

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE QUÍMICA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

**“Evaluación de medidas de mitigación de olores en un tanque de homogeneización de
la PTAR de la UCR finca 2, sede Rodrigo Facio”**

Britanny Ramos Castellón

CARTAGO, mayo, 2023

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

ingeniería
ambiental



Evaluación de medidas de mitigación de olores en un tanque de homogeneización de la PTAR de la UCR finca 2, sede Rodrigo Facio. © 2023 por Brittany Ramos Castellón is licensed under Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar para el título de Ingeniera Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal

Dra.ir. Mary Luz Barrios Hernández
Director

MSc. Laura Hernández Alpízar
Lector 1

MSc. Jorge Calvo Gutiérrez
Lector 2

MSc. David Isasi Hernández Parra
Coordinador COTRAFIG

MSc. Ricardo Coy Herrera
Director Escuela de Química

MSc. Diana Zambrano Piamba
Coordinadora de Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

Le dedico esta tesis a mi madre y mis dos hermanos, pilares permanentes en mi vida. También a mi pareja, Alexander Brenes quien me brinda constante motivación para cumplir mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento al Grupo PROAMSA por su invaluable colaboración en la realización de mi proyecto de graduación. Los insumos brindados por su empresa fueron fundamentales para el éxito de mi investigación, y estoy agradecido por la confianza y el apoyo brindado durante todo el proceso.

Asimismo, deseo agradecer a todos los trabajadores del Grupo PROAMSA que me brindaron su ayuda y conocimientos durante mi práctica profesional y en la realización del trabajo final de graduación. Su disposición y profesionalismo fueron clave para el triunfo de esta investigación.

Agradezco también a todos los docentes que me acompañaron en mi camino universitario, por compartir sus conocimientos y experiencia, y por brindarme las herramientas necesarias para llevar a cabo esta tarea. Especialmente a Diana Zambrano, quien me introdujo al apasionante mundo del tratamiento de agua residual y despertó mi interés en esta área. Finalmente, a mi tutora, Mary Luz Barrios, quien me brindó su apoyo y orientación en la generación de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 GENERALIDADES DE LOS OLORES Y ODORANTES.....	14
2.1.1 Clasificación de las fuentes de olor.....	15
2.1.2 Principales unidades con emisión de olores en PTAR.....	15
2.1.3 Compuestos odorantes en PTAR.....	16
2.1.4 Implicaciones de los odorantes en la salud.....	17
2.1.5 Condiciones que inducen olores.....	18
2.2 REGLAMENTACIÓN DE OLORES.....	21
2.2.1 Reglamentación Internacional.....	21
2.2.2 Reglamentación Nacional.....	22
2.3 CUANTIFICACIÓN Y CALIFICACIÓN DE OLORES.....	23
2.3.1 Concentración.....	23
2.3.2 Calificación del olor.....	24
2.3.3 Encuestas de percepción del olor.....	25
2.4 MEDIDAS DE MITIGACIÓN EN FASE LIQUIDA.....	26
2.4.1 Operación de las unidades.....	26
2.4.2 Aireación.....	27
2.4.3 Aditivos.....	27
2.5 TANQUES DE HOMOGENEIZACIÓN.....	27
3. METODOLOGÍA.....	29
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PTAR Y TANQUE DE HOMOGENEIZACIÓN.....	29
3.2 DESCRIPCIÓN DEL MUESTREO.....	31
3.2.1 Caudal y duración preliminar del TRH.....	31
3.2.2 Línea Base y Medidas de mitigación de olores.....	32
3.2.3 Puntos de muestreo.....	33
3.2.4 Parámetros fisicoquímicos.....	34
3.3 APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MITIGACION DE OLORES.....	36
3.3.1 Aireación.....	36
3.3.2 Adición de Cal.....	37
3.3.3 Adición de Sulfato de Hierro.....	37
3.3.4 Adición de BiOWiSH® odor.....	38
3.4 ENCUESTA DE PERCEPCIÓN DE OLORES.....	38
3.5 ANALISIS DE DATOS.....	40
3.5.1 Análisis de datos de parámetros fisicoquímicos.....	40
3.5.2 Análisis de datos de encuestas.....	41

4.	RESULTADOS.....	43
4.1	DETERMINACIÓN DEL CAUDAL Y TRH.....	43
4.1.1	Caracterización del Agua de Entrada.....	44
4.2	RESULTADOS DE APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN ..	45
4.2.1	Adición de cal	45
4.2.1	Adición de sulfato de hierro.....	45
4.2.2	Adición de BiOWiSH® Odor	46
4.3	COMPARACIÓN DE LA APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN	46
4.3.1	Concentración de Sulfuro	47
4.3.2	Tendencias de pH y ORP.....	48
4.3.3	Agua de Salida	50
4.4	PERCEPCIÓN DE OLOR.....	51
4.4.1	Intensidad.....	51
4.4.2	Ofensividad.....	52
4.4.3	Percepción del olor según la población de estudio	53
4.4.4	Carácter	54
5.	DISCUSIÓN.....	56
5.1	SELECCIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE OLORES.....	56
5.2	CAUDAL, TRH Y COMPORTAMIENTO DEL AGUA DE ENTRADA.....	56
5.3	APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE OLORES	59
5.3.1	Línea Base.....	59
5.3.2	Aireación.....	60
5.3.3	Adición de cal	61
5.3.4	Adición de sulfato de hierro.....	63
5.3.5	Adición de BiOWiSH® odor	65
5.4	DINÁMICA DEL ORP, PH Y CONCENTRACIÓN DE SULFUROS.....	66
5.4.1	Distribución de ORP y pH	66
5.4.2	Concentración de sulfuros.....	67
5.5	PERCEPCIÓN DE OLOR.....	68
5.5.1	Intensidad y Ofensividad	68
5.5.2	Grupos encuestados	70
5.5.3	Carácter	71
6.	CONCLUSIONES.....	73
7.	RECOMENDACIONES.....	75
8.	REFERENCIAS	76
9.	ANEXOS	82
10.	APENDICES	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Proceso general de la problemática de olores en sistemas de agua residual. ..	14
Figura 2.2. Compuestos odorantes emitidos en el tratamiento de aguas residuales investigados en 56 documentos entre 2000 y 2021.	16
Figura 2.3. Distribución de las especies de sulfuro en agua en función del pH a 25°C, 1atm y concentración total 0,1 M.	20
Figura 2.4. Rangos de valores de ORP para distintas reacciones biológicas y unidades de tratamiento de agua residual.	20
Figura 2.5. Diagrama de Pourbaix de especies de azufre en agua a 25°C, 1atm y concentración total 0,1 M.	21
Figura 2.6. Rueda de olores técnica.....	25
Figura 2.7. Disposición de los tanques de homogeneización (A) en línea (B) fuera de línea.	28
Figura 3.1. Localización de la PTAR de finca 2 dentro de las instalaciones de la UCR.	29
Figura 3.2. Diagrama de flujo de la PTAR.....	30
Figura 3.3. Plano de planta del tanque de homogeneización.....	31
Figura 3.4: Caudal promedio de aforo de vertedero en el periodo julio 2021 a junio 2022..	32
Figura 3.5. Puntos de muestreo marcados en plano de planta del tanque de homogeneización.	33
Figura 3.6. Rueda de olores utilizada para la encuesta de percepción de olores.....	40
Figura 4.1. Concentración de sulfuro total en los periodos del estudio medidas de mitigación de olores	47
Figura 4.2. Comportamiento del tanque de homogeneización en los periodos del estudio de medidas de mitigación de olores en contraste con el diagrama de las especies de azufre en el agua.	48
Figura 4.3. Comportamiento del tanque de homogeneización en el periodo de adición de sulfato de hierro en contraste con el diagrama de las especies de hierro y azufre en el agua.	50
Figura 4.4. Frecuencia de intensidad de olores de cada una de las medidas de mitigación de olor.	52
Figura 4.5. Frecuencia de ofensividad de olores de cada una de las medidas de mitigación de olor.	52

Figura 4.6. Proporción de los encuestados para cada fase de estudio de mitigación de olores	53
Figura 4.7. Distribución de las respuestas de ofensividad de olores para los grupos de estudiantes y trabajadores.	54
Figura 4.8. Distribución de las respuestas de intensidad de olores para los grupos de estudiantes y trabajadores.	54
Figura 4.9. Ruedas de olor específicas a cada periodo del estudio de medidas de mitigación de olor.	55

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1. Carácter, límites de exposición y umbral de detección de odorantes presentes en sistemas de agua residual.	18
Cuadro 2.2. Descripción de los factores FIDOL y las dimensiones CICOP de olores.	22
Cuadro 2.3. Escala intensidad y ofensividad.....	25
Cuadro 2.4. Medidas de control de H ₂ S.	26
Cuadro 2.5. Beneficios y consecuencias de los tanques de homogeneización en PTAR.....	28
Cuadro 3.1. Detalles de la aplicación de medidas de mitigación de olores para un total de cuatro repeticiones por tratamiento.	33
Cuadro 3.2. Detalles de los instrumentos a utilizar durante el muestreo.....	35
Cuadro 3.3. Detalles de las mediciones del muestreo	36
Cuadro 3.4. Detalles de la encuesta de percepción de olores.	39
Cuadro 4.1. Caudal y TRH medidos en la recolección de datos.	43
Cuadro 4.2. Resultados generales del monitoreo del agua residual de entrada.....	44
Cuadro 4.3. Características de la adición de cal.	45
Cuadro 4.4. Características de la aplicación de sulfato de hierro.	45
Cuadro 4.5. Resultados generales del monitoreo del tanque de homogeneización.....	46
Cuadro 4.6. Resultados generales del monitoreo del agua residual de salida	51

LISTAS DE SIGLAS Y ACRONIMOS

BRS: Bacterias reductoras de sulfato

C_{DO}: Umbral de detección de olores

CICOP: Concentración, Intensidad, Carácter, Ofensividad y Persistencia de olor

CIU: Clasificación Industrial Internacional Uniforme

DBO: Demanda biológica de oxígeno

DQO: Demanda química de oxígeno

FIDOL: Frecuencia, Intensidad, Duración, Ofensividad y Localización de los olores

n: Cantidad de mediciones

ND: No detectable

OD: Oxígeno disuelto

ORP: Potencial de oxidación-reducción

pH: Potencial de Hidrógeno

s: Desviación estándar

SST: Sólidos suspendidos totales

STEL: Short-term exposure limit o límite de exposición a corto plazo

TWA: Time weight average o promedio ponderado en el tiempo

UCR: Universidad de Costa Rica

WWTP: Wastewater treatment plants

\bar{x} : Promedio

RESUMEN

El saneamiento del recurso hídrico en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) es fundamental para la protección de los recursos naturales. Los tanques de homogeneización de las (PTAR) emiten olores durante sus tiempos de retención hidráulica (THR), según sus condiciones de operación. La gestión de olores involucra diversas medidas de mitigación.

En este estudio se evaluaron cuatro medidas de mitigación de olores en el tanque de compensación de la PTAR de la Universidad de Costa Rica, finca 2 sede Rodrigo Facio. Las medidas son: 1) aireación: aumento de oxígeno disuelto (OD) y potencial oxidación-reducción (ORP, por sus siglas en inglés); 2) adición de cal (CaO): aumento del potencial de hidrógeno (pH) y redistribución de especies de H₂S; 3) adición de sulfato de hierro (FeSO₄): precipitación del H₂S en FeS; y 4) adición del producto comercial BiOWiSH® odor: adición de microorganismos y activadores de procesos metabólicos.

Se aplicó cada medida en periodos de cuatro TRH, incluyendo un periodo sin alteración (línea base). Se recolectaron datos en el sitio de pH, ORP, OD y concentración de sulfuros disueltos. Se aplicó una encuesta de percepción de olores a visitantes de la PTAR (trabajadores y estudiantes), con las variables: intensidad, ofensividad y carácter del olor.

En los periodos de adición de cal, adición de sulfato de hierro y adición de BiOWiSH®, la concentración de sulfuro disuelto disminuyó; sin embargo, no generaron cambios perceptibles en la intensidad y ofensividad del olor.

La medida aireación evitó el agotamiento de oxígeno, régimen reductor y fermentación ácida identificadas en línea base, favoreciendo la oxidación de odorantes y una posible inhibición de las bacterias reductoras de sulfuro. Generó una reducción en la intensidad y ofensividad del olor, confirmando su efectividad. Se recomienda evaluar en periodos mayores y expandir la investigación de odorantes diferentes al H₂S.

Palabras Clave: Mitigación de olor, PTAR, Pretratamiento, Tanque de compensación, Tanque de homogeneización, Universidad de Costa Rica.

ABSTRACT

The sanitation of water resources in wastewater treatment plants (WWTP) is essential for the protection of natural resources. WWTP's equalization basins emit odors during their hydraulic retention times, depending on their operating conditions. Odor management involves several mitigation measures.

The present study evaluates four odor mitigation measures in the compensation tank of the University of Costa Rica, Rodrigo Facio campus. The applied measures are: 1) aeration: increase of dissolved oxygen and oxidation-reduction potential (ORP); 2) addition of lime (CaO): increase of hydrogen potential (pH) and redistribution of H₂S species; 3) addition of iron sulfate (FeSO₄): precipitation of H₂S into FeS; and 4) addition of BiOWiSH® odor: addition of microorganisms and metabolic process activators.

Each measure was applied in periods of four hydraulic retention times, including a period with no modification (baseline). On-site data were collected: pH, ORP, dissolved oxygen and dissolved sulfide concentration. An odor perception survey was applied to visitors to the WWTP (workers and students), with the variables: intensity, offensiveness, and odor character.

During the periods of lime addition, iron sulfate addition and BiOWiSH® addition, the concentration of dissolved sulfide decreased; however, they did not generate perceptible changes in the intensity and offensiveness of the odor.

The aeration measure prevented oxygen depletion, reductive regime and acid fermentation identified in the baseline, favoring the oxidation of odorants and a possible inhibition of sulfide reducing bacteria. It generated a reduction in odor intensity and offensiveness, confirming its effectiveness. It is recommended to evaluate in longer periods and to expand the investigation of odorants other than H₂S.

Key words: Odor mitigation, WWTP, Preliminary treatment, Equalization basin, University of Costa Rica.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de tratamiento de agua residual brindan saneamiento y colaboran con la tarea de protección de los recursos naturales. Sin embargo, los elementos de un sistema de tratamiento de aguas residuales pueden emitir olores desagradables (Jiang et al., 2017). La presencia de olores desagradables puede generar rechazo social para las PTAR y molestia a los trabajadores y comunidades aledañas.

Para combatir la problemática de olores en PTARs se deben abordar tres cuestiones principales: (1) ¿Qué olores se producen en el lindero de la planta? (2) ¿Qué procesos dentro de la planta dan lugar a estos olores? (3) ¿Qué prioridad debemos asignar a la mitigación de los olores molestos? (Burlingame, 2009).

Determinar la presencia y caracterización de olores se puede realizar por análisis químicos o sensoriales. Por un lado, los análisis químicos permiten determinar los odorantes, es decir los compuestos químicos responsables del olor. Por otro lado, los análisis sensoriales investigan los factores relacionados a la percepción negativa de un olor; carácter, ofensividad e intensidad de los olores generados, así como frecuencia y duración de los eventos de olor.

En caso de la segunda cuestión, múltiples estudios han identificado las potenciales unidades de generación y emisión de olores en las PTAR; en las que se incluyen las unidades de pretratamiento (Lewkowska et al., 2016). Esto comprende las rejillas, desarenadores y tanques de compensación (Metcalf y Eddie, 2003). Los tanques de compensación reciben los odorantes del agua residual y aquellos generados en el alcantarillado (Bazemo et al., 2020), además pueden generar nuevos odorantes según las condiciones de operación (Jiang, 2017).

Una vez identificada la(s) fuente(s) se debe de generar un plan de acción para eliminar o minimizar las molestias. Las principales estrategias se basan en prevenir su generación, alterar los olores a versiones menos ofensivas, capturarlos o bien dispersarlos para que no salgan del perímetro.

En el presente trabajo se estudia la mitigación de olores en la PTAR de la Universidad de Costa Rica (UCR), finca 2, sede Rodrigo Facio, en la cual se identificó previamente por la empresa operadora, Grupo PROAMSA, que una de las fuentes de olores principales es el tanque de homogeneización.

Se aplican cuatro medidas de mitigación de olores en su tanque de compensación, enfocadas en prevenir la generación y liberación de odorantes. El estudio busca determinar la medida de mitigación óptima para dicha unidad, además de recopilar información sobre sus mecanismos de acción, cambios fisicoquímicos que se generan en la unidad, y la percepción de olores en los periodos de aplicación mediante encuestas a trabajadores y visitantes de la PTAR.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la respuesta a corto plazo de la aplicación de cuatro diferentes medidas de mitigación de olores en un tanque de homogeneización de la PTAR en la UCR, finca 2, sede Rodrigo Facio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar medidas de mitigación de olores aplicables a la unidad de tanque de homogeneización en estudio.
- Comparar las medidas de mitigación de olores por medio de la aplicación y seguimiento a corto plazo de los parámetros fisicoquímicos del agua de la unidad.
- Analizar la percepción de olores de personas circundantes en los periodos de aplicación de las medidas de mitigación de olores.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES DE LOS OLORES Y ODORANTES

Un odorante es el compuesto químico responsable de generar un olor. Por otro lado, el olor es el efecto percibido cuando el odorante ha sido detectado e interpretado por un sistema sensorial. Por lo tanto, el olor es una cuestión subjetiva y depende de la percepción individual (Carrera-Chapela et al., 2014). La percepción puede modificarse por la interacción de los diferentes odorantes a las que se está expuesto el receptor (Gostelow y Parsons, 2000).

Para que la presencia de odorantes en el agua residual resulte en molestias en las comunidades, debe ocurrir un proceso complejo, con variables fisiológicas, meteorológicas, topográficas y fisicoquímicas. Este proceso global se resume en la Figura 2.1.

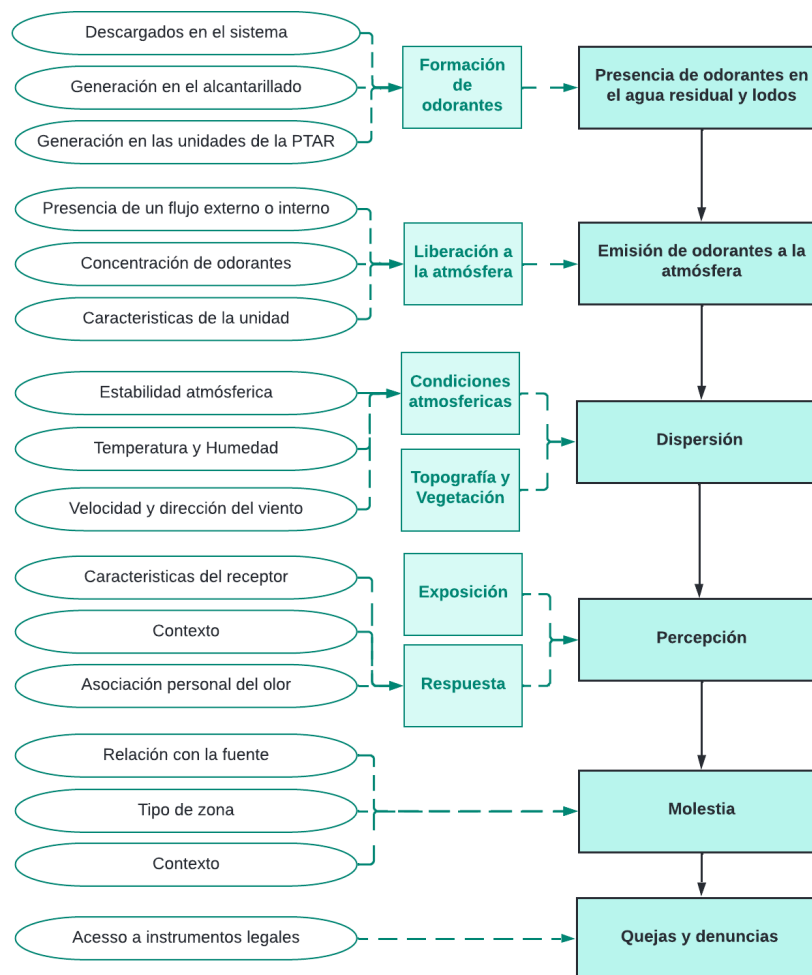


Figura 2.1. Proceso general de la problemática de olores en sistemas de agua residual. Adaptado de Van Harreveld, 2001 y Saéñz; 2015.

Las molestias por olores se producen exclusivamente cuando los odorantes se transfieren desde de la fuente de olor (aguas residuales o lodos) a la atmósfera y luego transportados a zonas donde están los receptores (Van Harreveld, 2001).

La percepción del olor por el receptor se ve influenciada por factores como frecuencia, intensidad, duración, ofensividad y localización de los olores, de aquí en adelante llamados factores FIDOL; así como por las experiencias personales, asociaciones emocionales, edad, sexo y el estado de salud (Valencia et al., 2011).

2.1.1 Clasificación de las fuentes de olor

Identificar las fuentes de emisión de olores en los sistemas de agua residual es esencial para solventar la problemática. Gostelow et al., (2001) presenta la siguiente división: fuentes de transferencia de masa y fuentes con formación de odorantes. La primera se refiere a las unidades donde se promueve la transferencia de odorantes hacia la gaseosa, mientras la segunda clasificación engloba a las unidades que permiten la formación de odorantes.

Otra clasificación es según el mecanismo de intercambio de masa: fuentes pasivas y fuentes activas, en función de la presencia o ausencia de un flujo externo (Jiang, 2017). En las fuentes activas los odorantes son transportados por el flujo de aire activo. En las pasivas los odorantes son arrastrados desde la superficie del agua residual por el movimiento natural del aire. Además, las unidades pueden ser clasificados en función de su extensión y geometría, como puntuales, lineales y superficiales (Lebrero et al., 2011).

La emisión de olores de las PTAR es mayoritariamente de tipo pasivo, depende del movimiento del aire y de las condiciones ambientales (Jiang, 2017). La emisión es facilitada por la gran cantidad de superficie expuesta, en la cual el viento ejerce fuerza de corte y contribuye significativamente a la dispersión de los olores (Carrera-Chapela et al., 2014).

2.1.2 Principales unidades con emisión de olores en PTAR

Alcantarillados: Los sistemas de alcantarillados son principalmente tuberías cerradas, se clasifican como sistemas de formación de odorantes. El agua residual al ingresar a las tuberías contiene pequeñas cantidades de oxígeno disuelto que se agota en los primeros kilómetros y provoca condiciones anaeróbicas en la tubería. Estas condiciones anaerobias fomentan procesos biológicos de producción de odorantes, como fermentación y reducción

de sulfuro (Park et al., 2014). En estructuras abiertas del alcantarillado, como estaciones de bombeo, pozos y la entrada a la PTAR estos odorantes son liberados (Bazemo et al., 2020).

Tratamiento preliminar y primario: Las emisiones de olor de las aguas residuales crudas y del tratamiento primario se caracterizan principalmente por los altos niveles de sulfuro de hidrógeno y compuestos formados en las alcantarillas (Bazemo et al., 2020). En puntos de turbulencia, como la entrada del influente, salida del efluente y en procesos de recirculación se promueve la liberación de gases (Lewkowska et al., 2016).

Tratamiento de lodos: Los procesos anaeróbicos involucrados en la línea de lodos suelen provocar un aumento de las emisiones de olores, debido a la producción biológica de compuestos orgánicos volátiles y compuestos de azufre (Jiang, 2017).

2.1.3 Compuestos odorantes en PTAR

Los compuestos olorosos dominantes en los alcantarillados y las diferentes unidades de tratamiento de las PTAR son diferentes. En la Figura 2.2. se presentan los odorantes encontrados en la revisión realizada por Gamonal y Sota (2021); en la que se identifican siguientes grupos: los compuestos sulfurados, los gases nitrogenados, mercaptanos, así como los aldehídos y cetonas. Tradicionalmente, los compuestos individuales de sulfuro de hidrógeno y el amoníaco se han utilizado como indicadores del olor de las PTAR y para su monitoreo continuo (Lebrero et al., 2011).

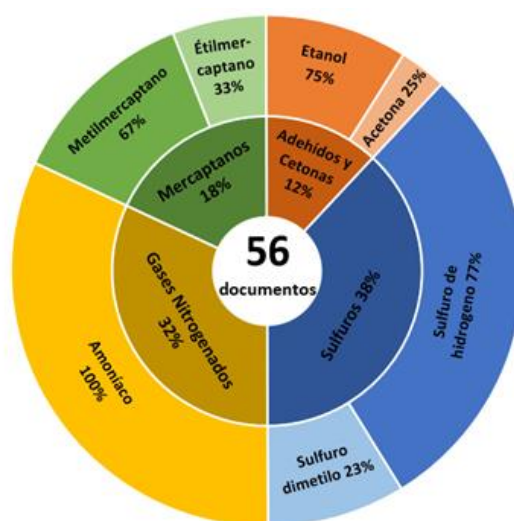


Figura 2.2. Compuestos odorantes emitidos en el tratamiento de aguas residuales investigados en 56 documentos entre 2000 y 2021. Adaptado de Gamonal y Sota, 2021.

Compuestos sulfurados: Entre los compuestos odorantes derivados del sulfuro se encuentra el sulfuro de hidrógeno, sulfuro dimetilo, compuestos reducidos del sulfuro y el grupo mercaptano (grupo funcional tiol) en el que se encuentra el metilmercaptano y el etilmercaptano. El sulfuro de hidrógeno es el compuesto de sulfuro con mayor reconocimiento en la producción de olores y corrosión en los sistemas de aguas residuales (Talaiekhosani; 2016). Los mercaptanos son compuestos que contienen sulfuro y se caracterizan por un olor intenso (Bazemo et al., 2020).

