

Evaluación de la carga bacteriológica en el aire de una planta de tratamiento de agua residual tipo wetland: implicaciones en la salud ocupacional

Evaluation of the bacteriological load in the air of a wetland-type wastewater treatment plant: implications for occupational health

Junior Rodolfo Paredes Donis¹, Pedro Saravia Celis¹

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Dirección para recibir correspondencia: juniorodolf@hotmail.com

Recibido: 20/01/2025

Revisión: 20/05/2025

Aceptado: 16/10/2025

Resumen

El estudio evaluó la carga bacteriológica aérea en una planta de tratamiento de aguas residuales tipo wetland con vetiver, ubicada en la Colonia Aurora II, zona 13 de la Ciudad de Guatemala, mediante muestreo pasivo semicualitativo. El objetivo fue identificar áreas con mayor contaminación microbiológica aérea como indicador de riesgo potencial para los operadores. Las muestras se recolectaron con placas Petri expuestas durante 30 minutos, definiéndose siete puntos de muestreo en el canal de rejillas, siete en el tratamiento con vetiver y siete en el efluente, según un análisis de probabilidad binomial. Los resultados mostraron mayores recuentos bacterianos en el tratamiento secundario (272 UFC/placa), seguido del canal de rejillas (156 UFC/placa) y el tratamiento con vetiver (134 UFC/placa). El valor máximo puntual alcanzado fue de 318 UFC/placa en la etapa de efluente. Todos los valores superaron el umbral de referencia de 29 UFC/placa, lo que evidencia una elevada contaminación microbiológica aérea y un posible riesgo para el personal expuesto, considerando las limitaciones del método utilizado.

Palabras claves: Agar, bacterias, cajas petri, carga biológica, medio de cultivo, muestreo biológico, patógeno, probabilidad binomial, unidades formadoras de colonias (U.F.C.).

Abstract

This study evaluated the airborne bacterial load at a wetland-type wastewater treatment plant using vetiver, located in Colonia Aurora II, Zone 13 of Guatemala City, through semi-qualitative passive sampling. The objective was to identify areas with higher airborne microbiological contamination as an indicator of potential risk to operators. Samples were collected using Petri dishes exposed for 30 minutes. Seven sampling points were defined in the screen channel, seven in the vetiver treatment area, and seven in the effluent, based on a binomial probability analysis. The results showed the highest bacterial counts in the secondary treatment area (272 CFU/plate), followed by the screen channel (156 CFU/plate) and the vetiver treatment (134 CFU/plate). A peak value of 318 CFU/plate was recorder in the effluent stage, exceeding the reference threshold. All values exceeded the reference threshold of 29 CFU/plate, indicating high airborne microbiological contamination and a potential risk to exposed personnel, considering the limitations of the method used.

Key words: Agar, bacteria, petri dishes, bioload, culture medium, biological sampling, pathogen, binomial probability, Colony Forming Units (C.F.U.)



Introducción

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales constituyen una infraestructura esencial para la protección de la salud pública y del ambiente; sin embargo, durante su operación y mantenimiento pueden generar riesgos ocupacionales asociados a la exposición a agentes biológicos presentes en el aire.

Las aguas residuales contienen una elevada carga microbiana de origen humano, incluyendo bacterias coliformes, que pueden ser liberadas al ambiente en forma de bioaerosoles durante distintas etapas del proceso de tratamiento (Mara, 1974). Estas instalaciones han sido identificadas históricamente como fuentes significativas de microorganismos transportados por el aire, los cuales pueden dispersarse hacia las áreas de trabajo de los operadores (Crook et al., 1988).

La implementación de sistemas de tratamiento adecuados no solo debe considerar la viabilidad técnica y los costos económicos, sino también los impactos asociados a su construcción, operación y mantenimiento, entre los cuales se incluyen los riesgos para la salud del personal expuesto (Arias & Morales, 2024).

En este contexto, el riesgo biológico se define como la presencia de organismos o sustancias derivadas de estos que pueden representar una amenaza para la salud humana, particularmente cuando la exposición ocurre de manera continua en el lugar de trabajo (Vásquez Rosero, 2019). Al respecto organizaciones internacionales han establecido índices de exposición biológica para evaluar estos riesgos en entornos laborales (American Conference of Governmental Industrial Hygienists [ACGIH], 2022)

Existe una limitada evaluación de riesgos bacteriológicos en plantas de tratamiento regionales, a pesar de que estudios en Ecuador han detectado contaminación biológica aérea en distintas fases del proceso mediante comparaciones con referencias internacionales (Vásquez Rosero, 2019).

