



DOI: <https://doi.org/10.46296/yc.v9i16.0577>

EFICIENCIA DE BIOBACTERPLUS AR EN LA BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

EFFICIENCY OF BIOBACTERPLUS AR IN THE BIOREMEDIATION OF DOMESTIC WASTEWATER

Cedeño-Quíñonez Carlos Abel ¹; Pincay-Cantos María Fernanda ²

¹ Escuela Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Calceta, Ecuador. Correo: carlos_cedeno_mga@espam.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-3944-9706>

² Escuela Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Calceta, Ecuador. Correo: maria.pincay@espam.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8431-4418>

Resumen

La remediación microbiana para el tratamiento del agua de descarga resulta una alternativa prometedora y viable. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de Biobacterplus AR, un bioinoculante comercial, para la biorremediación de aguas residuales domésticas. El experimento se realizó en dos plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) y los tratamientos correspondieron a: T1 (Control) y T2 (Biobacterplus AR). Se llevó a cabo el ensayo de bioaumentación (T2) durante 90 días para determinar el potencial depurativo de contaminantes del consorcio microbiano del inoculante analizando parámetros físico-químicos y biológicos que incluyen: DBO5, DQO, ST, coliformes fecales, sulfatos, tensoactivos, aceites y grasas, fósforo total y nitrógeno amoniacal, durante el ensayo se realizaron además monitoreos del pH, CE y TDS para controlar el estado del microambiente dentro del licor de la mezcla de cada PTAR. Los resultados muestran que la eficiencia de eliminación de contaminantes (EE%) con el bioaumentación (T2) fue significativamente mejor ($p < 0.05$) al control (T1), registrando una depuración mayor al 90% para todos los parámetros probados. Una contribución importante es que el sinergismo de los perfiles genotípicos microbianos empleados y su forma de aplicación consiguieron cumplir los requisitos de calidad, del agua de descarga, estipulados en la norma ambiental ecuatoriana.

Palabras claves: planta de tratamiento doméstica, biobacterplus AR, bioaumentación, parámetros microbiológicos, aguas residuales.

Abstract

Microbial remediation for the treatment of discharge water results in a promising and viable alternative. The objective of this research was to evaluate the efficiency of Biobacterplus AR, a commercial bioinoculant, for the biorremediation of domestical wastewater. This experiment was carried out at two wastewater treatment plants (WWTPs) and the treatments corresponded to: T1 (control) and T2 (Biobacterplus AR). The bioaugmentation (T2) test was carried out for 90 days to determinate the pollutant scavenging potential of the microbial consortium of the inoculant analyzing physical-chemical and biological parameters that includes: DBO5, DQO, ST, fecal coliforms, sulfates, surfactants, oils and fats, total phosphorus and amoniacal nitrogen, during the test monitoring of pH, CE and TDS were also carried out to control the state of the microenvironment within the liquor of the mixture of each WWTPs. The results show that the contaminant removal efficiency (RE %) with the bioaugmentation (T2) was significantly better ($p < 0.05$) than the control (T1), registering at purification greater than 90 % for all the parameters tested. An important contribution is that the synergism of the microbial genotypic profiles used and its form of application managed to fulfill the quality requirements of discharge water stipulated in the ecuadorian environmental standard.

Keywords: wateswater treatment plant, biobacterplus AR, bioaugmentation, microbiologicals parameters.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 20 de mayo de 2024.

Fecha de aceptación: 11 de julio de 2024.

Fecha de publicación: 10 de enero de 2025.



1. Introducción

El agua es considerada como uno de los bienes más preciados para la vida, cuya calidad puede verse alterada fácilmente impidiendo su utilización (Córdoba et al., 2010). La fracción líquida de residuos sólidos y líquidos provenientes de una comunidad se denomina aguas residuales. La descarga de estas sin tratar disminuye la calidad del cauce receptor y representa un peligro inminente para la salud, a causa de la contaminación fecal humana existente considerada de mayor riesgo que las fuentes animales de contaminación fecal (Soller et al., 2010).

En la actualidad, la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) es empleada para tratar sistemas de alcantarillado sanitarios, no sanitarios o combinados (Carbotecnia, 2023). A pesar de ser un sistema diseñado para una óptima biodegradación, se ha detectado que dicho proceso de remoción de contaminantes no es lo suficientemente eficaz (Nasamues y Prato, 2021). El problema radica en la fragilidad del microambiente dentro de la PTAR que es fácilmente

alterado por causas tanto internas como microflora no bacteriana (ejm. bacteriófagos) (Ariyadasa et al., 2023), y externas como defectos estructurales (Nasamues y Prato, 2021). Cuando el tratamiento del contaminante no alcanza un porcentaje de eliminación ideal por microorganismos nativos del ambiente, lo recomendable es la aplicación de otras técnicas de remediación para mejorar el proceso de descontaminación y que cumpla con la normativa ambiental del país.

El uso de microorganismos representa una estrategia frecuente empleada para el tratamiento de la contaminación en aguas residuales de diversa índole. La bioaumentación comprende una tecnología de biorremediación in situ basada en la adición de microorganismos eficientes exógenos para tratar ambientes con contaminación severa y ha sido empleada para la restauración de ecosistemas hídricos y terrestres arrojando exitosos resultados (Oruganti et al., 2022), por lo que resulta una opción factible y rentable para solventar el problema de la PTAR.