La reducción del ion sulfato ha sido el mecanismo más significativo para la producción de H₂S en las alcantarillas (Park et al., 2014) realizada por las bacterias reductoras de sulfato, seguido por la degradación de aminoácidos que contienen sulfuro en condiciones anaerobias (Bazemo et al., 2020). La actividad de las bacterias reductoras de sulfato se observa en especial en zonas con un flujo lento, baja aireación y temperaturas elevadas. Además, el pH del agua afecta en las reacciones bioquímicas de producción de H₂S y su solubilidad (Chestnutt et al., 2007).

Compuestos nitrogenados: Una de las sustancias que produce olores en los conductos de las redes alcantarillado es el amoníaco, producto de la descomposición bacteriana de la urea, presente en la orina humana. El amoníaco posee una baja temperatura de evaporación y olor penetrante (Talaiekhosani et al., 2016). Otros compuestos odorantes que contienen nitrógeno como, por ejemplo, aminas, indol y escadol pueden encontrarse en las emisiones de aguas residuales en concentraciones más bajas (Jiang et al., 2017).

La urea y compuestos orgánicos del nitrógeno, en presencia del oxígeno inicial de las tuberías se convierte en amoníaco mediante las bacterias amonificantes. Sin embargo, en alcantarillados anaerobios el ciclo del nitrógeno no puede continuar, el proceso de nitrificación permanece en el nivel de amonificación, hasta que se reanuda en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Talaiekhosani et al., 2016).

2.1.4 Implicaciones de los odorantes en la salud

Los olores con percepción negativa, generan deterioro en la calidad de vida de las personas expuestas. Algunos síntomas experimentados por las personas expuestas a los olores ofensivos son vómito, problemas respiratorios, náuseas, fatiga, ardor en ojos, nariz y/o garganta, cefalea, diarrea (Díaz et al., 2012).

Sin embargo, la exposición a ciertos odorantes es más alarmante que otros; según las características físicas y químicas del odorante, así como el tipo de exposición (Gutiérrez, 2020). Los efectos en la salud pueden ser graves incluso a bajas concentraciones de olor y tiempos de exposición. Hay dos valores de límite de exposición importantes el “Time weight average” (TWA) de ocho horas y “Short-term exposure limits” (STEL) de 15 minutos. Cualquier odorante con concentración superior a la TWA o STEL debe ser tomado como una alerta (Jiang, 2017).

Cuadro 2.1. Carácter, límites de exposición y umbral de detección de odorantes presentes en sistemas de agua residual.

Grupo	Subgrupo	Compuesto	C _{OD} (ppm)	SWA (mg/m ³)	STEL (mg/m ³)	Carácter	
Compuestos Sulfurados	Sulfuros	Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0,00047	14	21	Huevo podrido
		Sulfuro di metilo	(CH ₃) ₂ S	0,0030	-	-	Col, sulfurosa
		Tiofenol	C ₆ H ₆ S	0,000064	4	16	Ajo
	Mercaptanos	Metil mercaptano	CH ₄ S	0,000070	0,98	1,06	Col podrida, flatulencia
		Étil mercaptano	C ₂ H ₆ S	0,00019	1,3	1,25	Col podrida, zorrillo
Compuestos Nitrogenados	Aminas	Amoniaco	NH ₄	1	17	24	Fuerte y penetrante
	Escadol	Escadol	C ₉ H ₉ N	0,000006	-	-	Fuerte olor fecal
	Indol	Indol	C ₈ H ₇ N	0,00030	-	-	Heces o jazmines
Compuesto Orgánicos Volátiles	Ácidos orgánicos	Ácido acético	C ₂ H ₄ O ₂	0,0060	25	37	Picante, vinagre
	Alcoholes	Etanol	C ₂ H ₆ O	0,52	-	-	Químico
	Aldehídos	Aldehídos de bajo peso molecular		<30	1,2-176	-	Frutal
	Acetona	Acetona	(CH ₃) ₂ CO	0,94	1185	2375	Picante, afrutado, dulce, menta

Fuentes: Talaiekhzani et al., 2016 y Jiang, 2017.

2.1.5 Condiciones que inducen olores

Las condiciones de formación de odorantes pueden adjudicarse a la presencia de condiciones anóxicas o anaeróbicas (Hvitved et al., 2000), que favorecen reacciones biológicas de fermentación y reducción. Estas condiciones pueden alcanzarse durante el proceso de sedimentación y/o el proceso de espesamiento cuando el tiempo de retención hidráulica no es el apropiado (Vollertsen et al., 2008). Asimismo, existen condiciones físicas y atmosféricas que promueven la emisión de odorantes.

Guagming (2017), menciona que los olores en PTARs se ven afectados por el funcionamiento y las condiciones ambientales, como: la aireación, el pH, la temperatura y el tiempo de retención. Además, Gamonal y Sota (2021), identificaron las principales condiciones fisicoquímicas, de proceso y parámetros meteorológicos que generan odorantes en el tratamiento de agua residual e influyen en la salud comunitaria.

Condiciones fisicoquímicas: temperatura, pH, humedad, OD.

Procesos: gestión de lodos, desarenadores, sedimentación primaria.

Parámetros meteorológicos: dirección y velocidad del viento, temperatura del aire, nubosidad, humedad relativa, presión atmosférica y difusión.

Además, Kang et al. (2020), señala que los parámetros de calidad de agua como controlados en la operación de las PTAR como la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos totales (SST) y ORP no están relacionados directamente con la emisión de olores, pero influyen en la actividad de microorganismos como las bacterias reductoras de sulfato y la generación de odorantes.

Bacterias reductoras de sulfato: Uno de los principales odorantes es el H₂S, resultante de la reducción de compuestos orgánicos e inorgánicos de azufre por medio de las bacterias reductoras de sulfato. Las bacterias reductoras de sulfato son anaerobios obligados que obtienen energía para el crecimiento mediante la reducción de sustratos orgánicos. Estas pueden sobrevivir a una exposición temporal al oxígeno y volver a activarse en condiciones anaeróbicas. Sus fuentes de carbono preferidas son compuestos de bajo peso molecular como ácidos orgánicos, ácidos volátiles y alcoholes (Hao et al., 2009).



pH: Diferentes especies de sulfuros (H₂S, HS⁻ y S²⁻) coexisten en equilibrio en los sistemas de alcantarillado, y la distribución de cada especie es una función del pH. Por ejemplo, como se puede observar en la Figura 2.3, a pH 7, un pH normalmente encontrado en la mayoría de las aguas residuales, aproximadamente el 45% del sulfuro total existe como H₂S_{aq}. También hay un equilibrio entre H₂S acuoso y gaseoso regido por la ley de Henry (Hao et al., 2009).

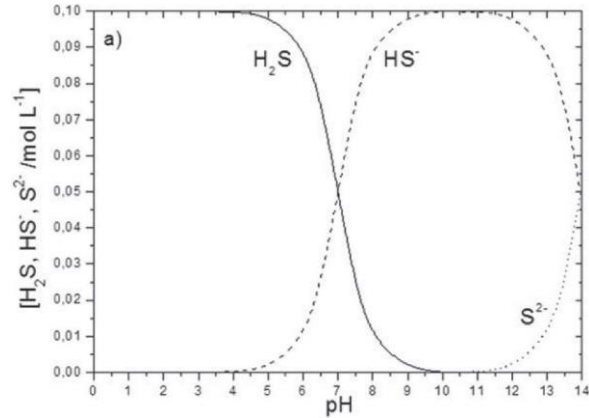


Figura 2.3. Distribución de las especies de sulfuro en agua en función del pH a 25°C, 1atm y concentración total 0,1 M. Fuente: Oliveira et al, 2017.

ORP: El potencial de oxidación-reducción de una sustancia indica la habilidad de reducir u oxidar otra sustancia. Como se presentan en la Figura 2.4. en agua residual el valor de ORP puede clasificarla en anaerobia-reductiva, anóxica y aeróbica-oxidativa y se conocen los rangos en que se presentan reacciones químicas y biológicas.

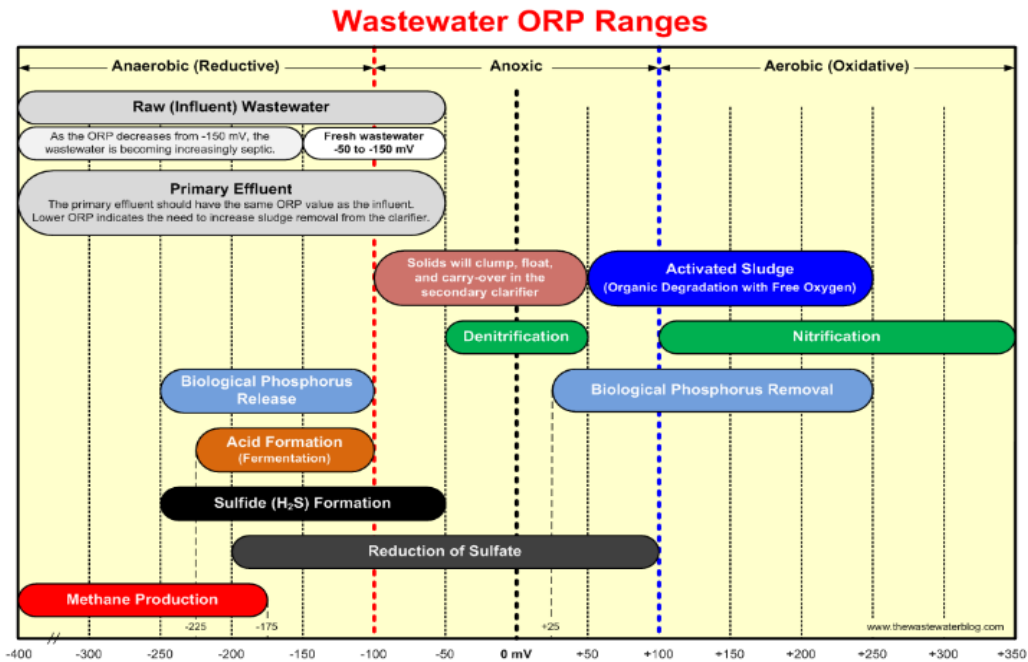


Figura 2.4. Rangos de valores de ORP para distintas reacciones biológicas y unidades de tratamiento de agua residual. Fuente: Tomado de TheWastewaterBlog, 2016.

Tanto el ORP (representado como E) como el pH influyen en la distribución de especies de azufre en medios acuáticos, esto es representado por el diagrama de Pourbaix en la Figura 2.5. Se aprecia que el H_2S suele estar presente en condiciones reductoras y ácidas.

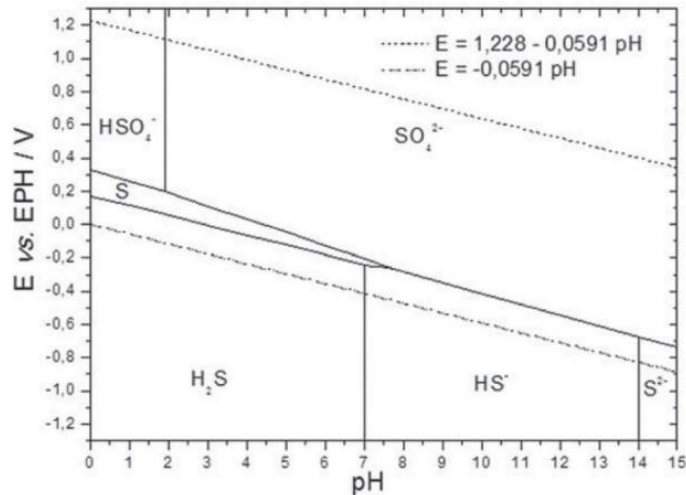


Figura 2.5. Diagrama de Pourbaix de especies de azufre en agua a 25°C, 1atm y concentración total 0,1 M. Fuente: Oliveira et al, 2017.

OD: Debido a la transferencia de masa de O_2 , la concentración crítica de OD en las aguas residuales por debajo de la cual puede ocurrir la reducción de sulfato es de 0,1 a 1,0 mg/L (Hao et al., 2009). Por encima de una concentración de OD de 1,0 mg/l, la reducción de sulfato puede inhibirse debido al aumento del potencial redox.

2.2 REGLAMENTACIÓN DE OLORES

2.2.1 Reglamentación Internacional

Los problemas de olor en torno al agua residual son habituales, y afectan la calidad de vida del público. Las quejas por olores, denuncias y preocupación sanitaria han llevado a la aplicación de normas y reglamentos específicas (Brancher et al., 2016). La reducción de las emisiones de olores desagradables se está convirtiendo en uno de los principales retos de las PTAR de todo el mundo, cada vez más preocupadas por su imagen pública (Lebrero et al., 2011) y el cumplimiento de la normativa.

Brancher et al (2016), reconoce cinco (5) enfoques principales utilizados por las jurisdicciones internacionales para evaluar y regular los impactos por olores.

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> i. Normas de concentración máxima ii. Normas de distancia de separación fijas y variables | <ul style="list-style-type: none"> iii. Normas de tasas de emisión máxima iv. Normas de límite de reclamos v. Normas basadas en la mejor tecnología disponible. |
|--|---|

Las regulaciones y normas sobre olores siguen explícitamente o por inferencia los factores FIDOL y otras dimensiones como Concentración, Intensidad, Cáncer, Ofensividad y Persistencia de olores (de aquí en adelante llamadas dimensiones CICOP) (ver Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2. Descripción de los factores FIDOL y las dimensiones CICOP de olores.

Acrónimo	Factor	Descripción
FIDOL	(F) Frecuencia	Qué tan frecuente los receptores son expuestos a olores.
	(I) Intensidad	La percepción de la fuerza o concentración del olor.
	(D) Duración	Lapso que dura un episodio de olor.
	(O) Ofensividad	La clasificación subjetiva de agrado o desagrado de un olor.
	(L) Localización	Sensibilidad del receptor, según el uso de suelo y contexto.
CICOP	(C) Concentración	Concentración del olor o los odorantes.
	(I) Intensidad	La percepción de la fuerza del olor o la magnitud del estímulo.
	(C) Carácter	Clasificación descriptiva del olor.
	(O) Ofensividad	Medida de lo agradable o desagradable de un olor, también conocido como tono hedónico.
	(P) Persistencia	Describe la velocidad a la que la intensidad de un olor disminuye al diluirse en la atmósfera debido al viento.

Adaptado de Brancher et al., 2016.

Por un lado, los factores FIDOL influyen en la afectación negativa a las comunidades producida por los olores (Griffiths, 2014). Por otro lado, con las dimensiones CICOP, las características pueden medirse eficazmente mediante métodos analíticos, sensoriales e instrumentales; o su combinación. Además, se suelen utilizar criterios como el umbral de detección de olores (C_{DO}) y en caso de utilizar modelos de dispersión, el nivel de cumplimiento del percentil y el tiempo de promedio del percentil (Brancher et al., 2016).

2.2.2 Reglamentación Nacional

En relación con la legislación costarricense, el Artículo 62 de la Ley Orgánica del Ambiente, define la contaminación atmosférica como la presencia de partículas, humo, polvo, malos olores, entre otros; en concentraciones superiores a los definidos por reglamentos emitidos por el Poder Ejecutivo. Sin embargo, hasta la fecha se carece de un reglamento para el control de olores ofensivos.

En marzo del 2020 el Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC) publicó un borrador del reglamento para olores ofensivos (2020). Este propone un límite máximo de inmisión de 3 OUE /m³ para el código CIU 3700, que incluye la gestión y operación de PTARs. Propone la metodología de cuantificación de olores de olfatometría dinámica regida

por el estándar europeo EN-13725; una técnica sensorial realizada por un panel capacitado cuyo resultado se expresa en unidades de olor por metro cúbico (OU_E/m^3).

Esta concentración representa el número de diluciones con aire neutral que son necesarios para llevar la muestra a su concentración umbral de detección de olor (C_{DO}) (Sironi et al., 2010). El C_{DO} corresponde a la concentración en la que sólo el 50% de los panelistas detectan el olor (Jiang et al., 2017).

2.3 CUANTIFICACIÓN Y CALIFICACIÓN DE OLORES

La naturaleza subjetiva de la percepción humana de los olores y la complejidad química de las emisiones odoríferas de las PTAR hacen que la caracterización de los olores sea una tarea difícil (Gostelow et al., 2001 y Zarra et al., 2009). Los enfoques más comunes para la caracterización de los olores son la percepción sensorial y las mediciones analíticas (Lebrero et al., 2011). Las mediciones analíticas caracterizan los olores en términos de su composición química; son más objetivas, repetibles y precisas. Sin embargo, proporcionan poca información sobre el impacto real en los receptores (Gostelow et al., 2001). Ambos tipos de mediciones son relevantes, y deberían llevarse a cabo en todas las campañas de evaluación de olores (Lebrero et al., 2011).

2.3.1 Concentración

La concentración de olores ofrece una cuantificación directa no basada en escalas sensoriales sino en un factor de dilución. La Norma Europea EN 13725 define la concentración de un olor a $1 OU_E/m^3$ como la que tiene el mismo estímulo que el olor de referencia n-butanol, equivalente a $123 \mu g/m^3$ (EN13725, 2003). Hawko et al. (2021), describe tres métodos para determinar la concentración de olor:

Olfatometría dinámica: La bolsa de muestreo se conecta directamente al olfatómetro, que a su vez diluye el olor y lo transfiere a los panelistas en concentraciones crecientes (Muñoz et al., 2010). La concentración de olor se determina cuando la muestra de olor diluida alcanza el umbral de detección olfativa para el 50% del panel, conformado por cuatro a ocho evaluadores capacitados.

Olfatometría estática: Este método similar al anterior, con la excepción de que la dilución se realiza manualmente utilizando bolsas de muestreo hasta alcanzar el umbral de detección (Li et al: 2019), lo que introduce error y contaminación relacionada a la manipulación de las múltiples bolsas.

Determinación usando análisis químicos: Se realiza con los datos de concentración de los odorantes encontrados en la muestra; usualmente espectrometría de masas por cromatografía de gases (GC-MS) (Fisher et al., 2018). A partir de esto se utiliza la siguiente ecuación para calcular la concentración final:

$$\text{Concentración de olor} = \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{C_{OD,i}}$$

Donde:
C_i : Concentración química de un odorante i.
C_{OD} : Umbral de detección del odorante

2.3.2 Calificación del olor

La caracterización de los olores engloba dos dimensiones CICOP, el carácter y la ofensividad también conocidos como la naturaleza del olor y tono hedónico. El carácter de generar un perfil de las emisiones olorosas, para identificar la causa/fuente principal de los olores. Para calificar los olores Hawko et al., (2021) detalla tres métodos principales:

Evocación: Es la descripción del olor con analogías u olores conocidos, es simple, poco replicable y se ve muy afectado por la subjetividad.

Descripción con referencia: Utiliza referencias de olores como descriptores seleccionados en lugar de evocaciones. Requiere de un panel especialmente entrenado que debe memorizar el olor de cada referente.

Perfiles odoríficos: Es la atribución de una intensidad a diferentes descriptores de olor, los cuales están en listas denominadas ruedas de olores. Las ruedas de olores pretenden crear un léxico unificado para describir la naturaleza del olor en un ámbito determinado (Muñoz et al., 2010). En la Figura 2.6 se presenta un ejemplo de rueda de olor.

La información presente en las ruedas de olor puede presentarse en diferentes niveles de detalle y puede adaptarse a las comunidades para crear información más simple (Hayes et al., 2017). También, proporciona a los operadores de PTAR una guía fácil y personalizable para combatir los olores (Fisher et al., 2018).

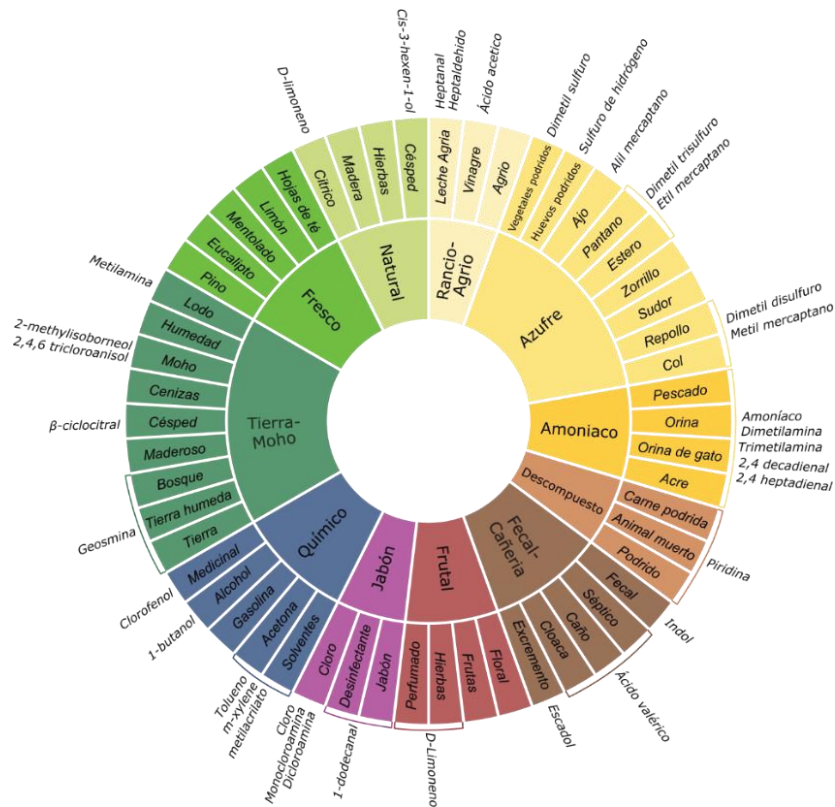


Figura 2.6. Rueda de olores técnica. Adaptación de Burlingame (2009) y Suffet y Rosenfeld (2007).

2.3.3 Encuestas de percepción del olor

Burlingame (2009), presenta una escala en forma de encuesta para los afectados con el objetivo de priorizar las medidas de mitigación de olores. Esta escala considera intensidad, ofensividad y carácter (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Escala intensidad y ofensividad

Factor	Escala	Descripción
Intensidad	Muy débil	El olor es apenas perceptible
	Débil	El olor es percibido, pero toma tiempo poder describirlo
	Moderado	El olor es fácilmente percibido e identificado
	Fuerte	El olor genera desagrado al oler por un tiempo extendido
	Muy fuerte	El olor es insoportable en periodos extendidos de tiempo
Ofensividad	Muy desagradable	El olor es muy desagradable
	Desagradable	El olor es desagradable
	Un poco desagradable	El olor es un poco desagradable

Fuente: Burlingame (2009).

Suffet et al. (2004), recomienda el uso de 11 grupos para la caracterización de olores provenientes de agua residual, agregando “Terpeno, fresco, limón, pino” y “Amoniaco, pescado” a los nueve grupos de Burlingame. Los grupos de Burlingame (2009) son:

- | | | |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| i. Rancio, pútrido | iv. Sulfuro, ajo, col | vii. Fragante, frutal |
| ii. Fecal, cañería | v. Medicinal, alcohol | viii. Tierra, moho, humedad |
| iii. Solvente, hidrocarburo | vi. Oxidante, cloro | ix. Madera, césped |

2.4 MEDIDAS DE MITIGACIÓN EN FASE LIQUIDA

Las condiciones que conducen a la formación de H₂S generalmente favorecen la producción de otros compuestos orgánicos malolientes. Por lo tanto, resolver los problemas de olor de H₂S a menudo también soluciona otros problemas de olor (Hao et al., 2009).

Cuadro 2.4. Medidas de control de H₂S.

Medidas de control	Mecanismo
Adicción de oxígeno	Supresión de la formación biológica de sulfuro y oxidación química del sulfuro presente en el agua residual
Adición de nitrato	Supresión de la formación biológica del sulfuro y oxidación biológica del sulfuro presente
Adición de sales de hierro	Precipitación del sulfuro presente en el agua
Adición de oxidantes fuertes	Oxidación química del sulfuro presente en el agua residual
Adición de compuestos alcalinos	El aumento del pH reduce la emisión de H ₂ S y aumenta la tasa de oxidación química del sulfuro presente en el agua

Fuente: Vollertsen et al., 2015.

2.4.1 Operación de las unidades

De acuerdo con Gutiérrez (2020), la acumulación de materia orgánica en el pretratamiento, mal manejo de lodos y acidificación de los reactores llevan a la emisión de olores. Asimismo, Sáenz (2015) menciona como una operación inadecuada de pH, temperatura, caudal TRH y OD generan olores en las PTAR.

ORP: De acuerdo con Talaiekhosani et al. (2016), aumentar el ORP a 500 mV, se puede detener la producción de H₂S en las aguas residuales y otros odorantes generados por condiciones anaerobias. El ORP puede aumentarse con inyección o dosificación de oxígeno y nitrato, lo que además provee de donadores de electrones a los microorganismos.

pH: Se ha sugerido cambiar el pH del agua residual con ácido o álcali como un método para disminuir la reducción de sulfato en plantas industriales. En agua residual con

baja concentración de H₂S un pH alto disminuye las emisiones de H₂S. Mientras que en aguas con altas concentraciones de sulfato un pH más bajo puede inhibir la actividad microbiana, debido a la toxicidad generada por el H₂S en los microorganismos (Hao et al., 2009).

2.4.2 Aireación

Altos niveles de OD inhiben las bacterias reductoras de sulfato; por lo tanto, se recomienda considerar el nivel OD en el diseño y operación de alcantarillado y PTARs para prevenir problemas de olores. Por encima de una concentración de OD de 1,0 mg/L, la reducción de sulfato puede inhibirse por el aumento del potencial redox y se desfavorece reacciones de reducción (Hao et al., 2009).