De manera similar, Coulson Valdivia y Delgado (2023) evaluó la presencia de agentes bacteriológicos en el aire de ambientes laborales en un laboratorio clínico en Nicaragua, identificando condiciones de exposición potencialmente asociadas a efectos en la salud de los trabajadores.

Otros estudios, como los desarrollados por el Instituto de Salud Pública de Chile, han documentado procedimientos de muestreo microbiológico aéreo mediante el uso de placas Petri con medios de cultivo sólidos en ambientes controlados y de riesgo biológico, resaltando la utilidad de estos métodos para evaluaciones exploratorias de calidad microbiológica del aire (Valenzuela Bravo, 2011).

En Guatemala, investigaciones realizadas en la Universidad de San Carlos han abordado principalmente la contaminación microbiológica del aire por hongos en ambientes de trabajo, reportando concentraciones superiores a 500 unidades formadoras de colonias por metro cúbico en laboratorios universitarios, tanto en espacios interiores como exteriores (Solís Cajas, 2011). Sin embargo, estudios internacionales recientes subrayan la importancia de evaluar simultáneamente ambientes interiores y exteriores para comprender la dinámica de dispersión de los bioaerosoles en entornos urbanos y laborales (Jabeen et al., 2023).

En este contexto la identificación temprana de los riesgos laborales es el primer paso para establecer programas de vigilancia epidemiológica eficaces en sectores de alta exposición a patógenos (Otero Ruiz, 2003).

Ante la ausencia de una normativa nacional específica sobre contaminación microbiológica aérea en ambientes laborales, resulta pertinente utilizar valores de referencia internacionales, como los propuestos por la Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo [EU-OSHA], s. f., a través de la Asociación del Instituto Técnico de Prevención (ITP), los cuales permiten clasificar el grado de contaminación con base en el número de unidades formadoras de colonias detectadas en el aire (Instituto Técnico de Prevención [ITP], 2011).

En este contexto, la pregunta de investigación que guía el presente estudio es: ¿Cuál es el nivel de contaminación microbiológica aérea presente en las diferentes etapas de una planta de tratamiento de aguas residuales tipo wetland con vetiver, y cómo varía entre dichas etapas en función de la carga bacteriológica detectada mediante muestreo aéreo pasivo?

El objetivo del estudio es evaluar de manera exploratoria la carga bacteriológica presente en el aire de distintas etapas del sistema de tratamiento, como un indicador del nivel de contaminación microbiológica aérea y de su potencial implicación para la salud ocupacional del personal encargado de la operación y el mantenimiento del sistema.

Asociación Instituto Técnico de Prevención ITP de la Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el trabajo CEC

La ITP y la Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el trabajo (EU-OSHA, s. f.) son organismos técnicos dedicados a promover la cultura preventiva y garantizar el cumplimiento de las normativas de salud laboral en Europa. Su labor se centra en reducir la siniestralidad, fomentar la capacitación profesional y mitigar el impacto de factores ambientales y laborales que puedan dañar la salud humana, alineándose con el Marco Estratégico de la Comisión Europea 2021-2027.

Bajo este marco preventivo, se analiza la situación crítica de los operadores en plantas de tratamiento de aguas residuales, quienes están expuestos constantemente a riesgos bacteriológicos. El estudio busca identificar estos peligros específicos y proponer soluciones técnicas que mejoren las condiciones de higiene y seguridad, protegiendo la integridad física de los trabajadores en este sector.

Los operadores de las plantas de tratamiento de aguas residuales se encuentran expuestos de manera constante a riesgos bacteriológicos. Ante esta situación, el presente estudio busca identificar y analizar dichos riesgos, así como proponer alternativas de solución orientadas a mejorar las condiciones laborales y proteger la salud de los operadores, contribuyendo así al fortalecimiento de la gestión de seguridad e higiene en este tipo de instalaciones.

Materiales y método

El estudio se realizó en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales tipo wetland con vetiver de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala, ubicada en la Colonia Aurora II, zona 13 de la Ciudad de Guatemala. Se seleccionaron tres puntos representativos del sistema: el canal de rejas, la etapa de tratamiento secundario y la etapa con vetiver,

por ser áreas donde los operadores realizan actividades de operación y mantenimiento.

Preparación del medio de cultivo

Los ensayos microbiológicos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Química y Microbiología Dra. Alba Tabarini Molina, ubicado en el edificio T5 de la Facultad de Ingeniería, zona 12 de la Ciudad de Guatemala. Para la preparación del medio de cultivo se utilizó agar nutritivo, siguiendo las especificaciones del fabricante, disolviendo 20 g de agar por litro de agua destilada.

La mezcla fue homogenizada y sometida a calentamiento mediante baño María hasta su completa disolución y esterilización. Posteriormente, el medio se mantuvo en estado líquido para su vertido aséptico en placas Petri estériles.