Las especies bacterianas principalmente del género *Pseudomona* spp, Actinomicetos spp y algunos hongos son poseedoras de un atractivo potencial degradador de contaminantes de aguas residuales como sulfuros, nitrógeno, fósforo, compuestos orgánicos y materia orgánica (Pinzón-Junca, 2019), quienes son aprovechados como fuente de alimentación por las mismas siendo en última instancia disueltas en partículas más pequeñas e inocuas. Otras especies bacterianas del género *Lactobacillus* spp y *Bacillus* spp, son también empleadas para la remediación de aguas por su destacada capacidad innata bactericida que inhibe el crecimiento de colonias patógenas segregando compuestos denominados “bacteriocinas” capaces de perforar la pared celular del patógeno acabando con el ciclo vital del mismo (Sharma et al., 2023; Oruganti et al., 2022).

Basándonos en lo expuesto anteriormente, en Ecuador se ha desarrollado un bioinoculante comercial en la empresa SERVIPEC denominado Biobacterplus AR que está conformado por un consorcio

microbiano de cepas bacterianas del género: *Bacillus* spp y *Pseudomonas* spp; y cepas fúngicas del género: *Trichoderma* spp y *Saccharomyces* sp inmersas en un vehículo sólido a base de sustrato vegetal y orgánico, responsable del mantenimiento genético estable y viable del cultivo mixto. Su composición comprende especies de los géneros mencionados seleccionados en función a sus atractivas capacidades de degradación de contaminantes orgánicos, alta adaptabilidad a ambientes adversos, compatibilidad y comportamiento competitivo frente a bacterias patógenas nativas presentes en aguas de descarga muy estudiados (Sharma et al., 2023; Clough et al., 2022; Pinzón-Junca, 2019). El bioinoculante contiene microorganismos beneficiosos, no genéticamente modificados, libres de toxicidad y su presentación es una pastilla sólida en forma de cubo color verde.

Por ende, el objetivo de esta investigación fue explorar el potencial de biorremediación de Biobacterplus AR como vía para mejorar el proceso de remoción de contaminantes dentro de una planta de tratamiento problema, en aras de

proponerlo como una alternativa potencial auxiliar que permita al efluente cumplir con la normativa ambiental del país.

2. Metodología

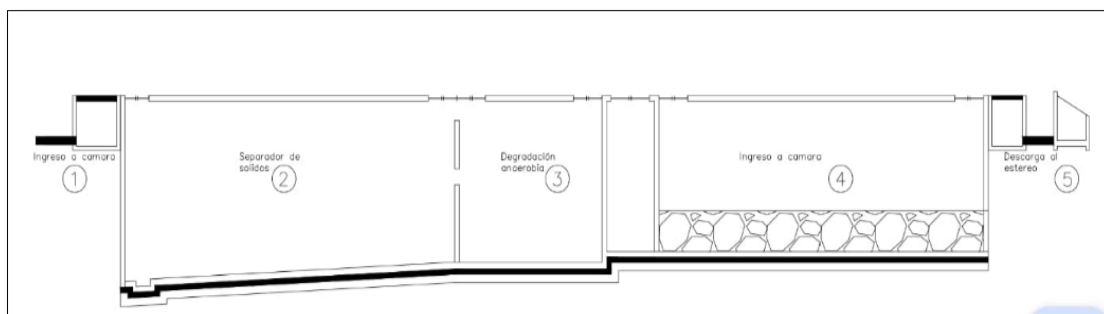
2.1 Área de estudio

El experimento se llevó a cabo en dos plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) ubicadas en la ciudad de Santo Domingo de los Colorados. La primera perteneciente a la urbanización “Las orquídeas” ($0^{\circ}14'21.2''\text{S}$ $79^{\circ}12'16.5''\text{W}$) y la otra situada en la urbanización “Jardines del Bombolí” ($0^{\circ}14'25.5''\text{S}$ $79^{\circ}11'48.6''\text{W}$); correspondientes al control y al tratamiento por bioaumento (Biobacterplus AR), respectivamente.

2.2 Diseño y operación de la PTAR

El efecto del bioaumento y control se investigaron en dos plantas de tratamiento compuestas cada una de un sistema con dos módulos estructurales: un separador de sólidos y la planta que está constituida por tres cámaras. El tratamiento del agua residual (AR) en ellas incluye un conjunto de cinco operaciones unitarias: retención de sólidos mayores, degradación anaerobia con separación de grasas (Primera cámara), degradación aerobia (Segunda cámara), decantación secundaria (Tercera cámara) y descarga directa al río (Figura 1). Cada PTAR constó con un dimensionamiento estructural de 6m de largo x 4m de ancho x 3m de profundidad con capacidad para una población media estimada de 300 hab. que recepta un caudal medio estimado de 0.95 l/s y de salida 120 l/s.

Figura 1. Acotaciones estructurales del sistema de tratamiento de aguas residuales



Nota. En la imagen se visualiza dos módulos: separador de sólidos (1) y la planta de tratamiento. Esta última con sus tres cámaras: anaerobia (2), aerobia de lodos activados (3) y decantación secundaria (4). El punto 5 constituye la descarga directa del efluente tratado.