2.4.3 Aditivos

Adición de Sales Insolubles de Metales: La reacción del sulfuro con metales como el hierro, el plomo, el níquel, el manganeso y el zinc puede convertir el sulfuro en una forma disminuyendo la concentración de H₂S. En el caso de sales de hierro; el hierro ferroso reacciona con el H₂S causando su precipitación como sulfuro de hierro. Sin embargo, pequeñas cantidades de azufre permanecen en forma soluble y requieren altas cantidades de sales para ser eliminadas (Talaiekhosani et al., 2016). Las dosis recomendadas de sulfato de hierro van de 1,5 - 4,5 mg/L por cada 1 mg/L de sulfuro total.

Adición de Oxidantes Fuertes: Talaiekhosani et al. (2016) mencionan la oxidación química del H₂S en aguas residuales mediante compuestos como peróxido de hidrógeno, cloro, permanganato de potasio, así como métodos de oxidación avanzados.

Aditivos microbianos: Estos productos buscan mejorar los mecanismos biológicos de degradación en el agua residual, mediante la adición de microorganismos, micronutrientes y otros productos activadores de los procesos metabólicos (Calvo y Hernández, 2016).

2.5 TANQUES DE HOMOGENEIZACIÓN

Los tanques de compensación o homogeneización tienen el objetivo de contrarrestar las variaciones en el caudal y carga orgánica de entrada. Los principales beneficios y consecuencias de utilizar estas unidades se presentan en el Cuadro 2.5. Incluyendo generación de malos olores.

Cuadro 2.5. Beneficios y consecuencias de los tanques de homogeneización en PTAR.

Beneficios	Consecuencias
Mejor rendimiento en tratamientos biológicos debido a eliminación o reducción de las cargas de choque, dilución de las sustancias inhibitoras y estabilización del pH.	Se necesitan áreas o terrenos relativamente grandes.
Mayor consistencia en la carga de sólidos permite mejorar la calidad del efluente y el rendimiento de espesamiento de los tanques de sedimentación secundarios.	Es posible que deban cubrirse para el control de olores cerca de áreas residenciales.
Una carga hidráulica más baja reduce los requisitos de área superficial de filtración, mejora el rendimiento del filtro y son posibles ciclos de retro lavado más uniformes.	Se requiere operación y mantenimiento adicionales.
En el tratamiento químico, la amortiguación de la carga de masa mejora el control de la dosificación química y la confiabilidad del proceso.	Requiere costo de inversión.

Fuente: Metcalf y Eddie, 2003.

Los tanques de homogeneización tienen dos disposiciones: en el tren de tratamiento o fuera del tren de tratamiento como se presenta en la Figura 2.7. (Ramesh et al., 2005). En línea el 100% del agua entrante pasa por la unidad y es bombeado a las siguientes unidades de tratamiento.

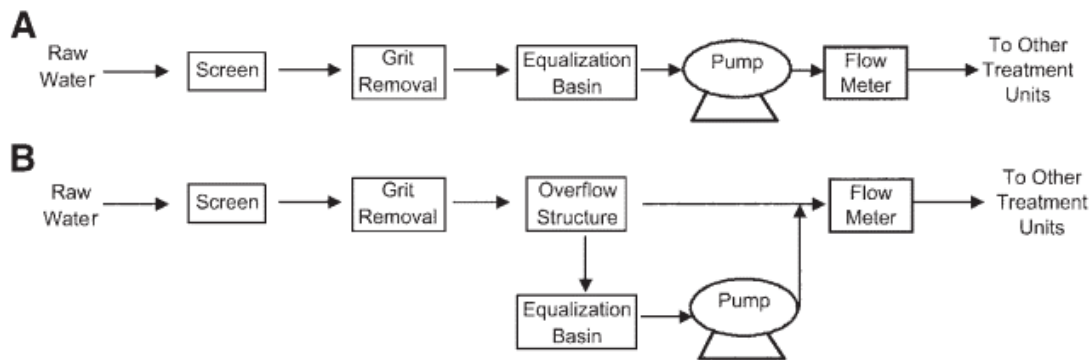


Figura 2.7. Disposición de los tanques de homogeneización (A) en línea (B) fuera de línea. Fuente: Ramesh et al., 2005.

Para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación, la información recopilada en el marco teórico es transcendental. Los estudios previos sobre las generalidades de olores y odorantes permitieron familiarizarse con la problemática de olores en PTAR, sus principales fuentes y causas. La reglamentación, cuantificación y calificación de olores permite conocer los factores que influyen en la percepción de olores. Finalmente, las medidas de mitigación en fase líquida permiten determinar las medidas de mitigación aplicables a un tanque de homogeneización y sus mecanismos de funcionamiento.

3. METODOLOGÍA

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PTAR Y TANQUE DE HOMOGENEIZACIÓN

El sistema de tratamiento de aguas residuales se encuentra en las instalaciones de la sede Rodrigo Facio de la Universidad de Costa Rica. Recibe agua residual de diferentes edificios académicos y de investigación, ubicados en la propiedad denominada como “Finca 2”. El agua residual es de tipo especial. El objetivo de tratamiento de la PTAR es cumplir con los límites de calidad de agua establecidos en el decreto No. 33601-S.

El listado de edificios que se conectan con el sistema de tratamiento es el siguiente:

- Centro de investigación en contaminación ambiental
- Centro de investigación del cáncer
- Neurociencias
- Facultad de Ciencias Básicas
- Instituto de investigaciones farmacéuticas
- Laboratorio de Ingeniería
- Ciclotrón
- Nanotecnología



Figura 3.1. Localización de la PTAR de finca 2 dentro de las instalaciones de la UCR.

La PTAR recibe el agua residual de los edificios circundantes, los almacena en un tanque de entrada y seguidamente es transportada por medio de bombeo a las rejillas. Cae por gravedad al tanque de homogeneización que se encuentra en línea con las demás unidades. Entra al tanque de aireación en el cual recibe tratamiento con la tecnología de lodos activados convencionales. El agua continúa hacia el sedimentador secundario y pasa por el tanque de salida para finalmente ser vertida al alcantarillado. Existe recirculación de los lodos activados desde el sedimentador hacia el tanque de aireación. Además, los lodos que no son recirculados se dirigen al digestor, luego a los lechos de secado y finalmente son desechados.

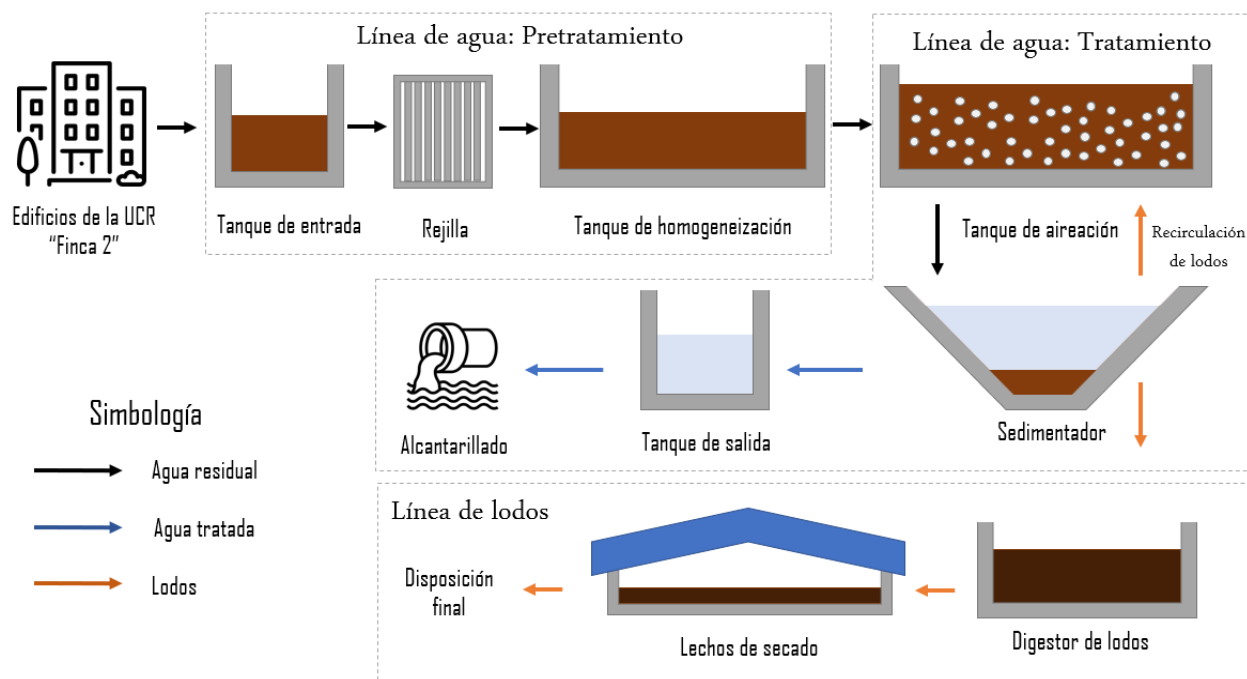


Figura 3.2. Diagrama de flujo de la PTAR.

La PTAR recibe un caudal diferente al de diseño, por lo que se realizan constantes modificaciones operacionales en el funcionamiento de la PTAR, las más relevantes a este trabajo son las siguientes: se utiliza volumen de agua en el tanque homogeneizador cercana al 25% del total, además solo se usa uno de los dos módulos de LA.

El tanque homogeneizador de la planta de la sede Rodrigo Facio UCR, finca 2 fue diseñado para un tiempo de retención de siete horas. Tiene las siguientes dimensiones: 11,3 m de largo, 1,2 m de ancho y 3,8 m de altura total. Cuenta con cinco difusores de membrana tipo disco en una fila a lo largo del fondo del tanque.

La entrada se realiza en un extremo por bombeo desde el tanque de agua cruda, primero pasando por una rejilla y cayendo por gravedad al tanque. Para la salida del agua, se utilizan dos bombas sumergibles en uno de los laterales del tanque. Estas bombas cuentan con un caudal de entrega de $9,0 \text{ m}^3/\text{s}$ de los cuales un máximo de $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ serán dirigidos a los tanques de aireación de lodos activados. El caudal restante recirculará a la unidad, a modo de mezcla.

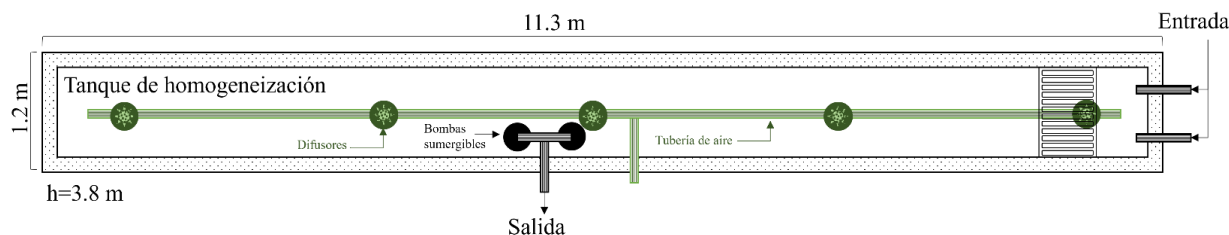


Figura 3.3. Plano de planta del tanque de homogeneización.

La altura del agua está regulada por un sistema de boyas, en la que la altura mínima de la boya es 0,9 m y la máxima 1,0 m. Por lo tanto, el mínimo de agua en el tanque es de $12,0 \text{ m}^3$ y el volumen máximo es de $13,3 \text{ m}^3$, con un promedio de $12,7 \text{ m}^3$. Cada vez que la boya activa el sistema de bombeo se evacuan como mínimo $1,4 \text{ m}^3$ hacia uno de los tanques de aireación de LA y se recirculan $7,7 \text{ m}^3$ para generar mezcla en la unidad.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL MUESTREO

3.2.1 Caudal y duración preliminar del TRH

La planificación del muestreo realizado entre los meses de setiembre y octubre 2022 se basó en el caudal histórico registrado para la PTAR en estudio (Figura 3.4). Los meses de setiembre y octubre del 2021 reportaron un caudal en el rango de $3,8$ y $6,6 \text{ m}^3/\text{día}$. Además, en los meses de época lluviosa del 2022, el caudal promedio se mantuvo en el rango de $6,0$ - $11,0 \text{ m}^3/\text{día}$.

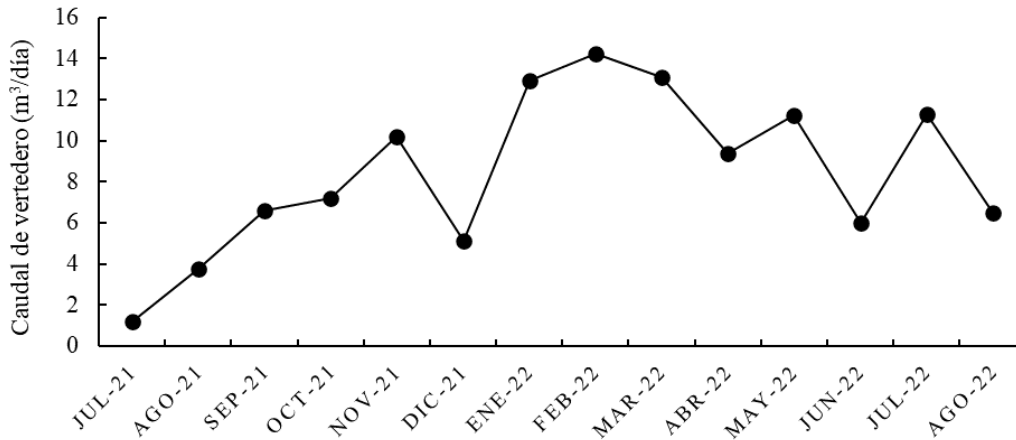


Figura 3.4: Caudal promedio de aforo de vertedero en el periodo julio 2021 a junio 2022. Fuente: Registro de Grupo PROAMSA (2022).

La proyección de posibles caudales fue importante para definir la duración de los TRH del muestreo. El TRH (periodo de tiempo que el agua permanece en una unidad de tratamiento) se recalculó con el volumen de la unidad y el caudal real de la unidad de la siguiente forma:

$$TRH (h) = \frac{\text{Volumen de la unidad (m}^3\text{)}}{\text{Caudal de salida o entrada (m}^3\text{/h)}}$$

3.2.2 Línea Base y Medidas de mitigación de olores

Antes de la aplicación de las medidas de mitigación de olores se estudió la línea base de la situación de olores. La línea de base recolecta información inicial acerca de la situación o problemática y permite medir el cambio que ha producido la intervención desarrollada (Generalitat Valenciana, 2017). La línea base del presente estudio, permitió conocer la problemática de olores, la caracterización del agua residual de la PTAR y definir variaciones en los periodos de aplicación de medidas de mitigación de olores.

Se seleccionaron cuatro medidas de mitigación (Cuadro 3.1), las cuales fueron aplicadas en diferentes periodos. Cada uno de los periodos, línea base y las cuatro medidas de mitigación, se realizaron por cuadruplicado de acuerdo con el tiempo de retención hidráulico (TRH) del tanque de homogeneización.

Cuadro 3.1. Detalles de la aplicación de medidas de mitigación de olores para un total de cuatro repeticiones por tratamiento.

Medida	Modo de aplicación	Periodo
Línea base	Monitoreo durante el funcionamiento de la unidad antes de aplicar las medidas de mitigación.	16-29 de setiembre
Aireación	Aireación de la unidad buscando mantener el ORP superior a 100 mV y el OD mayor a 1 mg/L.	30 de setiembre - 6 de octubre
Adición de cal	Adición de cal para aumentar el pH de la unidad y mantenerlo en el rango de 7,5 - 8.	10-14 de octubre
Adición de sulfato de hierro	Adición de sulfato de hierro para eliminar el sulfuro disuelto en el agua residual de la unidad. Dosis de acuerdo con mediciones de sulfuro disuelto.	17-20 de octubre
Adición de BiOWiSH® Odor	Adición de BiOWiSH® Odor para la disminución de olores, con la dosis recomendada de 10 ppm.	24-27 de octubre

3.2.3 Puntos de muestreo

Los puntos seleccionados para el muestreo de los parámetros fisicoquímicos son los marcados en la Figura 3.5. Los puntos A, B y C son puntos de muestreo (triplicado) dentro de la unidad en estudio la que la entrada y salida representan la tubería en la cual se tomaran muestras correspondientes.

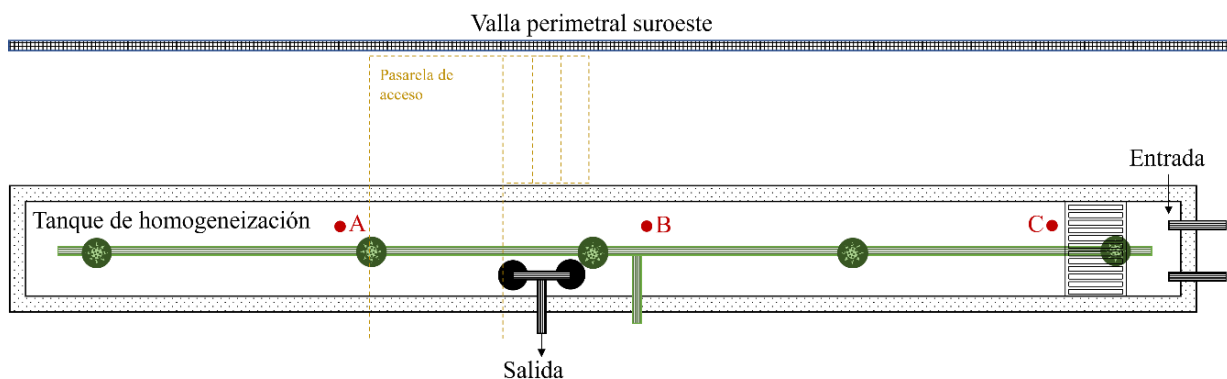


Figura 3.5. Puntos de muestreo marcados en plano de planta del tanque de homogeneización.

3.2.4 Parámetros fisicoquímicos

Para la evaluación de las medidas de mitigación de olores se monitorearon parámetros fisicoquímicos en el agua residual; OD, ORP, pH y concentración de sulfuro. Así como, características del funcionamiento de la unidad; caudal y características del agua de entrada y salida. Las mediciones que se realizaron durante el muestreo son las siguientes:

Caudal: Las mediciones de caudal de la unidad fueron monitoreadas en cada una de las sesiones de muestreo, para verificar que se cumpliera los cuatro TRH por medida de mitigación y línea base. Las horas disponibles para muestreo correspondieron de 8:00 am a 5:00 pm, de lunes a viernes. Los sábados y domingos no se realizarán muestreos debido a que el caudal de entrada se ve afectado por la capacidad de la institución, por lo que el TRH se extiende, no siendo comparable con las otras mediciones.

ORP: Toma de muestras y medición inmediata in situ con un medidor de ORP, Ruizhen.

pH: Toma de muestras y medición inmediata in situ con un pHmetro, HANNA.

OD: Medición in situ con una sonda medidora de OD, HANNA.

Temperatura: In situ mediante el medidor de ORP, Ruizhen

Concentración de sulfuro: Medición de sulfuro total (H_2S , HS^- y S^{2-}) en la fase líquida de la unidad con un kit de pruebas de sulfuro, LaMotte (Anexo 1).







Volumen de salida: Se calculó según el caudal de la bomba de salida y el tiempo de funcionamiento de esta.

$$\text{Volumen de salida (m}^3\text{)} = \text{Caudal de bombeo} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right) * \text{tiempo de bombeo (min)}$$

Dosis de los aditivos aplicados: Mediante una balanza digital marca MainStays

Los instrumentos utilizados para cada medición se detallan en el Cuadro 3.2. mientras que un resumen del monitoreo se presenta en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.2. Detalles de los instrumentos a utilizar durante el muestreo.

Nombre	Modelo	Marca	Imagen	Detalles
phmetro	pHep HI98127	HANNA		Medición del potencial de hidrógeno y temperatura
Medidor de ORP	ORP100	Ruizhen		Medición del potencial de reducción-oxidación y temperatura
Sonda de OD	HI9146	HANNA		Medición de la concentración de OD, saturación de oxígeno y temperatura
Balanza digital	Balanza digital	MainStays		Balanza de cocina para pesos entre 1g y 5000g
Kit de pruebas de sulfuro	Sulfide Test Kit	LaMotte		Medidor de la concentración de sulfuro total S ²⁻ para el rango de 0,2-20 ppm
Cono Imhoff	Cono Imhoff	Simax		Medición de sólidos sedimentables en mL/L

Cuadro 3.3. Detalles de las mediciones del muestreo

Punto de muestreo	Mediciones	Frecuencia
Dentro de la unidad (A, B, C)	pH OD ORP	Cada 30 min
	Sulfuro total	1 vez cada TRH
Entrada	pH OD ORP	Cada vez que se activó la bomba de entrada
	Solidos sedimentables	2 veces por TRH
Salida	pH OD ORP Caudal de salida	Cada vez que se activó la bomba de salida
Dosis de aditivos	Gramos adicionados	Cada vez que se adicionó un producto a la unidad

3.3 APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MITIGACION DE OLORES

3.3.1 Aireación

En la PTAR en estudio el tanque de homogeneización cuenta con tres difusores conectados al sistema de aireación. Para el periodo de aplicación de la medida de mitigación de aireación se abrió la válvula de aire correspondiente al sistema de aireación del tanque de compensación, permitiendo el paso de aire desde los sopladores de la PTAR hasta los tres difusores que se encuentran en el fondo del tanque de homogeneización.

El nivel de aireación fue controlado hasta que el oxígeno disuelto de la unidad se aproximó a 1 mg/L y el ORP fue positivo. Esto resultó en el uso de la configuración más baja de la válvula, debido a las características del sistema de aire de la PTAR y el agua residual.

Además, se revisó el cumplimiento de la presión del sistema de aire según los protocolos de seguridad de las PTAR al abrir y cerrar la válvula. Y se monitoreó que el cambio en el nivel de aireación en los tanques de LA no alterara su funcionamiento y consecuentemente la calidad del efluente.

3.3.2 Adición de Cal

Para mantener el pH en valores entre 7,5-8, se adicionaron diferentes cantidades de cal. Al inicio de cada sesión se adicionaron 100-130 g cada 30 minutos hasta llegar al pH deseado y a partir de este punto únicamente se adicionó más si el pH promedio de la unidad disminuía. Después de agregar la cal se abrió la válvula de aire por tres minutos para mejorar la mezcla de aditivo en la unidad.

3.3.3 Adición de Sulfato de Hierro

Para la adición de sulfato de hierro se utilizaron dos disoluciones acuosas de sulfato de hierro. Una disolución de aplicación puntual (A) y otra de aplicación periódica (B). La preparación de dichas disoluciones se basa en los valores de la concentración de sulfuro total en el agua de entrada y de la unidad. Estas mediciones fueron tomadas al inicio del TRH, utilizando el kit de sulfuro de LaMotte.

La aplicación puntual tuvo como objetivo eliminar el sulfuro en la unidad y la aplicación periódica buscó la eliminación del sulfuro que entra continuamente por el afluente de la planta. La disolución A se agregó al inicio del TRH con apoyo del sistema de aireación para mezclar por tres minutos. La aplicación de la disolución B fue horaria, se agregaron 250 mL por hora en la zona de entrada.

Recordando que la dosis de sulfato de hierro recomendada es de 1,5-4,5 mg/L por cada 1 mg/L de sulfuro se tomó la decisión de usar 2,75 g FeSO₄/g S⁻ para la disolución A y 4 g FeSO₄/g S⁻ para la disolución B. Esta diferencia se basa en que la disolución de aplicación continua debe enfrentarse a las variaciones en la concentración de sulfuro y caudal.

A continuación, se presentan los cálculos realizados para generar las disoluciones A y B.

$$Disolución A \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{Cn TH \left(\frac{g S^-}{L} \right) * Dosis \left(\frac{g FeSO_4}{g S^-} \right) * Volumen TH (L)}{Volumen de disolución A (L)}$$

Cn TH: Concentración de sulfuro medida en el tanque de homogeneización (g S⁻/L)

Dosis: gramos de FeSO₄ por cada gramo de sulfuro (FeSO₄/g S⁻)

Volumen TH: Volumen del tanque de homogeneización (L)

Volumen de disolución A: Volumen de disolución A que se desea (L).

$$\text{Disolución B } \left(\frac{g}{L}\right) = \frac{\text{Cn E } \left(\frac{g S^{-}}{L}\right) * \text{Dosis } \left(\frac{g FeSO_4}{g S^{-}}\right) * Q \left(\frac{L}{h}\right) * 10h}{\text{Volumen de disolución B (L)}}$$

Cn E: Concentración de sulfuro medida en el agua de entrada (g S⁻/L)

Dosis: gramos de FeSO₄ por cada gramo de sulfuro (FeSO₄/g S⁻)

Q: Caudal de entrada horario promedio (L/h)

Volumen de disolución B: Volumen de disolución B deseado (L).

