



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

CC2404.1 Evaluación de procesos no convencionales para el tratamiento de lixiviados provenientes de un relleno sanitario (Tercera etapa)

Informe final

COORDINACIÓN DE CALIDAD Y ECOLOGÍA DEL AGUA
SUBCOORDINACIÓN DE SISTEMAS DE SANEAMIENTO Y
REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

JEFE DE PROYECTO

Liliana García Sánchez

PARTICIPANTES

Edson Baltazar Estrada Arriaga

Carlos David Silva Luna

Axel Falcón Rojas

Alberto González Sánchez

Areli Gómez Rojas

COLABORADORES

Tania Gutiérrez Macías

Gissel Trujillo Dominguez

Minerva Sánchez Guzmán

Silvia Lucas Rodríguez

Perla Edith Alonso Eguía

Ulises Duvan Rodríguez Díaz

Netzer Sinue Castillo Ocampo

Thalia Rodríguez Candia

Eduardo Miguel Ramírez Flores

2024



INDICE

1. Antecedentes	3
2. Justificación	4
3. Objetivo	5
4. Metodología	6
4.1 Actualización de la base de datos	6
4.2 Caracterización de residuos envejecidos	7
4.3 Caracterización de lixiviados	8
4.4 Evaluación de procesos fisicoquímicos	8
4.5 Evaluación de sistemas de biofiltración	11
4.6 Evaluación de biocarbones	15
4.7 Evaluación de procesos de vermicompostaje	16
5. Resultados	18
5.1 Actualización de la base de datos	18
5.2 Caracterización de residuos envejecidos	19
5.3 Caracterización de lixiviados	20
5.4 Evaluación de procesos fisicoquímicos	21
5.5 Evaluación de sistemas de biofiltración	26
5.6 Evaluación de biocarbones	30
5.7 Evaluación de procesos de vermicompostaje	33
5.8 Formación de recursos humanos	34
5.9 Participación en congresos	35
6. Conclusiones	36
7. Bibliografía	37



1. Antecedentes

México enfrenta el reto de atender una serie de problemas ambientales relacionados con los objetivos acordados en el seno de las Naciones Unidas en el que se comprometió a avanzar hacia un desarrollo sostenible con un horizonte al año 2030. Estos problemas podrían constituir serios obstáculos para alcanzar la sustentabilidad en el futuro, entre ellos, el cambio climático, la pérdida de los ecosistemas terrestres y acuáticos y de su biodiversidad, la escasez y contaminación de los recursos hídricos y los problemas de calidad del aire (Semarnat, 2015).

El crecimiento de la población ha provocado un aumento desmedido en la generación de desperdicios, basura o residuos, convirtiéndose en un fuerte problema a nivel regional y mundial. Estos desperdicios son trasladados y depositados en sitios de disposición final, en los cuales existe una combinación de residuos, lo que genera una mezcla entre componentes orgánicos e inorgánicos que por la reacción, arrastre o filtrado genera un líquido contaminante denominado lixiviado. En la actualidad existen 2,203 sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial en México, de los cuales el 86% no cuenta con un sistema o plan de tratamiento de los lixiviados generados (INEGI, 2019). Incluso los sitios de disposición final de residuos diseñados y construidos conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003 que establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial no están exentos de presentar riesgo de infiltración de lixiviados al subsuelo. De esta forma, a través de los escurrimientos superficiales y subterráneos, el lixiviado producto del sitio de disposición final podría llegar a aguas subterráneas o superficiales, dañando el ecosistema acuático y generando un desequilibrio ecológico.

Para el tratamiento de los lixiviados se utilizan sistemas tanto fisicoquímicos como biológicos, sin embargo, los procesos son evaluados de forma aislada sin presentar un tratamiento general para la remoción de la mayor parte de los contaminantes presentes, entre los que se encuentran contaminantes orgánicos, inorgánicos y microbianos. Por otro lado, a escala real generalmente se utiliza la recirculación y tratamiento combinado de lixiviados con aguas residuales domésticas en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), lo cual no permite eliminar de forma adecuada los contaminantes presentes en los lixiviados, solo los concentra o los diluye.



2. Justificación

El mundo enfrenta una crisis ambiental en términos de cantidad y calidad del agua, a causa de la generación y disposición de residuos, el incremento de la población, la industrialización, el estilo de vida, el calentamiento global, el desarrollo y comportamiento antrópico. En cuanto a los residuos sólidos, su disposición es uno de los problemas ambientales más importantes que afecta a las sociedades del mundo, ya que a menudo se presentan algunos problemas producto de la degradación de la materia orgánica y de la presencia de otros compuestos presentes en los residuos que son depositados en los rellenos sanitarios. Dichos problemas son originados por la generación de gases y líquidos, los primeros son formados a partir de la descomposición de los ácidos orgánicos (biogás) y los segundos, conocidos como lixiviados, presentan altas concentraciones de ácidos orgánicos y materia disuelta. Además, los lixiviados poseen elevadas concentraciones de sales inorgánicas (cloruro de sodio y carbonatos) dando lugar a una alta conductividad y un alto contenido de metales pesados como el Cd, Cr, Cu, Fe, Pb y Zn, entre otros, cuyas concentraciones pueden sobrepasar los límites de toxicidad (Lapeyre et al. 2020). Los lixiviados pueden infiltrarse en los suelos o formar escurrimientos fuera de los sitios de confinamiento, dando lugar a la contaminación del suelo y de los cuerpos de agua receptores, provocando su deterioro y representando un riesgo potencial a los organismos vivos y a la salud humana.

Por otro lado, los RSU en rellenos sanitarios se estabilizan a medida que la materia orgánica se degrada gradualmente y las sustancias inorgánicas solubles se disuelven. Este proceso se denomina “mineralización” y los desechos resultantes estabilizados se denominan residuos envejecidos o estabilizados (RE). Se ha encontrado que los RE contienen una gran cantidad de metales pesados, compuestos tóxicos y altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes que dificultan su uso como tierra para cultivos una vez que el relleno sanitario se ha estabilizado y se desea volver a utilizar los terrenos.

Existen muchas investigaciones en la bibliografía que han caracterizado los lixiviados generados en los rellenos sanitarios, sin embargo, para el caso de los residuos envejecidos las investigaciones son escasas, por lo que en el presente proyecto se pretende caracterizar RE provenientes de diferentes rellenos sanitarios y evaluar la remoción de contaminantes mediante un proceso de vermicompostaje.

Para el caso del tratamiento de los lixiviados muchas veces las tecnologías que se aplican requieren personal altamente especializado para su operación, grandes inversiones en la construcción o en la operación y mantenimiento, lo que muchas veces resulta en un abandono de la tecnología. Ante ello, se propone el uso de sistemas no convencionales como la biofiltración para el tratamiento de lixiviados, los cuales ya se utilizan en México para tratar aguas residuales municipales y han resultado ser eficientes en la remoción de materia orgánica y nutrientes además de requerir bajo costo de construcción, operación y mantenimiento.

Además, dentro de los tratamientos para los lixiviados, el ozono y ultrasonido (US) pueden ser procesos que coadyuven en transformar la materia orgánica, fraccionándola, para incrementar la biodegradabilidad. Lo anterior se relaciona con que el ozono es un oxidante, con capacidad selectiva e indirecta, que tiene las características de oxidar preferentemente fracciones ricas en electrones, reducir el color y aumentar la biodegradabilidad (Rodríguez-Peña, et al., 2020), mientras que la aplicación de US en el agua residual tiene la particularidad de producir



cavitación por la presión negativa en la mitad del ciclo de una onda ocasionado que los compuestos más hidrofílicos sean descompuestos por radicales hidroxilos generados durante la cavitación, además de remover los compuestos volátiles al ser degradados por la acción térmica en las zonas de alta temperatura (Torkashvand, et al 2021). Por lo anterior, se evaluará el ozono y el ultrasonido como sistemas de tratamiento para la remoción de contaminantes presentes en los lixiviados.

Por otro lado, se pretende evaluar un proceso de adsorción mediante el uso de biocarbones provenientes de residuos orgánicos con la finalidad de determinar su potencial uso para favorecer la remoción de contaminantes presentes en lixiviados.

3. Objetivo

Determinar las transformaciones químicas de un lixiviado proveniente de un relleno sanitario mediante procesos de biofiltración.

4. Metodología

La metodología se llevó a cabo en seis etapas experimentales, tal como se muestra en la Figura 1.

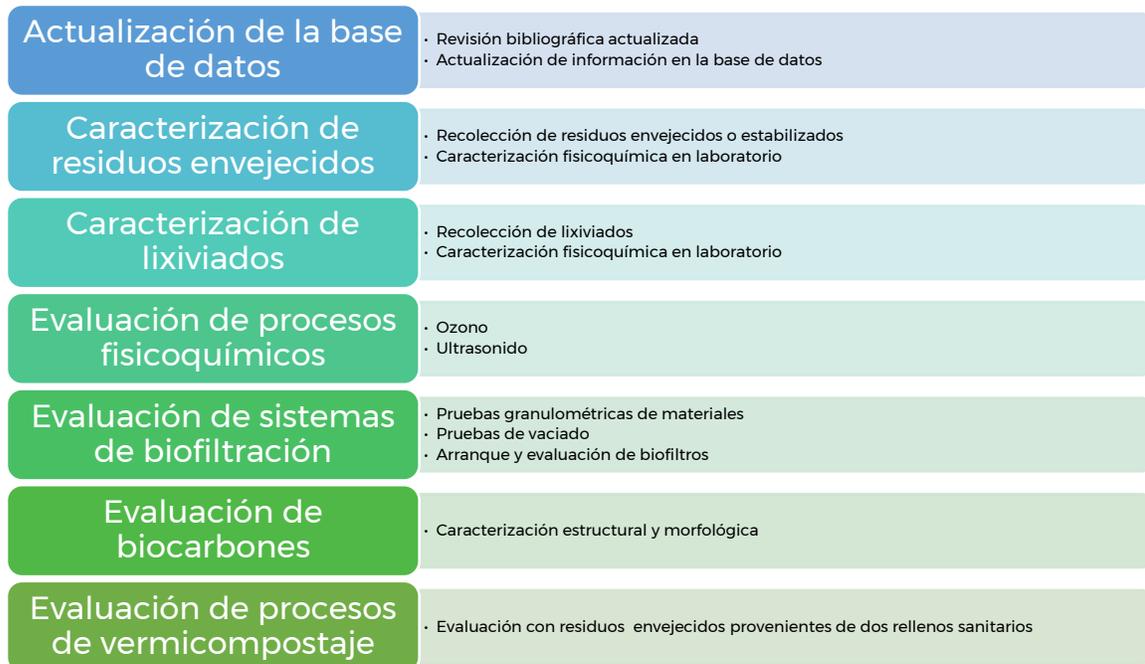


Figura 1 Planteamiento metodológico

A continuación se desglosa cada etapa.