Muestreo microbiológico aéreo

El muestreo de bacterias en el aire se realizó mediante un método pasivo de sedimentación, exponiendo placas Petri con medio de cultivo sólido al ambiente. Esta estrategia se fundamenta en principios utilizados en ambientes laborales, los cuales establecen criterios para la selección de puntos representativos y tiempos de exposición (Hernández Calleja, 2003).

En cada punto de muestreo se colocaron las placas a una altura aproximada de 1.0–1.5 m sobre el nivel del suelo, representativa de la zona de respiración de los operadores. Las placas se mantuvieron abiertas durante un periodo de 30 minutos, tras lo cual fueron cerradas, rotuladas y transportadas al laboratorio para su análisis.

Con base en un análisis de probabilidad binomial, se estableció un total de siete placas Petri por punto de muestreo, resultando en 21 muestras en total. Este diseño se adoptó con un enfoque exploratorio y semicualitativo, orientado a identificar diferencias relativas en la carga bacteriológica aérea entre las distintas etapas del sistema.

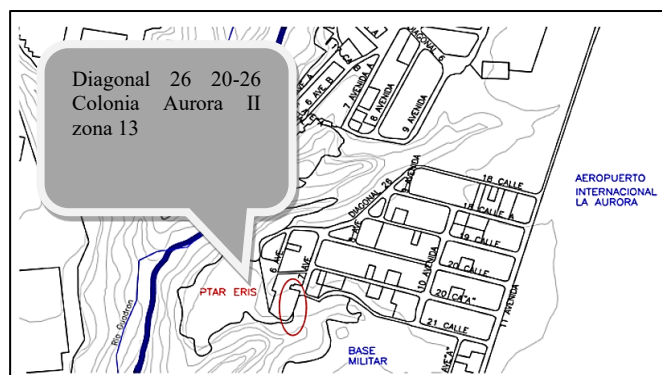
Incubación y conteo de colonias

Las placas expuestas fueron incubadas en una incubadora de laboratorio a una temperatura controlada de 35 ± 2 °C durante un periodo de 48 horas. Finalizado el tiempo de incubación, se realizó el conteo visual de las colonias bacterianas desarrolladas en cada placa, expresando los resultados como unidades formadoras de colonias por placa (UFC/placa).

Descripción del sitio de estudio

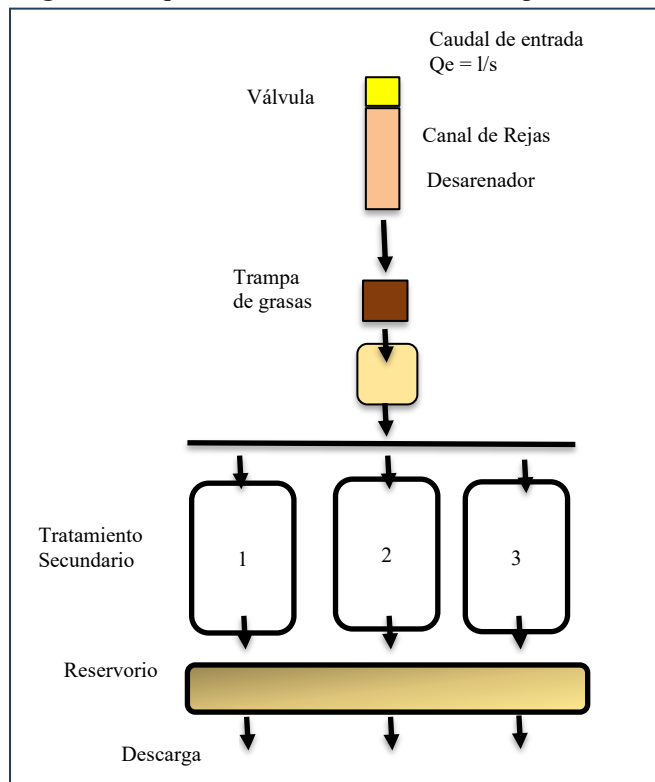
El área de estudio se localiza en la planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria ERIS, ubicada en Diagonal 26 20-56, colonia Aurora II zona 13 de la Ciudad de Guatemala a una latitud de $14^{\circ}34'41.98''$ al norte y longitud de $90^{\circ}32'11.32''$ al oeste (ver figura 1).

Figura 1. Localización del punto de muestreo.



En la figura siguiente se muestra la distribución de unidades de la planta de tratamiento utilizada en el estudio.