3.3.4 Adición de BiOWiSH[®] odor

La adición de BiOWiSH[®] odor en el tanque se basó en el seguimiento de las recomendaciones del producto. Se creó una disolución de 2 L con la cantidad de producto necesaria para que al agregarla la unidad tenga una concentración de 10 mg/L. Al inicio de cada sesión se preparó la disolución, se dio 15 minutos de activación y se agregó a la unidad. Se utilizó el sistema de aireación por tres minutos para acelerar la mezcla. Además, se esperó 40 minutos para iniciar las encuestas de percepción de olores.

$$\text{Disolución } \left(\frac{g}{L}\right) = \frac{\text{Cn BW } \left(\frac{mg}{L}\right) * \text{Volumen TH (L)}}{\text{Volumen de disolución A (L)}}$$

Cn BW: Concentración de BiOWiSH[®] odor recomendada (mg/L)

Volumen TH: Volumen del tanque de homogeneización (L)

Volumen de disolución A: Volumen de disolución A que se desea (L).

$$\text{Disolución } \left(\frac{g}{L}\right) = \frac{\frac{10mg}{L} * 12\ 677\ L}{2L} = \frac{126\ g}{2L}$$

3.4 ENCUESTA DE PERCEPCIÓN DE OLORES

Durante cada uno de los periodos de muestreo se caracterizó cualitativamente la percepción de olor mediante encuestas en sitio. La encuesta utilizó preguntas cerradas y de respuesta única para la evaluación del olor, específicamente los factores de: intensidad, ofensividad y carácter de los olores. Se realizaron 15 encuestas para cada fase de la recolección de datos, para un total de 75 encuestas. La encuesta se realizó a trabajadores y estudiantes entre el lindero suroeste de la planta y el tanque de homogeneización (Figura 3.4). Se realizó en esta zona debido a que es la zona más cercana al tanque de homogeneización

en la que los estudiantes tienen permitido movilizarse, según los protocolos de seguridad de la PTAR. En el Apéndice 2 se presentan el formato de encuesta utilizado y en Cuadro 3.4 un resumen de esta.

La escala de carácter, intensidad y ofensividad se basan en las recomendaciones de Burlingame (2009). La pregunta de carácter está acompañada de una rueda de olores (Figura 3.7.), traducida al español y basada en los grupos propuestos por Burlingame (2009) y Suffet y Rosenfeld (2007). Finalmente, la encuesta solicita información sobre la fecha y hora de llenado de la encuesta y características del receptor.

Cuadro 3.4. Detalles de la encuesta de percepción de olores.

Pregunta	Opciones	
¿Cuál es la intensidad de olor?	1. Sin olor 2. Muy leve 3. Débil	4. Fácilmente notable 5. Fuerte 6. Muy Fuerte
¿Cómo percibe el olor?	1. Neutral 2. Ligeramente desagradable	3. Desagradable 4. Extremadamente desagradable
¿Qué grupo de descriptores se ajusta mejor a su percepción del olor? (ver rueda de olores)	1. Natural 2. Frutal 3. Fresco 4. Tierra-Moho 5. Rancio-Agrio 6. Desinfectante	7. Químico 8. Amoniaco 9. Cañería- Fecal 10. Putrefacto 11. Azufre 12. Otro:
Fecha y Hora		
Razón por la que se encontraba en la zona	1. Trabajo 2. Estudio	3. Ocio 4. Otro:
Correo electrónico (opcional)		
Comentarios (opcional)		



Figura 3.6. Rueda de olores utilizada para la encuesta de percepción de olores. Adaptación de Burlingame (2009) y Suffet y Rosenfeld (2007).

3.5 ANÁLISIS DE DATOS

Para todas las pruebas estadísticas que se comentan a continuación se utilizó el programa de *Minitab 2019*.

3.5.1 Análisis de datos de parámetros fisicoquímicos

Datos anómalos: Se realizó la prueba de Grubbs para la determinar la existencia de datos anómalos en los conjuntos de datos de temperatura, ORP, pH y OD de los datos recolectados en la unidad, en la salida y en la entrada. La prueba se realizó sobre cada conjunto de datos para cada medida de mitigación aplicada, considerando que cada medida

de aplicación se comporta como una población independiente. Los datos anómalos se eliminan del estudio, más detalles de la prueba realizada y el procesamiento de datos se encuentran en el Apéndice 3.

Estadística descriptiva: Para representar los parámetros fisicoquímicos de la unidad, la salida y la entrada se resumieron los datos utilizando la media, desviación estándar y tamaño de la muestra. Estos se encuentran en los apéndices 4, 5 y 6.

Comparación de medias: Para determinar si existe una diferencia significativa en los parámetros fisicoquímicos medidos de la línea base y la aplicación de medidas de mitigación de olores al tanque homogeneización, se utilizó la prueba *t Student*. Esta prueba determina si existe una diferencia entre las medias de dos conjuntos de datos, en este caso se realiza con un nivel de confianza del 95%.

Para realizar la prueba *t Student* se requiere que los datos tengan una distribución normal y que los grupos tenga varianzas homogéneas. Esta prueba es la recomendada para grupos de datos con tamaños de muestra menores a 30 datos, sin embargo, también puede aplicarse a grupos mayores. La diferencia radica en que las muestras pequeñas tienen grados de libertad menores, que generan colas más amplias en la distribución, representativo de la distribución *t Student*. Mientras que a medida que los grados de libertad aumentan, la distribución se aproxima a una distribución normal (Sánchez, 2023).

Esta prueba se realizó para los conjuntos de datos de pH, temperatura, ORP, OD y sulfuros totales en el agua, entre la línea base y la aplicación de cada medida de mitigación de olor. También se realizó en los conjuntos de pH, temperatura, ORP, OD y sólidos sedimentables en los datos de salida y entrada. Detalles de estas pruebas estadísticas se encuentran en el Apéndice 7.

3.5.2 Análisis de datos de encuestas

La encuesta recolecta datos de tipo cualitativos de las características del olor. Por un lado, la intensidad y ofensividad se les asignó una escala ordinal jerárquica; del 0-5 en el caso de intensidad y de 0-4 ofensividad. Esta escala permite comparar la mediana de los conjuntos de datos. Por otro lado, el carácter del olor al no ser una cualidad con jerarquía, se estudia la frecuencia de aparición de los 11 grupos de descriptores del olor.

Rueda de olores: La rueda de olores está construida a partir de un gráfico de pastel con la frecuencia de respuesta de cada uno de los 11 grupos propuestos, se construye una rueda de olores específica a cada uno de los periodos en estudio (línea base y cuatro medidas de mitigación de olores). Se mantienen los colores y orden de la rueda utilizada en la encuesta. Además, se agregaron dos descriptores a todas las ruedas de olor generadas; “estero” al grupo de sulfuro y “cloaca” al grupo de fecal-cañería debido a sugerencias de los encuestados.

Comparación de medianas:

Los datos de intensidad y ofensividad son datos cualitativos ordinales, es decir, son categorías con jerarquía. A pesar de que se le pueden asignar números a cada categoría se debe de aplicar estadística para datos cualitativos; por esta razón no se comparan medias, sino medianas. Se utilizó la comparación de medianas de Mood, una prueba no paramétrica que se ajusta al carácter cualitativo de los datos. Se aplicó para la comparación de las medianas de la intensidad y ofensividad de la línea base con cada una de las medidas de mitigación de olores, utilizando un 95% de confianza. Además, se compararon las medianas de intensidad y ofensividad de los estudiantes y trabajadores, utilizando un 95% de confianza. Detalles de esta prueba estadística se encuentran en el Apéndice 8.

4. RESULTADOS

4.1 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL Y TRH

Según el histórico de caudales, el valor esperado está dentro del rango de 6,0 a 11,0 m³/día, por lo que con un volumen fijo de la unidad de 12,7 m³, el TRH varia de 50 a 27 horas. Sin embargo, debido a que la PTAR en estudio recibe agua únicamente durante las horas laborales de la universidad (8:00 am a 5:00 pm), el TRH se recalculó de la siguiente manera:

$$TRH (h) = \frac{Volumen (m^3)}{Caudal (\frac{m^3}{h})} = \frac{12,67 (m^3)}{[6 - 10] (m^3)/9 (h laborales)} = [8 - 16](h laborales)$$

Los resultados del comportamiento real del caudal de entrada a la PTAR y el TRH de la unidad se resumen en el Cuadro 4.1 para cada uno de los periodos estudiados. El caudal de la planta se mantuvo en el rango de 0,42-1,83 m³/día, mientras que los TRH en el rango de 6,9-30,1 h durante el periodo de estudio.

Cuadro 4.1. Caudal y TRH medidos en la recolección de datos.

Fases	Sesión	1	2	3	4	Promedio
Línea Base	Caudal (m ³ /h)	1,42	0,47	0,46	1,52	0,96
	TRH (h)	8,9	26,4	27,3	8,3	17,72
Aireación	Caudal (m ³ /h)	1,46	0,42	0,46	1,65	0,99
	TRH (h)	8,7	30,1	27,1	7,7	18,4
Adición de cal	Caudal (m ³ /h)	0,51	0,51	0,49	1,83	0,83
	TRH (h)	24,8	24,4	25,8	6,9	20,47
Adición de sulfato de hierro	Caudal (m ³ /h)	1,46	1,51	1,56	1,49	1,50
	TRH (h)	8,7	8,4	8,1	8,5	8,42
Adición de BiOWiSH® Odor	Caudal (m ³ /h)	1,45	1,41	1,79	1,49	1,53
	TRH (h)	8,8	9	7,1	8,5	8,35

Tiempos de retención mayores a nueve horas, que fueron muestreados por más de un día laboral se presentaron en los periodos de aireación, línea base y adición de cal. Específicamente en los lunes, martes y miércoles de setiembre y primeras dos semanas de octubre. En el caso de los periodos de adición de sulfato de hierro y BiOWiSH® Odor todos los tiempos de retención son menores a nueve horas, debido al aumento de caudal en las últimas dos semanas de octubre.

4.1.1 Caracterización del Agua de Entrada

En el Cuadro 4.2 se encuentran un resumen de las características del agua de entrada para cada uno de los periodos de aplicación de las medidas estudiadas. A partir de la comparación de cada medida de mitigación de olor con la línea base se generaron las siguientes inferencias sobre cada uno de los parámetros fisicoquímicos estudiados:

Temperatura: Todas las medidas de entrada se comportan diferente al de línea base.

pH: El promedio del agua de entrada de las medidas de adición de cal, adición de sulfato de hierro y adición de BiOWiSH® odor variaron con respecto al promedio de línea base. En el caso de adición sulfato de hierro y BiOWiSH® odor el agua registró pH ácidos; mientras que en durante la medida de adición de cal el pH incrementó (alcalino).

OD: Se encontró diferencia significativa en el oxígeno disuelto en el agua de entrada para los periodos de aireación, adición de sulfato de hierro y adición de BiOWiSH® odor. Estos fueron mayores al de línea base.

Cuadro 4.2. Resultados generales del monitoreo del agua residual de entrada

Parámetro	Línea Base	Aireación	Adición de cal	Adición de FeSO ₄	Adición de BiOWiSH® Odor	General	
ORP (mV)	\bar{x}	-85,10	-37,78	-40,46	-23,26	-49,29	-45,27
	s	44,92	35,31	44,14	37,76	42,67	44,77
	n	31	36	28	42	35	172
Temperatura (°C)	\bar{x}	23,25	22,91*	23,08*	23,79*	22,97*	23,18
	s	1,74	1,11	1,31	1,39	1,34	1,34
	n	31	36	28	42	35	172
pH	\bar{x}	7,43	7,60	7,98*	7,11*	7,08*	7,4
	s	0,58	0,48	0,64	0,46	0,41	0,6
	n	31	36	28	42	35	172
OD (mg/L)	\bar{x}	1,75	2,44*	2,07	2,6*	2,24*	2,25
	s	0,88	0,88	0,78	0,84	0,70	0,87
	n	31	36	28	42	35	172
Sólidos Sedimentables (mL/L)	\bar{x}	13,65	10,4	8	15,62	12,87	11,56
	s	9,8	6,6	5,2	6,78	7,37	10,1
	n	8	8	8	8	8	40

\bar{x} : Promedio s: Desviación estándar n: cantidad de mediciones

*Existe una diferencia de media con la línea base

No se encontró diferencia significativa en los parámetros de ORP y sólidos sedimentables en ninguno de los periodos de aplicación de medidas de mitigación de olores.

4.2 RESULTADOS DE APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN

4.2.1 Adición de cal

En el Cuadro 4.3 se especifica la cantidad de cal adicionada para cada TRH, para un total de 4 kg. El conteo de adiciones se refiere a la cantidad de veces que fue requerida la adición de cal, cada aplicación se refiere a la adición entre 100 -130 g de cal a la unidad.

Cuadro 4.3. Características de la adición de cal.

Dato	TRH 1	TRH 2	TRH 3	TRH 4	General
Cal añadida (g)	928	730	1114	1153	4070
Conteo de adiciones	9	7	9	9	34

4.2.1 Adición de sulfato de hierro

Para la aplicación de sulfato de hierro se generaron dos disoluciones (A y B) con las fórmulas detalladas en metodología, a continuación, los resultados para el TRH 1 son:

$$Disolución A \left(\frac{g}{L}\right) = \frac{\frac{1 \times 10^{-3} \text{ g } S^{-}}{L} * \frac{2,75 \text{ g } FeSO_4}{g \text{ } S^{-}} * 12 \text{ } 677 \text{ L}}{2,5 \text{ L}} = \frac{350 \text{ g } FeSO_4}{2,5 \text{ L}}$$

$$Disolución B \left(\frac{g}{L}\right) = \frac{\frac{0,5 \times 10^{-3} \text{ g } S^{-}}{L} * \frac{4 \text{ g } FeSO_4}{S^{-}} * \frac{1260 \text{ L}}{h} * 10 \text{ h}}{2,5 \text{ L}} = \frac{25 \text{ g } FeSO_4}{2,5 \text{ L}}$$

En el Cuadro 4.4. se presentan los resultados de la aplicación de sulfato de hierro como medida de mitigación de olor. Incluye concentraciones de sulfuro, concentración de las disoluciones, caudales horarios de cada TRH y porcentaje de remoción.

Cuadro 4.4. Características de la aplicación de sulfato de hierro.

Datos	TRH 1	TRH 2	TRH 3	TRH 4	Promedio
Sulfuro en Entrada (mg/L)	0,5	0,2	0,5	1	0,55
Sulfuro en unidad (inicial) (mg/L)	10	5	5	10	7,5
Sulfuro en unidad (después) (mg/L)	1	2	2	2	1,75
Disolución A (g/L)	140	70	70	140	--
Disolución B (g/L)	10	10	10	20	--
Caudal (L/h)	1492	1420	1420	1499	1458
Remoción (%)	80	80	60	80	75

Para el cálculo se utilizó el caudal horario promedio de las sesiones previas mostradas en el Cuadro 4.1, para lo cual se utilizó un promedio de 1260 L/h. A pesar de que los caudales horarios reales fueron mayores, la concentración de sulfato de hierro agregado se mantuvo en el rango recomendado (1,5 - 4,5 g FeSO₄/g S⁻). La menor dosis aplicada fue en TRH 4 donde se aplicó 3,3 g FeSO₄/ g S⁻.

4.2.2 Adición de BiOWiSH® Odor

De acuerdo con la dosis de aplicación del producto BiOWiSH® Odor se aplicaron 126 g en cada TRH, para un total de 504 g.

4.3 COMPARACIÓN DE LA APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN

En el Cuadro 4.5 se encuentran el resumen estadístico (promedio, desviación estándar y número de muestras) de los parámetros fisicoquímicos de la aplicación de las medidas de mitigación de olor y los resultados de la comparación de las medias con línea base.

Cuadro 4.5. Resultados generales del monitoreo del tanque de homogeneización

Parámetro	Línea Base	Aireación	Adición de cal	Adición de sulfato de hierro	Adición de BiOWiSH® Odor	
ORP (mV)	\bar{x}	-130,42	157,88*	-136,56	-85,21*	-132,39
	s	38,66	30,67	44,16	24,46	15,96
	n	243	273	189	186	174
Temperatura (°C)	\bar{x}	22,64	23,39*	22,83	23,48*	22,59
	s	0,84	1,36	1,16	1,23	0,69
	n	243	270	189	192	174
pH	\bar{x}	6,61	7,45*	7,73*	6,83*	6,64
	s	0,46	0,37	0,33	0,32	0,28
	n	240	267	183	192	177
OD (mg/L)	\bar{x}	ND	3,43*	ND	ND	ND
	s	-	1,78	-	-	-
	n	25	255	25	20	20
Sulfuros (mg/L)	\bar{x}	8,38	<0,2*	0,93*	1,75*	3,5*
	s	5,72	--	0,79	0,5	1,73
	n	8	4	4	4	4

*Existe una diferencia de media con la línea base

ND: No detectable

De los resultados obtenidos se puede denotar que:

Aireación: Hay una diferencia significativa del valor de ORP en comparación con la línea base. El pH del agua dentro de la unidad durante aireación es mayor al de línea base y

la concentración de sulfuro disminuyó. Además, el OD es medible mientras que en línea base no lo era. Finalmente hay una diferencia de 1 °C en la temperatura.

Adición de cal: Durante la aplicación de cal se genera una diferencia de pH y concentración de sulfuros totales en la unidad; siendo el pH mayor y el sulfuro menor al de línea base. El ORP, OD y temperatura no presentan diferencia.

Adición de sulfato de hierro: La adición de sulfato de hierro aumentó el ORP, sin embargo, se mantiene en valores negativos. Generó un aumento en el pH y una disminución en la concentración de sulfuro total. Además, se presenta una diferencia en la temperatura menor a 1°C. El OD se mantiene sin ser medible.

Adición de BiOWiSH® odor: La adición de BiOWiSH® Odor no generó diferencias significativas en los parámetros estudiados (pH, OD, ORP y temperatura), exceptuando la concentración de sulfuro en el agua.

4.3.1 Concentración de Sulfuro

En la Figura 4.1 se puede observar la concentración de sulfuro disuelto en la unidad para cada uno de los periodos de mitigación de olores. Existe una disminución significativa en la concentración de sulfuro de todas las medidas estudiadas en comparación con la línea base. En orden de menor a mayor promedio de concentración de sulfuro: aireación, adición de cal, adición de sulfato de hierro y adición de BiOWiSH® odor. Durante el periodo de aireación todas las muestras estuvieron en el límite inferior de la prueba de sulfuros (<0,2 mg/L).

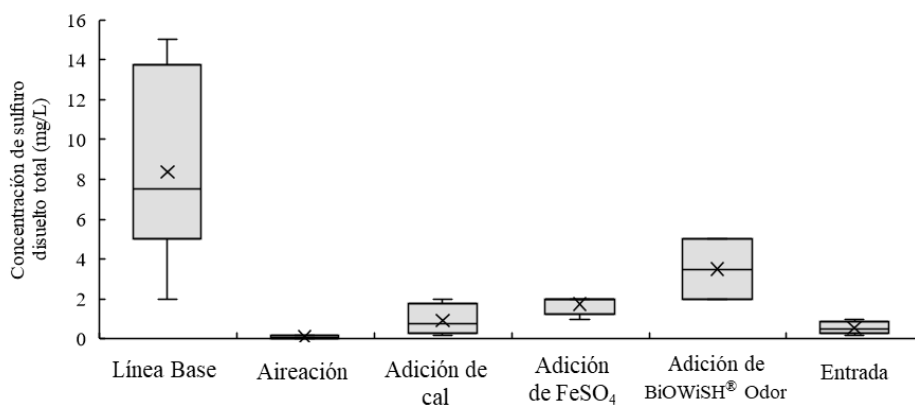


Figura 4.1. Concentración de sulfuro total en los periodos del estudio medidas de mitigación de olores

4.3.2 Tendencias de pH y ORP

En la Figura 4.2. se presentan los resultados de la correlación de los parámetros pH y ORP durante la aplicación de las cuatro medidas de control de olores en la unidad de tanque de compensación. Sobre el diagrama de dispersión que muestra los resultados obtenidos en este estudio se encuentra a escala, las líneas de un diagrama de Pourbaix de las especies de sulfuro en sistemas hídricos de Oliveira et al. (2017) para su comparación.

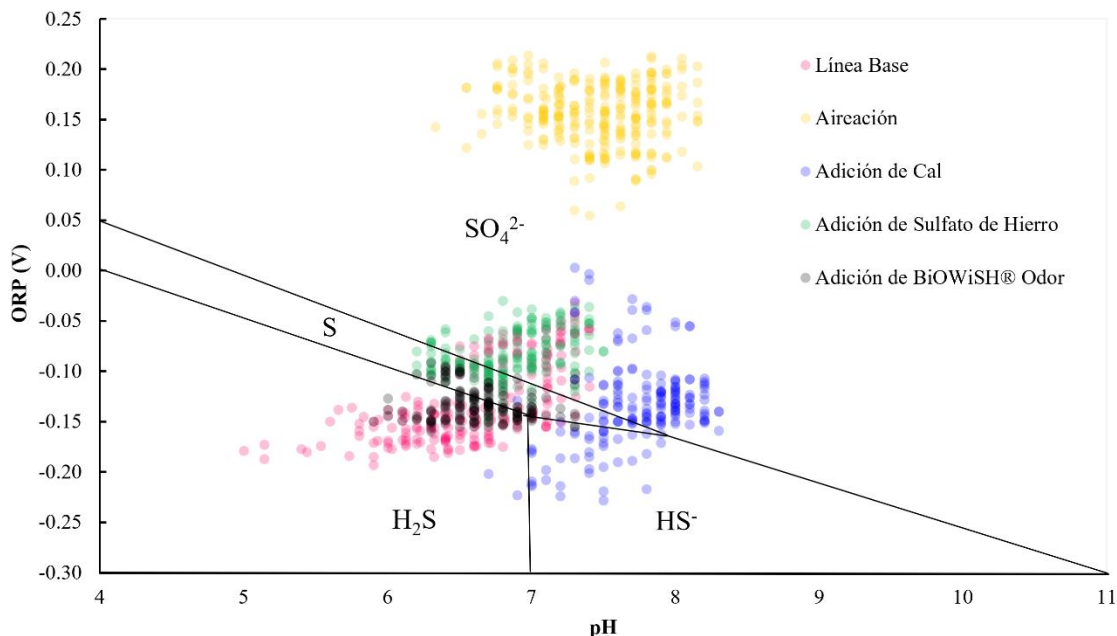


Figura 4.2. Comportamiento del tanque de homogeneización en los periodos del estudio de medidas de mitigación de olores en contraste con el diagrama de las especies de azufre en el agua.

Del diagrama se puede intuir que:

pH: Las medidas de aireación y adición de cal tienen un pH levemente alcalino, con promedios de 7,45 y 7,73. Seguidas por adición de sulfato de hierro, con un promedio de 6,8 cercano a un pH neutro. Finalmente, la línea base y adición de BiOWiSH® odor tienen un pH levemente ácido, con promedios de 6,61 y 6,64; sin embargo, línea base tiene mayor variación de pH.

ORP: En el eje de ORP se nota la diferencia del grupo de aireación, que tiene ORP positivos en todas las muestras tomadas. El grupo de sulfato de hierro es mayor al de línea base. En el caso de adición de cal, tiene mayor distribución o mayor rango de ORP que los

otros grupos. Finalmente, la línea base y adición de BiOWiSH[®] odor tienen un comportamiento de ORP similar, sin embargo, la línea base sigue teniendo mayor variación.

Especies de azufre

a. Línea Base y BiOWiSH[®] Odor: Los datos de línea base se encuentran en las secciones H₂S, sulfuro elemental y sulfato. La mayor densidad de datos se encuentra en la especie H₂S. Este comportamiento es muy similar al de la aplicación de BiOWiSH[®] odor con la excepción de que la mayor densidad de este periodo se encuentra en la zona de sulfuro elemental.

b. Aireación: El grupo de datos se encuentran por completo en la sección de la especie sulfato. Las condiciones oxidantes del sistema mueven el equilibrio hacia el sulfato, la especie más oxidada. Es el sistema más alejado de la especie H₂S, compuesto odorante.

c. Adición de cal: Los datos del periodo de adición de cal se distribuyen en las secciones de sulfato, seguido por HS⁻ y sulfuro en su estado elemental. El sistema durante ese periodo sufrió un aumento de pH debido a la adición de una sustancia alcalina, acompañado de un aumento de ORP.

d. Adición de sulfato de hierro: Finalmente, en los datos de adición de sulfato de hierro, el ORP es mayor al de línea base y los puntos se encuentran en la sección de sulfato y azufre elemental. Además, se debe de considerar el equilibrio del metal agregado (hierro). En la Figura 4.3 se contrastan a escala las condiciones del periodo de adición de sulfato de hierro con un diagrama de equilibrio hierro-azufre presentado en Oliveira et al. (2017). Se observa que el sistema durante este periodo se mantiene en la especie de sulfuro de hierro, tal como se desea para el funcionamiento de la medida de mitigación aplicada.

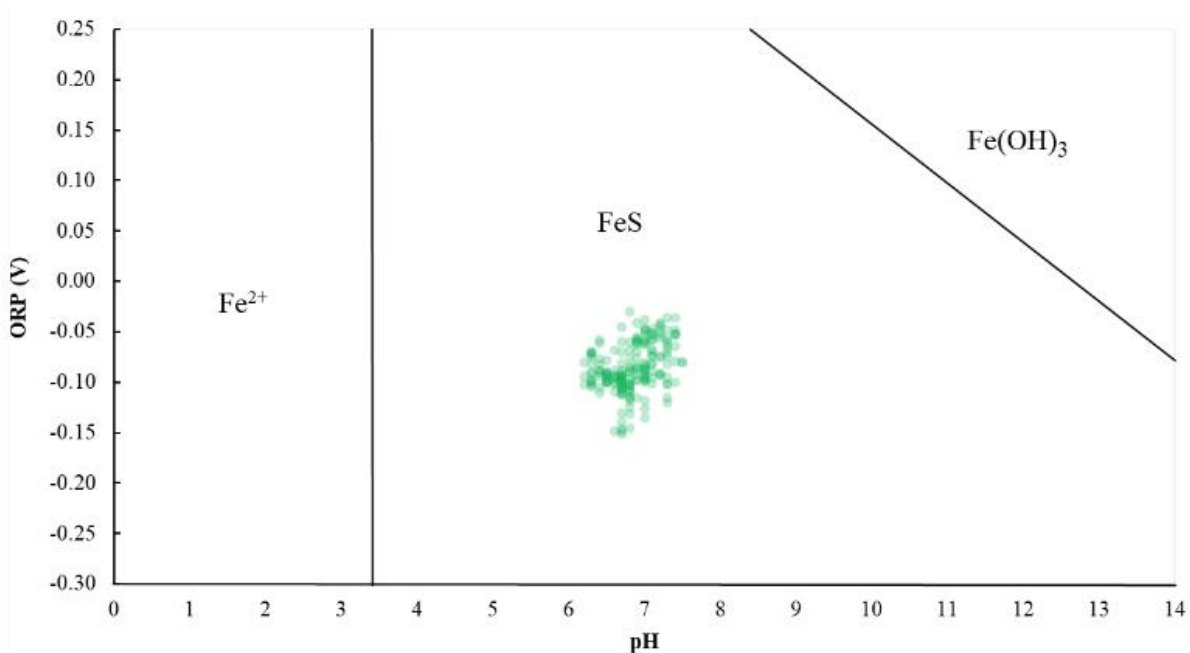


Figura 4.3. Comportamiento del tanque de homogeneización en el periodo de adición de sulfato de hierro en contraste con el diagrama de las especies de hierro y azufre en el agua.