4.1. Actualización de la base de datos

Se llevó a cabo la actualización de la base de datos y del Sistema de Información Geográfica desarrollado para visualizar los sitios de disposición final y las características de los lixiviados de dichos sitios reportadas en la literatura, para ello se realizó una revisión en tesis, revistas y libros relacionados al tema. Además se agregó la caracterización de los lixiviados realizada en el presente proyecto. La revisión consistió en los parámetros que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros recopilados en la revisión bibliográfica sobre lixiviados

Parámetro	Unidades	Parámetro	Unidades	Parámetro	Unidades	Parámetro	Unidades
pH	Unidades	DQO	mg/L	Arsénico	mg/L	Grasas y aceites	mg/L
Conductividad	mS/cm	DQO soluble	mg/L	Cadmio	mg/L	Carbono total	mg/L
SDT	ppm	Fracción biodegradable	-	Cobre	mg/L	Amonio (NH ₄ ⁺)	mg/L
Nitrógeno amoniacal	mg N-NH ₃ /L	NT	mg/L	Cromo	mg/L	Dureza de calcio (CaCO ₃)	mg/L
N orgánico	mg/L	Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	Hierro	mg/L	Cloruros (Cl)	mg/L
NTK	mg/L	PT	mg/L	Manganeso	mg/L	Cobalto	mg/L
P total	mg/L	SST	mg/L	Mercurio	mg/L	Ortofosfatos (PO ₄ ³⁻)	mg/L
Sulfatos	mg/L	SSV	mg/L	Níquel	mg/L	Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L
Nitratos	mg/L	ST	mg/L	Plomo	mg/L	Sulfuros (S ₂)	mg/L
Nitritos	mg/L	STV	mg/L	Zinc	mg/L	Turbiedad	NTU
Ortofosfatos	mg/L	STF	mg/L	COT	mg/L	Dureza total	mg/L
DBO ₅	mg/L	Toxicidad	UT	SAAM	mg/L	Alcalinidad	mg/L

4.2. Caracterización de residuos envejecidos

Se caracterizaron residuos envejecidos o estabilizados provenientes de los rellenos sanitarios La Cañada ubicado en el Estado de México y Regional Yecapixtla, ubicado en Morelos. En la Tabla 2 se presentan los parámetros evaluados. Para la caracterización de los residuos sólidos se determinaron parámetros como el contenido de materia orgánica, entre otros, aplicando las técnicas analíticas establecidas.

Además, se determinó el porcentaje de plásticos rígidos, bolsas nylon, vidrio, madera, piedras, finos, entre los principales (NMX-AA-15-1985) con 29 y 16 kg de residuo sólido de la Cañada y Yecapixtla, respectivamente. De igual manera, con el propósito de conocer los diferentes tamaños de partícula en los residuos secos, el residuo sólido será cribado y clasificado de acuerdo a los siguientes tamaños: >40 mm, 16-40mm y ≤15 mm (Bautista. 2018).

Tabla 2 Parámetros para la caracterización de residuos estabilizados o envejecidos

Parámetro	Técnica
pH	Potenciométrico
Humedad	NMX-AA-16-1984
Materia orgánica	NOM-021-RECNAT-2000

4.3. Caracterización de lixiviados

Se recolectaron y caracterizaron lixiviados provenientes de distintos rellenos sanitarios, los cuales fueron La Cañada, Bordo Poniente, Regional y Rancho Coronel, ubicados en Ixtapaluca (Estado de México), Texcoco (Estado de México), Yecapixtla (Morelos) y Tlaltizapán (Morelos), respectivamente.

La caracterización se llevó a cabo conforme a lo establecido en los Standard Methods For Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), mismos que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 Técnicas utilizados para la caracterización de lixiviados

Parámetros	Técnicas
pH	Multiparamétrico Hach HQ30d
DQOt y DQOs	SMEWW 5220D (2017)
DBO ₅	SMEWW 5210B (2017)
Alcalinidad	SMEWW 2320 (2017)
NT	Método Nessler 8075
N-NH ₃	Método Nessler 8038
NO ₃ ⁻	SMEWW 4500C (2017)
PT	SMEWW 4500-P (2017)
PO ₄ ³⁻	SMEWW 4500-P (2017)
Sólidos	SMEWW 2540D (2017)
Color	SMEWW 2120 (2017)

4.4. Evaluación de procesos fisicoquímicos

El tratamiento de lixiviados a través de procesos fisicoquímicos se llevó a cabo con muestras provenientes de los rellenos sanitarios La Cañada, Rancho Coronel y Bordo Poniente. Los sistemas utilizados ozono y una combinación de ozono con ultrasonido.

El tratamiento de lixiviado con ozono se llevó a cabo mediante un sistema que consistió en un generador de ozono (Ozone Ecological Equipments), una columna de contacto de O_3 y una trampa para capturar el ozono residual (Figura 2).



(a) Columna de contacto de O_3 de 3 L



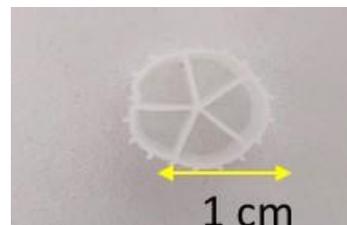
(b) Columna de contacto de O_3 de 6 L

Figura 2 Sistemas de contacto con ozono para los lixiviados provenientes de a) Rancho Coronel y Bordo Poniente y b) La Cañada

Debido a problemas de operación con la generación de espuma al momento de dosificar el ozono, se optó por utilizar dos columnas de contacto, de 3 L para la muestra de Bordo Poniente y Rancho Coronel, los cuales generaron menos espuma que la muestra proveniente de La Cañada, para el cual se utilizó una columna de contacto de 6 L. Cabe señalar que ambas columnas de contacto fueron empacadas con anillos tipo kaldness para mejorar la difusión del ozono y a las que se les implementaron rejillas que fungieron como trampas para la espuma con la finalidad de evitar derrames (Figura 3).



(a) Trampa para espuma



b) Anillo Kaldness

Figura 3 a) Trampa de espuma y b) Material de empaque de las columnas de contacto

Las condiciones de operación del sistema de ozonación se muestran en la Tabla 4.



Tabla 4 Condiciones de operación para el tratamiento con ozono

Parámetro	Medida
Volumen de muestra	500 mL (pH 3, 7 y 11)
Tiempo de contacto	40 min
Flujo	2 L/min
Difusor	Piedra porosa
Capacidad del reactor	2.93 L/5.85 L
Volumen de anillos "k"	500 mL
Ozono disuelto (medido en agua desionizada)	0.53 mg/L

Después de evaluar el proceso de ozonación, se evaluó un proceso combinado de ozono+ultrasonido (US). La estrategia fue ozonar los lixiviado e inmediatamente después proceder a llevar a cabo la aplicación de US. Para ello se utilizó un equipo de ultrasonido marca Hanchen modelo FS-1200 (Figura 4).



Figura 4 Equipo ultrasónico Hanchen modelo FS-1200

Las condiciones de operación de los experimentos con US se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Condiciones de operación para el tratamiento con US

Parámetro	Medida
Volumen de muestra	300 mL (pH 3, 7 y 11)
Potencia	1,200 W (40%)
Frecuencia	20 kHz
Condiciones	Pulso de 50 s con descansos de 10 s
Tiempo de sonicación	20 min



4.5. Evaluación de sistemas de biofiltración

Se evaluaron tres sistemas de biofiltración para el tratamiento de lixiviados provenientes del relleno sanitario La Cañada. Para ello, se utilizaron reactores de acrílico de 9.5 cm de diámetro y 45 cm de altura, con un volumen total de 3.19 L. A los reactores se les agregaron piedras pequeñas en el fondo como soporte para el material filtrante (Figura 5).



Figura 5 Reactores utilizados en la etapa de biofiltración

Los biofiltros fueron empacados con coque (BF1), coque combinado con trozos de madera (50:50, v:v) (BF2) y coque combinado con composta de jardín (50:50, v:v) (BF3) (Figura 6).



Figura 6 Materiales utilizados como empaque en los biofiltros: coque, trozos de madera, composta de jardín

Antes de realizar la mezcla, se realizó un análisis granulométrico para determinar el diámetro, área superficial y número de partículas de los materiales. Para ello se realizó una técnica de



análisis granulométrico estándar para suelos (McCabe et al. 2002). Se utilizó un agitador de tamices marca RETSCH modelo 12100401211 (Figura 7).



Figura 7 Tamizaje de los materiales filtrantes

Se utilizaron las fórmulas que se detallan a continuación para realizar el análisis granulométrico de cada uno de los materiales filtrantes.

Dividiendo el volumen total de la muestra entre el número de partículas de la mezcla se obtiene el volumen promedio de una partícula. El diámetro de dicha partícula es el diámetro medio de volumen y se obtiene a partir de la relación:

$$D_v = \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_{pi}^3}} \right]^{1/3}$$

Donde:

X_i = Fracción de masa en un determinado incremento.

n = Número de incrementos.

D_{pi} =Diámetro promedio de las partículas, tomado como media aritmética de los diámetros mayor y menor en el incremento.

El tamaño promedio de las partículas para una mezcla de las mismas se identifica de varias formas diferentes. El más usado es el diámetro medio volumen superficie que está relacionado con el área de la superficie específica. Y está definida con la siguiente ecuación:

$$D_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_{pi}}}$$



El diámetro medio de masa se obtiene a partir de la ecuación:

$$D_w = \sum_{i=1}^n X_i D_{pi}$$

Para poder calcular a partir del análisis diferencial, el número de partículas en una mezcla, se utiliza la siguiente ecuación, a fin de calcular el número de partículas en cada fracción y la población total en una unidad de masa de muestra, se obtiene sumando todas las fracciones.

$$N_w = \frac{1}{aP_p} \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_{pi}^3}$$

Donde:

a= Factor volumétrico de forma

P_p= Densidad de las partículas

Si se conoce la densidad P_p y la esfericidad Φ, de las partículas es posible calcular el área de la superficie de las partículas en cada fracción a partir de la ecuación, y sumando los resultados de todas las fracciones para obtener la superficie específica. Si su densidad y esfericidad son constante A_w viene dada por:

$$A_w = \frac{6}{\Phi_s P_p} \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_{pi}}$$

Donde:

P_p=Densidad

Φ= Esfericidad

Una vez realizado el análisis granulométrico de los materiales, los materiales fueron mezclados de acuerdo a lo mencionado anteriormente y fueron empacados en los reactores. Posteriormente se realizaron las pruebas de vaciado de acuerdo a la metodología descrita por Garzón-Zúñiga et al. (2003). El procedimiento se describe a continuación (Figura 8).

1. Se pesan los reactores vacíos.
2. Se empacan con grava (hasta la altura de la salida del agua). Posteriormente se agrega el material filtrante húmedo y se pesan nuevamente las columnas
3. Se llenan los reactores con agua por el fondo hasta que el medio filtrante este completamente inmerso. El llenado se debe realizar lentamente para prevenir la expansión del mismo y la formación de burbujas de aire. Se deja reposar toda la noche.
4. Se vacía el reactor.
5. Los reactores se llenan nuevamente con agua y se comienzan las pruebas de vaciado. El volumen de agua que se encuentra en los reactores es vaciado y se mide el volumen acumulado a diferentes intervalos de tiempo (1, 2, 4, 15, 30, 60, 180, 240, 420 y 1200 min).



Figura 8 Pruebas de vaciado

Después de las pruebas de vaciado los biofiltros fueron desempacados y el material filtrante fue inoculado con 0.5 L de lodo proveniente de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Los reactores fueron llenados nuevamente con el material inoculado y en la parte superior se agregó una capa de aserrín con la finalidad de mejorar la distribución del influente. Los biofiltros (BF) fueron operados con un caudal de 1 L/d y alimentados con lixiviados en una concentración del 10% con agua de la llave (Figura 9).



