	0.86	2.36	1.76
8	5.6	10.30	9.63	9.02	8.87	8.42	8.25	8.19	7.98	1.34	0.84	1.99	1.75
9	5.7	10.62	9.94	9.08	9.72	8.43	8.22	8.09	7.84	1.15	0.71	1.78	1.27
10	4.6	11.10	10.08	9.40	9.13	8.63	8.27	8.23	8.28	1.37	0.66	2.27	1.64
11	3.9	11.44	10.62	9.64	9.86	8.51	8.22	8.03	7.91	1.09	0.72	1.91	1.24
12	4.8	12.23	11.20	9.82	10.27	8.86	8.84	8.81	8.72	1.31	0.44	1.93	1.60
Semana	T° amb (C°)	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
14	7.4	12.87	12.15	11.30	12.20	8.29	8.21	8.12	7.87	1.32	0.41	2.11	1.03
15	10.8	13.47	13.50	13.03	13.75	8.13	8.37	7.95	7.88	1.01	0.32	1.78	1.22
16	10.4	14.34	13.50	12.88	13.68	8.23	7.87	7.94	7.83	0.98	0.31	1.68	0.95
17	8.8	13.52	12.88	12.42	12.73	8.31	8.14	7.96	7.78	1.09	0.29	1.62	0.97
18	11.9	14.35	13.80	13.60	14.20	7.95	7.94	7.80	7.73	1.18	0.30	1.84	1.23
19	11.1	14.83	14.05	13.80	14.38	8.13	8.14	7.84	7.83	0.68	0.29	1.59	1.21
20	11.3	13.73	13.10	12.85	11.48	8.23	8.28	7.88	7.78	0.69	0.29	1.63	1.25
21	9.9	14.10	13.93	14.23	14.43	8.54	8.15	7.79	7.73	0.56	0.24	1.56	0.96
22	10.9	14.10	14.45	14.83	15.48	7.98	8.21	7.85	7.86	0.46	0.20	1.13	0.93
24	9.5	15.12	14.82	15.60	13.98	8.27	8.06	7.83	7.80	0.63	0.30	1.44	1.32
25	10.0	14.58	14.30	13.90	14.13	8.07	7.66	7.67	7.62	0.97	0.45	1.70	1.41
26	12.0	14.06	13.82	13.76	14.06	8.42	7.87	7.70	7.73	0.77	0.19	1.30	1.18
27	13.1	14.96	14.50	14.66	14.96	8.06	7.40	7.46	7.42	0.73	0.28	1.25	1.06
28	11.8	14.70	14.55	14.25	14.75	8.40	7.89	7.62	7.64	0.74	0.42	1.51	1.36
29	10.5	15.37	14.67	13.87	13.83	7.84	7.64	7.68	7.66	0.35	0.21	1.46	1.10
31	12.3	14.75	14.45	13.50	14.05	8.55	7.89	7.98	7.92	0.53	0.18	1.15	1.07
32	10.8	14.17	13.17	12.63	13.03	7.91	7.42	7.70	7.64	0.23	0.16	1.69	1.50