4.3.3 Agua de Salida

Los parámetros fisicoquímicos del agua de salida del tanque homogeneizador para cada uno de los periodos del estudio de medidas de mitigación de olores se resumen en el Cuadro 4.6. Según las pruebas realizadas se encuentran las siguientes diferencias entre promedios:

Aireación: El ORP, temperatura, pH y OD son significativamente diferentes al de línea base. El ORP es positivo, la temperatura es mayor, el pH es mayor y se logra cuantificar el OD.

Adición de cal: El pH de salida es significativamente mayor al de línea base.

Adición de sulfato de hierro: Existen diferencias significativas en ORP, temperatura y pH en comparación con línea base. El ORP es mayor, aún negativo, la temperatura es mayor y el pH es mayor.

Adición de BiOWiSH® odor: No se encuentra diferencia significativa en ninguno de los parámetros analizados, entre la adición del producto y línea base.

Cuadro 4.6. Resultados generales del monitoreo del agua residual de salida

Parámetro	Línea Base	Aireación	Adición de cal	Adición de sulfato de hierro	Adición de BiOWiSH® Odor	
ORP (mV)	\bar{x}	-121,40	143,69*	-138,32	-78,13*	-105,56
	s	38,34	29,53	45,32	17,61	32,63
	n	30	36	34	32	25
Temperatura (°C)	\bar{x}	22,64	23,26*	22,60	23,31*	22,51
	s	0,77	1,36	1,14	1,24	0,62
	n	30	36	34	32	25
pH	\bar{x}	6,22	7,45*	7,63*	6,90*	6,59
	s	0,86	0,42	0,32	0,36	0,48
	n	30	36	34	32	25
OD (mg/L)	\bar{x}	ND	3,73*	ND	ND	ND
	s	-	2,02	-	-	-
	n	10	34	10	10	10

\bar{x} : Promedio s: Desviación estándar n: cantidad de mediciones

*Existe una diferencia de media con la línea base

ND: No detectable

Los parámetros que tienen diferencia significativa con línea base en la unidad de tanque de homogeneización coinciden con los que tienen diferencia en el agua de salida.

4.4 PERCEPCIÓN DE OLOR

4.4.1 Intensidad

La intensidad se midió en una escala jerárquica y se comparó cada medida de mitigación con la línea base. Se determinó con 95% de confianza que la mediana de medida de aireación difiere de la línea base. No se encuentran diferencias significativas con el resto de las medidas de mitigación de olores.

En la Figura 4.4 se puede apreciar la distribución de las respuestas de intensidad de la encuesta de percepción de olores. Aireación no tiene respuestas en “fuerte” y “muy fuerte”, mientras que los otros periodos si tienen respuestas en estas escalas superiores. Además, todas sus respuestas se concentran en tres categorías, mientras que otras medidas tienen cinco o más categorías.

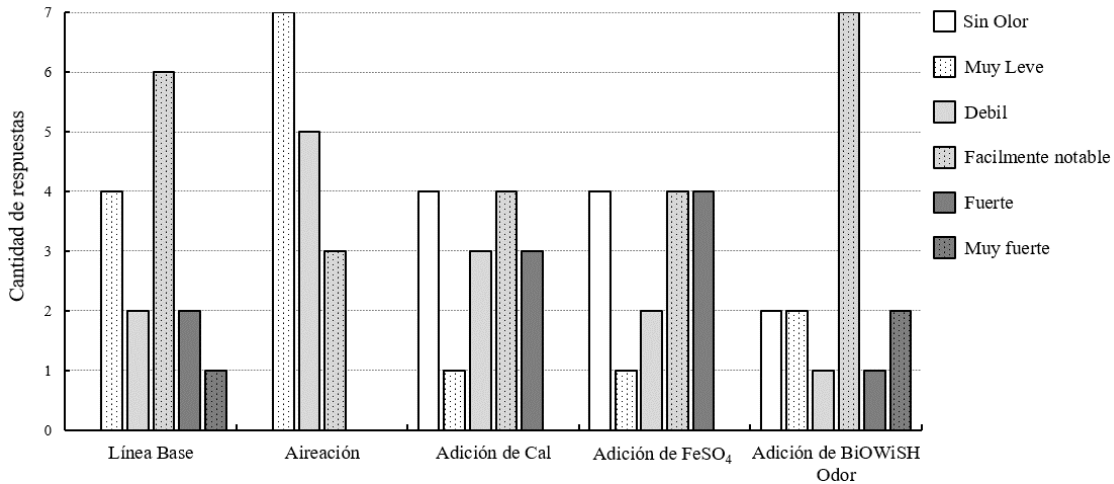


Figura 4.4. Frecuencia de intensidad de olores de cada una de las medidas de mitigación de olor.

4.4.2 Ofensividad

En la encuesta se utilizaron cinco categorías de ofensividad. Con el análisis de medianas, se identifica una diferencia entre la línea base y el periodo de aireación. No se encontró diferencia significativa entre la mediana de las otras tres medidas y la línea base.

En la Figura 4.5 se puede observar que medida de aireación únicamente tiene respuestas de las categorías “neutral” y “sin olor”. Por otro lado, la medida adición de BiOWiSH® odor tiene respuestas en ambos extremos, siendo la única en tener la categoría de “extremadamente desagradable”.

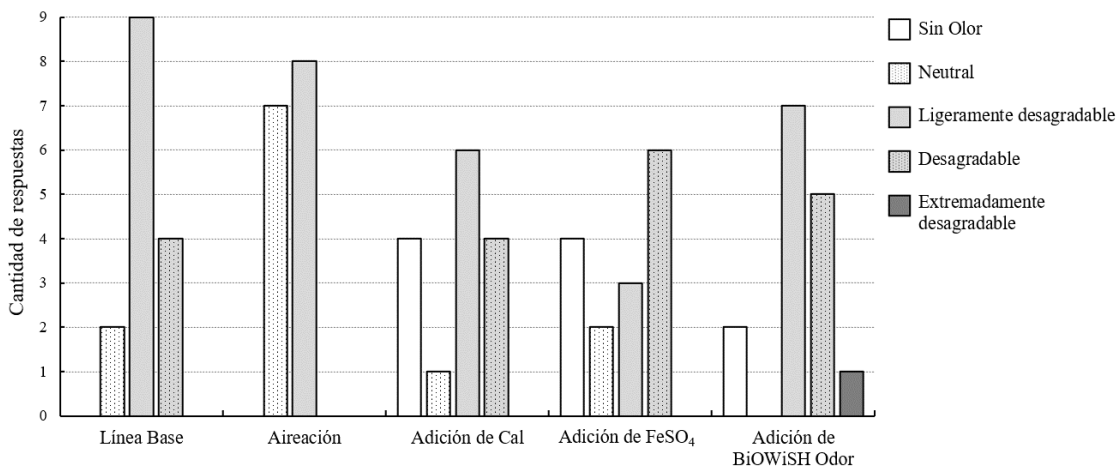


Figura 4.5. Frecuencia de ofensividad de olores de cada una de las medidas de mitigación de olor.

4.4.3 Percepción del olor según la población de estudio

Los participantes de la encuesta fueron estudiantes y trabajadores de la PTAR. Los estudiantes se encontraban en las instalaciones debido a la realización de una gira educativa debido a que el funcionamiento de la PTAR. Se recibieron estudiantes de Ingeniería Civil, Ingeniería Agrícola y de Biosistemas, así como Promoción de la Salud y estudiantes que realizaban muestreos ambientales. Todos los visitantes/funcionarios que ingresaron se sujetaron a los protocolos de seguridad de la PTAR.

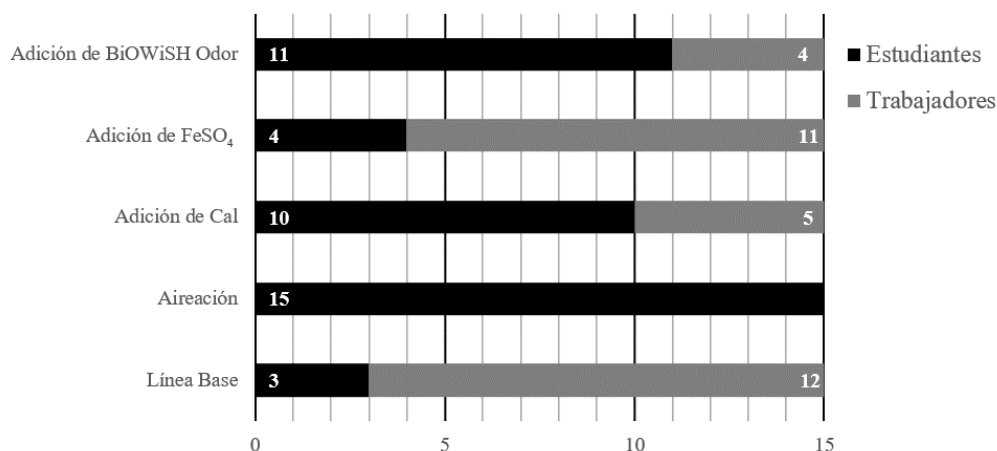


Figura 4.6. Proporción de los encuestados para cada fase de estudio de mitigación de olores

En el caso de trabajadores de la PTAR se encuestó operadores, ingenieros y encargados de mantenimiento. Así como otros trabajadores que se encontraban cerca de los linderos de la PTAR; entre ellos profesores, encargados de seguridad, jardinería y movilización de desechos sólidos.

Al comparar las medianas de intensidad y ofensividad asociadas a los grupos de estudiantes y trabajadores se encontró una diferencia significativa, esto con un 95% de confianza. La intensidad y ofensividad reportada por los trabajadores es menor que la del grupo de estudiantes. Según la figura de barras (Figura 4.7) las respuestas más frecuentes de los estudiantes son intensidad “fácilmente notable” y ofensividad “ligeramente desagradable”; mientras que para los trabajadores es intensidad “sin olor” y ofensividad “ligeramente desagradable”. La diferencia es más marcada en las respuestas de intensidad (Figura 4.8), los estudiantes no reportaron “sin olor” mientras que diez trabajadores reportaron “sin olor” (31% de trabajadores).

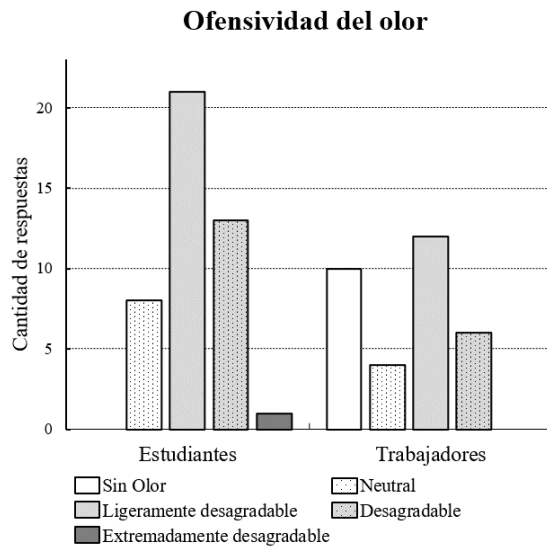


Figura 4.7. Distribución de las respuestas de ofensividad de olores para los grupos de estudiantes y trabajadores.

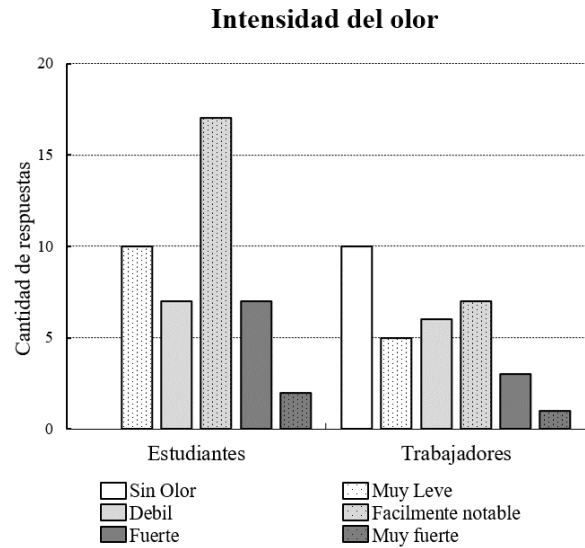


Figura 4.8. Distribución de las respuestas de intensidad de olores para los grupos de estudiantes y trabajadores.

4.4.4 Carácter

Con las respuestas de cada periodo del estudio se construyeron ruedas de olor específicas a cada medida de mitigación de olores y la línea base de la unidad. El tamaño de cada grupo en el gráfico (Figura 4.9) es equivalente a la frecuencia de respuesta. Los subgrupos de la rueda original de la encuesta (Figura 3.5) se mantienen.

Se puede observar en la Figura 4.9. que los grupos “fecal-cañería” y “químico” están presentes en todas las ruedas. El grupo “fecal-cañería” tiene una presencia de entre 36% - 47% en las ruedas de olor; mientras el grupo “químico” tiene una presencia de 4% - 8%, a excepción de la rueda del periodo de adición de cal donde tiene una presencia del 19%.

Los grupos “azufre” y “tierra-moho” se presentan en todas las ruedas a excepción de la rueda de olores de adición de cal. En la adición de cal se presentan la menor variedad de grupos (cuatro grupos), mientras que en adición de BiOWiSH odor se presenta la mayor variedad con ocho grupos.

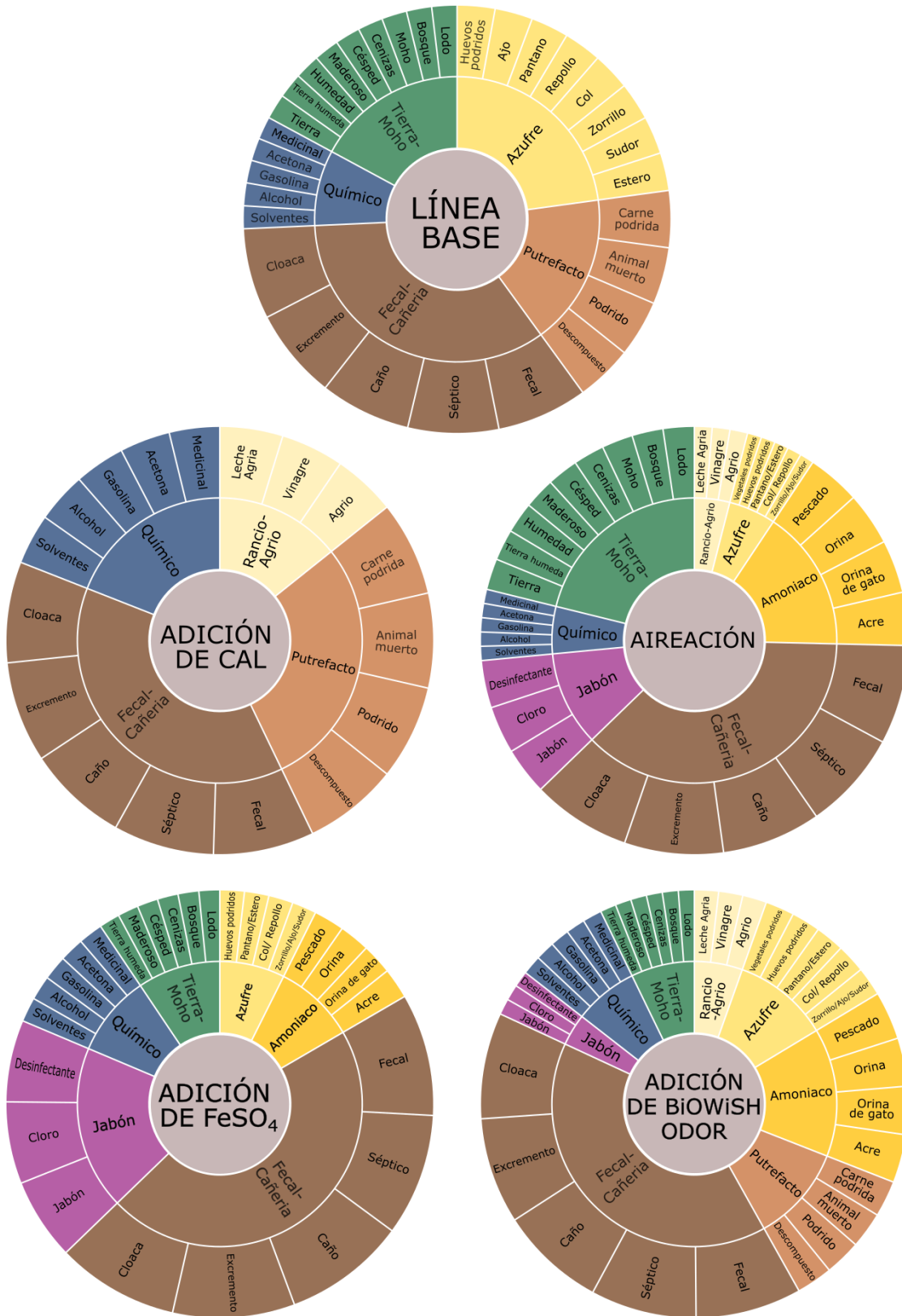


Figura 4.9. Ruedas de olor específicas a cada periodo del estudio de medidas de mitigación de olor.

5. DISCUSIÓN

5.1 SELECCIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE OLORES

De acuerdo con la investigación y revisión bibliográfica realizada sobre las medidas de mitigación de olores en plantas de tratamiento, se seleccionaron cuatro tratamientos para aplicar a la unidad de homogeneización, entre ellas: aireación, adición del producto comercial BiOWiSH® Odor, adición de cal y adición de sulfato de hierro. Las primeras dos medidas tienen un funcionamiento teórico que disminuye las emisiones de múltiples odorantes responsables de los malos olores en las PTAR. Mientras que las últimas dos son específicas para la reducción de las emisiones de H₂S, uno de los odorantes más estudiados y problemáticos en las PTAR.

La selección de las cuatro medidas tomó en cuenta y se ajustó a los siguientes factores:

- Aplicación práctica y acorde a la operación cotidiana de la planta.
- Acceso a recursos necesarios para la aplicación.
- Acceso a instrumentos para monitorear directa o indirectamente los cambios generados en la unidad.
- Respaldo teórico de su método de acción.
- Aprobación del Grupo PROAMSA y operadores de la planta en estudio.
- Potencial minimización de la afectación en las unidades posteriores al tanque de homogeneización y calidad del efluente de la PTAR.

5.2 CAUDAL, TRH Y COMPORTAMIENTO DEL AGUA DE ENTRADA

El comportamiento real del caudal de entrada a la PTAR y el TRH de la unidad durante el estudio (ver Cuadro 4.1) coincidió con el esperado según el comportamiento mensual histórico de la PTAR (ver Figura 3.4). Además, los TRH de los periodos de aplicación de medidas de mitigación son similares a los de línea base, a excepción de la aplicación de BiOWiSH® odor donde hay un aumento en el caudal de entrada por lo tanto una disminución del TRH. Esto pudo afectar de forma positiva los resultados de la aplicación las medidas, debido a que TRHs más largos tienen mayor potencial de generar olores desagradables (Lozada y Giraldo, 2019).

Respecto al agua de entrada, los olores que desprende una PTAR varían en función del agua residual cruda que entra en la planta y del funcionamiento de los procesos de tratamiento (Suffet et al, 2007). Con el fin de normalizar el efecto de las medidas de mitigación, los parámetros fisicoquímicos de todos los periodos se monitorearon en paralelo en el tanque de compensación y en el agua de entrada. Esta sección se presenta el análisis de las variaciones encontradas en los promedios del agua de entrada de cada medida aplicada.

Temperatura: Las diferencias de temperatura en el agua residual se atribuyen a causas como el uso del agua, variaciones de la temperatura del alcantarillado y variaciones climáticas (García y Pérez, 1985). Dichas variaciones son compensadas en el tanque de homogeneización, tal como se puede observar al comparar las temperaturas de entrada en el Cuadro 4.2 con las temperaturas reportadas dentro del tanque de homogeneización (Cuadro 4.5).

Se conoce que la temperatura disminuye la solubilidad de los gases, aumentando la tasa de emisión según la temperatura de evaporación de las sustancias (Lozada y Giraldo, 2019). Tagliaferri y Invernizzi, (2023) determinaron que la temperatura y la velocidad del viento tienen efecto sobre la tasa de emisión de compuestos orgánicos volátiles en un tanque de homogeneización; siendo más importante el efecto de la temperatura que la velocidad del viento. Su explicación es que la constante de Henry es una función de la temperatura y por lo tanto las tasas de emisión son funciones de la temperatura. Sin embargo, dicho estudio, fue específico para compuestos orgánicos volátiles en una PTAR y evaluó rangos de temperaturas mucho más amplios, entre 20°C y 35°C. Por lo que, en el presente estudio podría indicarse que a pesar de las diferencias significativas entre las variaciones de temperatura (iguales o menores a 1° C), no generan cambios reveladores en las tasas de emisión de odorantes de la PTAR.

pH: Durante la realización del estudio de medidas de mitigación de olores el pH tuvo un promedio general de 7,4 con desviación estándar de 0,6. En los periodos de adición de sulfato de hierro y adición de BiOWiSH® odor el pH fue cercano a neutro mientras que en línea base, aireación y adición de cal se presentaron valores ligeramente alcalinos. Se encuentra diferencia significativa entre línea base y la medida de adición de cal, la influencia de esta variación se discutirá más adelante.

OD: La diferencia de OD se atribuye al uso del agua y las condiciones de alcantarillado. Menores condiciones de oxigenación en el alcantarillado se vinculan con la producción de odorantes (Hvitved et al., 2000) y presencia de bacterias reductoras del sulfato (Hao et al., 2009). Durante línea base se reportó el promedio de OD más bajo de todos los periodos estudiados, sin embargo, durante todos los periodos se reporta un OD mayor a 1 mg/L, lo que deja saber que en general no hay un agotamiento de oxígeno ($< 0,1$ mg/L) en las tuberías (Gudjonsson et al., 2002).

ORP: El ORP promedio de entrada general es -48 mV. Este ORP está en el límite superior del ORP esperado para el agua de entrada de una PTAR (-50 mV a -150 mV) (Hvitved et al., 2000) y se califica como agua residual “fresca”. Esto coincide con la presencia de oxígeno. No se presentan condiciones anóxicas o anaerobias en el alcantarillado que propicien la generación de odorantes; el agua tiene un carácter reductivo esperado en el agua de entrada de una PTAR sin ser considerada séptica (Figura 2.4). Bajo estas características, no se recomienda priorizar la aplicación de medidas de mitigación de olores al alcantarillado de la planta en estudio.

Sólidos sedimentables: El promedio de sólidos sedimentables presente en el agua de entrada ($8-16$ mL/L) corresponde a un agua residual doméstica de media concentración (Metcalf y Eddie, 2003). Attal et al. (1992) demostraron que las tasas de reducción de sulfato, relacionadas con la producción biológica de H_2S , aumentan proporcionalmente con el aumento de la concentración de sólidos. En este caso no existe evidencia estadística de que las tasas de reducción de sulfato de los periodos en estudio sean afectadas por variaciones en los sólidos sedimentables del agua residual de entrada.

Otros parámetros: Una de las inquietudes durante el diseño del experimento de aplicación de las múltiples medidas de mitigación de olores fueron las variaciones en el agua de entrada en los diferentes periodos de aplicación. Sin embargo, las mediciones se mantienen dentro del rango de caracterización promedio de las aguas residuales (Metcalf y Eddie, 2003) permitiendo la comparación entre periodos. Cabe recalcar que variaciones en otras variables (DQO, DBO, concentraciones de odorantes específicos y condiciones atmosféricas), con posible impacto en los resultados están fuera del alcance del estudio.

5.3 APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE OLORES

5.3.1 Línea Base

Los cambios generados por las medidas de mitigación aplicadas son contrastados con los resultados de línea base, en el cual se presenta las condiciones del tanque de homogeneización sin intervención, ósea antes de la aplicación de alguna de las medidas de mitigación.

pH: Se presentó un valor promedio de pH dentro la unidad levemente ácida (6,6, Cuadro 4.5), no atribuible al agua de entrada (7,4, Cuadro 4.2), sino a una posible fermentación ácida, reacción biológica que de acuerdo con Higgins (2013) sucede el rango de ORP de -100 mV a -225 mV, lo que coincide con el valor reportado en el tanque de homogeneización (-130mV). La fermentación ácida se refiere a un grupo de reacciones biológicas que producen ácidos grasos volátiles, que consumen la alcalinidad del agua y una vez consumida el pH empieza a bajar (López et al., 2017), tal como sucedió en el tanque de homogeneización en el periodo de línea base.