2.3 Ensayo de bioaumentación

Los bioensayos se realizaron a una temperatura entre los 25 °C y 27 °C. Los tratamientos correspondieron a: T1 (control) y T2 (Bioaumento). Para el T2, se usó un solo biocubo de Biobacterplus AR, el mismo que fue inoculado dentro de la cámara anaerobia de la PTAR correspondiente, en donde quedó sumergido a 15 cm de la superficie del afluente (Agua residual de ingreso). Para lograr esta suspensión, el bioinoculante fue amarrado con una piola de composición simple y atado a un extremo externo de la planta con la intención de crear un aumento en el tiempo de retención celular (TRC) de las bacterias exógenas adicionadas en el agua residual para garantizar una mayor depuración biológica de nutrientes.

2.4 Estudio de la biorremediación

El estudio de biorremediación se realizó en dos etapas llevadas a cabo simultáneamente desde el inicio del tratamiento hasta su finalización en un período de 90 días. Las cuales correspondieron a:

Primera etapa: se realizó la medición del pH, conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos (TDS) para controlar el estado del proceso de biorremediación in situ. Para ello, se recolectaron 500 mL de efluente en el punto de descarga de ambas PTAR y se efectuaron las respectivas mediciones con ayuda del equipo paramétrico Hanna Combo model HI98129. Esta actividad se realizó cada 15 días post primera inoculación durante los 90 días de estudio para monitorear el mantenimiento de un sistema biológico activo en ambos tratamientos.

Segunda etapa: Para evaluar el potencial de remoción del bioaumento protagonizado por Biobacterplus AR, se determinaron los niveles tanto iniciales (afluente) como residuales (CR) del efluente tratado en tiempos de exposición de 7, 15, 30, 60 y 90 días para DQO, DBO5, sólido totales (ST) y coliformes fecales mientras que los correspondientes a grasas y aceites tensoactivos, sulfuros, fosforo y nitrógeno amoniacal se midieron a los 90 días del tratamiento, considerados secundarios en el estudio, pero no menos importantes,

y se compararon con los datos registrados del control. La eficiencia de eliminación (EE%) se calculó a partir de la concentración residual de cada parámetro para determinar la efectividad del proceso de acuerdo con la siguiente expresión matemática:

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia de eliminación (EE\%)} \\ = \frac{Co - CR}{Co} \times 100 \end{aligned}$$

Donde Co = concentración inicial del contaminante (afluente), CR = concentración residual de contaminante en cada tiempo de exposición (efluente).

2.5 Recolección y muestreo

El procedimiento de toma y colecta de muestras, para todos los parámetros, fue realizada acorde a la estipulado en la normativa estándar NTE INEC 2176:2013. Todos los datos obtenidos del T1 y T2 fueron registrados y posteriormente confrontados con los límites permisibles de descarga establecidos por la ley ambiental ecuatoriana: Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, TULSMA VI, Anexo 1, tabla 2 (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica, 2017) para un seguro y

responsable vertimiento de aguas residuales al río “Nila” (Cuerpo Receptor de la PTAR con el biaumento).

2.6 Caracterización de AR

Las AR correspondientes al T1 y T2 fueron caracterizadas antes y después del tratamiento. Los análisis físico-químicos y microbiológicos de las muestras recolectadas de agua cruda (afluente) y tratada (efluente) en la segunda etapa siguieron fueron analizadas por parte del laboratorio acreditado LABMOS S. A siguiendo los métodos: 5220-D PEE-LABMOS-05 (DQO), 5210-B PEE-LABMOS-02 (DBO), 2540-D PEE-LABMOS-04 (Sólidos Suspendidos Totales), 2540-B PEE-LABMOS-06 (Sólidos Totales), HACH 10248 PEE-LABMOS-17 (Sulfatos), HACH 8028 PEE-LABMOS-09 (Tensoactivos), 5520-A (Aceites y grasas), 9221-B (Coliformes fecales), 4500-P (Fósforo Total) y 4500-N (Nitrógeno amoniacal).

2.7 Análisis estadístico

Para evaluar la eficiencia de biorremediación mediado por las bacterias autóctonas del control (T1) vs Biobacterplus AR (T2), con los



parámetros de la segunda etapa se probó la normalidad de la diversidad de los datos mediante el estadístico de Shapiro-Wilk, posteriormente, se verificó la homogeneidad de las varianzas aplicando la prueba de Leven's y finalmente la significancia se evaluó con una prueba de T-student de una cola considerando significativo un valor de $P < 0.05$ para el rechazo de hipótesis de igualdad de medias entre los tratamientos. Todos los análisis fueron realizados en el software estadístico R-Studio.