**1.2. Promedio por semana de los resultados de turbiedad, conductividad y solidos sedimentables**

Sema na	Caudal (L/min)	Turbiedad (NTU)				Conductividad (ms/cm)				Solid. Sedim. (mL/L)			
		Pm	P2	P3	P4	Pm	P2	P3	P4	Pm	P2	P3	P4
2	1.85	154.50	284.17	145.17	105.50	581.6	1120.5	1089.9	872.2	0.2	0.5	0.6	0.1
3	1.99	172.50	161.50	94.33	69.83	607.8	607.1	703.9	660.4	0	0	0.2	0
4	2.14	191.00	176.17	110.83	49.83	602.7	613.6	679.0	612.9	0.3	0.4	0.1	0
5	2.75	ND	ND	ND	ND	659.6	509.0	536.7	552.0	0	1.5	0.3	0
6	2.25	91.83	69.17	99.83	31.33	491.6	438.9	500.8	505.0	0.1	0.5	0.1	0
7	3.12	130.83	115.17	92.50	62.00	491.6	462.5	521.4	489.3	0.1	0.6	0.2	0
8	2.75	104.50	105.00	85.67	60.83	552.6	560.2	579.5	545.0	0.1	0.4	0.1	0
9	1.8	207.50	113.50	57.17	40.00	603.8	543.1	555.6	553.9	0.1	0.4	0.5	0
10	1.97	94.00	44.00	94.00	36.75	501.3	361.2	395.8	407.1	0	0	0.4	0.4
11	3.18	196.40	61.60	62.00	43.20	578.1	427.5	461.1	464.1	0	0	1.8	0.6
12	3.1	114.50	80.50	45.00	23.50	467.0	405.7	433.6	423.2	0.6	0.5	0.3	0
Sema na	Caudal (L/min)	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
14	1.3	150.83	78.33	27.83	17.33	456.7	414.4	441.4	424.6	0.1	1.4	0.4	0
15	1.84	122.67	49.33	32.33	19.67	379.5	453.2	443.6	432.5	0.1	0	0.7	0
16	2.02	109.80	57.20	32.20	18.80	438.6	466.2	494.3	473.4	0.1	0.1	1.2	0
17	3.18	124.50	64.33	34.83	22.00	521.6	437.2	464.3	446.8	0.4	0.1	0.7	0
18	1.63	289.00	55.00	25.00	15.33	402.6	418.6	431.3	426.1	0.2	0	0.7	0
19	1.88	245.75	50.25	26.00	22.50	404.8	426.1	449.5	441.6	0.6	0.2	0	0
20	1.45	271.00	60.00	25.75	23.75	471.9	428.6	453.7	454.5	0.1	0.2	0.1	0
21	2.08	317.00	50.75	24.75	19.00	765.3	433.9	450.1	449.1	0.4	0.1	1	0
22	2.98	389.00	128.25	28.25	27.50	624.2	520.4	553.3	527.7	0.1	0	0.1	0
24	3.05	205.00	57.33	30.33	23.33	533.3	417.4	448.5	462.0	0.3	0.05	0.7	0
25	1.81	220.00	44.50	25.75	21.25	488.7	355.6	354.4	343.2	0.2	0.05	0	0
26	1.92	291.00	70.20	43.40	39.20	644.0	588.5	630.2	644.9	0.2	0.05	0.6	0
27	1.82	225.20	52.60	38.80	25.60	527.7	370.8	388.3	384.0	0.15	0.1	0.45	0
28	1.43	291.75	48.75	44.00	27.25	662.5	431.0	457.3	450.5	0.5	0.3	0.9	0
29	2.13	315.33	48.67	31.33	24.67	361.0	410.9	428.6	426.5	0.15	0.3	0.6	0
31	1.35	284.00	91.00	75.00	43.00	1005.0	653.8	683.1	636.2	0.5	1.4	1.1	0.1
32	1.98	260.00	47.00	38.00	20.67	555.6	368.0	385.2	378.5	0.4	0.1	1.3	0