OD y ORP: En los resultados de línea base la concentración de oxígeno disuelto no es detectable, lo que refleja agotamiento del oxígeno en la unidad de homogeneización y un régimen anaerobio. Además, el ORP del periodo es de -130 mV, lo cual según los rangos de ORP de las reacciones biológicas en agua residual, se ajusta a la reducción de sulfato, formación de H₂S y liberación de ácidos causados por la fermentación anteriormente señalada en la Figura 2.4 (Higgins, 2013).

Concentración de sulfuro: En el periodo de línea base se reportó un promedio de 8,34 mg/L sulfuros totales disueltos. En el agua residual de entrada se encuentra un rango de sulfuros menor (0,2-1,0 mg/L), indicando que en la unidad de tanque de homogeneización se están presentando reacciones que aumentan la concentración de sulfuros. Como se mencionó anteriormente el ORP de la unidad coincide con los rangos de reducción de sulfato, en el cual las bacterias reductoras de sulfato liberan sulfuros (H₂S, HS⁻ y S²⁻) (Hao et al., 2009).

5.3.2 Aireación

Durante la aplicación de aireación al tanque de homogeneización se cambiaron las condiciones fisicoquímicas de la unidad y se presentaron otros cambios relevantes a la generación de olores desagradables que se detallan a continuación.

pH: El promedio de pH de la unidad de homogeneización (7,45, Cuadro 4.5) coincide con el valor promedio de pH de entrada del periodo (7,60, Cuadro 4.2). La aireación evitó la fermentación ácida que si se presentó durante el periodo de línea base.

OD y ORP: Durante la aplicación de la aireación se lograron niveles de OD promedio de 3,4 mg/L y mínimo de 1,0 mg/L. Hao et al. (2009), recomienda un mínimo de 1,0 mg/L de OD para el control de olores en agua cruda. En el presente estudio debido a las características del sistema de aireación de la PTAR se trabajó con nivel de oxigenación mayor. Esta oxigenación elevó el ORP a valores positivos con un promedio de 158 mV, valor que está de acuerdo con Rimkus et al (1985) quien sugiere mantener un régimen oxidativo con un ORP de +100mV en el agua de entrada para evitar la emisión de olores.

Durante la aireación se mantuvo ese régimen oxidativo y aerobio, en el cual de acuerdo con las reacciones biológicas en agua residual no permitieron las condiciones necesarias para la reducción del sulfato, formación de H₂S y fermentación ácida (Higgins, 2013); reacciones biológicas relacionadas con la formación de odorantes (Hvitved et al., 2000). Por lo que la aplicación de aireación logró evitar las condiciones reductoras, anaerobias y levemente ácidas que se presentaron en el funcionamiento del tanque de homogeneización sin intervención.

Concentración de sulfuro: Las condiciones oxidantes y aerobias inhiben a las bacterias reductoras de sulfato y fomentan la oxidación química de los sulfuros en el agua (Vollestsén, 2015). A pesar de que en este estudio no se enumeraron agentes biológicos, se puede interpretar que dicha inhibición de bacterias ocurrió basado en los resultados en la concentración de sulfuro disuelto total en la unidad, la cual comparada con la línea base (8,38 mg/L) fue significativamente reducida a < 0,2 mg/L implicando una reducción en la concentración de sulfuros mayor a 97,5%. Estos resultados y las condiciones fisicoquímicas

de la unidad concuerdan con la inhibición de la reducción de sulfatos y la oxidación química del sulfuro a sulfitos y sulfatos.

Tipo de fuente de emisión: Al activar el sistema de aireación en el tanque de homogeneización esta unidad pasó de ser una fuente de emisión pasiva a una activa (Jiang, 2017). El flujo de aire agregado generó mayor intercambio entre el líquido de la unidad y la fase gaseosa, generando una mayor tasa de emisión de olores (Lozada y Giraldo, 2019). Sin embargo, también se debe tomar en cuenta la Ley de Henry. Esta indica que la velocidad de transferencia de los gases entre el medio líquido y el medio gaseoso es proporcional a la diferencia de concentraciones entre cada medio. La tasa de emisión si se ve influenciado por el aumento de agitación de la interfase, sin embargo, es más afectada por la concentración de odorantes en el líquido.

En este periodo se generó un cambio en las concentraciones de sulfuros y se asume que en las concentraciones de otros odorantes también. Según los resultados de la encuesta de percepción de olores detallados más adelante, se asume que el impacto de la mitigación de formación de odorantes sobrepone el cambio de tipo de fuente de emisión; con una disminución en la tasa de emisión de odorantes.

5.3.3 Adición de cal

Durante la aplicación de cal en el tanque de homogeneización la unidad tiene la capacidad de compensación, y la de neutralización de acidez. La práctica de ajustar el pH del agua residual dentro de los tanques de compensación, es conocida como neutralización del influente en la planta añadiendo automáticamente una sustancia alcalina, según los valores de pH de la unidad. En algunos casos, el pH del agua de entrada es elevada más del punto neutro para brindar alcalinidad al agua o facilitar los procesos siguientes (Ramesh et al, 2005).

pH: En este estudio, el objetivo de modificar el pH del agua de entrada fue desplazar el equilibrio de las especies de sulfuro en el agua hacia HS^- . Desplazar el equilibrio hacia HS^- ayuda a reducir las emisiones de H_2S , ya que, únicamente el H_2S puede transferirse de la fase líquida a la gaseosa y por lo tanto ser percibido por el sistema olfativo humano (Talaiekhosani, 2016). Según el gráfico de dispersión de especies de sulfuro en función del

pH (ver Figura 2.3), en un pH neutro cerca del 45% del sulfuro se encontraría como HS^- , mientras que al aumentar el pH a 8 este porcentaje va a aumentar a un 90%, reduciendo las emisiones de H_2S (Oliveira et al, 2017).

A continuación, se presentan los valores de concentración de H_2S según la concentración de sulfuros en la unidad, pH de la unidad y la distribución de especies de sulfuro según pH (Figura 2.3). Se detallan esta concentración de H_2S para el periodo de aplicación de cal y periodo de línea base, buscando con la comparación un porcentaje de disminución.

Durante el periodo de aplicación de cal se reportó una concentración de sulfuro en el tanque de homogeneización de 0,93 mg/L y un pH de 7,7. A este pH, se espera que un 15% de la concentración total de sulfuros se presente como H_2S (Stevdel, 2020). Por lo tanto, en este periodo se espera una concentración de 0,14 mg/L de H_2S (15% de 0,93 mg/L).

Por otro lado, en la línea base, se tiene un promedio de concentración de sulfuros de 8,38 mg/L y pH de 6,6. En este pH un 75% de la concentración total de sulfuro se encuentra como H_2S , resultando en 6,2 mg/L de H_2S en la unidad (75% de 8,38mg/L).

Tomando las concentraciones de H_2S en ambos periodos, la remoción de H_2S en el periodo de adición de cal sería de hasta un 98%. Cabe denotar que el gráfico de dispersión de especies de sulfuro en función del pH fue generado bajo condiciones estándar (25°C y 1atm) por lo que los valores estimados difieren de la realidad, ya que, para ambas mediciones (línea base y adición de cal) se reportó una temperatura promedio de 23°C y la presión atmosférica no fue registrada.

Concentración de sulfuros: Los valores de concentración de sulfuro disueltos incluyen las especies H_2S , HS^- . En la sección anterior se detalla la disminución de H_2S a partir de estimaciones y a continuación se toman la concentración de sulfuros disueltos medida, que engloba ambas especies.

La concentración de sulfuros disueltos en el periodo de adición de cal (0,93 mg/L) disminuyeron en promedio un 89% al compararlos con la línea base (8,38 mg/L). Esta disminución en la concentración total no se atribuye al cambio de distribución de las especies de sulfuro anteriormente detallada, sino a la oxidación química del sulfuro. Vollertsen (2015)

señala que la adición de compuestos alcalinos aumenta la tasa de oxidación química del sulfuro. Esta oxidación a valores de OD por debajo de 0,1 mg/L tiene producto azufre elemental y a mayor disponibilidad de oxígeno se puede producir sulfato y tiosulfato (Ruiz y Moreno, 2009). En el periodo se reporta un nivel de OD no detectable, no obstante, existe la posibilidad de que sea cercano a 0,1 mg/L, debido a una baja sensibilidad del instrumento en concentraciones tan bajas. Por lo tanto, no se identifica con certeza la reacción de oxidación que está sucediendo en la unidad.

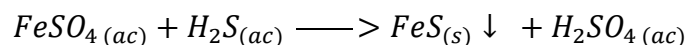
De acuerdo con los resultados encontrados en el periodo de adición de cal, se encuentran evidencias de dos mecanismos para la reducción de emisiones de H₂S en la unidad; modificación de las especies de sulfuro en el agua y oxidación química del sulfuro. Logrando una reducción del 89% en las concentraciones de sulfuro disuelto total y hasta un 98% de reducción de las emisiones de H₂S.

Dosis: En este estudio, durante la aplicación de cal se utilizaron en total 4070 g CaO para el periodo de 4 TRH, equivalentes a 5,5 días laborales. Esto para un pH de entrada inusualmente alto medido durante el periodo de estudio. Por lo tanto, la cantidad de cal utilizada solo refleja la cantidad necesaria para este periodo y debe ser recalculada según las características del agua de entrada, esperando un aumento de su consumo cuando se tenga un pH de entrada neutro o levemente ácido.

5.3.4 Adición de sulfato de hierro

La adición de sulfato de hierro, permite la adición de Fe²⁺ al agua, reaccionando con el sulfuro en forma de H₂S y HS⁻, separándose en forma de precipitación. Esta reacción evita la emisión de H₂S a la atmósfera. Las sales de hierro tienen un costo económico bajo y una alta eficiencia de remoción de sulfuro. Se puede utilizar Fe²⁺ y Fe³⁺, pues, no existe un acuerdo específico entre los investigadores en cuanto a la superioridad del hierro férrico sobre el ferroso o viceversa (Talaiekhosani, 2016).

La reacción específica al usar sulfato de hierro para el control de sulfuro de hidrógeno es la siguiente:



La formación de sulfuro de hierro es un proceso rápido, demostrado por la formación inmediata de un precipitado negro. El precipitado, en las condiciones del tanque de homogeneización sedimentan y se almacenan en el fondo del tanque. La precipitación de estos sólidos no aumenta la toxicidad, ni genera subproductos peligrosos (Zhang, 2006).

pH: La reacción de formación de FeS tiene mayor efectividad a pH neutros que en pH ligeramente ácidos (Firer et al, 2008). Durante el periodo de aplicación del sulfato de hierro el pH de la unidad se mantuvo cercano a neutro (6,83), por lo que se la reacción de formación de FeS tiene una alta efectividad en la unidad.

Concentración de sulfuro: En la aplicación de sulfato de hierro del presente estudio, se lograron concentraciones de 2 mg/L y 1 mg/L de sulfuro total, las cuales al utilizar la distribución de especies de sulfuro (Figura 2.3, 45% de H₂S a pH 7) se interpretan concentraciones residuales de 0,9 mg H₂S/L y 0,5 mg H₂S/L.

Resultados que concuerdan con el estudio de dosificación de Oviedo et al. (2011), donde determinan como límite de remoción de H₂S en 0,5 mg/L y para concentraciones iniciales de 25 mgH₂S/L una tasa de remoción máxima de 94%. Cabe recalcar que estas concentraciones residuales no se logran eliminar incluso con dosis muy altas de sulfato de hierro.

Además, se obtuvo un promedio de 1.75 mg/L de sulfuro representando una reducción de sulfuros promedio de 79%, en comparación con línea base.

Dosis: De acuerdo con la estequiometría de la reacción de formación de sulfuro de hierro se requieren 4,5 gramos de sulfato de hierro para precipitar un gramo de sulfuro de hidrógeno. Sin embargo, en práctica esto es una referencia y no un estándar. Las dosificaciones reales pueden variar debido a características específicas de los sitios de aplicación, como pH y concentraciones de fósforo en el agua (Oviedo et al., 2011). Esto debido a que la formación de FeS es solo una de las posibles interacciones entre el fósforo, azufre y hierro en PTARs; Hauduc et al, (2019), señala otras interacciones como la formación de Vivianita (mineral de fosfato de hierro) y óxidos férricos solubles.

Las dosis utilizadas en este estudio durante la aplicación de sulfato de hierro, consideran la concentración de sulfuro total y experiencias previas de aplicación en aguas

domésticas de Costa Rica por parte de trabajadores del Grupo PROAMSA, quienes operan la PTAR en estudio. Dosis que de acuerdo con los resultados de remoción de sulfuro fueron acertadas, ya que, lograron acercarse a una remoción máxima de H₂S. Sin embargo, no se llegó a la concentración residual mínima en todos los TRH, por lo que se podría aumentar la dosis de sulfato de hierro. No obstante, para optimizar la dosis se recomienda realizar un estudio de mayor duración al generado en el presente. Estudio que considere las variaciones en las concentraciones de azufre y fósforo en el agua residual de entrada; además de considerar la relación costo/beneficio.

5.3.5 Adición de BiOWiSH® odor

Se seleccionó este producto BiOWiSH odor® como medida de mitigación de olores aplicable al tanque de homogeneización debido a su reportado éxito en la disminución de odorantes y olor en agua residual de alcantarillado en Beijing, China (BiOWiSH® technologies, 2006). Además de su uso periódico en PTARs operadas por el Grupo PROAMSA.

TRH: En este periodo la PTAR recibió un caudal mayor al reportado en los otros periodos del estudio; por lo tanto, el TRH del tanque de homogeneización fue menor (7,08 h). Esto pudo afectar de forma positiva los resultados de la aplicación de las medidas, debido a que TRHs más largos tienen mayor potencial de generar olores desagradables debido a que pueden generar condiciones anaeróbicas y ácidas (Lozada y Giraldo, 2019). Es decir, una proporción de la mejora presentada en este periodo se puede vincular al cambio de TRH.

pH: En este periodo se presentaron pH ligeramente ácidos, promedio de 6,64, no causados por el pH del agua de entrada (7,08). Combinados con un promedio de ORP de -132,39 mV, señalan la presencia de fermentación ácida en la unidad (Higgins, 2013). La adición del BiOWiSH® odor no evitó la fermentación ácida en la unidad de homogeneización, teniendo un comportamiento muy similar al medido en la línea base donde se generó fermentación ácida.

Concentración de sulfuros: Durante la aplicación del producto BiOWiSH® odor en el tanque de compensación se reportó una concentración de los sulfuros a 3,5mg/L para una reducción de 56%, ligada directamente con la reducción de H₂S. En un caso de estudio del

producto BiOWiSH® odor en agua residual doméstica de alcantarillado se reportó una disminución de las emisiones de H₂S, NH₃ y olor después de 40 minutos de aplicación (BiOWiSH® technologies, 2006). Sin embargo, los resultados no pueden ser contrastados directamente, ya que, fueron tomadas en fases diferentes. El presente estudio midió concentración de sulfuros en el agua residual mientras que el realizado por BiOWiSH® monitoreo el H₂S en el aire circundante al alcantarillado.

Se presume que la concentración de sulfuros es menor a la reportada en línea base debido a la adición de microorganismos, micronutrientes y activadores de procesos metabólicos encontrados en el producto comercial; sin embargo, se desconoce los grupos bacterianos específicos utilizados en el cultivo. Es recomendable realizar pruebas adicionales con el fin de profundizar en su mecanismo de remoción y efectividad en la reducción de olores en tanques de homogeneización.

Dosis: Durante la experimentación se utilizó la dosis recomendada por la casa comercial correspondiente. Esto debido a que las medidas de mitigación de olores para tratamiento primario suele ser similares a las aplicadas en alcantarillados con altos niveles de H₂S (Jiang, 2017). La dosis indicada es de 10 mg/L agua residual de alcantarillado, un tiempo de activación de 30 min y tiempo de espera de 40 min.

A pesar de que el agua residual acumulada en el tanque de homogeneización no ha sido tratada y comparte características con el agua cruda del alcantarillado, la dosis aplicada pudo no ser la acertada para las condiciones del tanque. Por lo tanto, es recomendable adaptar la dosis y el tiempo de activación del producto específicamente la mitigación de olores en tanques de homogeneización.

5.4 DINÁMICA DEL ORP, PH Y CONCENTRACIÓN DE SULFUROS

5.4.1 Distribución de ORP y pH

Los resultados de ORP y pH de los periodos de aplicación de medidas de mitigación de olores también fueron contrastados con el diagrama de Pourbaix (Figura 2.5) de las especies de sulfuro en sistemas hídricos. Los resultados pueden observarse en las Figuras 5.2 y 5.3. Debe recordarse que estos diagramas son elaborados en condiciones de equilibrio, mientras que los sistemas de agua naturales están alejados de estas condiciones. No obstante,

es una herramienta útil para predecir la distribución de especies de sulfuro en el sistema (Oliveira et al., 2017).

Para todas las medidas aplicadas, se evaluó si los cambios realizados desplazaron las condiciones de la unidad lejos de la zona del diagrama gobernada por el H_2S . El H_2S es la única especie del diagrama que puede ser transferida a la fase gaseosa y causar emisiones de olores ofensivos (Talaiekhosani, 2016).

De acuerdo con la distribución de las condiciones de pH y ORP en el gráfico, los periodos con mayor densidad de puntos en la zona gobernada por el H_2S son línea base y adición de BiOWiSH® odor. Estos periodos son los que tienen mayor potencial de emisión de H_2S . En especial el periodo de BiOWiSH® odor que tiene menor variación de ORP y pH, y tiene mayor densidad de puntos en la zona H_2S del gráfico.

Las medidas de adición de cal y adición de sulfato de hierro, debido a cambios en pH y ORP se alejan de la especie H_2S . Ambos periodos tienen escasos puntos en la zona gobernada por el H_2S . La medida de adición de cal se desplaza hacia sulfato (SO_4^{2-}) y HS^- mientras el periodo de adición de sulfato de hierro se desplaza hacia azufre elemental y sulfato. Además, en la el grafico que incluye la interacción hierro-sulfuro (Figura 4.3) se aprecia que las condiciones de la unidad coinciden con el compuesto FeS , producto del mecanismo de acción de la medida de mitigación de olores. Estos periodos tienen un potencial de emisión de H_2S menor al de línea base y adición de BiOWiSH® odor.

Finalmente, el periodo de aireación es el que tiene condiciones de pH y ORP más alejadas a la zona gobernada por H_2S . La totalidad de los puntos se encuentran en la zona de la especie sulfato. Aireación es el periodo con condiciones más favorables, con menor potencial de producir emisiones de H_2S . En orden creciente de potencial de emisión de H_2S se encuentran aireación, adición de cal y adición de sulfato de hierro, línea base y adición de BiOWiSH® odor.

5.4.2 Concentración de sulfuros

En todos los periodos de aplicación de medidas de mitigación de olores se reportó una disminución en la concentración de sulfuros disueltos totales. Como se presenta en la Figura 4.1 el orden decreciente la concentración de sulfuro es: aireación, adición de cal,

adición de sulfato de hierro y finalmente adición de BiOWiSH®. En el caso de la medida de aireación se presentó una remoción y prevención de sulfuros disueltos. Se presenta remoción, ya que, el agua de entrada de la PTAR reportó un promedio de 0,55 mg/L, mientras que la unidad en el periodo de aireación presenta concentraciones menores (< 0,2 mg/L). Las medidas de adición de cal, sulfato de hierro y BiOWiSH® odor, disminuyeron la concentración de sulfuro en función a la línea base (8,38 mg/L).

A partir de los resultados y funcionamiento teóricos de las medidas se asume que, en el caso de aireación se da una inhibición de la actividad de las bacterias reductoras de sulfato y oxidación química del sulfuro; la adición de cal causó una oxidación química del sulfuro en el agua. En la adición de sulfato de hierro, el sulfuro precipitó en forma de FeS y finalmente en el periodo de adición de BiOWiSH® odor el cambio fue causado por los microorganismos añadidos en el producto comercial.

5.5 PERCEPCIÓN DE OLOR

5.5.1 Intensidad y Ofensividad

Ambos criterios evaluados en la encuesta, intensidad y ofensividad son subjetivos, ya que se ven influenciadas por el grado de detección y percepción de los diferentes odorantes para cada individuo. Y en el caso de la ofensividad se suele relacionar el olor percibido a sentimientos y experiencias previas, para poder calificarlo como “neutro” o “muy desagradable”. La caracterización subjetiva convencional, es decir, la unidad de olor, sigue evolucionando y siendo útil, ya que la percepción humana del olor es un criterio esencial de la eficacia de una medida de mitigación de olores en aguas residuales (Jiang, 2017).

La comparación de la línea base con respecto al resto de las medidas aplicadas mostró diferencias significativas únicamente con respecto a la medida de aireación, donde los valores en las variables intensidad y ofensividad son menores al resto de los periodos estudiados en la encuesta. Se debe tener presente que la medida de aireación fue la medida que logró mayor diferencia en todos los parámetros fisicoquímicos monitoreados y discutidos anteriormente. Concordando así con los resultados de la encuesta, donde el criterio de ofensividad tiene respuestas únicamente en las categorías más bajas: “neutral” y “sin olor”.

Las medidas de mitigación de adición de cal, adición de sulfato de hierro y adición de BiOWiSH® odor no generaron un cambio significativo en las variables intensidad y ofensividad del olor. Estas medidas si generaron una disminución de sulfuro total; y por lo tanto una reducción en las emisiones de H₂S. Sin embargo, los cambios en la percepción de la intensidad y ofensividad del olor no fueron significativamente detectables para las personas evaluadas.

Las medidas de adición de cal y adición de sulfato de hierro, recordando que son medidas específicas para la reducción de las emisiones de H₂S y que si redujeron la concentración de sulfuro totales; fueron inefectivas para reducir el olor. Esto puede ser debido a que las emisiones de H₂S tienen un papel auxiliar en el grupo de odorantes emitidos por la unidad. Es decir que la disminución de la concentración de olor del H₂S (relación entre la concentración química de un odorante y su umbral de detección) no es suficientemente significativa para generar un cambio en la concentración de olor total.

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman una de las limitaciones presentes en el avance de las medidas de mitigación de olores en las PTAR. Suffet et al. (2007), indica que el sulfuro de hidrógeno (H₂S) es cuestionable como el principal odorante e incluso como único indicador del olor en las plantas de tratamiento de aguas residuales. La mitigación de H₂S es un tema ampliamente recopilado y central en la problemática de olores, sin embargo, su control no asegura la disminución de la intensidad y ofensividad de los olores.

La medida de mitigación de olores con mejor resultados en la PTAR bajo estudio fue la aireación. Se recomienda continuar con esta medida a largo plazo utilizando un nivel de OD >1 mg/L y ORP >100 mV. Sin embargo, no se garantiza que esta medida por sí sola cumpla con el objetivo de gestión de olor de la PTAR en todas las épocas del año. Por lo tanto se sugiere definir el objetivo de la gestión de olores en la PTAR con indicadores medibles, como el número de quejas mensuales, y monitorear de la situación de olores en los diferentes periodos del año para determinar si se necesitan más medidas de mitigación.

Por otro lado, se recomienda evaluar la aplicación simultánea de dos o varias medidas de mitigación de olores en tanques de compensación; como por ejemplo aireación y adición de sulfato de hierro. Tomando en cuenta que la interacción entre las medidas puede cambiar

sus mecanismos de acción; para este ejemplo la formación FeS se realiza con una estequiometría diferente a la presentada en este estudio debido a la presencia de oxígeno (Ruiz y Moreno, 2009). Además, en el caso de aplicar medidas específicas al control de H₂S se recomienda cuantificar este compuesto en el aire antes y durante la aplicación, con detectores portátiles, analizadores fijos o muestreo y posterior análisis en laboratorio (Kim, 2014).

5.5.2 Grupos encuestados

Se encontró una diferencia significativa entre los valores de las variables intensidad y ofensividad reportados entre los estudiantes y los trabajadores encuestados bajo las mismas condiciones. Los trabajadores reportaron una baja intensidad y ofensividad del olor, mientras que los estudiantes encontraron los olores mucho más intensos y ofensivos. Esto pudo darse debido a las características y contexto de los encuestados, que influyen la percepción del olor (Van Harreveld, 2001). Para los estudiantes, en la mayoría de los casos era la primera vez que realizaban una visita a una PTAR, mientras que algunos trabajadores encuestados visitan una o múltiples PTAR en su jornada laboral.

Estudios han demostrado que el tono hedónico del olor está relacionado positivamente con la familiaridad del olor (Seo et al, 2008). Es decir, entre más familiarizado se está del olor menor ofensividad es reportada. Datos de un estudio de cacostmia (alteración del sentido olfativo) muestran que la intolerancia a los olores es frecuente en trabajadores jóvenes, sanos y no capacitados expuestos a olores desagradables en el trabajo (Magnavita, 2001). Además, Gamonal y Sota (2021) aluden al fenómeno de fatiga odorífica, en la cual los pobladores expuestos repetitivamente a un mismo olor disminuyen su sensibilidad ante el mismo. Todos estos factores: familiaridad, edad, capacitación y sensibilidad pueden verse involucrados en las diferencias en ofensividad e intensidad de los estudiantes y trabajadores.

A pesar de esta diferencia en percepción de olores, ambas poblaciones son parte de la población de estudio y son posibles afectados por la población de olores. Una encuesta de percepción de olor integral, así como un plan de gestión de olores integral deben de considerar ambas perspectivas y no se recomienda priorizar una perspectiva sobre otra.

5.5.3 Carácter

La generación de ruedas de olor para la aplicación en estudios de olores permite una comunicación eficaz, ya que, utiliza un lenguaje común y fijo para la descripción de los olores. Los descriptores de olor son etiquetas verbales que asocian un olor a un objeto y facilitan la identificación del olor para los receptores (Morrot et al., 2001). A su vez las etiquetas verbales pueden influenciar la percepción del olor. Se ha demostrado que el contexto visual y verbal pueden influenciar la percepción del olor, principalmente su tono hedónico (Herz y von Clef, 2001).