Figura 2. Esquema sistema de tratamiento tipo Wetland



Control de calidad

Durante el proceso de muestreo, transporte e incubación se mantuvieron condiciones asépticas con el fin de evitar contaminaciones externas y minimizar alteraciones en las muestras. Asimismo, se consideraron las limitaciones inherentes al método de muestreo pasivo, el cual no permite determinar un volumen exacto de aire muestreado, por lo que los resultados obtenidos se interpretan como indicadores relativos de contaminación microbiológica aérea.

Determinación del número de muestras

Se tomó para el análisis estadístico una distribución de probabilidad binomial debido a que es una distribución de probabilidad de variables discretas que cuenta el número de éxitos en una frecuencia de “n” ensayos independientes entre sí.

De acuerdo con la distribución de probabilidad binomial, se requiere como mínimo de 7 muestras de cada etapa para probar la hipótesis que la probabilidad de contaminación por bacterias no es un evento aleatorio, a un nivel de significancia de 0.05 (α).

Todo esto es por cada una de las tres etapas de estudio del agua de la planta de tratamiento. Es decir que serían 7 muestras de canal de rejas, 7 muestras del tratamiento primario y 7 muestras en el tratamiento secundario (efluente).

Para determinar que el agua de las tres etapas presenta una probabilidad mayor de 0.50 (50 %) de estar contaminada por bacterias, se hizo una prueba de hipótesis binomial según se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 1. Resultados de prueba de hipótesis binomial

Ho:	$p = 0.50$	(La presencia de contaminantes es un evento aleatorio)
Ha:	$p > 0.50$	(La presencia de contaminantes no es un evento aleatorio)

Si el evento no es aleatorio, significa que la contaminación por bacterias se da en más del 50 % de las veces y que, por lo tanto, es un riesgo.

En este caso se justifica que 7 muestras son suficientes para que con un hallazgo positivo (presencia de bacterias contaminantes) se rechace Ho a un nivel de significancia de 0.05.

Procedimiento estadístico

Por ser un estudio sin antecedentes en la zona, se asume una probabilidad de incidencia de los resultados de 0,5 (verdaderamente aleatorio).

Promedio y desviación estándar

Se realizó el promedio y desviación estándar utilizando los datos obtenidos en las etapas de canal de rejillas, tratamiento vetiver y el tratamiento secundario.

Localización y muestreo

La recolección de muestras se realizó en la planta experimental de ERIS, específicamente donde se ubica el wetland. Se seleccionaron tres puntos estratégicos, siendo estos el canal de rejillas, el sistema de tratamiento con vetiver y el tratamiento secundario.

Para las determinaciones de microorganismos objeto de esta investigación se empleó el método de sedimentación en placa, exponiendo cajas Petri durante un período de 30 minutos en cada punto. Finalizado el tiempo de exposición las muestras fueron selladas y transportadas al laboratorio bajo estrictos protocolos de bioseguridad para evitar contaminación externa o su deterioro.

Los análisis se realizaron en el laboratorio de Química y Microbiología de la Facultad de Ingeniería (USAC). El medio de cultivo se preparó mediante disolución de 9g de agar en 450 ml de agua destilada. La mezcla se homogeneizó y esterilizó mediante calor en baño María durante 30 minutos. Posteriormente se dosificaron 10.50 ml del medio en tubos de ensayo estériles. Para la siembra se utilizaron cajas Petri estériles, integrando 10.5 ml de agar y 1 ml de muestra por placa.

Siguiendo el diseño estadístico definido, se prepararon siete réplicas por cada punto de muestreo. Las placas se incubaron a temperatura controlada por un lapso de 48 horas; tras dicho período se procedió al recuento de unidades formadoras de colonias (UFC).

En las figuras 3 y 4 se ilustran los puntos de muestreo utilizados para el estudio.

Figura 3. Punto de toma de muestras en canal de rejillas.

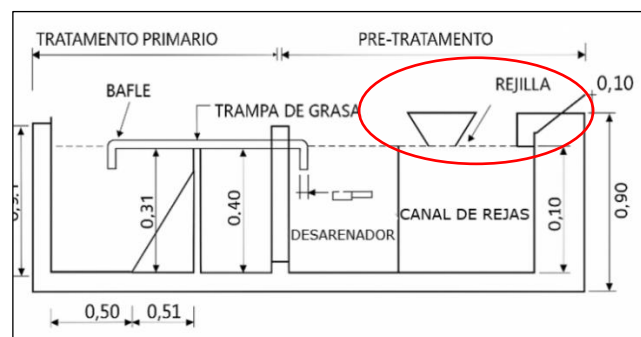
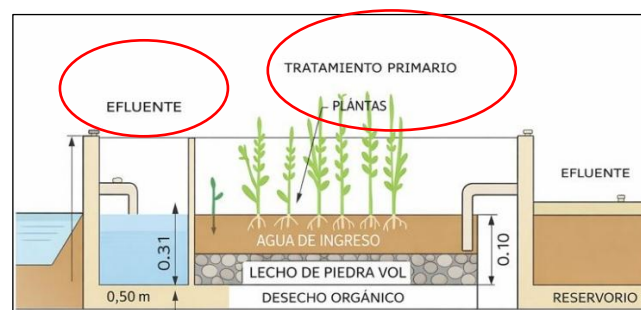


Figura 4. Punto de toma de muestras en humedal.



