

Publication status: Not informed by the submitting author

Odor mitigation measures for an equalization tank of a Wastewater Treatment Plant in Costa Rica

Britanny Ramos Castellón, Mary Luz Barrios-Hernandez

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.6599>

Submitted on: 2023-08-18

Posted on: 2023-08-18 (version 1)

(YYYY-MM-DD)

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

Medidas de mitigación de olores para un tanque homogeneizador de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en Costa Rica

Odor mitigation measures for an equalization tank of a Wastewater Treatment Plant in Costa Rica

Britanny Ramos Castellón¹, britannyramcas@gmail.com, Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0000-7620-7866>

Mary Luz Barrios-Hernández^{1,2,*}, mbarrios@itcr.ac.cr, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-4399-6333>

Resumen

[Objetivo] El objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta a corto plazo de cuatro diferentes medidas de mitigación de olores en un tanque de homogeneización de una PTAR universitaria. **[Metodología]** Se aplicaron las medidas de aireación, adición de cal, adición de sulfato de hierro y adición del producto comercial BiOWiSH® odor; durante cuatro tiempos de retención hidráulico. Se monitoreó el afluente y la unidad en cada periodo, utilizando una línea base como comparación de las medidas. Se midió por triplicado cada 30 min el potencial de Hidrógeno, potencial de oxidación reducción, oxígeno disuelto y la concentración de sulfuro disuelto. Se aplicó una encuesta de percepción de olores a visitantes de la PTAR evaluando intensidad, ofensividad y carácter con un total de 15 encuestas por periodo de monitoreo. Se determinaron diferencias entre medidas de mitigación y línea base con pruebas t-student (datos cuantitativos) y medianas de Mood (datos cualitativos). Se utilizó Minitab2019 y un límite de confianza de 95%. **[Resultados]** Todas las medidas de mitigación disminuyeron significativamente la concentración de sulfuro disuelto en la unidad. La medida aireación evitó el agotamiento de oxígeno, régimen reductivo y fermentación ácida, favoreciendo la oxidación de odorantes, además fue la única medida de mitigación estudiada que generó una reducción en la intensidad y ofensividad del olor. **[Conclusiones]** La aplicación de aireación generó un cambio en el comportamiento de la unidad y la percepción de olor, confirmando su efectividad. La adición de sulfato de hierro, cal y BiOWiSH® no generaron cambios significativos en la percepción de olor.

Palabras Clave: Agua residual especial; Mitigación de olor; Percepción de olor; Ruedas de olor; Tanque de compensación.

Abstract

[Objective] The objective of this study was to evaluate the short-term response of four different odor mitigation measures in a homogenization tank of a university WWTP. **[Methodology]** Aeration, addition of lime, addition of iron sulfate, and addition of the commercial product BiOWiSH® Odor were implemented over a study period equal to four hydraulic retention times. Monitoring was conducted for the influent water and within the tank for each period, including a baseline

* Autor para correspondencia

1 Ingeniería Ambiental, Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica

2 Escuela de Química, Centro de Investigación para la Protección Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

measurement for comparison. pH, oxidation-reduction potential and dissolved oxygen were measured in triplicates every 30 minutes, along with the concentration of dissolved sulfide. An odor perception survey was administered to WWTP visitors, evaluating intensity, offensiveness, and character with a total of 15 surveys per period. Differences between the mitigation measures and baseline were determined using t-student tests for quantitative data and Mood's medians for qualitative data. Minitab2019 was used with a confidence level of 95%. **[Results]** All the mitigation measures significantly decreased the concentration of dissolved sulfide in the tank. Aeration prevented oxygen depletion, reducing conditions, and acid fermentation, favoring the oxidation of odorous compounds. It was the only studied mitigation measure that led to a reduction in intensity and offensiveness of the odor. **[Conclusions]** The application of aeration induced changes in the tank's behavior and odor perception, confirming its effectiveness. The addition of iron sulfate, lime, and BiOWiSH® did not generate significant changes in odor perception.

Keywords: Special wastewater; Odour mitigation; Odour perception; Odour wheels; Compensation tank.

Introducción

Los procesos de tratamiento de aguas residuales desempeñan una función de vital importancia en el saneamiento y la preservación de nuestros recursos naturales. No obstante, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) enfrentan un desafío significativo relacionado con la emisión de olores desagradables (Jiang et al., 2017).

En las PTARs, las principales unidades que emiten olores son los alcantarillados sanitarios, el tratamiento preliminar y primario que incluye los tanques de homogenización y el procesamiento de los lodos. Los alcantarillados, al recibir agua residual con pocas cantidades de oxígeno que se agotan rápidamente, generan condiciones anaeróbicas que promueven la producción de odorantes a través de procesos biológicos como la fermentación y la reducción de sulfato (Park et al., 2014). Los altos niveles de sulfuros y odorantes se acumulan en las unidades homogeneizadoras (Bazemo et al., 2020), las cuales son diseñadas para contrarrestar variaciones de caudal y carga orgánica en el agua de entrada por medio de su almacenamiento temporal. Asimismo, la entrada del agua residual a la PTAR suele ser una zona de turbulencia que favorece la transferencia de los odorantes hacia la fase gaseosa (Gostelow et al., 2001; Lewkowska et al., 2016), además de ser una fuerza de corte que contribuye significativamente a la dispersión de los olores (Carrera-Chapela et al., 2014). Dicha emisión puede ser pasiva o activa, dependiendo de si la unidad está aireada o no.

Las condiciones que inducen los olores en las PTARs están relacionadas con la presencia de condiciones anóxicas o anaeróbicas, que favorecen reacciones biológicas de fermentación y reducción. Entre los diversos grupos de odorantes en las PTARs están los compuestos sulfurados (inorgánicos), compuestos sulfurados orgánicos (mercaptanos), gases nitrogenados y aldehídos y cetonas. Tradicionalmente, el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el amoníaco son utilizados como indicadores del olor de las PTARs (Lebrero et al., 2011). El H_2S , por su parte, proviene principalmente de la reducción del ion sulfato, llevada a cabo por las bacterias reductoras de sulfato (Bazemo et al., 2020). Estas bacterias son anaerobias obligadas y obtienen energía mediante la reducción de compuestos orgánicos e inorgánicos de azufre. Además, pueden sobrevivir temporalmente a una exposición al oxígeno y volver a activarse en condiciones anaeróbicas (Hao et al., 2009) siendo una de las principales fuentes de generación de H_2S en el agua residual.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

Los parámetros de calidad del agua también tienen una relación indirecta con la emisión de olores, ya que influyen en la actividad de los microorganismos (Kang et al., 2020). Por ejemplo, el pH del agua residual influirá en la distribución de las especies de odorantes. El sulfuro de hidrógeno puede presentarse en forma de H_2S , HS^- y S^{2-} , dependiendo del pH, sin embargo, solo el H_2S puede ser transferido de la fase líquida a la fase gaseosa y, por lo tanto, generar un olor desagradable (Oliveira et al., 2017).