3. Resultados y discusión

Se efectuó una prueba de tratamiento en estado continuo empleando Biobacterplus AR por 90 días a fin de proponerlo como un candidato prometedor para el tratamiento eficaz de aguas residuales domésticas. Tras el proceso de bioaugmentación (T2), se hizo necesario mencionar que las cualidades organolépticas como olor, color y turbidez del agua residual tratada presentaron una mejoría notoria a partir de los 7 días del biotratamiento, en comparación con el efluente del Control (T1) que destacó una primera diferencia registrable entre los tratamientos a

pesar de no haber sido considerada como uno de los objetivos del estudio. Estos resultados corroboraron la existencia de una actividad metabólica favorable y estable, que apunta a una colonización y supervivencia por parte de los microorganismos exógenos adicionados dentro del microbiota del licor de la mezcla de la PTAR.

3.1 Primera etapa: Control del microambiente generado

Durante el tratamiento, los microorganismos eficientes de Biobacterplus AR (T2) exhibieron interacciones sinérgicas benéficas con el micro ambiente de la PTAR, notado en el biofilm presente en la superficie de su efluente que indicó un sistema biológico activo y, por lo tanto, un conveniente proceso de biorremediación. Se evaluó el pH, encontrándose que el tratamiento asignado con Biobacterplus AR tras los 7 días post inoculación logró una estabilización arrojando un potencial de hidrógeno de 6.50, valor que se situó entre 6.6 y 7 hasta los 90 días representando una variación significativa respecto al control cuyo valor de pH osciló entre 4.5 a 5 siendo este muy bajo de lo ideal para

su vertimiento al cauce receptor. En el monitoreo de las variables CE y TDS se registró una disminución notoria gradual de sales disueltas por parte del T2 hallando transcurridos 7 días valores de 950 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 399 ppm respectivamente, los mismos que fueron prestos a un fenómeno de reducción hasta por 65 días y manteniéndose constante hasta los 90 días después del bioaumento, en comparación con los valores elevados de 1480 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 523 ppm pertenecientes al T1.

3.2 Segunda etapa: Efecto de la bioaugmentación en la eliminación de la carga de contaminantes

La tabla 1 y 2 muestran los resultados de los parámetros evaluados en los dos tratamientos. Se obtuvo una concentración inicial para DQO de 833 mg/l a partir de la caracterización del afluente de ambas PTAR ($t=0$). Tras el biotratamiento asignado, se observó una disminución considerable de la remoción efectuada por el T2 logrando porcentajes de degradación de 98% que superaron al control (Tabla 1).

Las AR registraron valores altos de DBO (402 mg/l) en el punto de partida (Aguas crudas). Se notaron

claras variaciones entre ambos tratamientos para la eliminación de DBO. Sorprendentemente, la mayor eficiencia de eliminación de DBO (98.51%) se logró con el tratamiento de bioaugmentación con el bioinoculante, lo que destaca el alto potencial biodegradativo del consorcio microbiano hacia la materia orgánica considerablemente superior a las bacterias autóctonas del control (Tabla 1).

Respecto a los sólidos Totales, al igual que la DQO y DBO, los afluentes fueron caracterizados con una concentración muy alta de ST (2766 y 2760 mg/l) previo a su respectivo tratamiento. El T2 mostró la mayor disminución gradual de los niveles de ST con el aumento del tiempo de exposición (hasta por 30 días), manteniéndose constante con una leve variación oscilada entre 100 – 200 ppm hasta los 90 días (Tabla 1). Por el contrario, los resultados del T1 arrojaron valores inferiores en más de un 40%. El tratamiento asignado por Biobacterplus AR resultó mucho más eficaz para disminuir la población patógena. La eficiencia de eliminación obtenida fue superior al 95% durante todo el tratamiento, a diferencia del T1 que



registró un valor del inferior al 75% (Tabla 1). Es notorio que la presencia de los microorganismos patógenos en las aguas residuales constituyó un factor biológico determinante en la descomposición de contaminantes por bacterias autóctonas, puesto que su

abundancia sugiere la generación de un fenómeno competitivo fuerte por alimento que perjudica el crecimiento poblacional óptimo de bacterias benéficas autóctonas expresado en un porcentaje de remoción de DBO, DQO, TDS y ST muy bajos.

Tabla 1. Eficiencia de eliminación (EE%) de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en las aguas residuales domésticas cruda y tratada.

Tiempo de exposición	T1 (Control)		T2 (Bioaumento)		Límite permisible según el TULSMA VI
	CR	EE%	CR	EE%	
DQO					
0	833 mg/l	-	-	-	200
7	230	72.38	15	98.20	
15	200	75.99	9	98.92	
30	206	75.27	9	98.92	
60	209	74.90	11	98.68	
90	250	69.98	25	97	
DBO					
0	402 mg/l	-	-	-	100
7	166	58.70	8	98	
15	115	71.39	6	98.51	
30	99	75.37	10	97.51	
60	110	72.64	12	97.01	
90	130	67.66	14	96.51	
ST					
0	2666 mg/l	-	2670	-	1600
7	1629	38.90	150	94.38	
15	2003	24.87	100	96.25	
30	1556	41.63	113	95.77	
60	1590	40.36	200	92.51	
90	1665	37.55	232	91.31	
Coliformes fecales					
0	9075nmp/100 ml	-	9078	-	2000
7	3052	66.37	236	97.40	
15	2665	70.63	214	97.64	
30	3000	66.94	315	96.53	
60	2995	67.00	435	95.21	
90	3010	66.83	445	95.10	