En la generación de la encuesta se tradujeron directamente los descriptores desde el idioma a inglés hacia el español. Al realizar esto directamente, no se atribuyó importancia a la frecuencia de uso y familiaridad de esos descriptores en la vida cotidiana de los potenciales encuestados, ignorando si existen mejores descriptores debido a la diferencia de contexto. Herz y von Clef, (2001) plantean que la susceptibilidad de los olores a ser influenciados por etiquetas verbales, varía de un olor a otro y se relaciona a la familiaridad. Por ejemplo; los encuestados en el presente estudio propusieron los descriptores “cloaca” y “estero” que posteriormente fueron agregados a la rueda de olor.

Los seres humanos poseen una excelente capacidad para detectar y diferenciar olores, pero suelen tener grandes dificultades para identificar odorantes específicos. Esta dificultad se hace insuperable a medida que aumenta la complejidad de la fuente de olor (Jinks y Laing, 1999). Los olores de aguas residuales pueden ser la combinación de múltiples odorantes, y dificultar e incluso imposibilitar la identificación de los odorantes principales mediante una rueda de olores. A pesar de que las ruedas de olores son herramientas útiles para una comunicación eficaz en la gestión de olores, no debe ser la única herramienta a disposición ya que poseen múltiples limitaciones.

En todas las ruedas de olores generadas en el estudio se encuentra el grupo “Fecal-Cañería”. Los compuestos escadol e indol, son frecuentemente asociados con un olor fecal; son percibidos y reconocidos a bajas concentraciones (Zhou et al., 2016). Sin embargo, no se tiene evidencia de que sean los responsables del carácter fecal de las emisiones del tanque de compensación. Las respuestas en la categoría fecal, puede deberse en parte, a las

influencias visuales y el contexto durante la realización de la encuesta. Todos los receptores conocían que la fuente de los olores es una PTAR, lugar donde se trata el agua residual.

En la rueda de olores del periodo de adición de cal, se espera que las respuestas del grupo “Amoniaco” aumentaran en comparación con la línea base y las de “Azufre” disminuirían. Esto debido a que, a valores bajos de pH, las emisiones son principalmente H₂S, ácidos grasos volátiles y mercaptanos, mientras que, a valores altos de pH de las aguas residuales, las emisiones son principalmente aminas y amoníaco (Mara & Horan, 2003). La disminución de respuestas del grupo “Azufre” si sucedió. Sin embargo, sucedió lo opuesto a el cambio esperado de las emisiones de amoniaco y amina por el cambio de pH. En el periodo de adición de cal no se reportan respuestas en el grupo “Amoniaco” que en línea base si se reportaron.

Como se mencionó en secciones anteriores los periodos de aplicación de medidas de mitigación de olores tienen una disminución de la concentración de sulfuros disueltos en comparación con la línea base, y esto se ve reflejado en las ruedas de olor. El grupo de “Azufre” en línea base corresponde a una mayor área de la rueda (25%) que en las medidas de mitigación de olores (0-15%). Sin embargo, no hay una relación lineal entre la concentración de sulfuros en el agua y la proporción de respuestas del grupo “Azufre”. Esto es en parte por la dificultad de identificación de olores específicos, variaciones en las percepciones olfativas de los participantes y que el H₂S no es el único odorante con la etiqueta de “Azufre”. Suffet et al. (2007), menciona que, aunque muchas veces el H₂S se utiliza como sustituto de todos los olores a azufre, su C_{DO} no es tan bajo como el de muchos otros compuestos de azufre en las aguas residuales.

6. CONCLUSIONES

Se seleccionaron cuatro medidas de mitigación de olores aplicables al tanque de homogeneización de la PTAR de UCR: aireación, adición de BiOWiSH® odor, adición de cal y adición de sulfato de hierro.

Las condiciones de pH, OD, ORP y temperatura del agua residual de entrada en los periodos del estudio no tienen variaciones que afecten la producción de olores, permitiendo comparar los resultados de cada medida aplicada con línea base.

En línea base se presentó un régimen anaerobio y reductivo, una alta concentración de sulfuros disueltos y un pH levemente ácido, atribuido a la reducción biológica de sulfato y fermentación ácida. Estas características de pH, ORP y concentración de sulfuros son las que se buscan evitar con las medidas de mitigación de olores.

La aireación de la unidad generó un régimen oxidativo y aerobio, una disminución de la concentración de sulfuros disueltos atribuido a la inhibición de las bacterias reductoras de sulfato y la oxidación química; con concentraciones de sulfuros en la unidad menores a los de agua de entrada.

En el periodo de adición de cal disminuyó la cantidad de sulfuros debido a la oxidación química del sulfuro. Además, se generó un desplazamiento del equilibrio hacia la especie HS^- debido al aumento de pH, reduciendo significativamente la emisión de H_2S .

La adición de sulfato de hierro en la unidad generó una disminución del sulfuro presente debido a la precipitación de FeS , y se lograron concentraciones residuales de sulfuro cercanas al límite teórico de remoción.

La adición de BiOWiSH® odor disminuyó la concentración de sulfuros, atribuido a los microorganismos adicionados y la unidad presentó fermentación ácida como en línea base.

De acuerdo con el equilibrio de especies de azufre según ORP, pH y la reducción de la concentración de sulfuros, la eficacia de las medidas se ordena de la siguiente manera: 1) Aireación 2) Adición de Cal 3) Adición de sulfato de hierro 4) Adición de BiOWiSH® odor.

Los resultados de las encuestas de percepción de olor muestran que únicamente la medida de mitigación de olores aireación generó una disminución en los valores de intensidad y ofensividad de olor de línea base; logrando probar su efectividad como medida de mitigación de olores.

La carencia de cambio en la percepción de olor en periodos de aplicación de las medidas de adición de cal y adición de sulfato de hierro, indican no ser efectivos para la mitigación de olor de la unidad en estudio. Además, sugiere que los odorantes problemáticos emitidos en la unidad no se limitan a H₂S.

La medida de mitigación de BiOWiSH[®] no tuvo la efectividad esperada en la reducción de intensidad y ofensividad del olor difiriendo así de los resultados esperados según la aplicación de BiOWiSH[®] en alcantarillado. Además, el desconocimiento de los grupos bacterianos propios del producto dificulta discutir su desempeño.

La diferencia de percepción de intensidad y ofensividad entre los estudiantes y trabajadores que respondieron la encuesta, puede adjudicarse a las diferencias de familiaridad, edad, capacitación y sensibilidad; sin embargo ambas perspectivas son valiosas para la gestión de olores.

7. RECOMENDACIONES

Evaluar la aplicación continua y a largo plazo de la medida de aireación en el tanque de compensación según los parámetros de OD (1 mg/L) y ORP (+100 mV).

Generar un plan de gestión de olores para la PTAR en estudio, definiendo una meta con indicadores medibles y determinar si la medida de mitigación de aireación sigue siendo efectiva a largo plazo. Recordando en el plan, que no se recomienda priorizar la aplicación de medidas de mitigación de olores al alcantarillado.

Realizar y ampliar el número de participantes en la encuesta de percepción de olores para aumentar la potencia de la prueba estadística y la confiabilidad de resultados una vez aplicadas las medidas a largo plazo, encuestando tanto a estudiantes como trabajadores. Así como recopilar nuevos descriptores de olores que sean útiles para la rueda de olores.

En el caso de aplicar medidas específicas al control de H₂S se recomienda cuantificar este compuesto tanto en fase gaseosa como líquida antes y durante la aplicación.

En este estudio se recomendó un rango de dosis de sulfato de hierro, pero para definir la dosis óptima y adecuada a otras PTARs se debe tomar en cuenta la concentración de azufre y fosfato en el agua residual de entrada.

Evaluar la combinación de aireación con otras medidas de mitigación en tanques de homogeneización, incluyendo medidas de mitigación de olor específicas a odorantes diferentes a H₂S, no mencionados en este estudio.

8. REFERENCIAS

- Attal, A; Brigodiot, M; Camacho, P. and Manem, J. (1992). Biological mechanisms of H₂S formation in sewer pipes. *Water Science and Technology*, 26 (1) 907-921. <https://doi.org/10.2166/wst,1992,0471>
- Bazemo, U; Gradner, E; Romero, A; Hauduc, H; Al-Omari, A; Takacs, I; Murthy, S; Torrents, A. y De Clippeleir, H. (2020). Investigating the dynamics of volatile sulfur compound emission from primary systems at a water resource recovery facility. *Water Environment Research*, 93 (2), 316-327. <https://doi.org/10.1002/wer,1417>
- BiOWiSH technologies. (2006). BiOWiSH® Odor Case Study- Rapidly Reducing Odor at Sewage Station in Se Jing Shan District, China. *BiOWiSH technologies*. <https://www.biowishtechnologies.com/resource/odor-emissions-sewage-station-china/>
- Brancher, M; Griffiths, K.D; Franco, D. y Lisboa, H. (2016). A review of odour impact criteria in selected countries around the world. *Chemosphere*, 168, 1531-1570. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere,2016,11,160>
- Morrot, G., Brochet, F., & Dubourdieu, D. (2001) . The colors of odors. *Brain and Language*, 79 (2), 309–320. <https://doi.org/10.1006/brln,2001,2493>
- Burlingame, G. A. (2009). A practical framework using odor survey data to prioritize nuisance odors. *Water Science and Technology*, 59 (3), 595–602. <https://doi:10.2166/wst,2009,872>
- Calvo, J.G. y Hernandez, P. (2016). *Mitigación de malos olores generados en plantas de tratamiento de aguas residuales: Estudio de caso El Roble de Puntarenas*. [Informe de proyecto de investigación]. Repositorio TEC
- Carrera-Chapela, F., Donoso-Bravo, A., Souto, J. A., & Ruiz-Filippi, G. (2014). Modeling the Odor Generation in WWTP: An Integrated Approach Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 255, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-1932-y>
- Chestnutt, T.E; Bach, M.T. y Mazyck, T.W. (2007). Improvement of thermal reactivated carbon for the removal of 2-methylisoborneol. *Water Research*, 41 (1), 79-86 <https://doi.org/10.1016/j.watres,2006,09,010>
- Diaz, G; González, E; Monteiro, T. y Solano, G. (2012). *Lineamiento Para La Vigilancia Sanitaria y Ambiental del Impacto de los Olores Ofensivos en la Salud y Calidad de Vida de las Comunidades Expuestas en Áreas Urbanas*. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/impactoolores-ofensivos-salud.pdf>
- Firer, D., Friedler, E. and Lahav, O. (2008). Control of sulfide in sewer systems by dosage of iron salts: Comparison between theoretical and experimental results, and practical implications, *Science of the Total Environment*, 392 (2) 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv,2007,11,008>
- Fisher, R. M; Barczak, R. J; Suffet, I.H; Hayes, J.E. y Stuetz, R.M. (2018). Framework for the use of odour wheels to manage odours throughout wastewater biosolids processing.

Science of the Total Environment, 634, 214-223.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.352>

- Gamonal, S. P. y Sota, L. (2021). *Revisión Sistemática: Compuestos Odorantes Emitidos en el Tratamiento de Aguas Residuales, y su Efecto en la Salud Comunitaria* [Tesis de bachillerato, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20,500,12692/64900>
- García, E. M. y López, J. (1985). *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Universidad de Granada.
- Generalitat Valenciana. (2017). *Guía para elaboración de los estudios de línea de base de los proyectos subvencionados por la generalitat*. <https://cooperaciovalenciana.gva.es/documents/164015995/164468323/Gu%C3%ADa+para+la+elaboraci%C3%B3n+de+los+estudios+de+L%C3%ADnea+de+Base+de+proyectos+subvencionados+por+la+Generalitat+2017/df11e7bb-049c-487f-8b09-57094c7bbf8b>
- Gostelow, P. y Parsons, S.A. (2000). Sewage treatment works odour measurement. *Science and Technology*, 41(6), 33–40. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0090>
- Gostelow, P., Parsons, S.A, y Stuetz, R.M. (2001). Odour measurements for sewage treatment works. *Water Research*, 35 (3), 579–597. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00313-4](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00313-4)
- Griffiths, K.D. (2014). Disentangling the frequency and intensity dimensions of nuisance odour and implications jurisdictional odour impact criteria. *Atmospheric Environment*, 90, 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.022>
- Jiang, G., Melder, D., Keller, J., & Yuan, Z. (2017). Odor emissions from domestic wastewater: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(17), 1581–1611. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1386952>
- Kim, H., Lee, H., Choi, E., Choi, I., Shin, T., Im, H. y Ahn, S. (2014). Characterization of odor emission from alternating aerobic and anoxic activated sludge systems using real-time total reduced sulfur analyzer. *Chemosphere*, 117(1), 394–401. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.08.008>
- Gutiérrez, Y. (2020). *Impacto de las sustancias odorantes de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) San Jerónimo en la calidad ambiental* [Tesis de doctorado, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio de la Universidad Andina del Cusco. <https://hdl.handle.net/20,500,12557/4366>
- Gudjonsson, G., Vollertsen, J., & Hvitved-Jacobsen, T. (2002). Dissolved oxygen in gravity sewers – measurement and simulation. *Water Science and Technology*, 45(3), 35–44. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0049>
- Hao, O.J; Chen, J.M; Huang, J y Buglass, R.L. (2009). Sulfate-Reducing bacteria. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 26 (2), 155-187. <http://dx.doi.org/10.1080/10643389609388489>

- Hauduc, H., Wadhawan, T., Johnson, B., Bott, C., Ward, M. y Takacs, I. (2019). Incorporating sulfur reactions and interactions with iron and phosphorus into a general plant-wide model. *Water Science and Technology*, 79 (1) 26-37. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.482>
- Hawko, C., Verrielle, M., Hucher, N., Crunaire, S., Leger, C., Locoge, N., & Savary, G. (2021). A review of environmental odor quantification and qualification methods: The question of objectivity in sensory analysis. *Science of The Total Environment*, 795 (1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148862>
- Hayes, J.E; Fisher, R.M; Stevenson, R.J; Mannebeck, C. y Stuetz, R.M. (2017). Unrepresented community odour impact: Improving engagement strategies. *Science of the Total Environment*, 609, 1650-1658. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.013>
- Herz, R S. y von Clef, J. (2001). The influence of verbal labeling on the perception of odors: Evidence for olfactory illusions? *Perception*, 30 (1) 381-391. <https://doi.org/10.1068/p3179>
- Higgins, F. (2013). ORP management in wastewater as indicator of process efficiency. *YSI blog*. <https://www.ysi.com/ysi-blog/water-blogged-blog/2013/08/orp-management-in-wastewater-as-an-indicator-of-process-efficiency>
- Hvitved, T; Vollertsen, J. y Tanaka, N. (2000). An integrated aerobic/anaerobic approach for prediction of sulphide formation in sewer. *Water Science & Technology*, 6, 107-115. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0099>
- Jinks, A., & Laing, D. G. (1999). A limit in the processing of components in odour mixtures. *Perception*, 28 (1), 395-404. <https://doi.org/10.1068/p2898>
- Kang, J.H, Song, J; Yoo, S.S; Lee, B.J y Ji, H.W. (2020). Prediction of Odor Concentration Emitted from Wastewater Treatment Plant Using an Artificial Neural Network (ANN). *Atmosphere*, 11 (8), 785-794. <https://doi.org/10.3390/atmos11080784>
- Lebrero, R; Bouchy, L; Stuetz, R. y Muñoz, R. (2011). Odor Assessment and Management in Wastewater Treatment Plants: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(10), 915-950. <http://dx.doi.org/10.1080/10643380903300000>
- Lewkowska, P; Cieřlik, B; Dymerski, T; Konieczka, P. y Namieřnik, J. (2016). Characteristics of odors emitted from municipal wastewater treatment plant and methods for their identification and deodorization techniques. *Environmental Research*, 151, 573-586. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.08.030>
- Ley Orgánica del Ambiente. Emitida por la Asamblea Legislativa. Publicada en la Gaceta n°215, Alcance 239, 13/11/1995.
- Li, J; Zou, K; Li, W; Wang, G. y Yang, W. (2019). Olfactory characterization of typical odorous pollutants part I: relationship between the hedonic tone and odor concentration. *Atmosphere*, 10 (9), 524-533. <https://doi.org/10.3390/atmos10090524>.
- López, C. M., Buitrón, G., García, H.A. y Cervantes F.J. *Tratamiento biológicos de aguas residuales: Principios, modelación y diseño*. IWA

- Lozada, D.L. y Giraldo, E.A. (2019). *Origen de los olores en plantas de tratamiento de agua residuales*. [Trabajo de grado, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. Repositorios Latinoamericanos.
- Magnavita, N. (2001). Cacosmia in healthy workers. *British Journal of Medical Psychology*, 74 (1), 121–127. <https://doi.org/10.1348/000711201160740>
- Mara, D. y Horan, N. (2003). *Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. Academic Press.
- MEIC (2020). Borrador del Reglamento para el Control de Olores Ofensivos. Publicado por el Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC), formulario 1174, 03/03/2020.
- Metcalf and Eddy. Inc (2003) *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. McGraw-Hill Ltd.
- Muñoz, R; Sivret, E. C; Parcsi, G; Lebrero, R; Wang, X; Suffet, I. H. y Stuetz, R. M. (2010). Monitoring techniques for odour abatement assessment. *Water Research*, 44, (18), 5129-5149. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.013>
- Norma Europea de determinación de la concentración de olor por olfatometría dinámica. EN13725, 2003.
- Oliveira, M. C., Lima, A. P., Figueredo, R. M., Acciari, H. A. y Codaro, E. N. (2017). Um estudo termodinâmico da corrosão dos aços carbono pelo sulfeto de hidrogênio - explorando conceitos de equilíbrio químico. *Química Nova*, 39 (9) 1-9. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042,20170186>
- Oviedo, E. R., Johnson, D. y Shipley, H. (2011). Evaluation of hydrogen sulphide concentration and control in a sewer system. *Environmental Technology*, 33 (10) 1207-1215. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330,2011,618932>
- Park, K; Lee, H; Phelan, S; Liyanaarachchi, S; Marleni, N; Navaratna, D. y Shu, L. (2014). Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 95 (A), 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.02.013>
- Ramesh, K.G; Flora, R.V y Chen J.P. (2005). Flow Equalization and neutralization. En Wang, L.K (Ed). *Physicochemical Treatment Processes: Volume 3* (21-45). Humana.
- Rimkus, R. R., Ziols, R. y Shaikh, A. (1985) Computer control of raw sewage chlorination for odor control. *Instrumentation and Control of Water and Wastewater Treatment and Transport Systems*, 1 (1) 297-302 <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-032591-0,50044-0>
- Ruiz, J; Moreno, J. (2009). Modelado e identificación del proceso de sulfuro oxidación en el tratamiento biológico de aguas residuales. *Congreso Anual 2009 de la Asociación de México de Control Automático*.
- Sáenz, L. (2015). *Modelación de dispersión de olores y odorantes mediante el modelo de penacho gaussiano. Estudio de caso en la planta de tratamiento de El Roble de Puntarenas, Costa Rica* [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio TEC. <https://hdl.handle.net/2238/6044>

- Sánchez, T. R. (2015). t-Student: Usos y abusos. *Revista mexicana de cardiología*, 26(1), 59-61.
- Seo, H., Buschhuter, D y Hummel, T. (2008). Contextual Influences on the Relationship between Familiarity and Hedonicity of Odors. *Journal of food science*, 73 (6) 273-278. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00818.x>
- Sironi, S; Capelli, L; Centola, P; Del Rosso, R. y Pierucci, S. (2010). Odour impact assessment by means of dynamic olfactometry, dispersion modelling and social participation. *Atmospheric Environment*, 44 (3), 354-360. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.10.029>
- Stevdel, R. (2020). The chemical sulfur cycle. En: Piet, N.L. (Ed.), *Environmental Technologies to Treat Sulfur Pollution: principles and engineering* (11-53). IWA.
- Suffet, I. H. y Rosenfeld, P. (2007). The anatomy of odour wheels for odours of drinking water, wastewater, compost, and the urban environment. *Water, Science and Technology*, 55 (1), 335-344. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2007.196>
- Suffet, I.H; Burlingame, P.E; Rosenfeld, P. (2004). The value of an odor-quality-wheel classification for wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*, 50 (4), 25-32 <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2007.196>
- Tagliaferri, F. y Invernizzi, M. (2023). Experimental evaluation on liquid area sources: Influence of wind velocity and temperature on the wind tunnel sampling of VOCs emissions from wastewater treatment plant. *Chemosphere*, 312 (2) 15-97. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137337>
- Talaiekhosani, A; Bagheri, M; Goli, A. y Khoozani, M.R. (2016). An overview of principles of odor production, emission, and control methods in wastewater collection and treatment systems. *Journal of Environmental Management*, 170, 186-206. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.021>
- The Wastewater Blog. (2022). ORP. *thewastewaterblog*. <https://www.thewastewaterblog.com/single-post/2016/12/18/orp>
- Valencia, J; Espinosa, A; Parra, A. y Peña, M. (2011). Percepción del riesgo por emisiones atmosféricas provenientes de la disposición final de residuos sólidos. *Revista de Salud Pública*, 13(6), 930–941. ISSN: 0124-0064
- Van Harreveld, A.P. (2001). From odorant formation to odour nuisance: new definitions for discussing a complex process. *Water Science and Technology*, 44 (9), 9–15. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0498>
- Vollertsen, J., Revilla, N., Hvitved-Jacobsen, T. y Haaning, A. N. (2015). Modeling Sulfides, pH and Hydrogen Sulfide Gas in the Sewers of San Francisco. *Water and Environment Research*, 87 (11) 1980-1989. <https://doi.org/10.2175/106143015X14362865226752>
- Vollertsen, J; Nielsen, A; Jensen, H.S, y Hvitved-Jacobsen, T. (2008). Modeling the formation and fate of odorous substances in collection systems. *Water Environmental Research*, 80(2), 118–126. <https://doi.org/10.2175/106143007X220671>

- Zarra, T; Naddeo, V; Belgiorno, V; Reiser, M. y Kranert, M. (2009). Instrumental characterization of odour: a combination of olfactory and analytical methods. *Water Science and Technology*, 59(8), 1603–1609. <https://doi.org/10.2166/wst,2009,125>
- Zhang, L; Schryver, P; Gusseme, B; Muynck, W., Boon, N. and Verstraete W. (2008). Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review. *Water Resources*, 42 (1) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.watres,2007,07,013>
- Zhang, X.L., Yana, S; Tyagi, R.D. y Surampalli, R.Y. (2013). Odor control in lagoons. *Journey of Environmental Management*, 124, 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman,2013,03,022>
- Zhou, Y., Hallis, A.S., Vitko, T. y Suffet, I.H. (2016). Identification, quantification, and treatment of fecal odors released into the air at two wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 180 (1) 257-263. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman,2016,05,046>

9. ANEXOS

ANEXO 1:

METODO DE DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SULFURO TOTAL EN AGUA

SULFIDE TEST KIT

Code 4456-01 | Octa-Slide 2, 0.2-20.0 ppm



QUANTITY	CONTENTS	CODE
30 mL	*Sulfide Reagent A	*4458-G
15 mL	*Sulfide Reagent B	*4459-E
60 mL	Sulfide Reagent C	4460-H
2	Test Tubes, 2.5-5-10mL, plastic, w/caps	0106
1	Pipet, 1.0 mL, plastic	0354
1	Sulfide Octa-Slide 2 Bar, 0.2-20.0 ppm	4457-01
1	Octa-Slide 2 Viewer	1101



*Reagent is a potential health hazard. **READ SDS:** lamotte.com
Emergency information:
Chem-Tel USA 1-800-255-3924
Int'l, call collect, 813-248-0585



To order individual reagents or test kit components, use the specified code number.

Warning! This set contains chemicals that may be harmful if misused. Read cautions on individual containers carefully.
Not to be used by children except under adult supervision.



USE OF THE OCTA-SLIDE 2 VIEWER

Note: Collect sample with a minimum of aeration and analyze promptly:









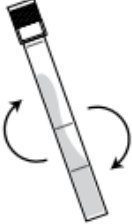


EPA ACCEPTED PROCEDURE

A known concentration of sulfide in the range of 0.2-20.0 ppm S= may be prepared as a check standard by referring to APHA Standard Methods 4500-S2-D, 17th Ed., 1989. Run this test on the check standard. If the test result is incorrect, discard the old reagents and order the reagent refill package.

Continued on next page...

PROCEDURE

Note: Collect sample with a minimum of aeration to analyze promptly:

<p>1. Place Sulfide Octa-Slide 2 Bar (4457-01) into the Octa-Slide 2 Viewer (1101).</p> 	<p>2. Fill a test tube (0106) to the 5 mL line with the sample water.</p> 	<p>3. Add 15 drops of *Sulfide Reagent A (4458).</p> 
<p>4. Cap and gently invert to mix.</p> 	<p>5. Add 3 drops of *Sulfide Reagent B (4459).</p> 	<p>6. Cap and mix.</p> 
<p>7. Wait 1 minute.</p> 	<p>8. Use the pipet (0354) to add 1.0 mL of Sulfide Reagent C (4460).</p> 	<p>9. Cap and mix.</p> 
<p>10. Insert test tube into Octa-Slide 2 Viewer (1101).</p> 	<p>11. Hold the Viewer so that non-direct light enters through the back. Match sample color to a color standard. Record as ppm Sulfide.</p> 	

10. APENDICES

APENDICE 1: FECHAS E INSUMOS DE LOS MUESTREOS

Cuadro 10.1. Cronograma de muestreos e insumos utilizados.