Las molestias relacionadas con los olores solo ocurrirán si los odorantes se transfieren desde la fuente de olor hacia la atmósfera y son transportados hasta los receptores (Van Harreveld, 2001). Es por ello que la problemática de los olores en las PTARs debe ser abordada desde distintos enfoques. En primer lugar, determinando la presencia y caracterización de los olores mediante análisis químicos o sensoriales; permitiendo identificar los odorantes, compuestos químicos responsables de generar el olor percibido (Carrera-Chapela et al., 2014). Por otro lado, los análisis sensoriales investigan los factores relacionados con la percepción negativa de un olor (Burlingame, 2009); la percepción del olor por parte del receptor se verá influenciada por factores como la frecuencia, intensidad, duración, ofensividad y localización de los olores (factores FIDOL) (Griffiths, 2014), así como por experiencias personales, asociaciones emocionales, edad, sexo y estado de salud (Valencia et al., 2011). Para cuantificar los olores, Brancher et al., (2016) ha utilizado métodos analíticos, sensoriales e instrumentales, o una combinación de ellos, que permiten medir eficazmente dimensiones como concentración, intensidad, carácter, ofensividad y persistencia, llamadas CICOP.

Según Hawko et al., (2021), la calificación del carácter y la ofensividad, también conocidos como la naturaleza del olor y el tono hedónico se puede evaluar mediante tres métodos principales utilizando la evocación, la descripción con referencia y los perfiles odoríficos. Para ello se proponen las ruedas de olor. Muñoz et al. (2010), menciona que estas herramientas establecen un léxico unificado en la descripción de la naturaleza del olor en un contexto determinado facilitando la identificación del olor al encuestado al expresar las molestias causadas en PTARs (Suffet y Rosenfeld, 2007; Burlingame, 2009). Las encuestas se refuerzan con escalas para determinar la intensidad, ofensividad y carácter del olor percibido por los afectados (Burlingame, 2009).

El presente trabajo tiene como objetivo principal mostrar los resultados la aplicación a corto plazo de cuatro medidas de mitigación de olores en el tanque de homogeneización de la PTAR Finca 2 ubicada en las instalaciones de la Universidad de Costa Rica. El análisis se realizó por medio de la comparación de los cambios ocurridos en la unidad utilizando parámetros fisicoquímicos de interés: potencial de Hidrógeno (pH), potencial de oxidación reducción (Oxidation-Reduction Potential, ORP, por sus siglas en inglés), oxígeno disuelto (OD) y la concentración de sulfuro disuelto. La investigación fue reforzada mediante una evaluación de la percepción del olor por parte de un grupo de encuestados fijos (trabajadores) y aleatorios (visitantes).

Metodología

Instalaciones de la PTAR

El estudio se llevó a cabo en la PTAR ubicada en las instalaciones de la sede Rodrigo Facio de la Universidad de Costa Rica, Finca 2 (9.938311, -84.045415). Recibe agua cruda

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

de tipo especial de los edificios académicos y de investigación ubicados en la propiedad denominada con el mismo nombre. El agua residual proveniente de los edificios es almacenada en un tanque de entrada y seguidamente transportada por bombeo a un sistema de rejillas. Cae por gravedad al tanque de homogeneización. Seguidamente entra a uno de los tanques biológicos operado con tecnología de lodos activados convencionales, abandonado la PTAR a través de un último tanque de salida que va hacia el alcantarillado público.

El tanque homogeneizador en estudio fue diseñado para un tiempo de retención de siete horas y cuenta con las siguientes dimensiones: 11,3 m de largo, 1,2 m de ancho y 3,8 m de altura total (Figura 1). Está equipado con cinco difusores de membrana tipo disco (Blowtac) colocados en fila a lo largo del fondo del tanque. La salida del agua es a través de dos bombas sumergibles en uno de los laterales del tanque.

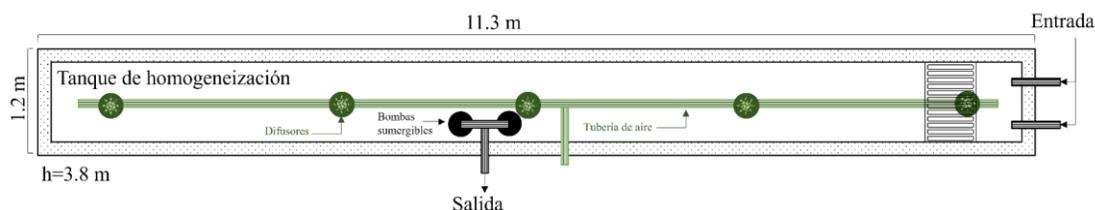


Figura 1. *Plano de planta del tanque de homogeneización.*

Nota: Fuente propia de la investigación.

Línea base y medidas aplicadas

El estudio fue realizado entre los meses de setiembre y octubre del año 2022, en el cual se realizó una campaña de monitoreo de la unidad entre ellos, una línea base (estado cero de la unidad) y la aplicación de cuatro medidas de mitigación de olor nombradas: Aireación, Adición de cal, Adición de sulfato de hierro, Adición de BiOWiSH® Odor (Tabla 1). Cada periodo de estudio por medida aplicada tuvo una duración de cuatro tiempos de retención hidráulico (TRH, Ecuación 1), el cual se calcula según el volumen de la unidad (m^3) y el caudal de entrada (m^3/h).

$$TRH (h) = \frac{\text{Volumen de la unidad } (m^3)}{\text{Caudal de entrada } (m^3/h)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Aireación: La aireación se controló por medio de la abertura de la válvula de aire del tanque de homogeneización, permitiendo el funcionamiento de los cinco difusores. El nivel de aireación fue intervenido hasta que el oxígeno disuelto de la unidad se aproximó a 1 mg/L y el ORP fue positivo.

Adición de Cal: Con el fin de mantener el pH en valores entre 7,5-8, se adicionaron entre 100 y 130 g de cal al inicio de cada sesión en una disolución acuosa filtrada y cada 30 minutos hasta llegar al pH deseado. A partir de este punto únicamente se adicionó cal si el pH promedio de la unidad disminuía. En total se agregaron 928 g, 730 g, 1114 g y 1153 g para cada TRH. Con el fin de realizar una mezcla completa se abrió la válvula de aire por tres minutos justo después de la adición.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

Tabla 1

Descripción de la aplicación de medidas de mitigación de olores en el periodo del 16 de setiembre al 27 de octubre 2022.

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.	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

Nota: Fuente propia de la investigación.