Figura 9 Inoculación y arranque de BF

El monitoreo de los sistemas se realizó de acuerdo a los parámetros que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Parámetros de seguimiento de los biofiltros

Parámetro	Técnica
DQO	APHA, 2017
pH	Potenciométrico
Temperatura	Potenciométrico
Conductividad	Potenciométrico
Potencial REDOX	Potenciométrico
SDT	Potenciométrico

4.6. Evaluación de biocarbones

Se sintetizó y caracterizó biocarbón proveniente de cachaza de caña mediante pirólisis para ser utilizados posteriormente en sistemas de biofiltración para el tratamiento de lixiviados. La síntesis del biocarbón se realizó mediante pirólisis en reactores hidrotermales a dos diferentes temperaturas: 450 y 550 °C (Gao et al. 2021; Qu et al. 2021). Los reactores se colocaron en horno eléctrico. El material obtenido se caracterizó mediante Microscopia electrónica de barrido (SEM) y Espectroscopia por dispersión de energía de rayos X (EDS).

4.7. Evaluación de procesos de vermicompostaje

Se evaluó un proceso de vermicompostaje con la especie *Eisenia foetida* y con residuos estabilizados (RE) provenientes del relleno sanitario La Cañada y Regional Yecapixtla.

Para ello se utilizaron recipientes de plástico de 20x15x15 cm a los cuales se les realizaron perforaciones. Se realizaron mezclas de los RE con diferentes proporciones de biosólidos provenientes de una PTAR municipal (B-PTAR) en combinaciones masa:masa 100:0, 50:50, 10:90 y 5:95. Cada mezcla se llevó a un volumen de 1 kg en los que se inocularon 10 lombrices de la especie *Eisenia foetida*. En la Tabla 7 se muestra el diseño experimental utilizado.

Tabla 7 Condiciones experimentales del vermicompostaje

DISEÑO EXPERIMENTAL				
Muestras	No. Tratamiento	Detalle del tratamiento	Proporción de los sustratos en % (RE:B-PTAR)	No. Organismos
La Cañada, Edo. De México.	CS	RE	100:0	0
	C1	RE	100:0	10
	C2	RE+B-PTAR	50:50	10
	C3	RE+B-PTAR	10:90	10
	C4	RE+B-PTAR	5:95	10
Regional Yecapixtla, Morelos	TS	RE	100:0	0
	T1	RE	100:0	10
	T2	RE+B-PTAR	50:50	10
	T3	RE+B-PTAR	10:90	10
	T4	RE+B-PTAR	5:95	10
Biosólido de PTAR Municipal (B-PTAR)	LS	B-PTAR	0:100	0
	L1	B-PTAR	0:100	10

En la Figura 10 se muestran las diferentes etapas del proceso de vermicompostaje el cual tuvo una duración de 60 d. Durante la evaluación del proceso de vermicompostaje, se evaluó por conteo directo la cantidad de organismos vivos y su madurez sexual y reproducción (presencia de cocones o huevecillos), además las lombrices fueron pesadas con la finalidad de obtener el peso promedio por organismo. Se llevó a cabo el monitoreo del pH y la temperatura del sustrato durante toda la etapa experimental.



Figura 10 Sistema de vermicompostaje: a) Inoculación, b) Exposición y c) Charolas de vermicompostaje



5. Resultados

5.1. Actualización de la base de datos

Se realizó la actualización de la base de datos sobre las características de los lixiviados provenientes de sitios de disposición final en México. En la Figura 11 se presentan las características encontradas en la literatura. Se encontró que la mayoría de los estudios se han realizado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente localizado en el Estado de México, con datos reportados desde 2004. Además, se encontró que muchos de los trabajos en los que se han caracterizado lixiviados no presentan la ubicación o el nombre del sitio de la muestra.

	Nombre	La Perseverancia	La Perseverancia	Bordo Poniente	Bordo Poniente	Bordo Poniente	Bordo Poniente	Bordo Poniente	Bordo Poniente	Bordo Poniente	Bordo Poniente	Bordo Poniente	Cuetzalan	La Cañada
	Ubicación	Cuautila, Morelos	Cuautila, Morelos	Texcoco, Estado de México	Texcoco, Estado de México	Texcoco, Estado de México	Texcoco, Estado de México	Texcoco, Estado de México	Texcoco, Estado de México	Texcoco, Estado de México	Texcoco, Estado de México	Texcoco, Estado de México	Cuetzalan del Progreso, Puebla	Ixtapaluca, Estado de México
	Tipo sitio	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Basurero municipal	Relleno sanitario
DQO _{5/20}	mg/L					3,664±180						4,473.00		
Fracción Biodegradable (Relación DBO ₅ /DQO)	-	0.03		0.10	0.02	0.05		<0.01	0.81-0.86	0.094±0.003		0.10	0.93	0.09
COT	mg/L													
NT	mg/L	3,671.00		460.00		9,000±283							10.00	
N-NH ₃	mg/L	2,520.00		240.00	1,547±6	1,857±440				660±30	887.00	731.00	11.20	733±58
N orgánico	mg/L													
NTK	mg/L							301±19, 2,914±27				818.00		
Nitratos	mg/L	120.00		4.00	33±4	35±7					112.00			28±3
Nitritos	mg/L	147		-	0.18±0.14									0.67±0.23
PT	mg/L	442				337±80								
Ortofosfatos	mg/L	75.00		75.64		89±40						163.00	7.40	
Sulfuros (S ₂ -)	mg/L													
Sulfatos	mg/L	300.00						1,298±11, 2,81±9					120.00	
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	9,540.00		7,328.00	12,458±62	11,054±150		12,000.00	3.8±0.08, 16.2±1			14.30	278.80	10,472±1,711
Dureza de calcio (CaCO ₃)	mg/L													
Dureza total	mg/L													
SST	mg/L	322.00		830.00	350±36	395±21		250±18, 324±27			160.00		860.00	627±214
SSV	mg/L	266.00		256.00	83±29	205±7		207±21, 271±29			150.00		210.00	363±85
ST	mg/L	24,295.00		23,490.00	21,120±520	11,715±530				15.60			1,595.00	13,587±411
STV	mg/L	10,270.00		5,563.00	3,755±165	2,010±28							395.00	2,910±231
STF	mg/L	14,025.00		17,927.00	17,365±355	9,705±559							1,200.00	4,323±176
Turbiedad	UNT											233.00		
	Nombre	Rancho Coronel	Rancho Coronel	Cuadalupe Victoria	Tetlana	No reportado	No reportado	No reportado	No reportado	El Zapote	No reportado	No reportado	No reportado	No reportado
	Ubicación	Tlaltizapán, Morelos	Tlaltizapán, Morelos	Mexicali, Baja California	Temixco, Morelos	Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	León, Guanajuato	Toluca, Estado de México	Morelia, Michoacán	Tampico, Tamaulipas	Cuadajajara, Jalisco	Mérida, Yucatán	Mérida, Yucatán	Mérida, Yucatán
	Tipo sitio	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Tiradero	Sitio de disposición final	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Basurero	Basurero	Sistema de almacenamiento de RSU	Relleno sanitario	Relleno sanitario	Relleno sanitario
DQO _{5/20}	mg/L		1,330±77									5,532.00		5,532.00
Fracción Biodegradable (Relación DBO ₅ /DQO)	-	0.04	0.09			0.15							0.05±0.00	0.007±0.00
COT	mg/L											2,857.00	2,381±1.53	2,857.00
NT	mg/L		490±14											
N-NH ₃	mg/L	2,250±40	148±4		381±3		3,087.20	1,095.20				1481.00	649.67±10.02	4,239±6.9
N orgánico	mg/L											176.00		
NTK	mg/L						2,240.00	192.00				1,659.00	1,099.56±16.66	4,671±67
Nitratos	mg/L	197±6	105±2											
Nitritos	mg/L	48±2												
PT	mg/L		3±0.5									277.4	4180±0.80	43.2±0.05
Ortofosfatos	mg/L				<1									
Sulfuros (S ₂ -)	mg/L				10.68±1.68							405.00		
Sulfatos	mg/L				<1									140-610
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	422±52	857±58			9,134.00						6,857.00	6,857.00	6,284±80
Dureza de calcio (CaCO ₃)	mg/L				8418±549									
Dureza total	mg/L											964.00		964.00
SST	mg/L	190±35	83±11			502.80						520±20		75.00
SSV	mg/L	47±45	75±7											51.00
ST	mg/L	7,233±176	3,195±120									26,392±151.80		12,810.00
STV	mg/L	2,910±231	905±50											3,839.00
STF	mg/L	4,323±176	2,290±170											
Turbiedad	UNT											108.00		108.00

Figura 11 Características de lixiviados en México

En general, las características de los lixiviados en México son altas concentraciones de materia orgánica, nutrientes y fracciones biodegradables menores a 0.1, lo que indica su baja biodegradabilidad.

5.2. Caracterización de residuos envejecidos

Los resultados obtenidos de la caracterización de subproductos para los residuos estabilizados o envejecidos provenientes de los rellenos sanitarios La Cañada y Regional Yecapixtla se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8 Clasificación de subproductos presentes en residuos envejecidos o estabilizados

Subproducto	La Cañada	Regional Yecapixtla
	% en peso	
Algodón	0.254	-
Cartón	0.041	-
Fibra dura vegetal	0.634	0.009
Hueso	-	0.112
Loza y cerámica	1.647	0.068
Material ferrosol	0.038	-
Pañal desechable	0.145	0.050
Plástico de película	2.154	1.533
Plástico rígido	1.305	0.646
Poliuretano	0.049	0.115
Tela	0.477	0.110
Vidrio de color	0.071	0.844
Vidrio transparente	0.614	0.044
Otros (suelo)	92.569	96.470
Total	100	100

Se identificaron 12 subproductos para La Cañada, de los cuales, el algodón, cartón, fibra dura vegetal, material ferroso, pañales, telas, y vidrios están presentes en porcentajes <0.7%, mientras que la presencia de plásticos es del 3.509% de la muestra de residuos, para cerámicas se identificó el 1.647%, por lo que el 92.569% restante corresponde a el suelo con el que se cubrieron las celdas del relleno sanitario.

Para la muestra de los residuos sólidos provenientes del relleno Regional Yecapixtla se identificaron 10 subproductos en la muestra de residuos, de los cuales, la fibra dura vegetal, huesos, cerámicas, pañales, vidrios y telas, están presentes en porcentajes <0.115%, los plásticos representan un 2.294% de la muestra, y el 96.470% restante, corresponde al suelo utilizado para cubrir las celdas.

La caracterización fisicoquímica de ambos residuos envejecidos se muestra en la Tabla 9. Debido a que el mayor porcentaje de los residuos en ambas muestras corresponden a suelo, la caracterización fisicoquímica se realizó con ese porcentaje de muestra. Se encontró que para ambos rellenos sanitarios el suelo presenta una densidad mayor a 1.32 g/cm³ lo que

corresponde a un suelo de tipo mineral no volcánico. Para el caso del relleno sanitario La Cañada los datos de textura corresponden a un suelo con textura franco arenosa, mientras que para el relleno Regional Yecapixtla el suelo corresponde a una textura franca (NOM-021-RECNAT-2000).

Tabla 9 Caracterización fisicoquímica de los residuos envejecidos o estabilizados

Parámetro	La Cañada	Regional Yecapixtla
pH	8	7.5
Materia orgánica (%)	3.84	5.05
Humedad (%)	3.62	5.16
Textura (%)		
• Arena	75.25	49.59
• Arcilla	16.144	23
• Limo	8.59	27.4
Densidad (g/cm ³)	1.79	1.36

5.3. Caracterización de lixiviados

Los resultados obtenidos en la caracterización de las diferentes muestras de lixiviados (correspondientes al lote 2024) se presentan en la Tabla 10.

Se observa que las concentraciones más elevadas de contaminantes, como lo es la DQO, se encontraron en el relleno sanitario La Cañada, reportando concentraciones de $9,169.40 \pm 65.06$ mg/L, mientras que las más bajas se encontraron en Rancho Coronel con una concentración de $1,399.51 \pm 25.62$ mg/L de DQO, las cuales son concentraciones reportadas en lixiviados intermedios, sin embargo la relación DBO5/DQO en todos los lixiviados es menos a 0.3, lo que indica una baja biodegradabilidad de los lixiviados, valores que están presentes en lixiviados maduros o viejos.