Nota: La CR representa la concentración residual de contaminante en un tiempo de exposición dado del efluente tratado (Agua de salida); La concentración inicial toma el valor cuando t=0 y proviene del afluente (Agua residual de ingreso). El límite permisible se ha tomado del libro TULSMA VI, Anexo 1, tabla 2

Se encontró que el agua residual cruda no tuvo niveles elevados para sulfatos, tensoactivos, fósforo y

nitrógeno amoniacal. En efecto, se registraron nuevamente variaciones en la eficiencia de eliminación de

estos contaminantes entre los tratamientos. Se obtuvo una reducción exitosa por parte del T2 en comparación con el T1 cuyo valor fue el más bajo en la eliminación de aceites y grasas (25.98 %). El más alto porcentaje de eliminación

logrado por biorremediación correspondió a los parámetros de fósforo total y nitrógeno amoniacal, siendo del 100% aplicando el tratamiento con el bioaumentado (Tabla 2).

Tabla 2. Eficiencia de eliminación (EE%) de sulfatos, tensoactivos, aceites, fósforo y nitrógeno en las aguas residuales domésticas tratadas (efluente).

Variable	Tiempo de exposición	T1(Control)		T2(Bioaumentado)		Límite permisible TULSMA VI
		CR	EE%	CR	EE%	
Sulfatos	0	254 mg/l	-	254	-	400
	90	80	68.50	30	88.19	
Tenso activos	0	0.70 mg/l	-	0.70	-	0.5
	90	0.20	71.43	<0.008	99.89	
Aceites y grasas	0	38 mg/l	-	38.10	-	30
	90	28.2	25.98	0.22	99.42	
Fósforo	0	2.44 mg/l	-	2.44	-	10
	90	0.99	59.43	0	100	
Nitrógeno amoniacal	0	42.13mg/l	-	43.51	-	30
	90	12	72.42	0	100	

Las AR tratadas por bioaumentación con Biobacterplus AR los límites permisibles de la normativa ambiental ecuatoriana. Por otro lado, el efluente del T1 presentó carencias en su calidad incumpliendo la normativa.

3.3 Biodegradación: bacterias autóctonas VS Biobacterplus AR

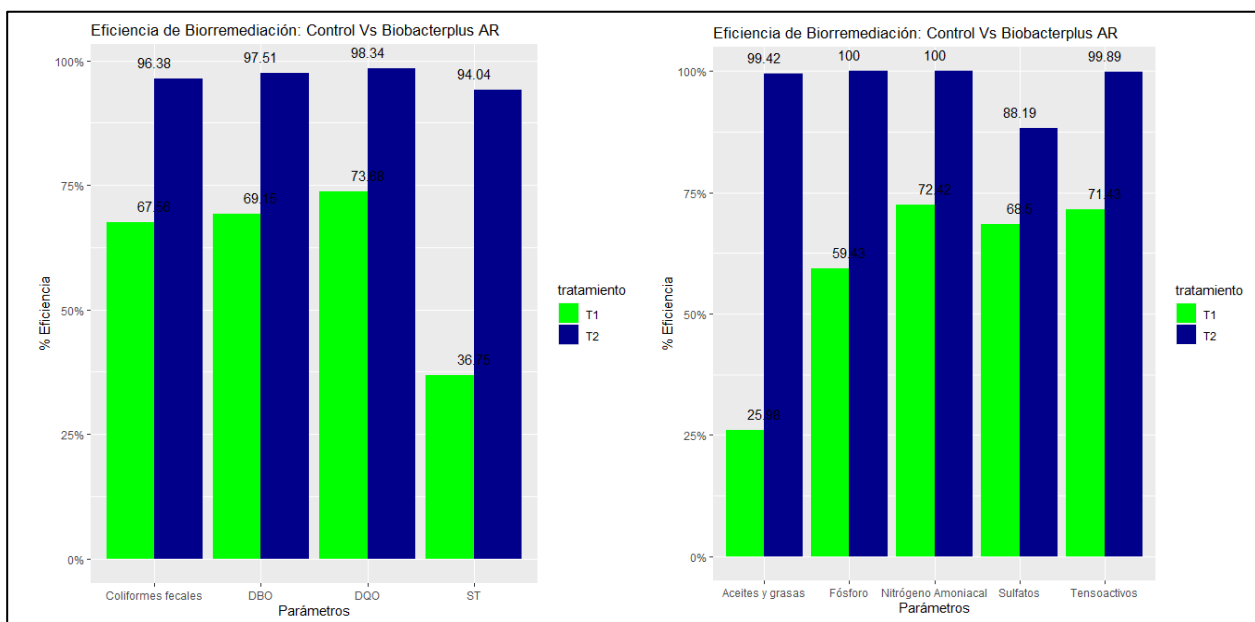
Con un intervalo de confianza del 95% y un p-value > 0.05 se encontró que la Eficiencia de Eliminación siguió una distribución normal; además, de poseer varianzas iguales para ambos tratamientos

(homocedasticidad). La prueba de T de una cola para varianzas iguales indicó con un 95% de confiabilidad y un p-value <0.05, la existencia de diferencia significativa en la eficiencia de remoción para todos los parámetros probados entre ambos tratamientos. De esta manera, se confirmó que la biorremediación por bioaumentación con Biobacterplus AR (T2) fue más eficiente, según los valores descritos de EE%, que la degradación efectuada por la población microbiana autóctona del sistema perteneciente al Control

(T1). En el gráfico 1, se observa la comparación del proceso de biorremediación efectuado por ambos tratamientos. Con ello, este estudio reporta una media

porcentual de eliminación de contaminantes óptimo del 97.10% por parte del bioinoculante frente al 61.10 % del control.