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) para eliminar el sulfuro presente en la unidad y otra de aplicación periódica (B) para eliminar el sulfuro que entra continuamente en el afluente. La concentración de ambas se basa en los valores de la concentración de sulfuro total en el agua de entrada y de la unidad. La disolución A se agregó al inicio del experimento 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. Los cálculos realizados para generar las disoluciones se describen en la Ecuación 2 para la disolución A y la Ecuación 3 para la disolución B.

$$Disolución A \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{Cn TH \left(\frac{g S^-}{L} \right) * Dosis \left(\frac{g FeSO_4}{g S^-} \right) * Volumen TH (L)}{Volumen de disolución A (L)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

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).

$$Disolución B \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{Cn E \left(\frac{g S^-}{L} \right) * Dosis \left(\frac{g FeSO_4}{g S^-} \right) * Q \left(\frac{L}{h} \right) * 10h}{Volumen de disolución B (L)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

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).

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

Adición de BiOWiSH® odor: Para la preparación del producto comercial BiOWiSH® odor se dio seguimiento a las recomendaciones de la casa comercial del producto. Su evaluación fue tomada en cuenta en este estudio debido a su uso rutinario en la PTAR para el control de olores. Para su uso la mezcla se preparó de acuerdo con la Ecuación 4, con una concentración de 10 mg/L y se dejó reposar por 15 minutos. Luego se agregó a la entrada del tanque homogeneizador e inmediatamente se activó el sistema de aireación por tres minutos para establecer una mezcla homogénea.

$$\text{Disolución} \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{C_n \text{ BW} \left(\frac{mg}{L} \right) * \text{Volumen TH (L)}}{\text{Volumen de disolución A (L)}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

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).

Parámetros de evaluación

En el agua de entrada se midió de forma puntual: OD, temperatura, pH, concentración de sulfuro y sólidos sedimentables, utilizando los instrumentos listados en la Tabla 2, junto con el caudal de entrada. Para la evaluación del efecto de las medidas de mitigación de olores aplicadas, se monitorearon el OD, ORP, pH y temperatura por triplicado, las muestras fueron tomadas en los puntos A, B y C (Figura 2) dentro del tanque homogeneizador, cada 30 minutos.

Tabla 2

Detalles de los instrumentos utilizados durante el muestreo durante el periodo de estudio setiembre a octubre 2022.

Nombre	Modelo	Marca	Detalles
pHmetro	pHep	HANNA	Medición del pH y temperatura
Medidor de ORP	ORP100	Ruizhen	Medición del ORP 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 1 g y 5000 g
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

Nota: Fuente propia de la investigación.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

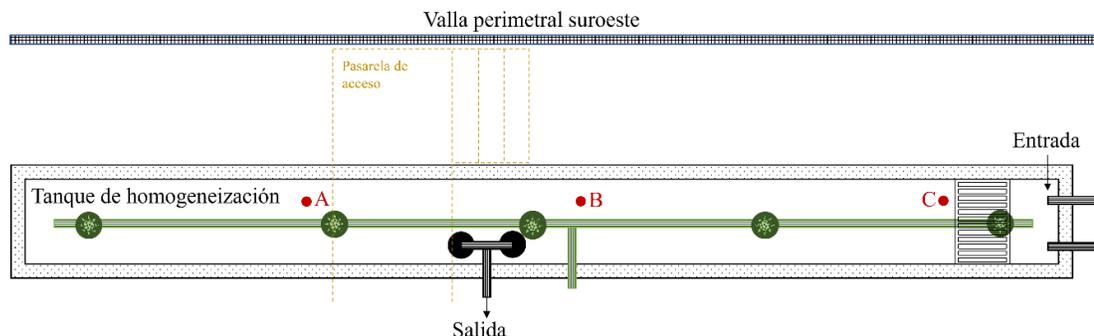


Figura 2. *Puntos de muestreo en plano de planta del tanque de homogeneización.*
Nota: Fuente propia de la investigación.

Encuesta de percepción de olores

Durante cada uno de los periodos de muestreo se caracterizó cualitativamente la percepción de olor mediante encuestas en el sitio (Tabla 3), a trabajadores y estudiantes que se encontraban de visita en la PTAR específicamente entre el lindero suroeste de la planta y el tanque de homogeneización, debido ser la zona más cercana la unidad con permiso de movilización según los protocolos de seguridad de la misma. Se realizó un total de 15 encuestas para cada fase de la recolección de datos.

Tabla 3

Detalles de la encuesta de percepción de olores aplicada durante el periodo de estudio setiembre a octubre 2022.

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

Nota: Fuente propia de la investigación.

La encuesta midió intensidad, ofensividad y carácter de los olores. La escala de carácter, intensidad y ofensividad se basaron en las recomendaciones de Burlingame (2009). La pregunta de carácter está acompañada de una rueda de olores (Figura 3), traducida al español y basada en los grupos propuestos por Burlingame (2009) y Suffet y Rosenfeld (2007). Finalmente, se solicita la fecha y hora de llenado de la encuesta y características del receptor.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

Análisis de datos

Las pruebas estadísticas se ejecutaron con el programa *Minitab 2019* utilizando un 95% de confianza. Para los conjuntos de datos cuantitativos que incluyen temperatura, ORP, pH y OD, se aplicó una prueba de datos anómalos (Grubbs) y posteriormente una prueba de comparación de medias (*t Student*). La comparación se realizó entre los conjuntos de datos de cada medida de mitigación de olores y la línea base.

En el caso de las respuestas de las encuestas de percepción de olores, las respuestas de intensidad y ofensividad son datos cualitativos ordinales, es decir, categorías con jerarquía. A pesar de que se le pueden asignar valores numéricos se debe de aplicar estadística para datos cualitativos; por esta razón se utilizó la comparación de medianas de Mood, una prueba no paramétrica. Se aplicó para la comparación de las medianas de la intensidad y ofensividad de cada una de las medidas de mitigación de olores con la línea base. Además, se compararon las medianas de los resultados de intensidad y ofensividad obtenidos al categorizar estudiantes y trabajadores.



Figura 3. Rueda utilizada para la encuesta de percepción de olores. Adaptación de Burlingame (2009) y Suffet y Rosenfeld (2007).

Con las respuestas de la encuesta de carácter, se adaptó la rueda de olor para cada periodo de estudio agregando dos descriptores nuevos a todas las ruedas de olor generadas: “estero” al grupo de sulfuro y “cloaca” al grupo de fecal-cañería, esto debido a sugerencias de los encuestados (Figura 3). La representación gráfica mantiene un total de 11 grupos generales cada uno con subcategorizaciones entre tres y 9 descriptivos.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

Análisis y resultados

Características del agua entrada

El caudal de la PTAR en el período de estudio estuvo en el rango de 0,42-1,83 m³/día, mientras que los TRH en el rango de 6,9-30,1 horas (Tabla 4). Existió un aumento en el caudal de entrada de la planta y reducción de TRH en el período de adición de sulfato de hierro y adición de BiOWiSH® Odor. Esto es de importancia para los resultados del estudio y comparaciones, debido a que TRHs más largos tienen mayor potencial de generar olores desagradables (Lozada y Giraldo, 2019) pudiendo generar un efecto en el funcionamiento del producto comercial.