Los valores de pH obtenidos para los cuatro lixiviados se encuentran en el rango de 7.6 a 9.5, valores presentados en lixiviados maduros.

De igual forma los lixiviados presentaron concentraciones de NT en un rango entre 490 a 9,000 mg/L, siendo Bordo poniente el que reporto la concentración más alta de $9,000 \pm 282.84$ mg/L y Rancho coronel la más baja de 490 ± 14.14 mg/L.

Tabla 10 Caracterización fisicoquímica de lixiviados

Parámetros (mg/L)	Regional Yecapixtla	La Cañada	Bordo	Rancho coronel
pH	9.23 ± 0.04	9.66 ± 0.19	8.13 ± 0.25	7.68 ± 0.09
DQOt	7,260 ± 576.54	9,169.40 ± 65.06	3,759.73 ± 174.01	1,399.51 ± 25.62
DQOs	5,471.20 ± 435.67	8,905.80 ± 206.19	3,663.73 ± 180.116	1,330.17 ± 76.60
DBO ₅	189.90 ± 56.35	1,002.48 ± 339.06	189.24 ± 75.60	121.29 ± 29.41
Relación DBO ₅ /DQO	0.03	0.10	0.05	0.09
Alcalinidad	1,567.35 ± 307.61	14,524.49 ± 270.07	11,054.42 ± 130.26	857.14 ± 57.72
NT	500 ± 141.42	1,035 ± 91.92	9,000 ± 282.84	490 ± 14.14
N-NH ₃	51.33 ± 3.05	383.33 ± 5.77	1,856.67 ± 439.81	148 ± 3.60
NO ₃ ⁻	24.50 ± 6.19	11 ± 4.24	34.78 ± 7.42	105.03 ± 2.30
PT	58.17 ± 4.47	24.70 ± 4.10	336.67 ± 80.14	6.33 ± 0.94
PO ₄ ³⁻	12.64 ± 3.28	15.70 ± 1.83	89.17 ± 39.85	2.67 ± 0.47
ST	5,725 ± 162.63	10,365 ± 63.64	11,715 ± 530.33	3195 ± 120.20
SV	1,945 ± 233.34	3,570 ± 155.56	2,010 ± 28.28	905 ± 49.45
SF	3,780 ± 70.71	6,795 ± 219.20	9,705 ± 558.61	2,290 ± 169.70
SST	190 ± 45.82	325 ± 21.21	395 ± 21.21	82.50 ± 10.60
SSV	103.33 ± 25.16	240 ± 14.14	205 ± 7.07	75 ± 7.07
SSF	86.67 ± 20.81	85 ± 7.07	190 ± 14.14	7.50 ± 3.53
Color aparente (UPtCo)	15,580 ± 1583.35	16,160 ± 947.62	4,525 ± 713.55	4,480 ± 169.70
Color verdadero (UPtCo)	14,700 ± 141.421	14,900 ± 1411.21	3,800 ± 989.94	3,745 ± 63.63

5.4. Evaluación de procesos fisicoquímicos

Bordo Poniente

El primer tratamiento aplicado fue el ajuste de pH de los lixiviados a 3, 7 y 11. Posteriormente cada muestra fue sometida a contacto con ozono para finalmente aplicar US. Todo el procedimiento experimental se realizó en forma secuencial. En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos con respecto al color verdadero y aparente.

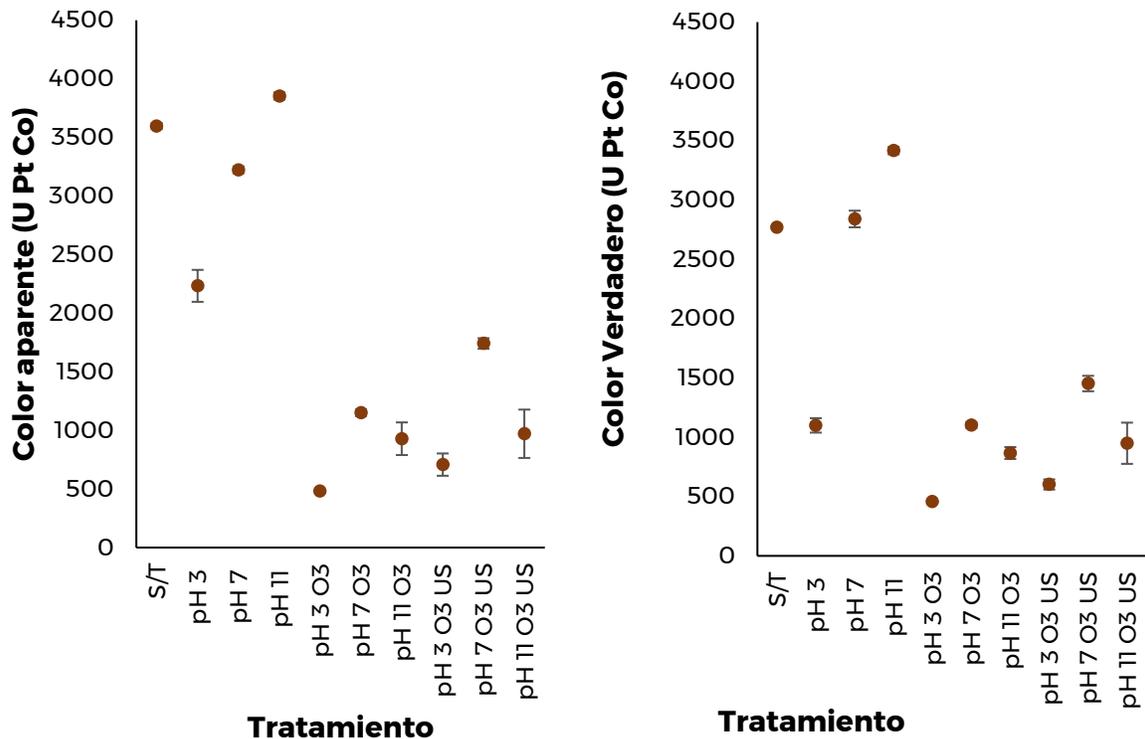


Figura 12 Comportamiento del color en lixiviados del relleno sanitario Bordo Poniente

El color aparente presentó un valor ligeramente por arriba de los 3,500 U Pt-Co para el lixiviado sin tratamiento y se encontró la mejor disminución con el tratamiento a pH 3 más O₃ con un 86% de disminución. Se observa en la Figura que en general en los tratamientos a los que se aplicó ozono u O₃+US hubo una disminución por lo menos del 50% en el valor de color. El ozono tiene preferencia por los dobles enlaces (Vidal, 2003) y considerando que los compuestos cromóforos de la materia orgánica pueden contener fracciones ricas en electrones, se puede asumir que el ozono transformó ese tipo de compuestos disminuyendo así el color. El argumento anterior aplica también a la disminución de color verdadero en los que nuevamente en los tratamientos donde se aplicó ozono u ozono + US presentaron las mejores eficiencias de remoción de color (superior al 52%), siendo el tratamiento con ozono a pH 3 el mejor (83% de remoción). Además, con los valores de remoción de color verdadero se asume que los tratamientos oxidantes fueron efectivos con la materia orgánica soluble.

Por otro lado, en la Figura 13 se puede observar que los tratamientos no tuvieron un efecto significativo para el aumento de la relación DBO₅/DQO con excepción de los tratamientos con ozono a pH 3 y 7. A pH ácido las sustancias de tipo húmico se pueden precipitar lo cual pudo influir en aumentar dicha relación ya que se presenta una disminución de la DQO.

Comparando los tres tratamientos a pH 3 y 7 ambos con la aplicación de ozono podría ser que este último es quien oxidó y fragmentó la materia orgánica siendo su efecto más importante que el del pH.

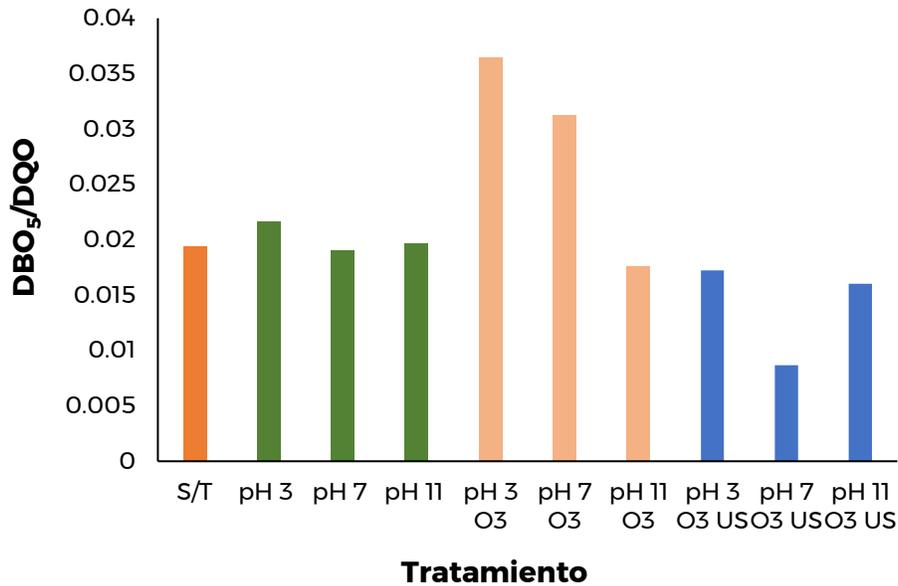


Figura 13 Comportamiento de la relación DBO₅/DQO en lixiviados del relleno sanitario Bordo Poniente

Rancho Coronel

La Figura 14 muestra la remoción de color verdadero y aparente bajo los tratamientos aplicados para el lixiviado proveniente del relleno sanitario Rancho Coronel (RC). Se observó nuevamente que el ajuste de pH a un valor de 3 influyó en la remoción de color verdadero y aparente, siendo a este valor donde se encontraron las mejores eficiencias de remoción superiores al 70% para los tratamientos donde se aplicó O₃ y O₃ + US.