### 1.3. Promedio por semana de los resultados de amonio, nitrito y nitrato

Semanas	Amonio (mg/L)				Nitrito (mg/L)				Nitrato (mg/L)			
	Pm	P2	P3	P4	Pm	P2	P3	P4	Pm	P2	P3	P4
1	13	ND	20	ND	0.088	ND	0.03	ND	FR	ND	FR	
3	ND	14	ND	13	ND	0.083	ND	0.019	ND	ND	ND	0.35
6	ND	13	ND	18	ND	ND	ND	0.042	ND	ND	ND	FR
7	ND	10	ND	19	ND	ND	ND	0.025	ND	ND	ND	FR
9	ND	13	ND	10	ND	0.053	ND	0.027	ND	FR	ND	FR
11	19	ND	ND	14	ND	ND	ND	0.039	ND	ND	ND	0.3
Semanas	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
14	15	16	23	16	0.038	0.113	0.082	0.056	0.32	FR	FR	FR
15	18	19	22	17	ND	0.043	0.053	0.046	ND	0.35	0.5	FR
16	14	24	23	23	ND	0.012	0.085	0.1	ND	FR	0.51	FR
17	9	16	17	16	ND	0.015	0.082	0.05	ND	FR	0.6	FR
18	6	27	29	32	0.061	0.022	0.039	0.035	FR	FR	FR	FR
19	12	19	20	20	ND	0.027	0.07	0.073	ND	FR	0.46	FR
20	15	16	17	16	ND	0.046	0.088	0.081	ND	FR	0.42	FR
21	33	24	23	20	ND	0.012	0.063	0.055	FR	FR	0.32	FR
22	47	29	32	29	0.216	0.014	0.037	0.035	FR	FR	0.3	FR
23	8	23	25	24	0.018	0.019	0.047	0.047	FR	FR	0.3	FR
24	14	15	17	16	0.089	0.014	0.103	0.051	FR	FR	0.38	FR
25	23	15	15	15	0.074	0.027	0.097	0.081	FR	FR	0.44	FR
26	10	16	22	23	0.07	0.048	0.037	0.027	FR	FR	0.3	FR
27	18	15	15	16	0.052	0.019	0.063	0.042	FR	FR	FR	FR
28	20	9	13	10	0.056	0.07	0.095	0.091	FR	0.36	0.3	FR
29	14	15	18	19	0.041	0.009	0.069	0.042	FR	FR	FR	FR
31	51	49	53	47	0.158	0.015	0.027	0.015	FR	FR	0.31	FR
32	46	13	15	16	0.139	0.028	0.094	0.039	0.74	FR	0.3	FR
33	11	17	20	17	0.0474	0.01	0.071	0.037	FR	FR	FR	FR

**1.4. Promedio por semana de los resultados de nitrógeno total, fosfato total y ortofosfatos**

Semanas	Nitrogeno total (mg/L)				Fosfato total (mg/L)				Ortofosfatos (mg/L)			
	Pm	P2	P3	P4	Pm	P2	P3	P4	Pm	P2	P3	P4
1	37	ND	49	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
3	ND	39	ND	33	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
6	ND	24	ND	23	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
7	ND	46	ND	33	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
9	ND	44	ND	28	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
11	FR	FR	ND	33	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Semanas	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
14	14	49	45	33	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
15	41		28	23	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
16	30	34	28	28	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
17	17	24	21	19	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
18	49	37	34	35	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
19	27	28	25	24	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
20	35	24	21	21	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
21	60	37	27	25	FR	4.37	3.65	3.39	4.49	3.35	3.11	3
22	60	42	34	32	9.27	4.96	4.28	4.01	5.51	3.68	3.75	3.51
23	22	28	29	28	5.61	4.04	4.32	4	1.85	3.02	3.77	3.61
24	46	25	22	20	4.81	3.29	2.98	3.22	3.11	2.31	2.43	2.42
25	51	21	21	18	4.26	1.96	2.14	2.81	3.51	1.96	2.03	2.07
26	22	27	26	27	4.48	3.58	3.58	3.02	1.65	2.5	2.95	3.8
27	41	22	22	19	6.03	2.95	2.92	2.72	3.73	2.13	2.38	2.48
28	60	18	17	13	6.86	2.18	2.41	1.72	5.68	1.57	1.72	1.53
29	27	24	23	22	6.21	2.99	3.17	2.93	2.32	2.21	2.26	2.45
31	60	FR	FR	55	FR	7.03	6.74	5.61	8.94	5.023	4.94	4.56
32	60	19	20	18	14.2	2.41	2.55	2.47				
33	27	26	23	19	5.44	3.15	3.07	2.6	1.74	2.25	2.51	2.19