Tabla 4

Caudal y TRH medidos en la recolección de datos durante el periodo de estudio setiembre a octubre 2022.

Fases		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

Nota: Fuente propia de la investigación.

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 y dar precisión y confiabilidad a los resultados, los parámetros fisicoquímicos de todos los periodos fueron monitoreados en paralelo en el tanque de compensación y en el agua de entrada (Tabla 5). Se midió temperatura, pH, OD, ORP y sólidos sedimentables ya que se relacionan directa o indirectamente con la emisión de olores. Esto permitió comparar los resultados de cada medida aplicada con la línea base.

Respecto a la temperatura, las tasas de emisión de olores varían según su valor debido al cambio en la solubilidad (Lozada y Giraldo, 2019) y a la constante de Henry (Tagliaferri y Invernizzi, 2023). Las diferencias de temperatura en el agua residual se atribuyen el uso del agua, variaciones de la temperatura en el alcantarillado y variaciones climáticas (García y Pérez, 1985). En este estudio, no se registraron cambios reveladores en las tasas de emisión de odorantes entre periodos, debido a que las variaciones fueron iguales o menores a 1° C.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

Respecto al pH, para el promedio general de agua de entrada se registró un valor de 7,4. Debido al efecto que la medida de adición de cal tiene en la fluctuación del pH, se discute en detalle en la sección “adición de cal”.

La diferencia de concentración de OD se atribuyó 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 la presencia de bacterias reductoras del sulfato (Hao et al., 2009). 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). 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 el cual debe estar entre -50 mV y -150mV (Hvitved et al., 2000) y se califica como agua residual “fresca”. Esto coincide con la presencia de oxígeno.

Finalmente, el promedio de sólidos sedimentables (8-16 mL/L), asociado con la tasa de producción biológica de H₂S (Attal et al., 1992) no presentó variaciones entre periodos, se calificó como agua residual doméstica de media concentración (Metcalf y Eddie, 2003; Chen et al., 2020). No existe evidencia estadística de variaciones significativas de las características del agua de entrada medidas durante la línea base y antes de la aplicación de cada medida, permitiendo así comparar entre periodos.

Tabla 5

Monitoreo de los parámetros característicos del agua residual de entrada antes de la aplicación de las medidas de control de olores, setiembre a octubre 2022.

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*	7,40
	s	0,58	0,48	0,64	0,46	0,41	0,60
	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

Nota: Fuente propia de la investigación.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

Aplicación de las medidas de mitigación de olores

En la Tabla 6 se encuentran el resumen estadístico 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.

Tabla 6

Resultados generales del monitoreo en el tanque de homogeneización después de la aplicación de las medidas de control de olores, setiembre a octubre 2022.

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

Nota: Fuente propia de la investigación.

Línea base

Durante el periodo sin intervención se detectó un régimen anaerobio en el tanque homogeneizador reconocido por un agotamiento del OD en el agua almacenada (No detectable; Tabla 6). Se observó adicionalmente un valor promedio de pH dentro de la unidad levemente ácido (6,6; Tabla 6) no atribuible al agua de entrada (7,4; Tabla 5), sino a una posible fermentación ácida, la cual es un conjunto de reacciones que puede ocurrir dentro del rango de ORP de -100 mV a -225 mV (Environmental, 2007); coincidiendo con el ORP promedio medido en la unidad (-130mV). Dicha fermentación ácida es causada por un grupo de reacciones biológicas que producen ácidos grasos volátiles, consumiendo la alcalinidad del agua y por lo tanto reduciendo el pH del agua (López et al., 2017).

La concentración de sulfuros totales disueltos en la unidad fue de 8,34 mg/L, mientras que en el agua residual de entrada se encontró en un rango de sulfuros menor entre 0,2-1,0 mg/L, mostrando la ocurrencia de reacciones que aumentan la concentración de sulfuros tales como la reducción de sulfato y formación de H₂S (Hao et al., 2009); circunstancias que ocurren junto con la liberación de ácidos volátiles (Environmental, 2007).

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.*Aireación*

La aplicación de aireación al tanque de homogeneización logró cambiar las condiciones fisicoquímicas de la unidad e interferir en el proceso de la generación de olores. Hao et al. (2009) recomienda un mínimo de 1,0 mg/L de OD para el control de olores en agua residual cruda, que fue posible con la abertura de la válvula de aire, alcanzando niveles de OD promedio de 3,4 mg/L y mínimos de 1,0 mg/L; además de elevar el ORP a valores positivos con un promedio de 158 mV. Este último valor también concuerda con la recomendación de Rimkus et al (1985) quien sugiere mantener un ORP de +100mV en el agua residual de entrada para evitar la emisión de malos olores. Por otro lado, se logró mantener el pH promedio de la unidad de homogeneización (7,45; Tabla 6) constante respecto al pH del agua de entrada (7,60; Tabla 5).

El régimen oxidativo y aerobio del agua residual, ayudó a controlar las condiciones necesarias para la reducción del sulfato, formación de H₂S y la fermentación ácida, reacciones que si se presentaron en la línea base (Hvitved et al., 2000; Environmental, 2007). Dichas condiciones oxidantes y aerobias inhiben a las bacterias reductoras de sulfato (Hao et al. 2009) y fomentan la oxidación química de los sulfuros en el agua (Vollesten, 2015). 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.

Se debe mencionar que, al activar el sistema de aireación en el tanque de homogeneización, pasó de ser una fuente de emisión pasiva a una activa (Jiang, 2017), con mayor intercambio entre fases y mayores tasas de emisión (Lozada y Giraldo, 2019). Sin embargo, a pesar de que la tasa de emisión se ve influenciado por el aumento de agitación de la interfase, 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 también para las concentraciones de otros odorantes; además se aclara que, el impacto de la mitigación de formación de odorantes puede sobreponer el cambio de tipo de fuente de emisión, resultando en una disminución en la tasa de emisión de odorantes (Kim et al., 2014).

Adición de cal

Durante la aplicación de cal en el tanque de homogeneización, la unidad tiene capacidad de compensación y neutralización de acidez. El ajuste del pH del agua residual dentro de los tanques de compensación es conocido como neutralización del afluente y en algunos casos, el pH es elevado más del punto neutro para brindar alcalinidad al agua o facilitar los procesos siguientes (Goel et al, 2005). En este estudio, el objetivo de modificar el pH del agua de entrada fue la búsqueda de un desplazamiento del equilibrio de las especies de sulfuro en el agua hacia HS⁻ para reducir las emisiones de H₂S; esto debido a que únicamente el H₂S puede transferirse de la fase líquida a la gaseosa y por lo tanto ser percibido por el sistema olfativo humano (Talaiekhosani, 2016).