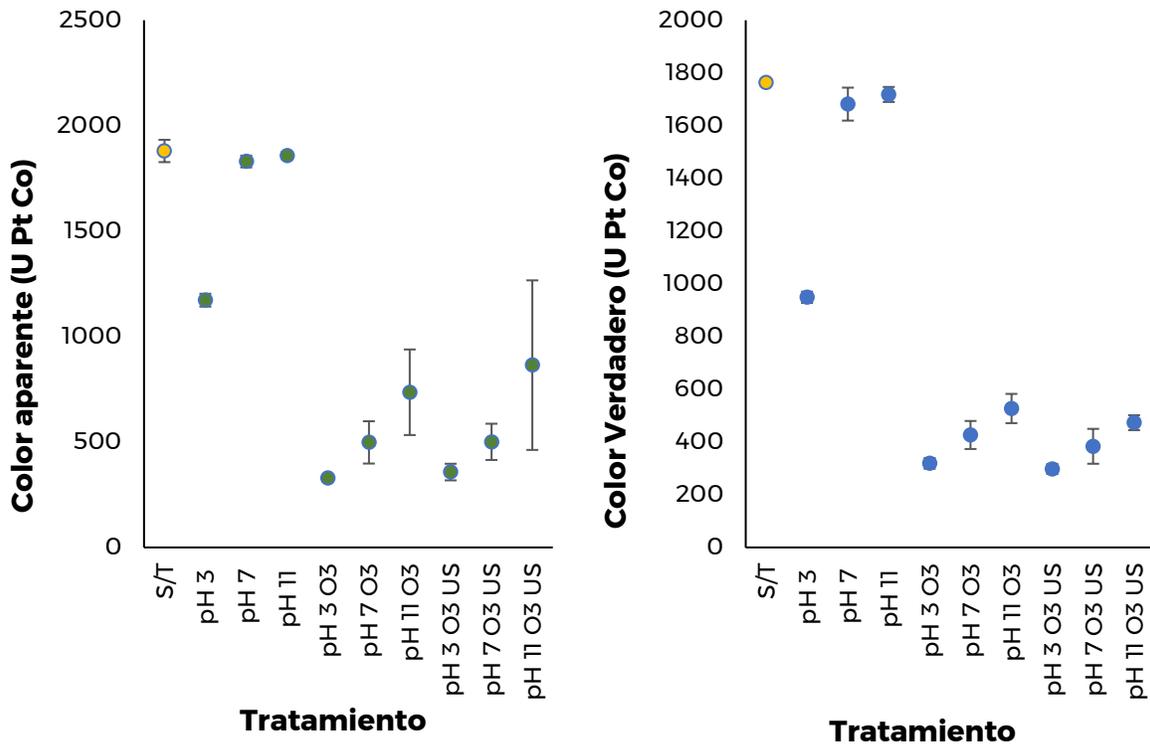


Figura 14 Comportamiento del color en lixiviados del relleno sanitario Rancho Coronel

Respecto a la evaluación de la biodegradabilidad, en la Figura 15 muestra que los tratamientos que tuvieron un efecto significativo fue la combinación de pH 3 + O₃ +US además de pH 7 + O₃.

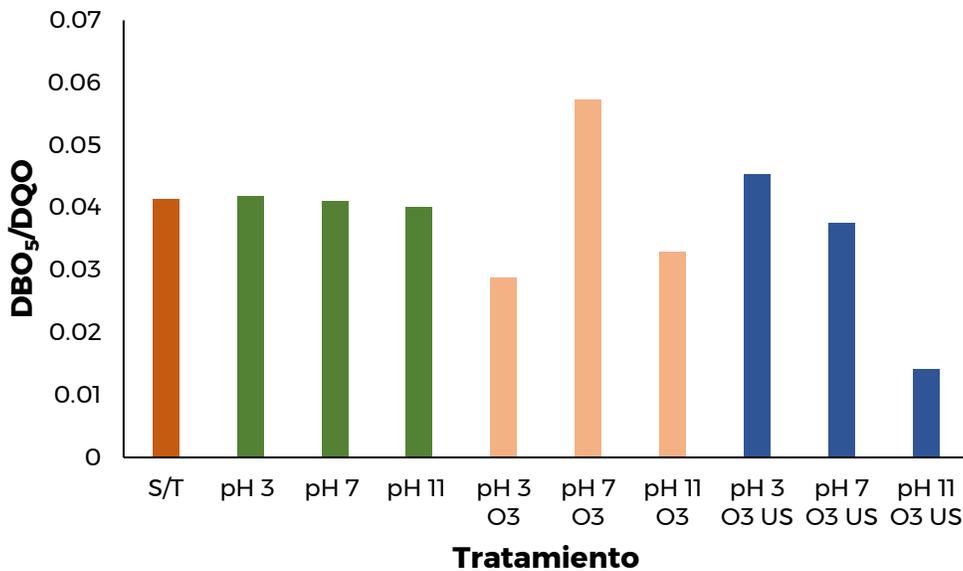


Figura 15 Comportamiento de la relación DBO₅/DQO en lixiviados del relleno sanitario Rancho Coronel

La Cañada

El lixiviado de La Cañada presentó los resultados más dispersos respecto a la remoción de color aparente y verdadero (Figura 16). Respecto al color aparente, la remoción más alta (alrededor del 50%) se alcanzó a pH 3 y con su complementario tratamiento de ozono y ozono + US. Al observar la Figura y considerando la dispersión de los valores, parece que no hubo una diferencia significativa entre los tres tratamientos, por lo cual, la disminución del color se puede atribuir solo al efecto del pH sobre las sustancias húmicas y huminas. El efecto del pH a un valor de 3, se repitió para el color verdadero, siendo a ese pH donde se encontraron las mejores eficiencias de remoción (aproximadamente 70%) e indicando que ni el ozono o el tratamiento O₃ + US tuvieron mayor efecto.

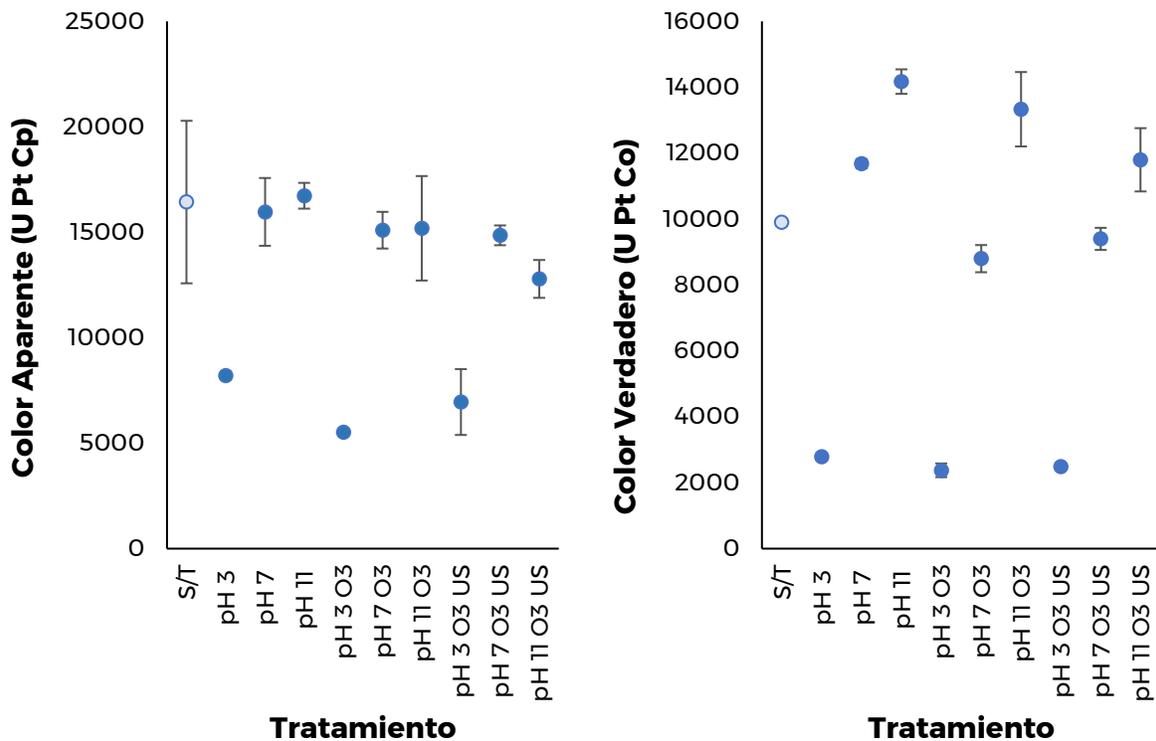


Figura 16 Comportamiento del color en lixiviados del relleno sanitario La Cañada

Respecto a la evaluación de la biodegradabilidad, en la Figura 15 muestra que los tratamientos que tuvieron un efecto significativo fue la combinación de pH 3 + O₃ + US además de pH 7 + O₃.

De acuerdo al análisis estadístico aplicado para la evaluación de cambio en la biodegradabilidad por el cálculo del cociente DBO₅/DQO, no hay diferencia significativa en ninguno de los tratamientos con solo el ajuste de pH (Figura 17). De hecho, para los tratamientos donde se aplicó O₃ se observó una disminución de la biodegradabilidad, lo cual podría indicar un efecto adverso por el ozono. El O₃ puede fraccionar la materia orgánica, sin embargo, las moléculas hijas pueden ser más tóxicas que las originales, ocasionando un efecto inhibitorio o tóxico en las bacterias que se utilizan para la medición del análisis de DBO₅. Este fenómeno no se advirtió con los lixiviados de Bordo Poniente y Rancho Coronel, posiblemente



por la diferencia en el tipo de materia orgánica, que al ser La Cañada un relleno sanitario joven, sus lixiviados presentarían una fracción orgánica más biodegradable en teoría, no obstante, hacen falta más estudios para caracterizar más detalladamente el lixiviado de La Cañada y así elucidar que clase de transformaciones se están llevando a cabo.

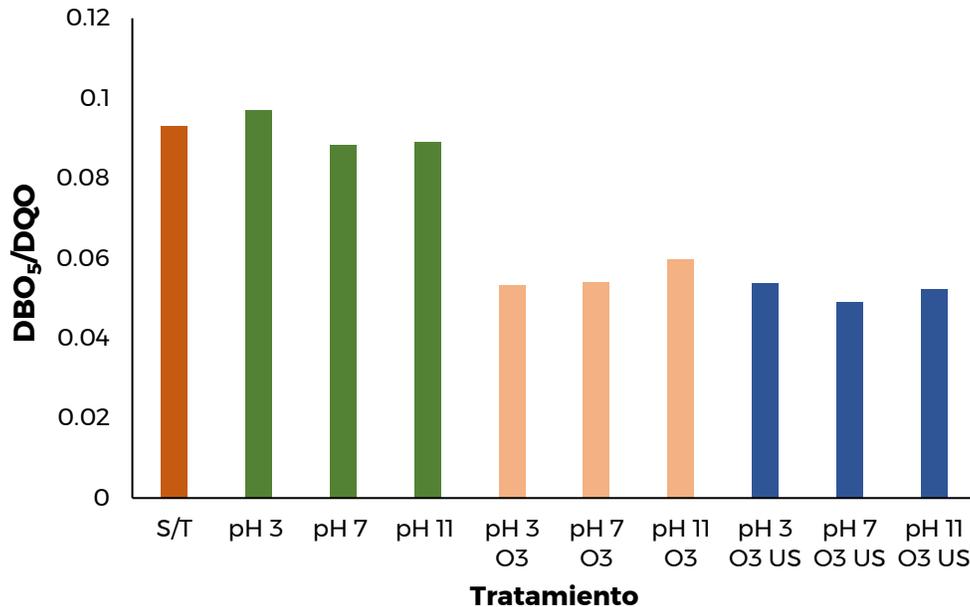


Figura 17 Comportamiento de la relación DBO₅/DQO en lixiviados del relleno sanitario La cañada

5.5. Evaluación de sistemas de biofiltración

Se determinó la granulometría de los materiales que serán utilizados como empaque de los biofiltros (coque, trozos de madera y composta de jardín).

Para el análisis granulométrico se consideró la tabla de esfericidades de sedimentos debido a que no se encontraron datos para los materiales utilizados, de la misma forma se utilizó un factor de forma de 1.5 similar a la arena de cantos vivos, cuya morfología es parecida a los materiales utilizados (Tabla 11).

Tabla 11 Características de las partículas

Parámetro	Significado	Coque	Trozos de madera	Composta de jardín
Φ_s	Esfericidad	0.75	0.5	0.8
P_p	Densidad	0.00127	0.0005	0.0005
α	Factor volumétrico de forma	1.5	1.5	1.5

Una vez tamizados los materiales fueron pesados (el material retenido en cada malla) y con estos resultados se evaluaron las fórmulas del análisis granulométrico. Los resultados se muestran en la Tabla 12.