Para determinar el grado de contaminación con base a la cantidad de colonias de bacterias detectadas en las muestras realizadas en el afluente, tratamiento y efluente de la planta de tratamiento, se tomarán los parámetros indicados por la Asociación Instituto Técnico de Prevención ITP de la Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el trabajo CEC indicados en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de conteo y carga bacteriológica.

Número de colonias	Contaje	Carga Biológica
1	>200 U.F.C./placa	Carga contaminante muy baja
6	>200 a 500 U.F.C./placa	Carga contaminante baja
16	>500 a 1000 U.F.C./placa	Carga contaminante alta
29	> a 1000 U.F.C./placa	Carga contaminante muy alta

Fuente: Asociación Instituto Técnico de Prevención ITP de la Agencia Europea para la Salud en el trabajo CEC.

Resultados

En la Tabla 3 se presentan los resultados del conteo de colonias bacterianas obtenidos mediante muestreo microbiológico aéreo pasivo, expresados como unidades formadoras de colonias por placa (UFC/placa), correspondientes al canal de rejillas de la planta de tratamiento tipo wetland. Los valores registrados oscilaron entre 64 y 211 UFC/placa, con una variabilidad moderada entre las muestras analizadas.

La Tabla 4 muestra los resultados correspondientes a la etapa de tratamiento con vetiver, donde los conteos de colonias bacterianas variaron entre 105 y 168 UFC/placa. En comparación con el canal de rejillas, esta etapa presentó valores promedio ligeramente menores, así como una menor dispersión de los datos.

En la Tabla 5 se presentan los resultados del tratamiento secundario, donde se registraron los mayores conteos de colonias bacterianas del sistema evaluado, con valores entre 130 y 318 UFC/placa, evidenciando una mayor presencia relativa de bacterias en el aire en esta etapa del proceso.

La Tabla 6 permite comparar de forma directa los conteos obtenidos en las tres etapas del sistema, observándose una tendencia consistente a mayores valores en el tratamiento secundario, seguido del canal de rejillas y, finalmente, de la etapa con vetiver.

En la Tabla 7 se presentan los valores promedio y la desviación estándar de los conteos bacterianos. El tratamiento secundario presentó el mayor promedio de colonias (271.86 ± 61.55 UFC/placa), seguido del canal de rejillas (155.86 ± 46.85 UFC/placa) y del tratamiento con vetiver (134.29 ± 19.40 UFC/placa). Estos resultados evidencian diferencias relativas en la carga bacteriológica aérea entre las etapas evaluadas.

Los conteos obtenidos en todas las etapas superan el valor de referencia cualitativo de 29 UFC/placa, reportado en la literatura internacional para la clasificación del grado de contaminación microbiológica aérea en ambientes laborales. No obstante, debido a las limitaciones inherentes al método de muestreo pasivo, los resultados se interpretan de manera comparativa y exploratoria, sin estimar concentraciones volumétricas de bacterias en el aire.

Las gráficas de distribución elaboradas para cada etapa muestran una dispersión de los datos consistente con la variabilidad observada en los conteos, sin

evidenciar valores atípicos extremos que invaliden los resultados obtenidos (ver gráficas 1 y 2).

Tabla 3. Carga biológica en canal de rejillas de planta de tratamiento tipo Wetland.

No.	Canal de rejillas U.F.C./placa
1	211
2	194
3	198
4	140
5	64
6	139
7	145

Tabla 4. Carga biológica en tratamiento tipo vetiver de planta de tratamiento tipo Wetland.

No.	Tratamiento Vetiver U.F.C./placa
1	168
2	147
3	125
4	134
5	144
6	105
7	117

Tabla 5. Carga biológica en tratamiento secundario de la planta de tratamiento tipo Wetland.