Durante este 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 (Tabla 6). A este pH, se espera que un 15% de la concentración total de sulfuros se presente como H₂S (Stevdel, 2020; Oliveira et al; 2017). Por lo tanto, en este periodo se espera una concentración de 0,14 mg/L

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

de H₂S (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 (Tabla 6). En este pH un 75% de la concentración total de sulfuro se encuentra como H₂S, resultando en 6,2 mg/L de H₂S en la unidad (75% de 8,38mg/L). Tomando las concentraciones de H₂S en ambos periodos, la remoción de H₂S en el periodo de adición de cal es de hasta 98%.

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). Recordando que los valores de concentración de sulfuro disueltos incluyen las especies H₂S, HS⁻. 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 tiene producto azufre elemental y con disponibilidad de oxígeno, produce sulfato y tiosulfato (Ruiz y Moreno, 2009).

Adición de sulfato de hierro

Para la aplicación de sulfato de hierro se utilizaron las disoluciones de sulfato de hierro descritas en la metodología, tomando en cuenta las variables de concentración de sulfuros en el agua de entrada y concentración de sulfuros en la unidad mostradas en la Tabla 7. Además, se utilizó el caudal horario promedio de las sesiones anteriores a la aplicación (1420 L/h).

Tabla 7

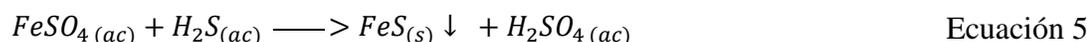
Características de la aplicación de sulfuro de hierro en la unidad en estudio durante el periodo de estudio, setiembre a octubre 2022.

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 inicial unidad (mg/L)	10	5	5	10	7,5
Disolución A (g/L)	140	70	70	140	--
Disolución B (g/L)	10	10	10	20	--
Sulfuro final en unidad (mg/L)	1	2	2	2	1,75
Remoción (%)	80	80	60	80	75

Nota: Fuente propia de la investigación.

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 (Talaiekhosani, 2016). La formación de sulfuro de hierro es un proceso rápido, demostrado por la formación inmediata de un precipitado negro, el cual no aumenta la toxicidad, ni genera subproductos peligrosos (Zhang, 2008).

La reacción de formación de FeS tiene mayor efectividad a pH neutros (Firer et al, 2008) como los presentados en el periodo de aplicación del sulfato de hierro (6,83; Tabla 6). La Ecuación 5 muestra la reacción específica al usar sulfato de hierro para el control de sulfuro de hidrógeno.



ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

En el presente estudio, se midieron concentraciones de 2 mg/L y 1 mg/L de sulfuro total, las cuales al utilizar la distribución de especies de sulfuro (45% de H₂S a pH 7) se pueden leer como 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. Cabe recalcar que estas concentraciones residuales no se logran eliminar incluso con muy altas dosis de sulfato de hierro. Finalmente, se obtuvo un promedio de 1.75 mg/L de sulfuro representando una reducción de sulfuros promedio de 79 %, en comparación con línea base.

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 la práctica esto difiere. Las dosificaciones reales pueden variar debido a factores como el 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). Sin embargo, las dosis utilizadas en este estudio se consideran acertadas, ya que, lograron acercarse a una remoción máxima de H₂S.

Adición de BiOWiSH® Odor

En este periodo la PTAR recibió un caudal mayor al reportado en los otros periodos del estudio; observándose un THR en el tanque de homogeneización menor (7,08 h) al reportado durante la aplicación de las otras medidas (Tabla 4). Dicha condición operacional pudo haber mostrado una afectación positiva en los resultados durante la aplicación del producto, ya que TRHs más largos tienen mayor potencial de generar olores desagradables por las condiciones anaeróbicas y ácidas que provoca y viceversa (Lozada y Giraldo, 2019). Sin embargo, en este periodo se presentaron pH ligeramente ácidos, con un promedio de 6,64 (Tabla 6), observándose una reducción con respecto al pH del agua de entrada (7,08; Tabla 5), lo cual combinado con un promedio de ORP de -132,39 mV señala la presencia de una fermentación ácida en la unidad (Environmental, 2007). Por lo tanto, el uso de BiOWiSH® Odor evidencia un comportamiento muy similar al medido en la línea base donde no se aplica ninguna medida de mitigación de olores.

Adicionalmente, la concentración de los sulfuros se redujo a 3,5 mg/L correspondiente a 56 % de remoción ligada directamente con la reducción de H₂S. Se presume que la concentración de sulfuros es menor a la reportada en la línea base debido a la adición de microorganismos, micronutrientes y activadores de procesos metabólicos encontrados en el producto comercial (BiOWiSH® technologies, 2006); sin embargo, se desconoce los grupos bacterianos específicos utilizados en el cultivo. Ya que se ha reportado su efectividad en alcantarillados con altos niveles de H₂S (Jiang, 2017), es recomendable realizar pruebas adicionales con el fin de profundizar en su mecanismo de remoción y garantía en la reducción de olores en tanques de homogeneización. Dichas pruebas pueden apoyarse en la adaptación de la dosis y el tiempo de activación del producto basado en los TRH de los tanques de almacenamiento.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

Tendencias del pH y ORP durante la aplicación de las medidas de mitigación

En la Figura 4 se presentan los resultados de la correlación de los parámetros pH y ORP durante la aplicación de las medidas de mitigación de olores, los cuales se posicionaron a escala sobre el diagrama de dispersión de Pourbaix Oliveira et al. (2017), donde se describen la distribución de las especies de sulfuro (ORP en función del pH) en condiciones de equilibrio en sistemas hídricos. Dicha representación tiene como objetivo valorar si las medidas de mitigación aplicadas desplazan las condiciones de la unidad lejos de la zona del diagrama gobernada por el H_2S , recordando que el H_2S es la única especie del diagrama que puede ser transferida a la fase gaseosa y causar emisiones de olores ofensivos (Talaiekhzani, 2016).

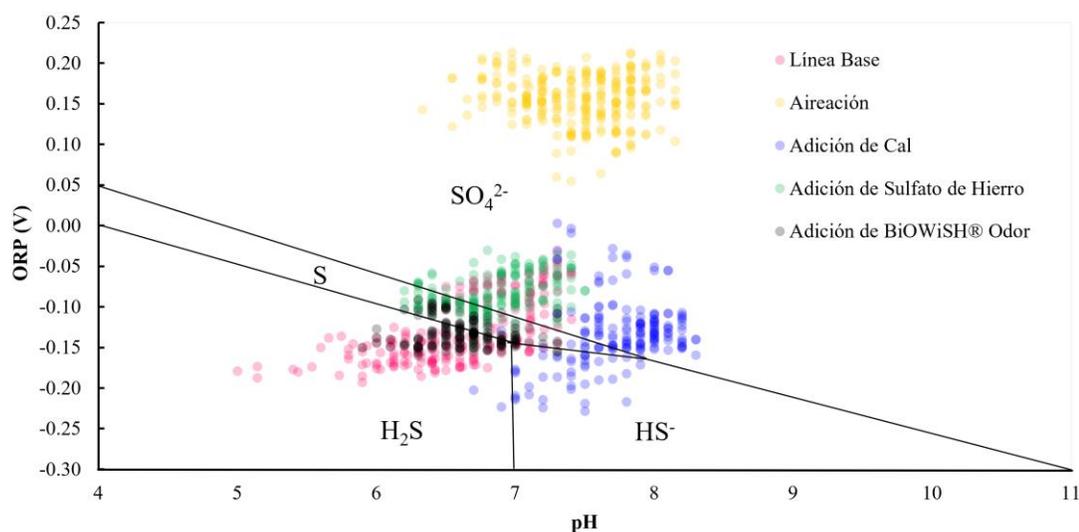


Figura 4. Comportamiento del tanque de homogeneización en los periodos del estudio de medidas de mitigación de olores en contraste con el diagrama de las especies de azufre en el agua.