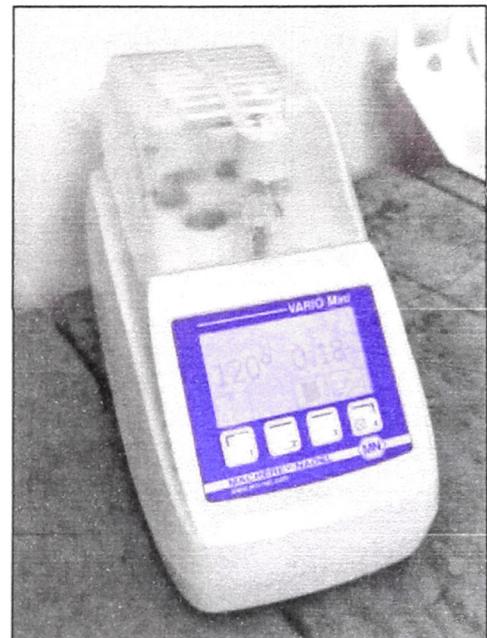
### 1.5. Promedio por semana de los resultados de DQO

Semanas	DQO (mg/L)			
	Pm	P2	P3	P4
1	ND	ND	ND	ND
3	ND	163.4	ND	53.8
6	ND	168.3	ND	120.4
7	ND	206.4	ND	142.9
9	ND	238.1	ND	134.6
11	298.2	ND	ND	114.4
	P1	P2	P3	P4
14	289	270.4	173.5	120.2
15	ND	ND	ND	ND
16	300.9	205.7	117	110.5
17	ND	ND	ND	ND
18	285.3	283.8	149.6	125.8
19	ND	ND	ND	ND
20	384.6	137.2	55.6	78.8
21	ND	ND	ND	ND
22	699.6	235.6	160.7	137.8
23	ND	ND	ND	ND
24	270.6	162.7	96.5	84.4
25	ND	ND	ND	ND
26	332.7	198.3	129.5	123
27	ND	ND	ND	ND
28	265.4	111.9	78.7	62.1
29	438.4	162.5	117.7	95.6
31	800	369.5	297.9	201.8
32	731.3	97.3	77.5	63.1
33	513.6	171.1	102.3	73.7

## Anexo 2: Panel fotográfico

### 1.1. Equipos utilizados para la medición de los parámetros

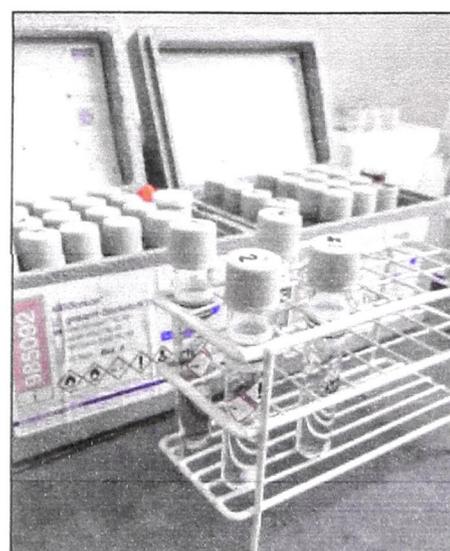
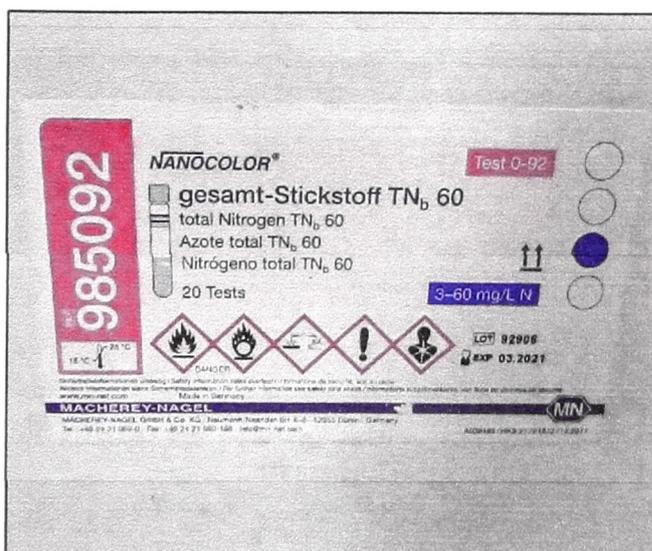
Para la medición de la turbiedad, los nutrientes y la DQO se usó el equipo alemán PF-12Plus de la marca Macherey-Nagel y para la digestión de las muestras se usó el bloque calefactor NANOCOLOR VARIO Mini.