No.	Tratamiento secundario U.F.C./placa
1	297
2	290
3	303
4	250
5	318
6	315
7	130

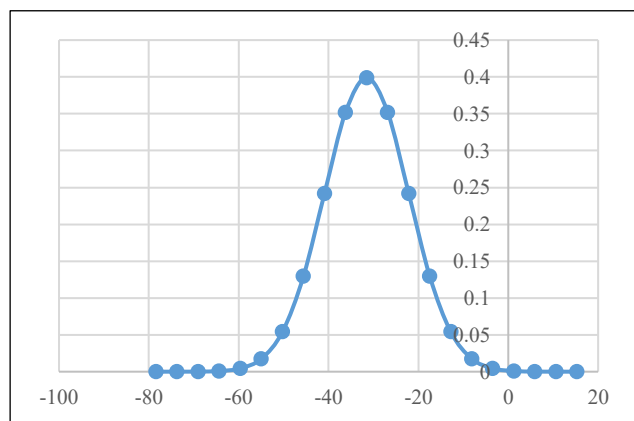
Tabla 6. Contaje de colonias por placa Petri de bacterias en planta de tratamiento tipo humedal con vetiver.

No.	Canal de rejillas	Tratamiento Vetiver	Tratamiento secundario
1	211	168	297
2	194	147	290
3	198	125	303
4	140	134	250
5	64	144	318
6	139	105	315
7	145	117	130

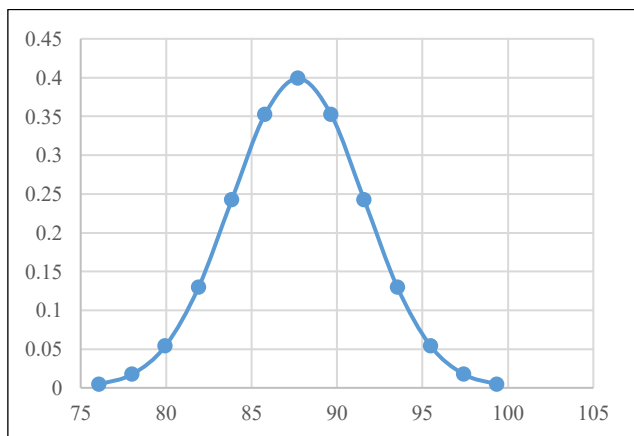
Tabla 7. Tabla de promedio y desviación estándar.

Unidad	Promedio Número de Colonias	Desviación Estándar Número de Colonias
Canal de rejás	155.857143	46.84756
Vetiver	134.285714	19.40334497
Tratamiento secundario	271.857143	61.55468781

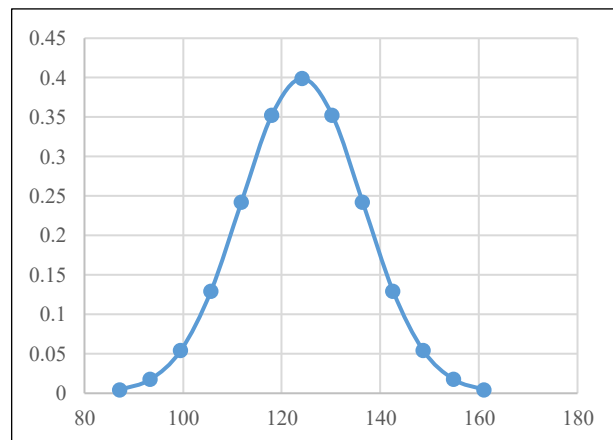
Gráfica 1. Gráfica de Distribución de datos para etapa de canal de rejás.



Gráfica 2. Gráfica de Distribución de datos para etapa de tratamiento vetiver.



Gráfica 3. Gráfica de distribución de datos para etapa de tratamiento secundario.



Discusión de resultados

Los resultados muestran que todas las etapas del sistema presentaron concentraciones de bacterias superiores a 29 U.F.C., límite establecido por la Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo (Instituto Técnico de Prevención [ITP], 2011). Esto confirma un alto nivel de contaminación en el aire de la planta.

La mayor concentración se detectó en el tratamiento secundario (318 U.F.C.), seguido del canal de rejás (211 U.F.C.) y el tratamiento con vetiver (168 U.F.C.).

Estos valores reflejan un riesgo significativo para los operadores. Hallazgos similares se han reportado en plantas de tratamiento de aguas residuales en Polonia, donde se observaron niveles elevados de bacterias anaerobias en ambientes de trabajo (Cyprowski et al., 2018). De forma similar otros estudios han demostrado que las emisiones de bioaerosoles no solo son elevadas, sino que presentan una composición microbiana compleja que debe ser monitoreada para prevenir riesgos a la salud a largo plazo (Li et al., 2024).

Asimismo, en un estudio realizado en China se identificó que las emisiones bacterianas en plantas de tratamiento representan un riesgo para la salud, especialmente en zonas de turbulencia y aireación (Yang et al., 2019). De manera consistente, Gholami et al. (2021) reportaron cargas bacterianas y fúngicas elevadas en diferentes áreas de plantas de tratamiento, tanto con muestreos pasivos como activos.