Nota: Adaptación de Oliveira et al., 2017 con datos propios de esta investigación.

Se puede observar que los periodos con mayor densidad de puntos en la zona gobernada por el H_2S son línea base y adición de BiOWiSH® odor. Por otro lado, 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 SO_4^{2-} y HS^- mientras el periodo de adición de sulfato de hierro se desplaza hacia azufre elemental y sulfato. 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 SO_4^{2-} . 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.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

Sulfuro disuelto total medido antes y durante la aplicación de las medidas de mitigación

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 5, el orden decreciente la concentración de sulfuro es: aireación, adición de cal, adición de sulfato de hierro y finalmente adición de BiOWiSH®.

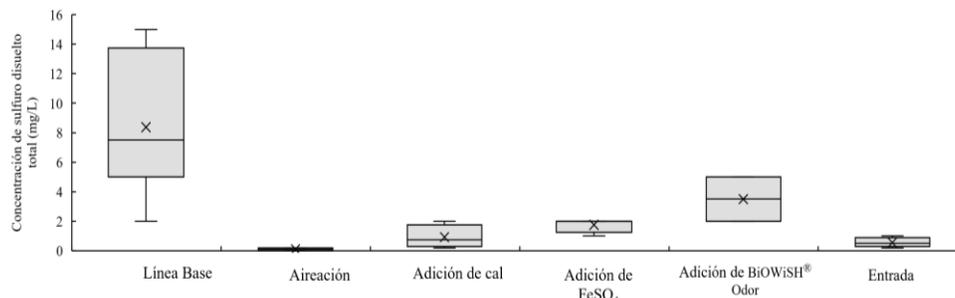


Figura 5. Concentración de sulfuro total en los periodos del estudio medidas de mitigación de olores.

Nota: Fuente propia de la investigación.

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.

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; y en la adición de sulfato de hierro, el sulfuro precipitó en forma de FeS. Finalmente, en el periodo de adición de BiOWiSH® odor el cambio es característico a las propiedades presentes en el producto comercial.

Percepción humana del olor a partir de encuestas

La percepción humana del olor es un criterio esencial de la eficacia de una medida de mitigación de olores en aguas residuales (Jiang, 2017); sus respuestas son influenciadas por la detección y percepción de los encuestados. La Figura 6 y Figura 7 presentan los resultados de la encuesta aplicada antes y durante la aplicación de las cuarto medidas, esto con el fin de relacionar la efectividad de los parámetros fisicoquímicos anteriormente monitoreados con respecto a la percepción al olor. Las respuestas están basadas en como el individuo percibe la intensidad del olor y que tan ofensivo lo considera.

De esa manera la aplicación de la medida de aireación fue la que mostró mayor diferencia en todos los parámetros fisicoquímicos estudiados, concordando así con los resultados de la encuesta, donde para el criterio de intensidad sobresalen las categorías “muy leve” y “débil”, seguidas solamente por “fácilmente notable”; mientras que de ofensividad resaltan únicamente las categorías más bajas: “neutral” y “sin olor” (Figura 7). Al comparar

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

el resto de las medidas aplicadas con la línea base, una vez más se observaron 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.

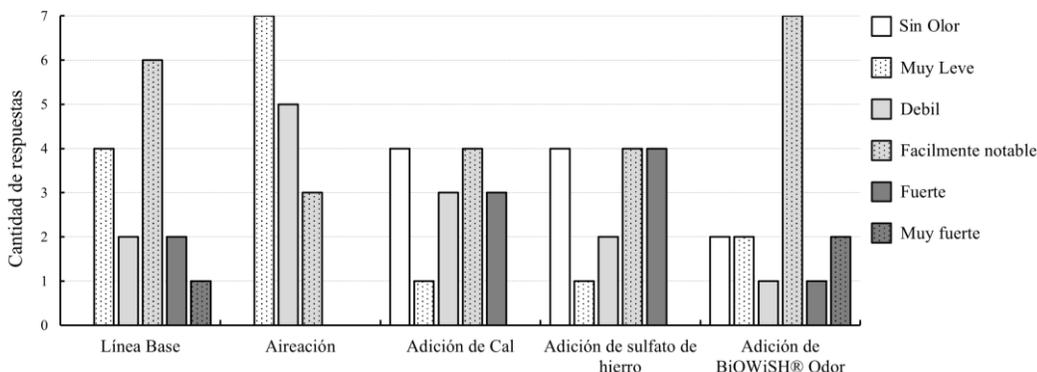


Figura 6. Frecuencia de intensidad del olor para cada uno de los periodos de aplicación de medidas de mitigación.

Nota: Fuente propia de la investigación.

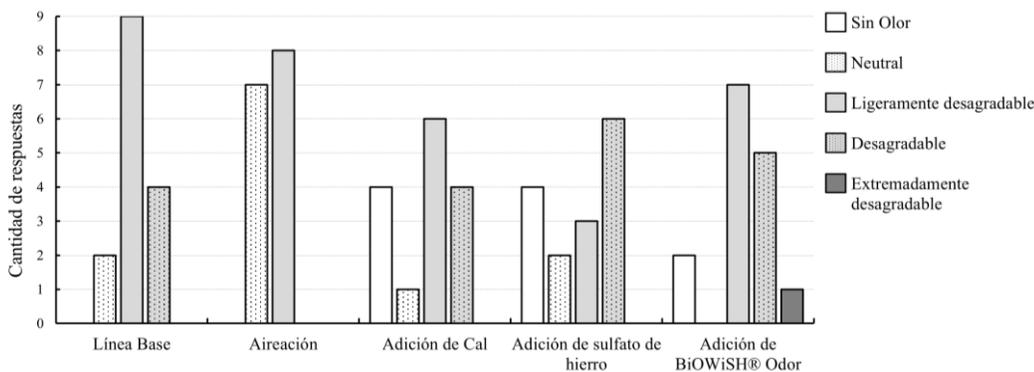


Figura 7. Frecuencia de ofensividad del olor para cada uno de los periodos de aplicación de medidas de mitigación.

Nota: Fuente propia de la investigación.