Fase del muestreo	Fechas	Insumos requeridos	
Aireación	16 de setiembre	pHmetro	Encuestas
	21 de setiembre	Medidor de ORP	Guantes
	22 de setiembre	Sonda de OD	Libreta
	23 de setiembre	Kit de pruebas de sulfuro	
	29 de setiembre		
Línea base	30 de setiembre	pHmetro	Encuestas
	3 de octubre	Medidor de ORP	Guantes
	4 de octubre	Sonda de OD	Libreta
	5 de octubre	Kit de pruebas de sulfuro	
	6 de octubre		
Adición de cal	10 de octubre	pHmetro	Encuestas
	11 de octubre	Medidor de ORP	Guantes
	12 de octubre	Sonda de OD	Libreta
	13 de octubre	Kit de pruebas de sulfuro	Balanza digital
	14 de octubre	Recipiente	Saco de cal
Adición de sulfato de hierro	17 de octubre	pHmetro	Guantes
	18 de octubre	Medidor de ORP	Libreta
	19 de octubre	Sonda de OD	Balanza digital
	20 de octubre	Kit de pruebas de sulfuro	Sulfato de hierro
		Encuestas	Recipiente
Adición de BiOWiSH® Odor	24 de octubre	pHmetro	Guantes
	25 de octubre	Medidor de ORP	Libreta
	26 de octubre	Sonda de OD	Balanza digital
	27 de octubre	Kit de pruebas de sulfuro	Sulfato de hierro
		Encuestas	Recipiente

APENDICE 2: EVALUACIÓN DE LA PERCEPCIÓN DE OLORES

Evaluación de medidas de mitigación de olores para tanques de compensación de PTAR



TEC | Tecnológico de Costa Rica
Ingeniería Ambiental

Tesista:
Britanny Ramos Castellón
britannyramcas@gmail.com

Tutora:
Mary Luz Barrios
Hernández

En colaboración con:



Este formulario busca evaluar las dimensiones del olor: *intensidad*, *ofensividad* y *carácter* de olor producidas por tanques de compensación de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR).

Intensidad: Es la percepción de fuerza del olor.

Ofensividad: Que tan agradable o desagradable es el olor.

Carácter: Clasificación descriptiva del olor.

Este estudio, es parte de una tesis del TEC y es acompañado con cambios en las condiciones de operación y monitoreo de parámetros fisicoquímicos de la unidad para determinar la efectividad de medidas de mitigación de olores.

Dimensiones del olor: Marque con x una opción

- ¿Cuál es la intensidad de olor?
 - Sin olor
 - Muy leve
 - Débil
 - Fácilmente notable
 - Fuerte
 - Muy Fuerte
- ¿Cómo percibe el olor?
 - Neutral
 - Ligeramente Desagradable
 - Desagradable
 - Extremadamente desagradable
- ¿Qué grupo de descriptores se ajusta mejor a su percepción del olor? (ver cuadro 1 o rueda de olores)
 - Natural
 - Frutal
 - Fresco
 - Tierra-Moho
 - Rancio-Agrio
 - Desinfectante
 - Químico
 - Fecal
 - Amoniaco
 - Cañería
 - Putrefacto
 - Azufre
 - Otro: _____

Cuadro 1: Grupos de descriptores para calificar olores.

Grupo	Descriptores asociados
Natural	Cítricos, Madera, Hierbas, Césped
Frutal	Floral, Frutas, Hierbas, Perfumado
Fresco	Eucalipto, Pino, Mentolado, Limón, Hojas de té
Tierra-Moho	Tierra, Tierra húmeda, Humedad, Madera, Césped, Cenizas, Moho, Bosque
Rancio-Agrio	Levadura, Leche agria, Vinagre, Agrio
Desinfectante	Jabón, Cloro, Desinfectante
Químico	Solventes, Alcohol, Gasolina, Acetona, Medicinal
Fecal	Boñiga, Orina, Excremento, Estiércol
Amoniaco	Orina, Amoniaco, Pescado
Cañería	Fecal, Excremento, Séptico
Putrefacto	Descompuesto, Carne podrida, Animal muerto, Podrido
Azufre	Vegetales podridos, Ajo, Sudor, Zorrillo, Huevos podridos, Pantano, Repollo, Col

Evaluación de medidas de mitigación de olores para tanques de compensación de PTAR



TEC | Tecnológico de Costa Rica
Ingeniería Ambiental

Tesista:
Britanny Ramos Castellón
britannyramcas@gmail.com

Tutora:
Mary Luz Barrios
Hernández

En colaboración con:



Otros datos relevantes: Llene los espacios o marque con x una opción

1. **Fecha:** _____
2. **Hora:** _____
3. **Razón por la que se encontraba en la zona:**
 - Trabajo
 - Estudio
 - Ocio
 - Otro: _____
4. **Correo electrónico** (opcional, solo si desea que los resultados de la tesis y la encuesta sean compartidos con usted)

5. **Comentarios adicionales** (opcional):

¡Muchas gracias por su colaboración!

Los resultados de esta encuesta serán utilizados para una tesis de Ingeniería Ambiental del TEC.

APENDICE 3: PRUEBA DE VALORES ANORMALES EN LOS DATOS RECOPIRADOS

Se realiza la prueba de Grubbs para cada conjunto de datos. Se encuentran datos anómalos de ORP, Temperatura y pH en la unidad. En los datos de salida y entrada no se encontraron datos anómalos.

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
 Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Cuadro 10.2. Resultados de la prueba de Grubbs a los datos recopilados

Prueba	Medida	Unidad		Entrada		Salida	
		p value	¿Existen valores anómalos ?	p value	¿Existen valores anómalos ?	p value	¿Existen valores anómalos ?
ORP	Línea Base	1,000	No	0,455	No	1,000	No
	Aireación	0,193	No	0,362	No	0,988	No
	CaO	0,333	No	0,359	No	0,125	No
	FeSO ₄	0,003	Si	0,884	No	1,000	No
	BiOWiSH Odor	0,000	Si	1,000	No	1,000	No
Temperatura	Línea Base	0,149	No	0,385	No	1,000	No
	Aireación	0,005	Si	0,943	No	0,473	No
	CaO	0,353	No	1,000	No	1,000	No
	FeSO ₄	0,573	No	0,582	No	0,121	No
	BiOWiSH Odor	0,021	Si	0,562	No	0,626	No
pH	Línea Base	0,264	No	0,542	No	0,234	No
	Aireación	0,000	Si	1,000	No	0,708	No
	CaO	0,008	Si	1,000	No	1,000	No
	FeSO ₄	1,000	No	1,000	No	0,104	No
	BiOWiSH [®] Odor	1,000	No	0,364	No	0,855	No
OD	Aireación	1,000	No	--	--	--	--
	General	--	--	0,912	No	0,788	No

Se eliminan las réplicas de ORP de la medida adición de sulfato de hierro (TRH1 8:30 am) y adición de BiOWiSH[®] Odor (TRH1 3:30 pm). En temperatura se eliminan las réplicas de aireación (TRH4 10:30 am) y adición de BiOWiSH[®] Odor (TRH3 10:30 am). Finalmente, en pH se elimina las réplicas de aireación (TRH2 8:00 am) y adición de cal (TRH1 8:30 am).

Una vez eliminadas los datos anómalos se repite la prueba a los grupos modificados (Cuadro 11,3). Se encuentran nuevamente valores anómalos de ORP en la medida de la medida de adición de sulfato de hierro (TRH1 9:00 am) y en pH de aireación (TRH1 8:30 am). Estos datos y sus réplicas son eliminados. Finalmente se corre la prueba en cada uno de los conjuntos sin encontrar valores atípicos.

Cuadro 10.3. Resultados de la prueba de Grubbs a los datos recopilados, por segunda vez

Prueba	Medida	p value	¿Existen valores anómalos?
ORP	FeSO ₄	0,011	Si
	BiOWiSH® Odor	1	No
Temperatura	BiOWiSH® Odor	0,948	No
	Aireación	0,475	No
pH	CaO	0,320	No
	Aireación	0,016	Si

APENDICE 4: RESUMEN ESTADISTICO DE LA RECOLECCIÓN DE DATOS EN EL TANQUE

Cuadro 10.4. Resultados generales del monitoreo del tanque de homogeneización en línea base

Parámetro	TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General	
ORP (mV)	Promedio	-74,88	-150,57	-161,48	-125,71	-130,42
	Desviación estándar	16,35	14,12	12,83	33,26	38,66
	Mediciones	57	72	63	51	243
Temperatura (°C)	Promedio	22,81	22,97	22,88	21,68	22,64
	Desviación estándar	0,58	0,96	0,62	0,32	0,84
	Mediciones	57	72	63	51	243
pH	Promedio	6,93	6,30	6,39	6,92	6,61
	Desviación estándar	0,27	0,40	0,41	0,34	0,46
	Mediciones	57	69	63	51	240
Sulfuros (mg/L)	Promedio	2	5	15	10	8
	Desviación estándar	-	-	-	-	5,72
	Mediciones	1	1	1	1	4

Cuadro 10.5. Resultados generales del monitoreo del tanque de homogeneización en aireación

Parámetro	TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General	
ORP (mV)	Promedio	187,13	144,32	153,93	158,27	157,88
	Desviación estándar	13,34	31,83	29,37	21,26	30,67
	Mediciones	54	96	75	48	273
Temperatura (°C)	Promedio	24,06	23,64	22,74	23,13	23,39
	Desviación estándar	1,51	1,31	1,14	1,08	1,36
	Mediciones	54	96	75	45	270
pH	Promedio	7,37	7,34	7,79	7,23	7,45
	Desviación estándar	0,40	0,36	0,21	0,17	0,37
	Mediciones	51	93	75	48	267
OD (mg/L)	Promedio	2,56	3,08	5,23	1,98	3,43
	Desviación estándar	1,15	1,60	1,12	1,08	1,78
	Mediciones	54	87	75	39	255
Sulfuros (mg/L)	Promedio	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
	Mediciones	1	1	1	1	4

Cuadro 10.6. Resultados generales del monitoreo del tanque de homogeneización en adición de cal

Parámetro	TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General	
ORP (mV)	Promedio	-162,38	-136,04	-98,09	-141,79	-136,56
	Desviación estándar	37,73	28,95	52,24	21,71	44,16
	Mediciones	60	45	45	39	189
Temperatura (°C)	Promedio	22,32	23,52	22,72	22,94	22,83
	Desviación estándar	0,94	1,02	1,00	1,39	1,16
	Mediciones	60	45	45	39	189

pH	Promedio	7,81	7,77	7,55	7,78	7,73
	Desviación estándar	0,42	0,28	0,24	0,24	0,33
	Mediciones	54	45	45	39	183
Sulfuros (mg/L)	Promedio	0,2	2	1	0,5	0,93
	Desviación estándar	-	-	-	-	0,79
	Mediciones	1	1	1	1	4

Cuadro 10.7. Resultados generales del monitoreo del tanque de homogeneización en adición de sulfato de hierro

Parámetro		TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General
ORP (mV)	Promedio	-90,31	-87,56	-74,40	-89,21	-85,21
	Desviación estándar	25,40	31,75	21,64	12,27	24,46
	Mediciones	42	48	48	48	186
Temperatura (°C)	Promedio	23,15	23,58	23,86	23,32	23,48
	Desviación estándar	1,27	1,21	1,28	1,08	1,23
	Mediciones	48	48	48	48	192
pH	Promedio	6,95	7,01	6,88	6,49	6,83
	Desviación estándar	0,31	0,27	0,18	0,21	0,32
	Mediciones	48	48	48	48	192
Sulfuros (mg/L)	Promedio	2	1	2	2	1,75
	Desviación estándar	-	-	-	-	0,5
	Mediciones	1	1	1	1	4

Cuadro 10.8. Resultados generales del monitoreo del tanque de homogeneización en adición BiOWiSH Odor

Parámetro		TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General
ORP (mV)	Promedio	-133,40	-119,35	-140,51	-138,31	-132,39
	Desviación estándar	11,73	19,29	7,94	11,84	15,96
	Mediciones	42	48	39	45	174
Temperatura (°C)	Promedio	22,79	22,00	22,88	22,79	22,59
	Desviación estándar	0,42	0,59	0,89	0,42	0,69
	Mediciones	45	48	36	45	174
pH	Promedio	6,75	6,53	6,48	6,79	6,64
	Desviación estándar	0,26	0,16	0,29	0,25	0,28
	Mediciones	45	48	39	45	177
Sulfuros (mg/L)	Promedio	2	2	5	5	3,5
	Desviación estándar	-	-	-	-	1,73
	Mediciones	1	1	1	1	4

APENDICE 5: RESUMEN ESTADISTICO DE LA RECOLECCIÓN DE DATOS EN LA ENTRADA

Cuadro 10.9. Resultados generales del monitoreo del agua residual de entrada en línea Base

Parámetro	TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General	
ORP (mV)	Promedio	-24,60	-85,29	-105,60	-95,78	-85,10
	Desviación estándar	41,71	38,87	42,20	24,90	44,92
	Mediciones	5	7	10	9	31
Temperatura (°C)	Promedio	24,64	24,31	23,00	21,93	23,25
	Desviación estándar	2,55	2,05	0,62	0,49	1,74
	Mediciones	5	7	10	9	31
pH	Promedio	7,52	7,05	7,44	7,64	7,43
	Desviación estándar	0,38	0,48	0,69	0,55	0,58
	Mediciones	5	7	10	9	31
OD (mg/L)	Promedio	1,53	1,92	1,22	2,33	1,75
	Desviación estándar	0,63	0,77	0,75	0,92	0,88
	Mediciones	5	7	10	9	31
Solidos Sedimentables (mL/L)	Promedio	17,5	4,5	15,8	6	13,65
	Desviación estándar	7,0	0,7	20,2	5,7	9,8
	Mediciones	2	2	2	2	8

Cuadro 10.10. Resultados generales del monitoreo del agua residual de entrada en aireación

Parámetro	TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General	
ORP (mV)	Promedio	-25,27	-53,80	-43,00	-22,80	-37,78
	Desviación estándar	22,3	46,34	38,64	5,36	35,31
	Mediciones	11	10	10	5	36
Temperatura (°C)	Promedio	23,09	22,79	22,30	23,94	22,91
	Desviación estándar	1,17	1,17	0,82	0,57	1,11
	Mediciones	11	10	10	5	36
pH	Promedio	7,36	7,54	8,06	7,29	7,60
	Desviación estándar	0,35	0,35	0,53	0,25	0,48
	Mediciones	11	10	10	5	36
OD (mg/L)	Promedio	2,52	2,27	2,61	2,23	2,44
	Desviación estándar	0,87	0,73	1,06	0,96	0,88
	Mediciones	11	10	10	5	36
Solidos Sedimentables (mL/L)	Promedio	10	7	17,5	6	10,4
	Desviación estándar	7,1	4,2	10,6	5,7	6,6
	Mediciones	2	2	2	2	8

Cuadro 10.11. Resultados generales del monitoreo del agua residual de entrada en adición de cal

Parámetro		TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General
ORP (mV)	Promedio	-57,89	-59,20	-8,71	-36,43	-40,46
	Desviación estándar	44,28	13,07	44,35	46,13	44,14
	Mediciones	9	5	7	7	28
Temperatura (°C)	Promedio	22,67	24,24	22,44	23,41	23,08
	Desviación estándar	1,44	0,92	0,62	1,43	1,31
	Mediciones	9	5	7	7	28
pH	Promedio	8,54	8,42	7,53	7,37	7,98
	Desviación estándar	0,41	0,30	0,28	0,38	0,64
	Mediciones	9	5	7	7	28
OD (mg/L)	Promedio	2,48	1,62	1,99	1,96	2,07
	Desviación estándar	0,64	0,51	0,71	1,04	0,78
	Mediciones	9	5	7	7	28
Solidos Sedimentables (mL/L)	Promedio	5	6	8,5	12,5	8
	Desviación estándar	2,8	-	2,1	10,6	5,2
	Mediciones	2	2	2	2	8

Cuadro 10.12. Resultados generales del monitoreo del agua residual de entrada en adición de sulfato de hierro

Parámetro		TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General
ORP (mV)	Promedio	-31,40	-14,82	-17,30	-25,55	-22,17
	Desviación estándar	17,03	53,22	23,93	33,67	34,65
	Mediciones	10	11	10	11	42
Temperatura (°C)	Promedio	23,37	24,34	23,41	23,95	23,79
	Desviación estándar	1,50	1,61	0,83	1,42	1,39
	Mediciones	10	11	10	11	42
pH	Promedio	7,31	7,36	7,06	6,74	7,11
	Desviación estándar	0,44	0,51	0,33	0,23	0,46
	Mediciones	10	11	10	11	42
OD (mg/L)	Promedio	2,80	2,42	2,53	2,68	2,60
	Desviación estándar	0,58	0,98	0,92	0,89	0,84
	Mediciones	10	11	10	11	42
Sulfuros (mg/L)	Promedio	0,5	0,2	0,5	1,0	0,5
	Desviación estándar	-	-	-	-	0,3
	Mediciones	1	1	1	1	4
Solidos Sedimentables (mL/L)	Promedio	22,5	10	12,5	17,5	15,62
	Desviación estándar	10,6	-	3,5	3,5	6,78
	Mediciones	2	2	2	2	8

Cuadro 10.13. Resultados generales del monitoreo del agua residual de entrada en adición de BiOWiSH Odor

Parámetro		TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General
ORP (mV)	Promedio	-41,33	-24,70	-30,71	-99,00	-49,29
	Desviación estándar	29,10	35,22	38,72	21,51	42,67
	Mediciones	9	10	7	9	35
Temperatura (°C)	Promedio	23,40	22,12	23,11	22,61	22,77
	Desviación estándar	0,55	0,87	0,74	0,30	0,81
	Mediciones	9	10	7	9	35
pH	Promedio	7,26	6,78	7,06	7,26	7,08
	Desviación estándar	0,54	0,18	0,18	0,44	0,41
	Mediciones	9	10	7	9	35
OD (mg/L)	Promedio	2,19	2,57	1,74	2,31	2,24
	Desviación estándar	0,64	0,61	0,67	0,75	0,70
	Mediciones	9	10	7	9	35
Solidos Sedimentables (mL/L)	Promedio	19	11,5	8,5	12,5	12,87
	Desviación estándar	15,6	2,1	2,1	3,5	7,37
	Mediciones	2	2	2	2	8

APENDICE 6: RESUMEN ESTADISTICO DE LA RECOLECCIÓN DE DATOS EN LA SALIDA

Cuadro 10.14. Resultados generales del monitoreo del agua residual de salida en línea Base

Parámetro		TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General
ORP (mV)	Promedio	-62,25	-139,70	-148,83	-142,33	-121,40
	Desviación estándar	13,70	10,69	13,29	13,65	38,34
	Mediciones	8	10	6	6	30
Temperatura (°C)	Promedio	22,75	23,17	22,65	21,62	22,64
	Desviación estándar	0,38	0,84	0,16	0,32	0,77
	Mediciones	8	10	6	6	30
pH	Promedio	7,01	5,40	6,01	6,75	6,22
	Desviación estándar	0,60	0,25	0,94	0,30	0,86
	Mediciones	8	10	6	6	30

Cuadro 10.15. Resultados generales del monitoreo del agua residual de salida en aireación

Parámetro		TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General
ORP (mV)	Promedio	153,50	134,82	134,75	153,78	143,69
	Desviación estándar	42,21	13,30	24,15	33,54	29,53
	Mediciones	8	11	8	9	36
Temperatura (°C)	Promedio	23,66	23,39	22,53	23,39	23,26
	Desviación estándar	1,62	1,49	0,83	1,28	1,36
	Mediciones	8	11	8	9	36
pH	Promedio	7,01	7,51	7,88	7,39	7,45
	Desviación estándar	0,40	0,28	0,27	0,30	0,42
	Mediciones	8	11	8	9	36

OD (mg/L)	Promedio	3,36	4,07	6,26	1,49	3,73
	Desviación estándar	1,11	1,20	1,01	1,04	2,02
	Mediciones	8	9	8	9	34

Cuadro 10.16. Resultados generales del monitoreo del agua residual de salida en adición de cal

Parámetro		TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General
ORP (mV)	Promedio	-170,90	-140,13	-98,00	-136,13	-138,32
	Desviación estándar	34,05	40,21	50,89	24,49	45,32
	Mediciones	10	8	8	8	34
Temperatura (°C)	Promedio	22,14	23,01	22,48	22,88	22,60
	Desviación estándar	0,69	1,13	1,44	1,26	1,14
	Mediciones	10	8	8	8	34
pH	Promedio	7,68	7,66	7,48	7,70	7,63
	Desviación estándar	0,38	0,32	0,28	0,27	0,32
	Mediciones	10	8	8	8	34

Cuadro 10.17. Resultados generales del monitoreo del agua residual de salida en adición de sulfato de hierro

Parámetro		TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General
ORP (mV)	Promedio	-87,13	-81,50	-65,25	-78,63	-78,13
	Desviación estándar	13,62	16,04	15,89	19,56	17,61
	Mediciones	8	8	8	8	32
Temperatura (°C)	Promedio	23,28	22,86	23,39	23,71	23,31
	Desviación estándar	2,00	0,68	0,73	1,20	1,24
	Mediciones	8	8	8	8	32
pH	Promedio	7,00	7,16	6,83	6,61	6,90
	Desviación estándar	0,53	0,24	0,12	0,19	0,36
	Mediciones	8	8	8	8	32

Cuadro 10.18. Resultados generales del monitoreo del agua residual de salida en adición de BiOWiSH Odor

Parámetro		TRH 1	TRH 2	TRH3	TRH4	General
ORP (mV)	Promedio	-123,83	-96,00	-64,86	-144,33	-105,56
	Desviación estándar	9,11	8,15	12,69	11,60	32,63
	Mediciones	6	6	7	6	25
Temperatura (°C)	Promedio	22,77	22,30	22,69	22,25	22,51
	Desviación estándar	0,43	1,09	0,36	0,23	0,62
	Mediciones	6	6	7	6	25
pH	Promedio	6,58	6,58	6,66	6,55	6,59
	Desviación estándar	0,45	0,50	0,34	0,22	0,48
	Mediciones	6	6	7	6	25

APENDICE 7: COMPARACIÓN DE MEDIAS

Se realiza la prueba t Student, prueba para determinar si las medias de dos grupos son iguales. El nivel de confianza de la prueba es de 95%.

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ Hipótesis nula $H_0: \text{diferencia}_\mu = 0$
 Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$ Hipótesis alterna $H_1: \text{diferencia}_\mu \neq 0$

En la prueba de sulfuros se agregaron las mediciones realizadas a la unidad antes de la adición de sulfato de hierro a los datos de línea base.

Cuadro 10.19. Resultados de la prueba de t Student a los datos recopilados

Prueba	Medida	Unidad		Entrada		Salida	
		p value	¿Existe diferencia entre las medias?	p value	¿Existe diferencia entre las medias?	p value	¿Existe diferencia entre las medias?
ORP	Línea Base - Aireación	0,000	Si	0,344	No	0,025	Si
	Línea Base - CaO	0,06	No	0,665	No	0,848	No
	Línea Base - FeSO ₄	0,000	Si	0,188	No	0,014	Si
	Línea Base - BiOWiSH Odor	0,547	No	0,18	No	0,972	No
Temperatura	Línea Base - Aireación	0,000	Si	0	Si	0,000	Si
	LB- CaO	0,132	No	0	Si	0,111	No
	Línea Base - FeSO ₄	0,000	Si	0	Si	0,000	Si
	Línea Base - BiOWiSH Odor	0,475	No	0,001	Si	0,104	No
pH	Línea Base - Aireación	0,000	Si	0,203	No	0,000	Si
	Línea Base - CaO	0,000	Si	0,001	Si	0,000	Si
	Línea Base - FeSO ₄	0,000	Si	0,014	Si	0,000	Si
	Línea Base - BiOWiSH Odor	0,334	No	0,01	Si	0,050	No
OD	Línea Base - Aireación	0,002	Si	0,002	Si	0,000	Si
	Línea Base - CaO	1,000	No	0,141	No	1,000	No
	Línea Base - FeSO ₄	1,000	No	0,000	Si	1,000	No
	Línea Base - BiOWiSH Odor	1,000	No	0,015	Si	1,000	No
Solidos Sedimentables	Línea Base - Aireación	--	--	0,452	No	--	--
	Línea Base - CaO	--	--	0,180	No	--	--
	Línea Base - FeSO ₄	--	--	0,648	No	--	--
	Línea Base - BiOWiSH Odor	--	--	0,860	No	--	--
Sulfuros	Línea Base - Aireación	0,002	Si	--	--	--	--
	Línea Base B- CaO	0,004	Si	--	--	--	--
	Línea Base - FeSO ₄	0,007	Si	--	--	--	--
	Línea Base - BiOWiSH Odor	0,033	Si	--	--	--	--

APENDICE 8: COMPARACIÓN DE MEDIANAS

Se realiza la Prueba de la mediana de Mood, prueba para determinar si las medianas de dos grupos son iguales. El nivel de confianza de la prueba es de 95%.

Hipótesis nula H_0 : Las medianas de población son todas iguales

Hipótesis alterna H_1 : Las medianas de población no son todas iguales

Prueba	Comparación	p value	¿Existe diferencia entre las medianas?
Intensidad	Línea Base - Aireación	0,025	Si
	Línea Base - CaO	0,464	No
	Línea Base - FeSO ₄	0,713	No
	Línea Base - BiOWiSH Odor	0,705	No
	Estudio-Trabajo	0,025	Si
Ofensividad	Línea Base -Aireación	0,046	Si
	Línea Base - CaO	1,000	No
	Línea Base - FeSO ₄	0,439	No
	Línea Base - BiOWiSH Odor	0,439	No
	Estudio-Trabajo	0,018	Si