Figura 2. Comparación de la eficiencia de biorremediación entre los dos tratamientos para AR. Remediación por bacterias autóctonas = T1 (color azul) y remediación por Biobacterplus AR = T2 (color verde).



Discusión

Una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) es un sistema diseñado para crear un ambiente óptimo donde los microorganismos autóctonos del agua residual puedan multiplicarse para degradar los contaminantes; sin embargo se ha puesto en evidencia que en condiciones reales dada a la fragilidad de este microambiente, el proceso de degradación con frecuencia es alterado (Czarota et al., 2023), resultando en una eliminación ineficiente de los

residuos que incumple además con los límites permisibles sugeridos para un posterior vertimiento seguro como se pudo denotar en el presente estudio (Control). Las causas de esta afección a la microflora bacteriana degradadora se debe a principalmente factores ambientales detectados como: el cambio de oxígeno en el agua, la variación drástica de pH por aguas lluvias, limpieza de la PTAR, tipo de contaminante y humedad (Sharma et al., 2023), lo que justifica un nivel de eliminación de contaminantes

relativamente inferior al 80 % hallado por parte del control (T1). Pese a ello, la degradación mediada por el consorcio microbiano de Biobacterplus AR (T2) logró porcentajes superiores al 90% para los todos los parámetros analizados (DBO, DQO, ST, sulfatos, tensoactivos, aceites y grasas, fósforo y nitrógeno). Esto debido a las cualidades genotípicas atractivas de cada especie presente en el bioinoculante que les permite resistir a condiciones adversas y codificar proteínas con capacidad biocatalítica para transformar y absorber compuestos de naturaleza compleja, inclusive degradar mercaptanos y reducir aldehídos responsables de malos olores (Horta et al., 2009); que no son asimilados por la microbiota autóctona, razón por la que a pesar de la variación de condiciones ambientales presentaron una reducción significativa de fuertes odorantes, excelente estabilización, y por lo tanto, una alta y rápida remoción frente al control.

La degradación de coliformes fecales constituyó uno de los focos importantes a reducir dentro de la investigación. El mayor porcentaje

de eliminación para este parámetro fue del 96% alcanzado con el tratamiento por bioaumento (T2). Esta variación respecto al T1 se explica por la presencia de especies bacterianas del género *Bacillus* spp. en el cultivo mixto, quienes son poseedoras de una interesante capacidad antimicrobiana originada por genes estructurales que sintetizan bacteriocinas, un tipo de proteínas responsables que inhiben la división celular, perforan paredes celulares u obstaculizan procesos metabólicos importantes dentro del organismo patógeno (biosíntesis) (Benítez-Chao et al., 2021; Yount et al., 2020); además, de la presencia de *Pseudomonas* spp. que genera un ambiente microbicida, induciendo la muerte celular del patógeno debida a la secreción de toxinas (Exo A, Exo T, Exo S, Exo U, y ExoY) dentro del microbioma (Paz-Zarza et al., 2019). Por el contrario, la eliminación de patógenos mediado por las cepas bacterianas autóctonas del control fue inferior al 70% , debido a los efectos antagónicos que exhiben las bacterias patógenas sobre su crecimiento gracias a mutaciones genéticas de índole natural, a causa de su alta deriva génica



(adaptación), así como de la abundancia relativa de microflora no bacteriana potencial patógena conformada principalmente por virus responsables de la transferencia de genes entre bacterias pertenecientes a taxones patógenos intestinales responsables de las mutaciones mencionadas; y protozoos que se alimentan de bacterias protagonistas de la biodegradación (Ariyadasa et al., 2023), lo que explica la ineficacia de la PTAR del T1 .

Durante el control del microambiente generado por la bioaumentación, la estabilización del pH, TDS y CE determinaron la supervivencia de las especies microbianas del bioinoculante durante el estudio y, por lo tanto, la biorremediación. Este estudio comprueba que el uso combinado de cepas microbianas exógenas concentradas (consorcio) mejoran la capacidad microbiana de todo el sistema, dando como resultado un alto grado de biodegradación en las aguas residuales domésticas (97%). Una explicación razonable, es atribuible a los efectos sinérgicos que posee el consorcio del producto, puesto que especies como cepas fúngicas de

Saccharomyces sp y *Trichoderma* spp, son productoras de metabolitos secundarios que se originan por procesos de acumulación, absorción y degradación de compuestos tóxicos fenólicos en formas no tóxicas, a la vez constituyendo nutrientes para otras bacterias del consorcio lo que mejora su capacidad de crecimiento y por ende la eficiencia del proceso de biorremediación (Espinosa-Ortiz et al., 2016).