Investigaciones más recientes confirman esta tendencia. Li y colaboradores (2024) encontraron que la emisión de bioaerosoles varía según la estación del año, pero en todas las condiciones se superan los valores de referencia internacionales. Del mismo modo, Møller y colaboradores (2022) evidenciaron que la exposición a bioaerosoles en operadores está asociada con incrementos en marcadores inflamatorios en sangre, lo que refuerza el riesgo sanitario.

Estos resultados indican que la exposición en plantas de tratamiento no es un evento aleatorio, sino un riesgo constante para los trabajadores. La evidencia internacional coincide con los datos obtenidos en este estudio, lo que demuestra la necesidad de reforzar medidas de bioseguridad y control en los procesos de operación y mantenimiento.

De acuerdo al análisis estadístico, se obtuvo por medio de la probabilidad binomial para el canal de rejillas un promedio de 156 colonias de bacterias, con una desviación estándar de 46.84 para el tratamiento tipo Vetiver un promedio de 135 colonias, con una desviación estándar de 19.40 y para el canal de rejillas, un promedio de 272 colonias de bacterias, con una desviación estándar de 61.55 las cuales fueron interpretadas por la gráfica de la distribución binomial con forma de campana.

En la etapa de canal de rejillas (211 U.F.C.) y tratamiento con vetiver (168 U.F.C.) mostraron niveles superiores al límite de 29 U.F.C. establecido por la normativa europea. Por lo que se concluye que ambas etapas del sistema de tratamiento de agua residual presentan una alta carga bacteriológica en el aire que pueden afectar a los operadores del sistema de tratamiento.

La mayor concentración bacteriológica registrada en la etapa del efluente (318 U.F.C.) indica que esta es el área de mayor riesgo de exposición bacteriológica en el aire del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Este resultado coincide con lo reportado en otros estudios, donde las áreas con mayor turbulencia o manipulación del agua residual presentaron las cargas bacterianas más elevadas (Cyprowski et al., 2018; Yang et al., 2019).

Conclusiones

El estudio permitió evaluar de manera exploratoria la contaminación microbiológica aérea en distintas etapas de una planta de tratamiento de aguas residuales tipo wetland con vetiver, mediante un método de muestreo aéreo pasivo de carácter semicualitativo. Los resultados evidenciaron diferencias relativas en la carga bacteriológica entre las etapas del sistema, identificándose el tratamiento secundario como la zona con mayor presencia de colonias bacterianas en el aire, seguido del canal de rejillas y de la etapa con vetiver.

Los conteos obtenidos en todas las áreas evaluadas superaron los valores de referencia cualitativos reportados en la literatura internacional, lo que sugiere la presencia de niveles elevados de contaminación microbiológica aérea en el entorno de trabajo. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas realizadas en plantas de tratamiento de aguas residuales y otros ambientes laborales con exposición a agentes biológicos (Gholami et al., 2021; Li et al., 2024).

Si bien el método empleado no permite establecer relaciones directas con efectos en la salud, los resultados constituyen un indicador de exposición potencial. Investigaciones recientes han comenzado a vincular estas exposiciones en trabajadores de aguas residuales con alteraciones en marcadores inflamatorios y pulmonares en suero, lo que refuerza la urgencia de implementar medidas preventivas (Møller et al., 2025).

Con base en los hallazgos del estudio, se recomienda fortalecer las medidas preventivas y de control, tales como el uso adecuado de equipo de protección personal (mascarillas, guantes), la mejora de las condiciones de ventilación en áreas críticas, la implementación de protocolos de limpieza y desinfección, así como la organización de las actividades de operación y mantenimiento para minimizar la exposición prolongada en las etapas con mayor carga bacteriológica.

Asimismo, se sugiere desarrollar estudios futuros con metodologías activas y análisis complementarios que permitan profundizar en la evaluación del riesgo biológico en este tipo de instalaciones.

Agradecimientos

El autor desea patentizar su agradecimiento al MSc. Ing. Pedro Saravia Celis, por brindar su apoyo como asesor, al MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre y al MSc. Ing. Julián Duarte Jiménez, por el tiempo dedicado y la colaboración brindada para realizar este

trabajo de investigación. Al Licenciado Oscar Federico Nave del Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas (USAC) por su apoyo con el análisis estadístico. Al señor Tereso Pérez (QEPD) encargado de la PTAR Aurora II y a EMPAGUA por la oportunidad de continuar con mis estudios de maestría en Ingeniería Sanitaria.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado con recursos propios del autor y del Laboratorio Dra. Tabarini Molina, ubicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

Como citar este documento

Paredes Donis, J. & Saravia Celis, P. (2025). Evaluación de la carga bacteriológica en el aire de una planta de tratamiento de agua Residual tipo wetland: implicaciones en la salud ocupacional. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 20(1), Artículo 1719. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v20i1.1719>

Consentimiento informado

No aplica.