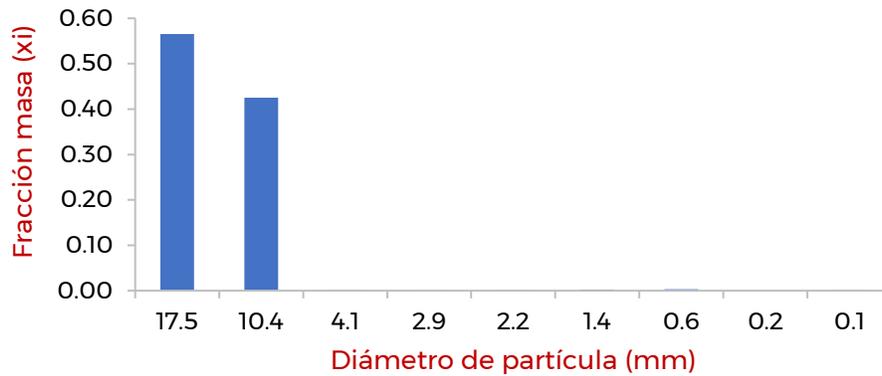
Tabla 12 Resultados del análisis granulométrico

Parámetro	Significado	Coque	Trozos de madera	Composta de jardín
A_w (mm ² /g)	Superficie específica	607	24,496	19,917
N_w (partículas/g)	Número de partículas en la mezcla.	1,440	197,270	60,091
D_v (mm)	Diámetro medio de volumen	0.7	0.2	0.3
D_s (mm)	Diámetro medio-volumen superficie	10.3	1.0	0.8
D_w (mm)	Diámetro medio de masa	14.3	8.4	2.7

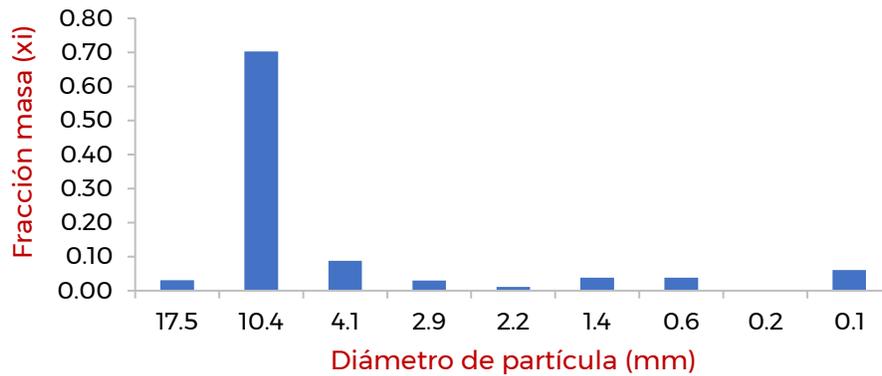
En la Figura 18 se presenta la distribución de los materiales evaluados de acuerdo al tamaño de partícula. Como se puede observar en las gráficas el coque al ser una partícula más sólida que no se rompe presenta solamente 2 tamaños de partícula y una mínima proporción de polvo, mientras que en la composta se presenta una distribución más amplia en el tamaño de partícula, por esta razón se decidió utilizar una mezcla de materiales para proporcionar un área superficial alta, con un material rígido que evite la compactación de los trozos de madera y la composta.



Coque



Trozos de madera



Composta

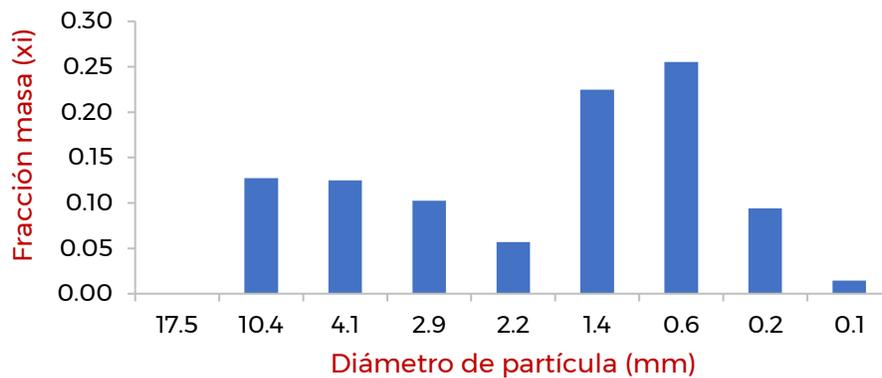


Figura 18 Distribución del tamaño de partícula de las muestras de materiales analizados

Una vez que se realizó la mezcla de materiales, se llevaron a cabo las pruebas de vaciado a través de las cuales se obtuvo la porosidad de los materiales (Tabla 13). Como se puede



observar, el coque al mezclarse con los otros materiales disminuye su porosidad debido a que parte de los espacios vacíos son ocupados por dichos materiales en la mezcla.

Tabla 13 Porosidad de los materiales en los reactores

Material	Porosidad (%)
Coque	68
Coque+trozos de madera (50:50%)	31
Coque+composta (50:50%)	51

Después de realizar las pruebas de vaciado, los biofiltros fueron inoculados y los sistemas fueron alimentados con lixiviados al 10%. A continuación se describen los resultados obtenidos.

En la Figura 19 se muestra el comportamiento del pH en los biofiltros, se puede observar que el pH en el influente se ha mantenido en un rango entre 8 a 9.4, mientras que en efluente de los tres biofiltros al inicio de la experimentación se presentó un pH superior a 8.8, posteriormente disminuyó a valores entre 7.4 a 7.9 y a partir del día 6 de operación se observa que los tres biofiltros se comportan diferente, sin embargo, el pH se continua manteniendo en valores superiores a 6.5, lo que indica que existe el pH adecuado en los biofiltros para el crecimiento y proliferación de los microorganismos.

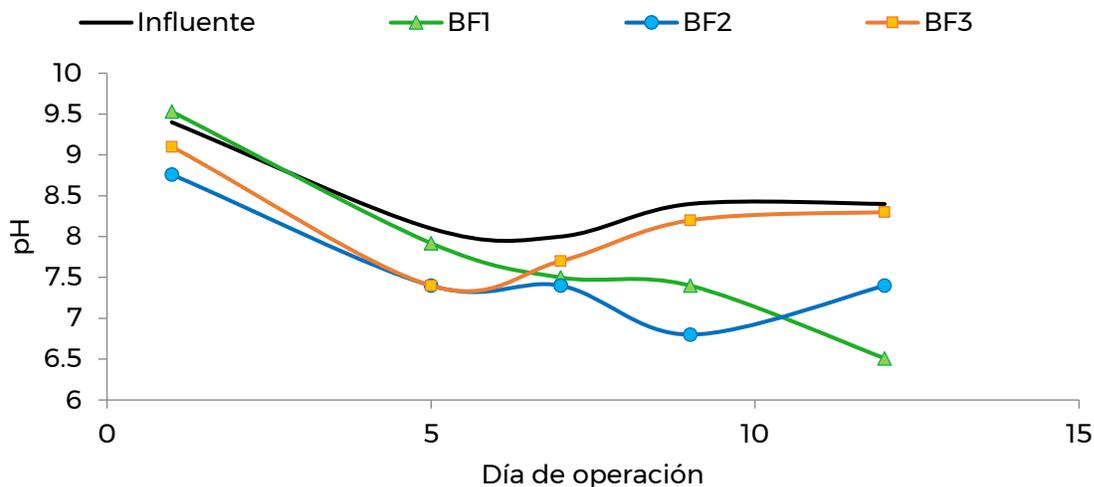


Figura 19 Comportamiento del pH en biofiltros

Con respecto a la DQO se puede observar una ligera disminución en la concentración con respecto al influente (Figura 20), lo que puede indicar que la materia orgánica está siendo retenida en el material filtrante desde el inicio de la etapa experimental, esto debido a las propiedades de los materiales de adsorber las moléculas contaminantes. Después de 12 d de operación en continuo se encontró una remoción de DQO de 18, 34 y 14% para el BFI, BF2 y BF3, respectivamente.

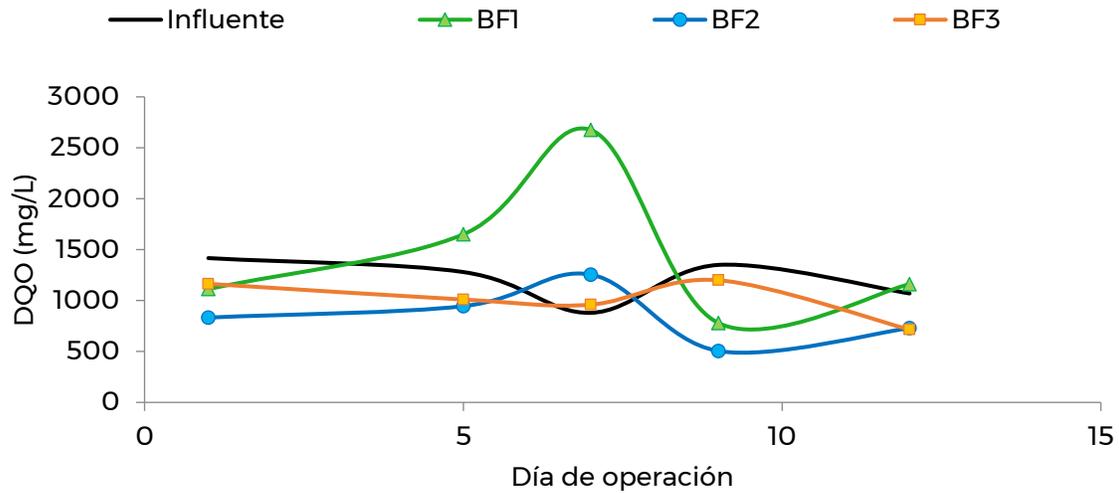


Figura 20 Comportamiento de la materia orgánica en biofiltros

En la Figura 21 se observan muestras del influente y efluentes de los biofiltros. Se puede apreciar que las coloraciones del influente y efluente son similares, sin embargo, para el BF2 y BF3 el color es más claro (más amarillo) probablemente por el lavado de los ácidos húmicos y fúlvicos de los materiales orgánicos, lo cual brinda esta coloración y lo cual impacta directamente en la medición de la DQO.