Esta relación sinérgica dialogada y la presentación del producto en sólido fue partícipe de su persistencia a través del tiempo dentro del microambiente de la PTAR, motivo por el cual el tratamiento de aguas residuales con el consorcio microbiano arrojó excelentes resultados de biodegradabilidad por un período de 90 días de duración. Un reporte realizado por Zabermawi et al. (2022) menciona la ineficacia de los sistemas individuales para remediar aguas residuales, puesto que como resultado de su evaluación detectaron que la eficiencia de remoción de contaminantes en aguas residuales de tipo industrial por cepas individuales fue una eliminación de residuos

relativamente ínfima en contraste a la de un cultivo mixto analizado por ellos. Por lo tanto, no recomiendan el empleo de una especie de cepa microbiana para tratar aguas residuales debido a la cantidad abundante de contaminantes existentes en el agua que no puede ser procesada a tiempo y termina comprometiendo la eficiencia del sistema. Sharma et al. (2023) y Liu y Chen (2014) en sus artículos de revisión discuten amplios resultados de investigaciones que respaldan al consorcio microbiano como candidato potencial para el tratamiento de aguas residuales, destacando el trabajo de Leong et al. (2019) en el que registraron una eficiencia de eliminación de contaminantes en aguas textiles del 94% usando un consorcio de microalgas con bacterias que se asemejan con los resultados obtenidos en este estudio. Los resultados obtenidos respaldan la utilización eficaz de los consorcios entre microorganismos para el tratamiento de aguas residuales diversas, no obstante, la persistencia de estos por un prolongado tiempo se convierte en un reto debido a la falta de estabilidad entre las cepas del consorcio; puesto, que unas

especies ejercen un control negativo sobre otras que perjudica su asociación (Ochoa Carreño, D. y Montoya Restrepo, A., 2010), generando una eficiencia de remoción alta pero con una duración corta de 7 a 15 días optando por aplicar una gran cantidad de dosis que resulta en costos elevados a diferencia de Biobacterplus AR. Adicionalmente, la consideración de otros factores externos en este estudio como el punto de inoculación que incrementó el tiempo de retención celular durante el tratamiento contribuyó también en el mejoramiento de la eficiencia de remoción de carga orgánica.

Estos resultados revelaron que el agua tratada con el bioinoculante ayudó a conservar la calidad del cauce receptor a través de su cumplimiento con los límites permisibles regidos a la norma ecuatoriana, por lo que se considerada como apta para su reutilización tanto industrial como agrícola. Esto destaca otro beneficio por parte de la remediación microbiana responsable realizada, contribuyendo así a la economía circular y sostenible (Babcock-Jackson et al., 2023).



4. Conclusiones

Las aguas residuales domésticas mostraron niveles extremadamente altos para todos los principales contaminantes analizados (DBO, DQO, ST y coliformes fecales), lo que las convierte en un efluente pesado con muchas dificultades en su tratamiento y efectos peligrosos en los ambientes receptores que hace necesario el empleo de un tratamiento robusto.

En este estudio el tratamiento de bioaumentación con Biobacterplus AR registró un potencial remediativo eficiente que consiguió disminuir la contaminación en más de un 90% en el agua residual que ingresa a la planta de tratamiento. Puesto que, el tipo de bacterias degradativas que constituyeron el consorcio (con potencial interesante de degradación), el aumento de retención celular obtenido por el punto de inoculación del mismo en la planta, las condiciones climáticas de la ciudad y la estabilidad de los microorganismos, permitieron obtener excelentes índices de biodegradabilidad de contaminantes. Esto refleja su idoneidad operativa resultado ser una alternativa altamente competitiva y viable puede

aplicarse para mejorar el sistema de remediación generado dentro de una PTAR puesto que: optimiza el funcionamiento del sistema de la planta, ayuda a cumplir las normas de vertimiento en todos los parámetros de manera rápida, mejora la remoción de carga orgánica, reduce la acumulación de lodos y controla olores fuertes. Esta aplicación es muy prometedora considerando la duración del tratamiento, eficiencia, costo, condiciones de operación, energía empleada e impacto ambiental en comparación con otros tratamientos. Basado en este conocimiento, se recomienda la aplicación del producto como un método seguro y eficiente para la biorremediación de aguas residuales domésticas en plantas de tratamiento primario en las que se ha detectado carencias en la calidad del efluente vertido.