### 1.2. Pruebas de tubo marca Nanocolor

En las imágenes mostradas a continuación se aprecia el lote correspondiente a cada parámetro a la izquierda y a la derecha los tubos usados en las muestras.

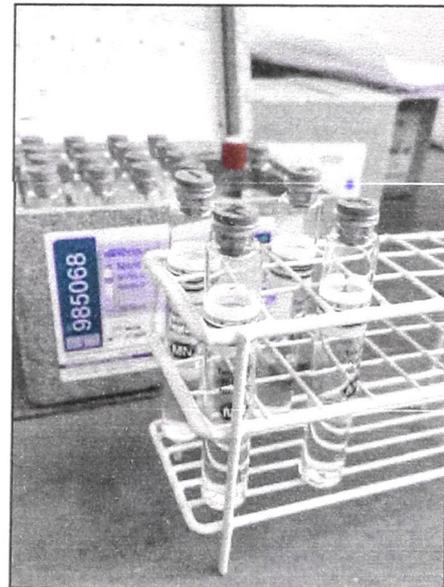
- Nitrógeno total



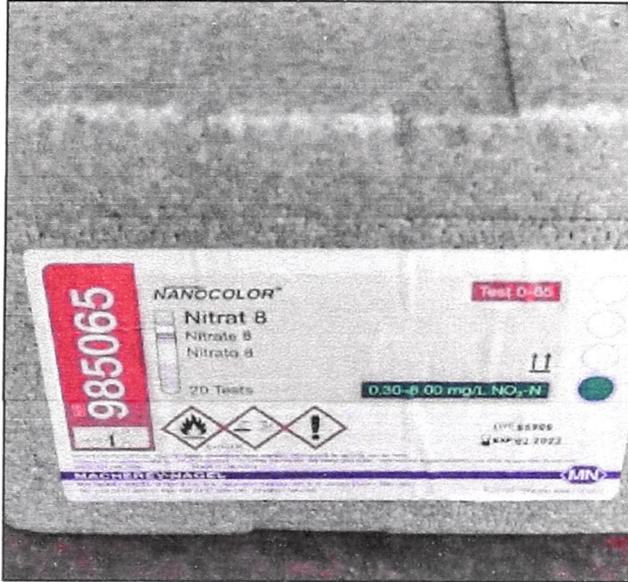
- Amonio