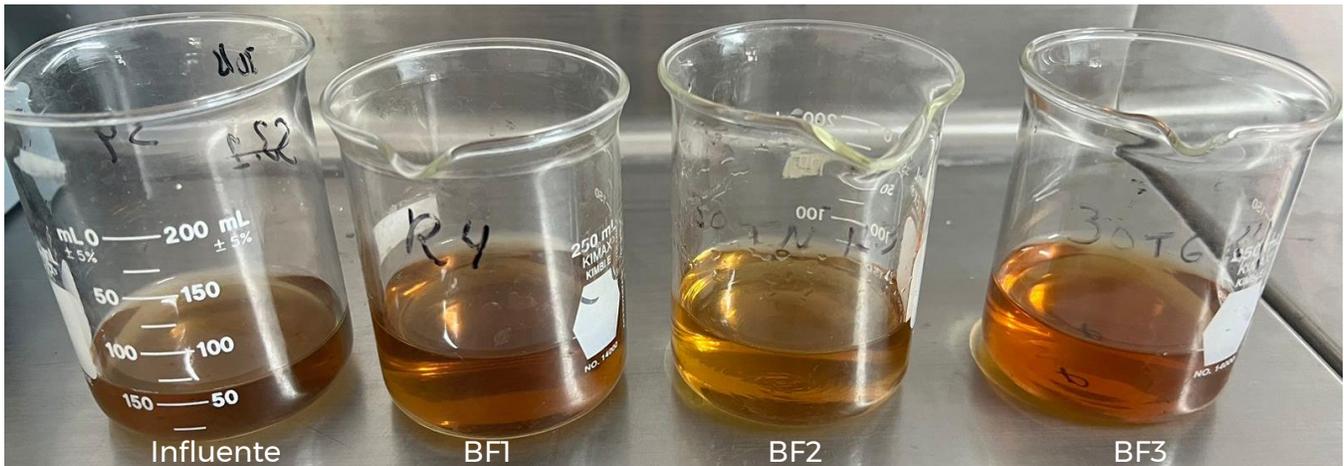


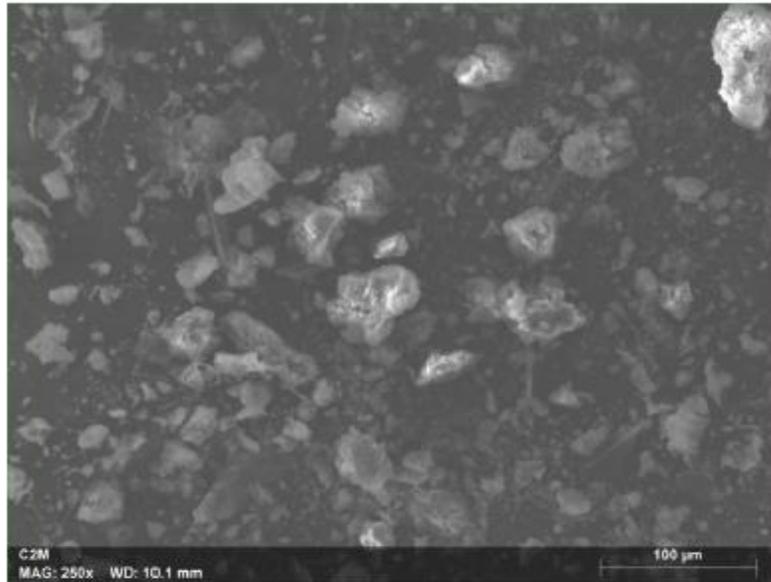
Figura 21 Muestras de lixiviado crudo y tratado a través de los procesos de biofiltración

5.6. Evaluación de biocarbones

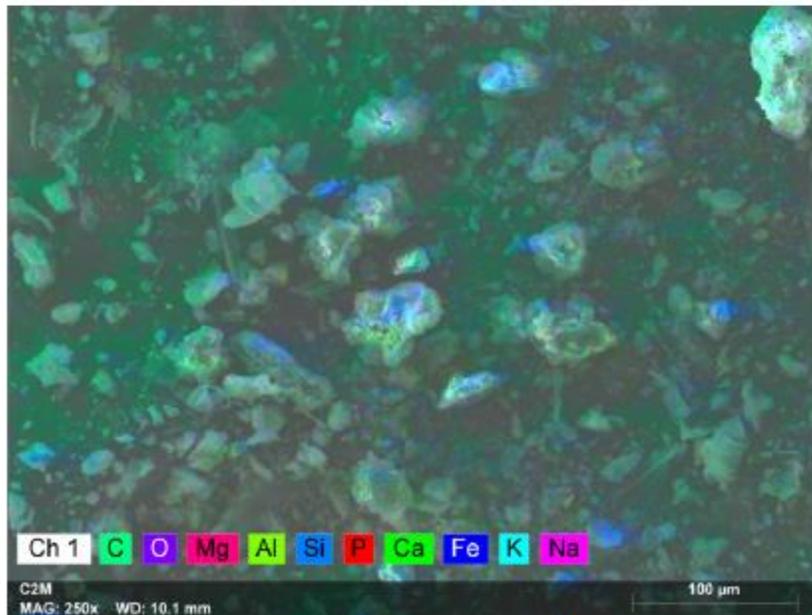
Se realizó el análisis SEM (Microscopia electrónica de barrido) para el biocarbón de cachaza con la finalidad de identificar la distribución de tamaño y forma del material (Figura 22). Se muestra en la Figura 23 el mapeo elemental por EDS (Espectroscopia por dispersión de



energía de rayos X) en los que se observa la identificación y cuantificación de elementos presentes en el biocarbón.

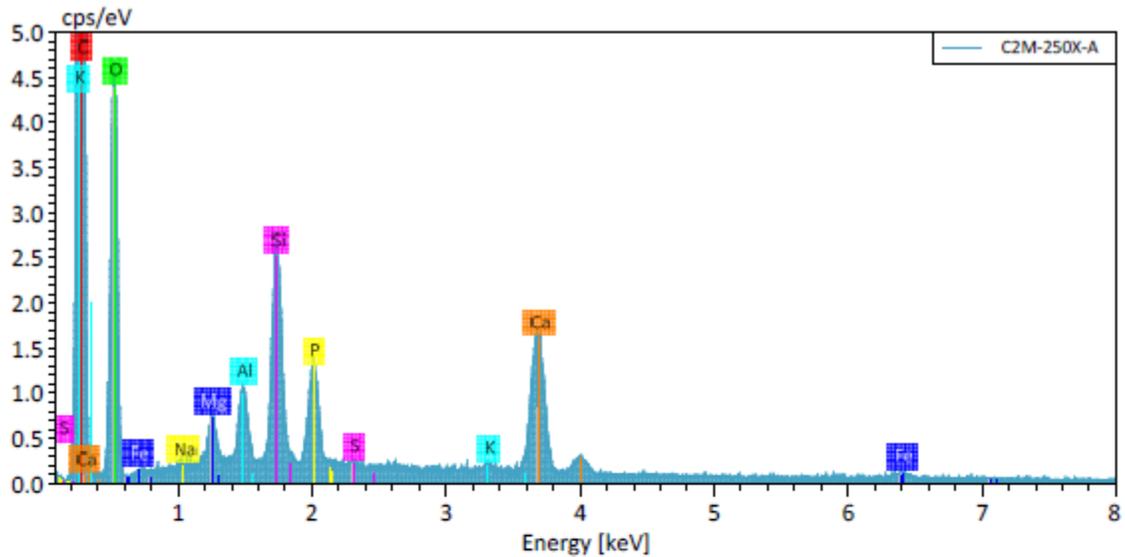


Name	Date	Time	HV [kV]	Mag	WD [mm]
C2M	10/3/2023	4:58:54 PM	20.0 keV	250x	10.1 mm



Name	Date	Time	HV [kV]	Mag	WD [mm]
C2M	10/3/2023	4:59:08 PM	20.0 keV	250x	10.1 mm

Figura 22 Análisis SEM de biocarbón de cachaza de caña de azúcar



Name	Date	Time	HV [kV]	Real time [s]	Dead time [%]	Pulses [kcps]
C2M-250X-A	10/3/2023	4:48:20 PM	20.0	91.653	3	2.826

C2M-250X-A

Element	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbon	59.486960	59.486959	68.937399	6.846760	11.509682
Oxygen	31.038565	31.038565	27.002888	3.929765	12.660910
Sodium	0.047361	0.047361	0.028675	0.005689	12.012609
Magnesium	0.738026	0.738026	0.422657	0.069034	9.353880
Aluminium	0.940952	0.940952	0.485415	0.073014	7.759579
Silicon	2.139580	2.139580	1.060373	0.118529	5.539844
Phosphorus	1.319748	1.319748	0.593075	0.078929	5.980624
Sulfur	0.162037	0.162037	0.070337	0.033044	20.392651
Potassium	0.199915	0.199915	0.071170	0.033729	16.871550
Calcium	3.561881	3.561881	1.237045	0.132821	3.728949
Iron	0.364976	0.364976	0.090966	0.040873	11.198873
	100.000000	100.000000	100.000000		

Name	Date	Time	HV [kV]	Real time [s]	Dead time [%]	Pulses [kcps]
C2M-250X-A	10/3/2023	4:48:20 PM	20.0	91.653	3	2.826

Figura 23 Análisis EDS de biocarbón de cachaza de caña de azúcar



5.7. Evaluación de procesos de vermicompostaje

En la Figura 24 se observa la supervivencia de las lombrices durante la etapa experimental. Se puede observar que el tratamiento T4 mostró una tasa de supervivencia del 100%, seguido por C2 y C3 con un 90% y 80% respectivamente. En contraste, el sustrato C1 mostró una ausencia total de sobrevivientes.

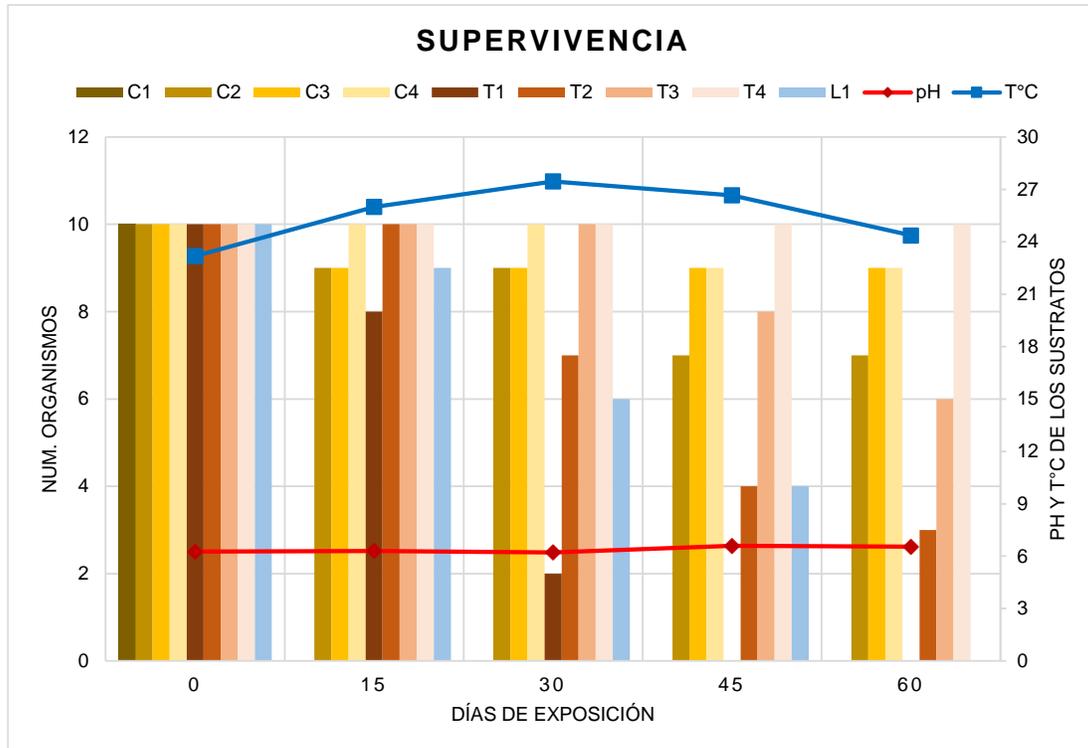


Figura 24 Supervivencia de *Eisenia foetida* durante el proceso de vermicompostaje

El pH de la mezcla (RE+biosólido) se mantuvo en un rango entre 6 a 6.96, mientras que la temperatura se encontró en un rango entre 24 a 28°C.

Se observó que en el tratamiento T2 se obtuvo un mayor incremento en el peso promedio de las lombrices (194%), seguido de C2 con un incremento del 139%. Los tratamientos T3 y C3 presentaron incrementos en el peso de las lombrices de 131% y 99%, respectivamente (Figura 25).