Contribuciones de autor

Diseño, trabajo de campo y laboratorio, recolección de datos, análisis de datos, elaboración del documento: J.R.P.D

Diseño y supervisión de investigación y revisión del manuscrito: P.S.C.

Referencias

American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (2022). 2022 TLVs and BEIs: Based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices. www.acgih.org

Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo. (s. f.). Misión y visión. <https://osha.europa.eu/es/about-eu-osha/what-we-do>

Arias, A., & Morales, M. (2024). Sistemas descentralizados como estrategia combinada de tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos. [Aguasresiduales.info. https://www.aguasresiduales.info/revista/articulos/sistemas-descentralizados-como-estrategia-combinada-de-tratamiento-de-aguas-residuales-y-recuperacion-de-recursos](https://www.aguasresiduales.info/revista/articulos/sistemas-descentralizados-como-estrategia-combinada-de-tratamiento-de-aguas-residuales-y-recuperacion-de-recursos)

Coulson Valdivia, G., & Delgado, O. (2023). Riesgos biológicos asociados a las condiciones laborales en el personal que labora en el laboratorio clínico BIOMEDIC, en la ciudad de Granada, Nicaragua, enero 2023. *Revista Científica de Estelí*, 12(47), 40–52. <https://doi.org/10.5377/farem.v12i47.16855>

Crook, B., Bardos, P. V., & Lacey, J. (1988). Domestic waste composting plants as sources of airborne microorganisms. *Compost Production, Quality and Use* (pp. 63–71). Elsevier Applied Science.

Mara, D. (1974). *Bacteriology for sanitary engineers*. Churchill Livingstone.

Hernández Calleja, A. (2003). NTP 608: Agentes biológicos: Planificación de la medición. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo <https://www.insst.es/documentacion>.

Instituto Técnico de Prevención. (2011). Exposición a agentes biológicos en el entorno laboral. *Prevención, Trabajo y Salud*, (61), 20–21.

Otero Ruiz, J. G. (2003). *Riesgos laborales del personal sanitario*. McGraw-Hill.

Solís Cajas, E. R. (2011). Estudio micológico del aire en áreas ocupacionales y exteriores del laboratorio de investigación en productos naturales ubicados en el edificio T-10 en la Ciudad Universitaria en zona 12 y el laboratorio ubicado en la zona 1 del centro de información y asesoría toxicológica de la Facultad de Ciencias y Farmacia. [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio de la Biblioteca Central de la USAC. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_3102.pdf

Valenzuela Bravo, M. T. (2011). Procedimiento: Muestreo microbiológico en el aire (PRT-712.02-001). Instituto de Salud Pública de Chile. www.ispch.cl

- Vásquez Rosero, E. J. (2019). Diseño del sistema de seguridad y salud ocupacional para la planta de tratamiento de aguas residuales de Ibarra de la EMAPA-I [Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital UTN. <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/9589/2/04%20IND%20189%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Cyprowski, M., Stobnicka-Kupiec, A., Ławniczek-Wałczyk, A., Bakal-Kijek, A., Golofit-Szymczak, M., & Górny, R. (2018). Anaerobic bacteria in wastewater treatment plant. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 1(91), 571–579. <https://doi.org/10.1007/s00420-018-1307-6>
- Yang, K., Li, L., Wang, Y., Xue, S., Han, Y., Liu, J., & Gao, G. (2019). Airborne bacteria in a wastewater treatment plant: Emission characterization, source analysis and health risk assessment. *Water Research*, 1(149), 596-606. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.027>
- Møller, S. A., Frederiksen, M. W., Rasmussen, P. U., Østergaard, S. K., Nielsen, J. L., & Madsen, A. M. (2025). Characterization of bioaerosol exposures in wastewater treatment plant workers and serum levels of lung and inflammatory markers. *Journal of Hazardous Materials*, 487, Artículo 137254. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137254>
- Jabeen, R., Kizhisseri, M. I., Mayanaik, S. N., & Mohamed, M. M. (2023). Bioaerosol assessment in indoor and outdoor environments: A case study from India. *Scientific Reports*, 13, Artículo 18066. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44315-z>
- Li, Y., Liu, X., Dong, Y., Wang, Y., Zhang, S., Xu, Z., & Yang, Q. (2024). Characteristics of bioaerosol emissions from a municipal wastewater treatment plant: Health risk assessment and microbial composition. *Science of the Total Environment*, 934, Artículo 173096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173096>