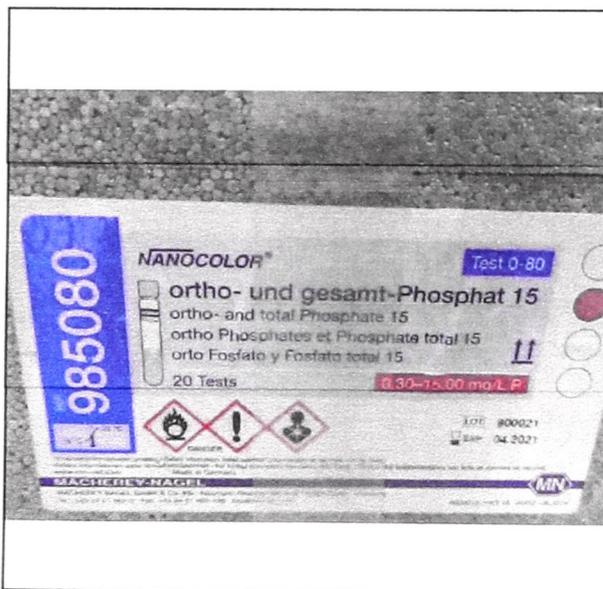
- Nitrito



- Nitrato

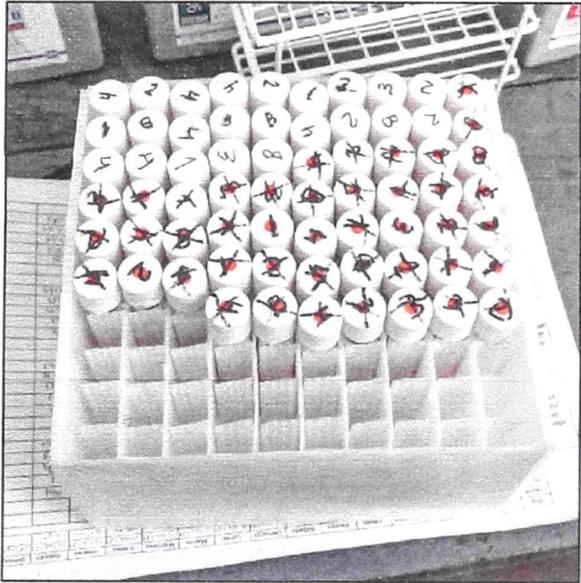


- Fosfato total y Ortofosfatos

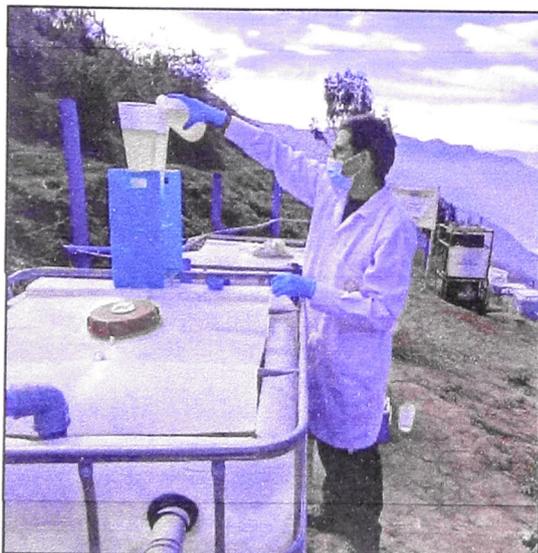
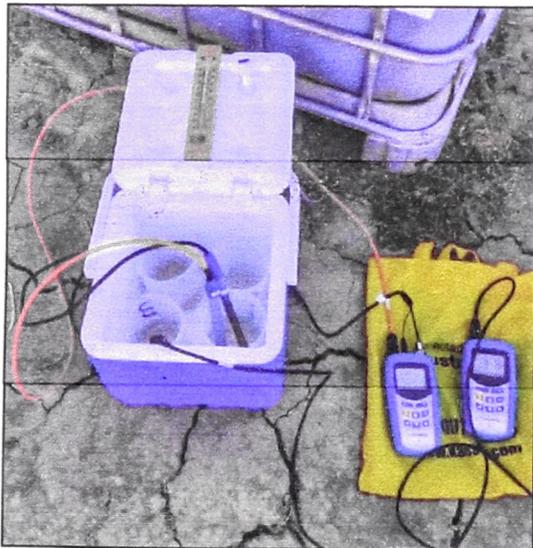


Para las muestras de DQO se usó un kit para análisis de agua residual LR marca SQA de rango alto (20 - 800 mg/L).