A pesar de que las medidas de mitigación de adición de cal, adición de sulfato de hierro y adición de BiOWiSH® odor generaron una disminución de sulfuro total y del H₂S, no mostraron un cambio significativo en ninguna de las categorías de percepción del olor basado en las variables intensidad y ofensividad del olor. Al igual que la línea base todas muestran presencia de la categoría de ofensividad “desagradable” con una intensidad de “fuerte” a “muy fuerte”. Esto puede ser debido a que 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 (Suffet et al., 2007).

Al categorizar los grupos encuestados en estudiante y trabajadores, se encontró una diferencia significativa entre la percepción de los grupos a la intensidad y ofensividad bajo las mismas condiciones (Figura 8). 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

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

influyen la percepción del olor (Van Harreveld, 2001), ya que los estudiantes realizan la visita aleatoriamente y los trabajadores están más habituados al olor.

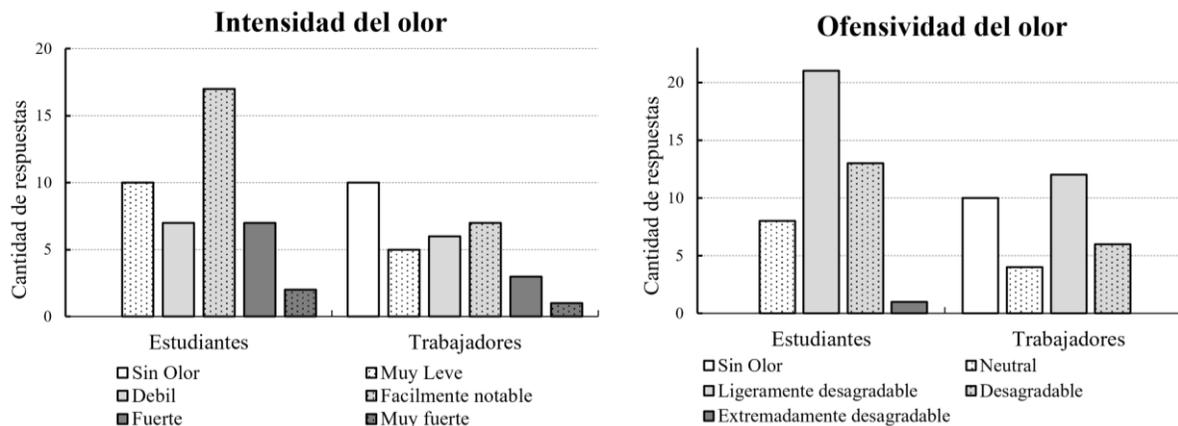


Figura 8. Frecuencia de intensidad (izquierda) y ofensividad (derecha) del olor para los estudiantes y trabajadores.

Nota: Fuente propia de la investigación.

El tono hedónico del olor está relacionado positivamente con la familiaridad del olor (Seo et al, 2008). 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 por parte de los encuestados. A pesar de esta diferencia en percepción de olores, no se recomienda priorizar una perspectiva sobre otra.

Caracterización por medio de ruedas de olor

Los olores de aguas residuales son fuentes de olores complejas y los seres humanos 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). Por esta razón, las ruedas de olores son herramientas útiles para su caracterización o identificación.

Como parte de los productos de la investigación se adaptaron de la literatura ruedas de olor para identificar el olor percibido antes y durante la aplicación de las medidas de mitigación, las respuestas se pueden observar en la Figura 9. 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 odorantes responsables, por lo que las respuestas en la categoría “fecal” pueden deberse a las influencias visuales y el contexto durante la realización de la encuesta.

La disminución de las concentraciones de sulfuro disuelto en el agua de tanque de homogeneización es acompañada por menor frecuencia del grupo de “Azufre” en comparación con línea base. Sin embargo, no se encuentra una relación lineal. 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”.

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

Suffet et al. (2007), menciona que, aunque muchas veces el H₂S se utiliza como sustituto de todos los olores a azufre, su umbral de detección de olores no es tan bajo como el de muchos otros compuestos de azufre en las aguas residuales.

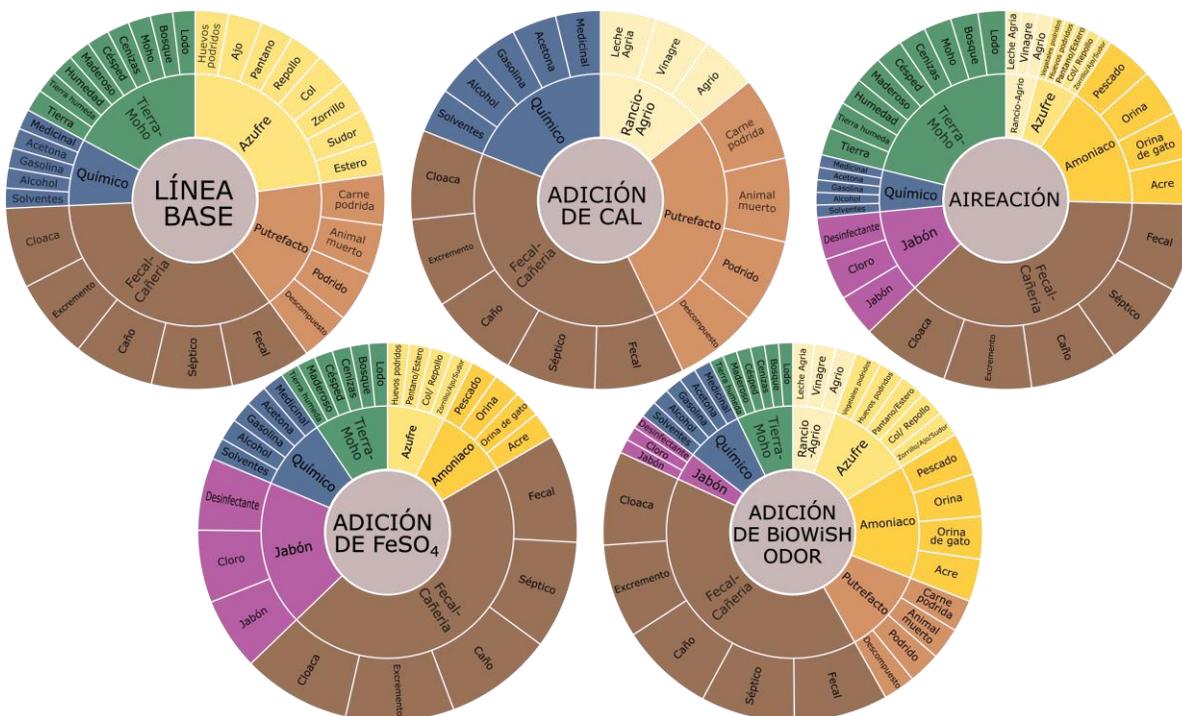


Figura 9. Ruedas de olor específicas a los periodos de mitigación de olores. Nota: Fuente propia de la investigación.