Bibliografía

Ariyadasa, S., Taylor, W., Weaver, L., McGill, E., Billington, C., y Pattis, I. (2023). Nonbacterial Microflora in Wastewater Treatment Plants: an Underappreciated Potential Source of Pathogens. *Microbiology spectrum*, 11(3), e0048123.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1128/spectrum.00481-23>
- Babcock-Jackson, L., Konovalova, T., Krogman, J., Bird, R., y Díaz, L. L. (2023). Sustainable Fertilizers: Publication Landscape on Wastes as Nutrient Sources, Wastewater Treatment Processes for Nutrient Recovery, Biorefineries, and Green Ammonia Synthesis. *Journal of agricultural and food chemistry*, 71(22), 8265–8296.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c00454>
- Benítez-Chao, D., León-Buitimea, A., Lerma-Escalera, J., y Morones-Ramírez, J. (2021). Bacteriocins: An Overview of Antimicrobial, Toxicity, and Biosafety Assessment by in vivo Models. *Frontiers in microbiology*, 12, 630695.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.630695>
- Carbotecnia. (2023). Tratamiento de aguas residuales PTAR. <https://www.carbotecnia.info/categoria-productos/tratamiento-de-aguas-residuales/>
- Clough, S., Jousset, A., Elphinstone, J., y Friman, V. (2022). Combining in vitro and in vivo screening to identify efficient *Pseudomonas* biocontrol strains against the phytopathogenic bacterium *Ralstonia solanacearum*. *MicrobiologíaOpen*, 11(2), e1283.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mbo3.1283>
- Córdoba, M. A., Del Coco, V. F., & Basualdo, J. A. (2010). Agua y salud humana. *Química viva*, 9(3), 105-119.
- Czarnota, J., Masloń, A., y Pajura, R. (2023). Wastewater Treatment Plants as a Source of Malodorous Substances Hazardous to Health, Including a Case Study from Poland. *International journal of environmental research and public health*, 20(7), 5379.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijerph20075379>
- Espinosa-Ortiz, E., Rene, E., Pakshirajan, K., Hullebusch, E. v., y Lens, P. (2016). Fungal pelleted reactors in wastewater treatment: Applications and perspectives. *Chem Eng J*, 283(19), 553-571.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.068>
- Hort a, C., Gracy b, S., Platel a, V., y Moynault, L. (2009). Evaluation of sewage sludge and yard waste compost as a biofilter media for the removal of ammonia and volatile organic sulfur compounds (VOSCs). *Chemical Engineering Journal*, 152(1), 44-53.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.03.026>



- Leong, W., Azella Zaine, S., Ho, Y., Uemura, Y., Lam, M., Khoo, K., . . . Lim, J. (2019). Impact of various microalgal-bacterial populations on municipal wastewater bioremediation and its energy feasibility for lipid-based biofuel production. *Journal of environmental management*, 249, 109384. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109384>
- Liu, J., y Chen, F. (2014). Biología y aplicaciones industriales de chlorella: avances y perspectivas, biotecnología de microalgas. *Avances en ingeniería bioquímica/biotecnología*, 153, 1–35. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/10_2014_286
- Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica. (2017). Texto Unificado de Legislación Secundaria (TULSMA). Decreto Ejecutivo 3516. Registro Oficial Edición Especial. <https://doi.org/chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>
- Nasamues, J., y Prato, J. (2021). Metodologías para evaluar sistemas de tratamiento de aguas residuales en el Ecuador. Ecuador: Riobamba
- Universidad Nacional de Chimborazo. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/7659>
- Ochoa Carreño, D. y Montoya Restrepo, A. (2010). Consorcios microbianos: una metáfora biológica aplicada a la asociatividad empresarial en cadenas productivas agropecuarias. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 18(2), 55-74. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-68052010000200004&lng=en&tlng=es
- Oruganti, R., Katam, K., Show, P., Gadhamshetty, V., Upadhyayula, V., y Bhattacharyya, D. (2022). A comprehensive review on the use of algal-bacterial systems for wastewater treatment with emphasis on nutrient and micropollutant removal. *Bioengineered*, 13(4), 10412–10453. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2056823>
- Paz-Zarza, V., Mangwani-Mordani, S., Martínez-Maldonado, A., Álvarez-Hernández, D., Solano-Gálvez, S., y Vázquez-López, R. (2019). *Pseudomonas aeruginosa*: Pathogenicity and antimicrobial resistance in

- urinary tract infection. *Revista chilena de infectología*, 36(2), 180-189. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182019000200180>
- Peña, S., Mayorga, J., y Montoya, R. (2018). Propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Yaguachi (Ecuador). *Ciencia e Ingeniería*, 39(2), 161-167. https://doi.org/https://www.redalyc.org/journal/5075/507557606007/html/#redalyc_507557606007_ref9
- Pinzón-Junca, A. (2019). *Pseudomonas*. *Acta Medica Colombiana*, 44(2), 52. <https://doi.org/https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=163161125012>
- Sharma, M., Agarwal, S., Agarwal Malik, R., Kumar, G., Pal, D., Mandal, M., . . . Gupta, V. (2023). Recent advances in microbial engineering approaches for wastewater treatment: a review. *Bioengineered*, 14(1), 2184518. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2184518>
- Soller, J. A., Schoen, M. E., Bartrand, T., Ravenscroft, J. E., y Ashbolt, N. J. (2010). Estimated human health risks from exposure to recreational waters impacted by human and non-human sources of faecal contamination. *Water research*, 44(16), 4674–4691. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.049>
- Yount, N., Weaver, D., de Anda, J., Lee, E. Y., Lee, M., Wong, G., y Yeaman, M. (2020). Discovery of Novel Type II Bacteriocins Using a New High-Dimensional Bioinformatic Algorithm. *Frontiers in immunology*, 11, 1873. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.01873>
- Zabermawi, N., Alyhaiby, A., y El-Bestawy, E. (2022). Microbiological analysis and bioremediation bioassay for characterization of industrial effluent. *Scientific reports*, 12(1), 18889. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-022-23480-7>