- DQO



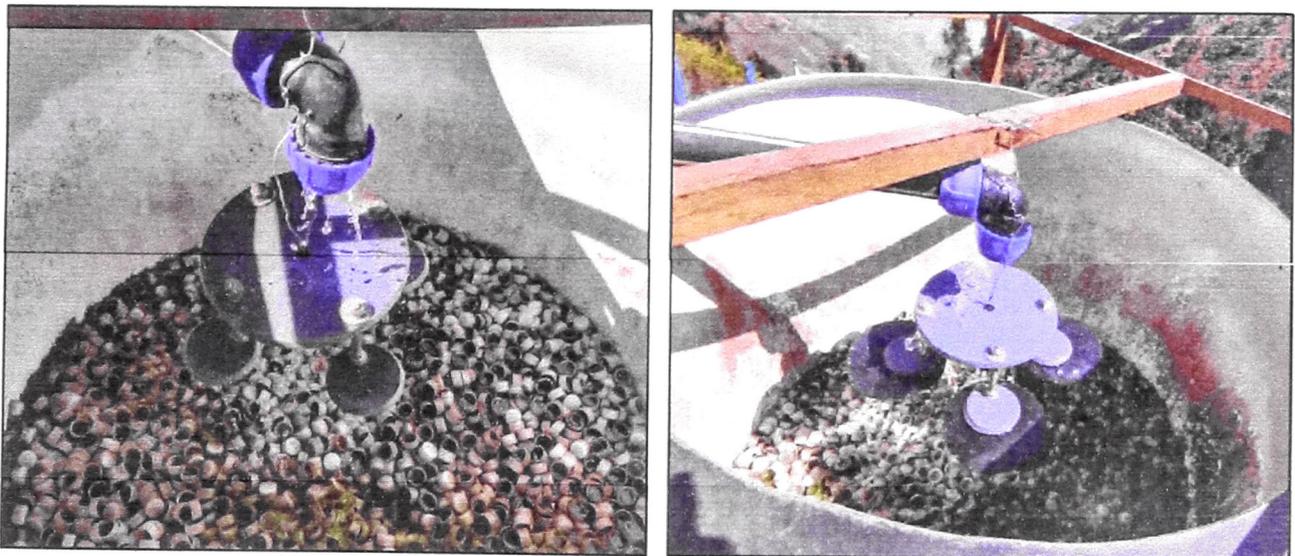
### 1.3. Toma de muestras in situ



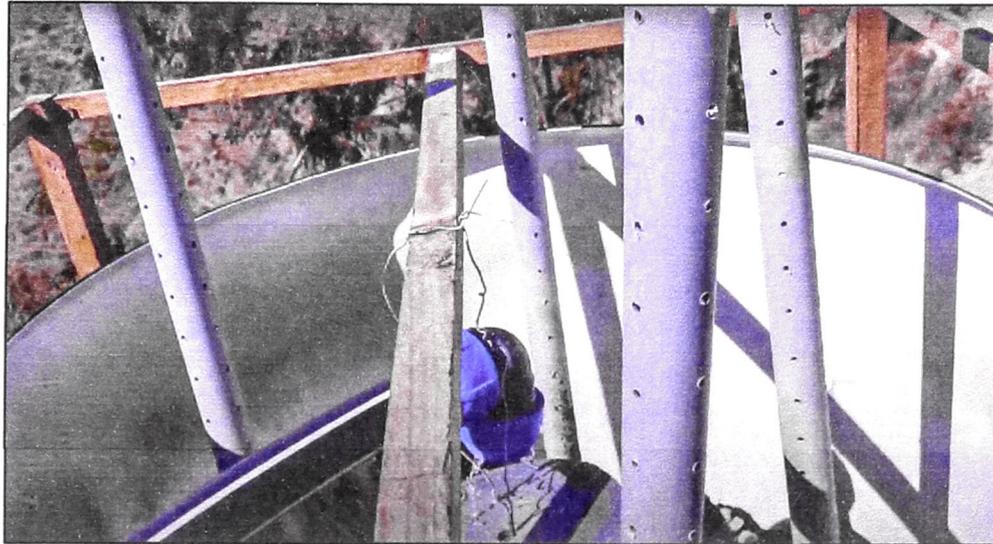
#### 1.4. Problemas de operación y modificaciones en la planta piloto



Al inicio no existía un punto de toma de muestras al ingreso de la planta por lo que se usaba el punto Pm el cual se ubicaba entre el tanque de sedimentación 1 y el tanque de sedimentación 2. Finalmente, para la etapa 1 se llegó a instalar el punto P1 como se ve en la imagen de la derecha.



Para poder mejorar la distribución de las aguas residuales se intentó agrandar los platos como se observa en la imagen de la derecha.



Para incrementar el flujo de aire se instaló tuberías de PVC con agujeros como se observa en la imagen, pero no se pudo notar una mejora considerable posteriormente cuando se midió el oxígeno disuelto.