Conclusiones

En el estudio de las condiciones del agua residual cruda, se pudo determinar que el pH, DO, ORP y temperatura no presentaron variaciones significativas a lo largo de los periodos estudiados. Esto permitió comparar los resultados de cada medida aplicada con la línea base de manera precisa y confiable. En la línea base, se observó un régimen anaerobio y reductor, con una alta concentración de sulfuros disueltos y un pH ligeramente ácido. Estas características se atribuyeron a la reducción biológica de sulfato y la fermentación ácida. Según los parámetros pH, ORP y concentración de sulfuros, la eficacia de las medidas de mitigación de olores aplicadas en este estudio se puede organizar en el siguiente orden: aireación, adición de cal, adición de sulfato de hierro y finalmente la adición del producto comercial BiOWiSH® odor.

Respecto a la aplicación de las medidas, el proceso de mantener aireada la unidad homogeneizadora hasta 1 mg/L de DO, aseguró un OPR positivo e indujo un régimen oxidativo y aerobio, lo que llevó a la disminución en la concentración de sulfuros disueltos debido a la inhibición de las bacterias reductoras de sulfato y la oxidación química resultando concentraciones de sulfuros en la unidad menores que las del agua de entrada. Mientras que, en el periodo de adición de cal la concentración de sulfuros debido a la oxidación química del sulfuro se vio disminuida, y sugiere que el aumento del pH generó un desplazamiento del equilibrio hacia la especie HS⁻ reduciendo significativamente la emisión de H₂S. Del mismo

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

modo, con la adición de sulfato de hierro en la unidad se logró bajar las concentraciones residuales cercanas al límite teórico de remoción, ya que el sulfuro precipita en forma de FeS. Durante la adición de BiOWiSH® odor, la disminución de la concentración de sulfuros se le atribuye a un posible grupo de microorganismos presentes en el producto comercial. Sin embargo, se desconoce el principal mecanismo biológico que ocurre en el tanque de homogeneización.

Las encuestas de percepción de olor mostraron que la medida de mitigación de olores mediante aireación logró disminuir la intensidad y ofensividad del olor respecto a la línea base, demostrando su efectividad como medida para mitigar los olores desagradables. Por el contrario, la falta de cambio en la percepción del olor durante los periodos de la adición de cal y de sulfato de hierro indica que ambas medidas no son seguras para la mitigación de los olores producidos en la unidad en estudio. Además, sugiere que los odorantes problemáticos emitidos en la unidad no se limitan únicamente al H₂S, lo que podría requerir enfoques de mitigación adicionales para abordar este problema de manera integral.

Agradecimiento

B.R.C. agradece al personal de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de Costa Rica, Finca 2 por permitir el acceso a sus instalaciones y acompañamiento en el muestreo; y al Grupo PROAMSA por las gestiones administrativas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

Declaración de la contribución de los autores

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo. El porcentaje total de contribución para la conceptualización, preparación y corrección de este artículo fue el siguiente: B.R.C. 50 % y M.L.B.H. 50 %.

Declaración de disponibilidad de los datos

Los datos que respaldan los resultados de este estudio serán puestos a disposición por el autor B.R.C. previa solicitud razonable.

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/>

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

- 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.org/10.2166/wst.2009.872>
- 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), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-1932-y>
- Chen, G. H., van Loosdrecht, M. C., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2020). *Biological wastewater treatment: principles, modeling and design*. London: IWA publishing.
- 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>
- 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, La Libertad, Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/64900>
- García, E. M. y López, J. (1985). *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Granada: Universidad de Granada.
- Environmental, Y. S. I. (2007). ORP management in wastewater as indicator of process efficiency. YSI, Yellow Springs, OH <http://www.ysi.com/media/pdfs/A567-ORP-Management-in-Wastewater-as-an-Indicator-of-Process-Efficiency.pdf> (accessed on 15.05. 23)
- 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>
- Goel, R.K., Flora, J.R.V., Chen, J.P. (2005). *Flow Equalization and Neutralization*. In: Wang, L.K., Hung, Y.T., Shamas, N.K. (eds) *Physicochemical Treatment Processes*. Handbook of Environmental Engineering, vol 3. Humana Press. <https://doi.org/10.1385/1-59259-820-x:021>
- 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>

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

- 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>
- 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>
- 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>
- Kim, H., Lee, H., Choi, E., Choi, I., Shin, T., Im, H., & Ahn, S. (2014). Characterization of odor emission from alternating aerobic and anoxic activated sludge systems using real-time total reduced sulfur analyzer. *Chemosphere*, 117, 394-401. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.08.008>
- 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>
- López, C. M., Buitrón, G., García, H.A. y Cervantes F.J. *Tratamiento biológicos de aguas residuales: Principios, modelación y diseño*. London: IWA <https://doi.org/10.2166/9781780409146>
- 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, Bogotá, Colombia. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/981>
- Metcalf and Eddy. Inc (2003) *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. New York: 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>
- 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>

ESTE DOCUMENTO ES UN PREPRINT.

- 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*. https://amca.mx/memorias/amca2009/articulos/amca2009_75.pdf
- 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>
- Stevdel, R. (2020). The chemical sulfur cycle. En. Piet, N.L. (Ed.), *Environmental Technologies to Treat Sulfur Pollution: principles and engineering* (11-53). London: 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>
- 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>
- 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. <http://hdl.handle.net/10906/80870>
- 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; 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>
- Zhang, L; Schryver, P; Gussemé, 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>
- 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>

This preprint was submitted under the following conditions:

- The authors declare that they are aware that they are solely responsible for the content of the preprint and that the deposit in SciELO Preprints does not mean any commitment on the part of SciELO, except its preservation and dissemination.
- The authors declare that the necessary Terms of Free and Informed Consent of participants or patients in the research were obtained and are described in the manuscript, when applicable.
- The authors declare that the preparation of the manuscript followed the ethical norms of scientific communication.
- The authors declare that the data, applications, and other content underlying the manuscript are referenced.
- The deposited manuscript is in PDF format.
- The authors declare that the research that originated the manuscript followed good ethical practices and that the necessary approvals from research ethics committees, when applicable, are described in the manuscript.
- The authors declare that once a manuscript is posted on the SciELO Preprints server, it can only be taken down on request to the SciELO Preprints server Editorial Secretariat, who will post a retraction notice in its place.
- The authors agree that the approved manuscript will be made available under a [Creative Commons CC-BY](#) license.
- The submitting author declares that the contributions of all authors and conflict of interest statement are included explicitly and in specific sections of the manuscript.
- The authors declare that the manuscript was not deposited and/or previously made available on another preprint server or published by a journal.
- If the manuscript is being reviewed or being prepared for publishing but not yet published by a journal, the authors declare that they have received authorization from the journal to make this deposit.
- The submitting author declares that all authors of the manuscript agree with the submission to SciELO Preprints.