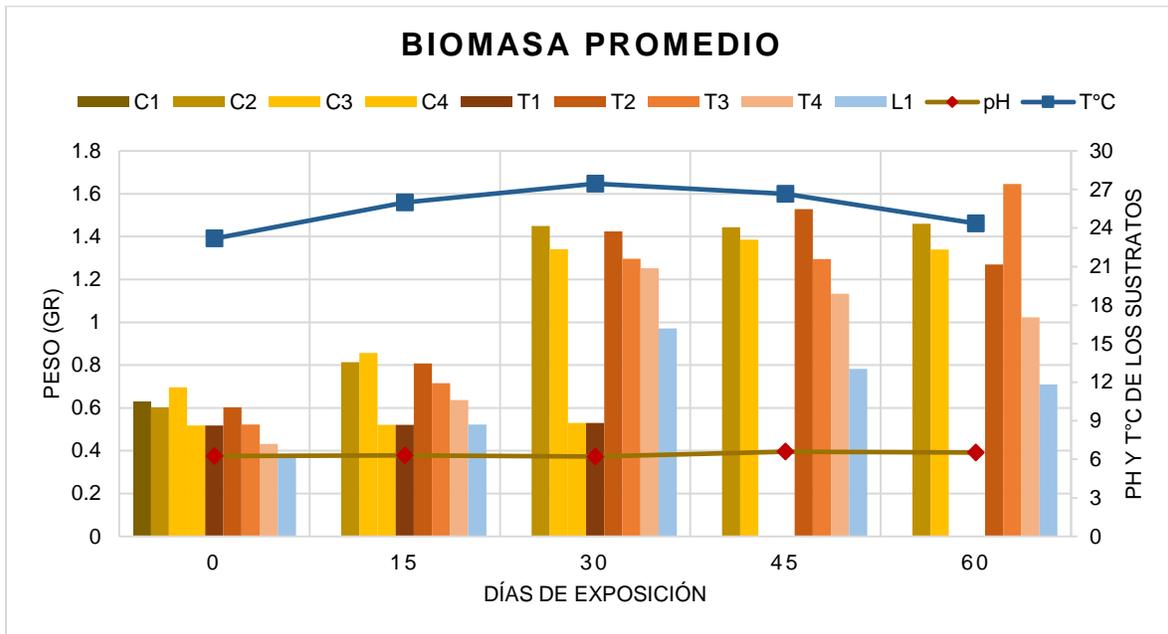


Figura 25 Evolución de la biomasa de *Eisenia foetida* durante el proceso de vermicompostaje

Se observó a través de un microscopio estereoscópico la mayor presencia de cocones y crías en el tratamiento T4 (Figura 26).

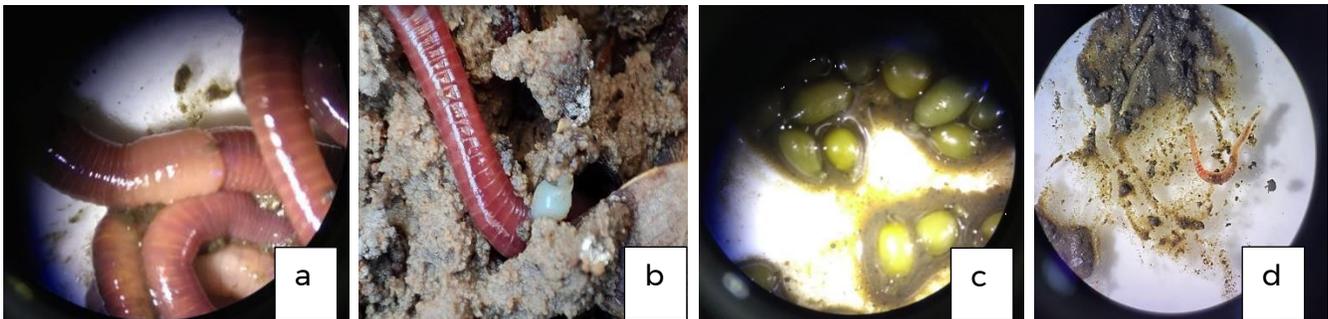


Figura 26 Observaciones microscópicas: a) organismo con clitelo, b) cocones, c) cocones en su segunda etapa de desarrollo y d) crías

5.8. Formación de recursos humanos

Durante la ejecución del proyecto se apoyó en la formación de recursos humanos a través de tesis, servicio social y prácticas profesionales (se encuentran en cierre de proyectos) enlistadas en la Tabla 14.

Tabla 14 Formación de recursos humanos

Estudiante	Nivel	Proyecto
Ulises Duvan Rodríguez Díaz	Doctorado	Tesis
Netzer Sinue Castillo Ocampo	Licenciatura	Servicio Social
Thalia Rodríguez Candia	Licenciatura	Residencia profesional
Eduardo Miguel Ramírez Flores	Licenciatura	Residencia profesional



5.9. Participación en congresos

Con los resultados del proyecto se participó con la presentación en póster del artículo “Evaluación de un sistema de vermicompostaje para el tratamiento de residuos envejecidos provenientes de un relleno sanitario” y con la presentación oral del artículo “Pretratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios con procesos de oxidación avanzada” en el Primer Congreso Internacional de Ingeniería Ambiental “Perspectivas para la sostenibilidad” (CIAMB) realizado del 19 al 21 de junio en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Se anexan memorias del Congreso).

Además se participará con el artículo “Comportamiento de la toxicidad en un sistema biológico granular para el tratamiento de lixiviados” en el XXXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica que se llevará a cabo del 1 al 4 de octubre en Medellín, Colombia (Se anexa resumen).



6. Conclusiones

Durante la revisión bibliográfica se encontró que la mayor parte de los trabajos en los que se ha realizado una caracterización de lixiviado se han hecho con los lixiviados del relleno sanitario de Bordo Poniente. Se encontró que las fracciones biodegradables en todos los lixiviados reportados son bajas (menores a 0.1).

Con respecto a los residuos envejecidos o estabilizados, se encontró que el mayor constituyente es el suelo, sin embargo, falta analizar los compuestos químicos presentes en dichos residuos.

Los lixiviados caracterizados en el presente proyecto presentan bajas biodegradabilidades y valores de DQO desde 1,330 hasta 9,169 mg/L, con altas concentraciones de nitrógeno y fósforo (de 500 a 9000 mg/L para nitrógeno total y de 6 a 337 mg/L para fósforo total).

Los procesos fisicoquímicos evaluados (ozono y ozono+US) mostraron que debido a las concentraciones de contaminantes tan variadas presentes en los lixiviados analizados, no se pudo obtener un método general para el tratamiento de los mismos, por lo que se tienen que continuar realizando modificaciones en el pH, en la combinación de los sistemas y evaluar sistemas alternativos de tratamiento fisicoquímico. Se encontraron remociones máximas de DQO de 18, 28 y 32% para el lixiviado de Bordo Poniente, Rancho Coronel y La Cañada con los experimentos de pH 11 y ozono, pH 11 y ozono+ultrasonido y pH 3 y ozono, respectivamente.

El sistema de biofiltración con diferentes materiales presentó remociones de DQO de 18, 34 y 14% para el BF1 (coque), BF2 (coque+trozos de madera) y BF3 (coque+composta de jardín), respectivamente.

Durante la caracterización de biocarbón proveniente de cachaza de caña de azúcar se identificaron diferentes compuestos presentes en el mismo, entre ellos, magnesio, aluminio, fierro y potasio.

Los resultados del proceso de vermicompostaje mostraron un 100% de mortandad de las lombrices de la especie *Eisenia foetida* en residuos estabilizados provenientes de dos rellenos sanitarios. Sin embargo, al mezclar los residuos con biosólido de PTAR a partir de una mezcla (50:50, v/v) se obtiene la sobrevivencia de por lo menos el 40% de los organismos. Con una mezcla del 5% de RE se obtiene mayor sobrevivencia de la especie y se asegura la reproducción de la misma.



Bibliografía

- Arellano, J. (2024). [https://usuarios.geofisica.unam.mx/gvazquez/estratiGAB/Zona%20desplegar/Clases/Clase%2003%20PEPS%20\(Caracter%EDsticas%20sedimentos\).pdf](https://usuarios.geofisica.unam.mx/gvazquez/estratiGAB/Zona%20desplegar/Clases/Clase%2003%20PEPS%20(Caracter%EDsticas%20sedimentos).pdf)
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2009). An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 54-60. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.06.038
- Hassan, M., Zhao, Y., & Xie, B. (2016). Employing TiO₂ photocatalysis to deal with landfill leachate: Current status and development. *Chemical Engineering Journal*, 285, 264-275. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.093>
- Hernández García, H., Buitrón Méndez, G., M Lopez-Vazquez, C., & J Cervantes Carrillo, F. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño. IWA publishing. DOI: 10.2166/9781780409146
- Rodríguez Peña, M., Barrera Díaz, C. E., Costillas, S., Lacasa, E., Sáez, C., Cañizares, P., ... & Sánchez Bautista, A. (2020). Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de agua. México, UAEMEX. Pp.17, 46, 47 y 48. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/109361>
- Tchobanoglous, G., y Kreith, F. (2002). Formation, Composition, and Management of Leachate. En G. Tchobanoglous, y F. Kreith, "Landfilling". *Handbook of solid Waste Management*. California: McGraw-Hill. Pp700-723.
- Torkashvand, J., Rezaei Kalantary, R., Heidari, N., Kazemi, Z., Kazemi, Z., Farzadkia, M., ... & Oshidari, Y. (2021). Application of ultrasound irradiation in landfill leachate treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(35), 47741-47751. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15280-9>
- Gao L., Li Z., Yi W., Li Y., Zhang P., Zhang A., Wang L. Impacts of pyrolysis temperature on lead adsorption by cotton stalk-derived biochar and related mechanisms. *J Environ Chem Eng*. 2021; 9 (4).
- Qu J., Wang Y., Tian X., Zhao J., Deng F., Tao Y., Jiang Q., Wang L., Zhang Y. KOH-activated porous biochar with high specific surface area for adsorptive removal chromium (VI) and naphthalene from water. *J Hazard Mat*. 2021; 401.
- Solís, P. 2011. Tesis de Maestría. Obtención de Vermicomposta a partir de residuos orgánicos de mercado en distintas etapas de precomposteo y su evaluación en Maíz. 89p.
- González G. Juan Carlos y Godoy P. Sofia C. 2021 Evaluación de la adaptación de las lombrices rojas *Eisenia foetida* a lodos de lixiviados de un relleno sanitario con perspectiva a su utilización en procesos de vermicompostaje. *Conciencia Digital*. Vol 4, Núm.3.1, p.6-22.
- Khursheed Ahmad Dar and S. Senthilmurungan. 2022. Municipal solid waste as the prospective substrate for earthworm *Eisenia foetida* to convert waste into manure. *International Journal of Zoology and Applied Biosciences*. Vol. 7, Issue 1, pp:11-16.
- Satyawati Sharma, Kaviraj Pradhan, Santosh Satya, Padma Vasudevan. 2005. Potentiality of earthworms for waste management and in other uses-A Review. *The Journal of American Science*, 1.
- Blair T., McPherson J., 1999, Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. *Journal of sedimentary research*, vo. 69, no. 1. pp. 6-19



- Cardoso L., Ramírez, E., Rivas, A. 2000. Informe Final. Instalación de un sistema de Vermiestabilización a escala real en una planta de Tratamiento Municipal. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.



UNAM
POSGRADO
Ingeniería



INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM



CECC

ISWA

LAC

CONSORCIO UNIVERSITARIO
DE INVESTIGACIÓN SOSTENIBLE, DE INGENIERÍA
EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

REVISTA INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Volumen 40, 2024
ISSN-0188 4999

<http://www.revistas.unam.mx/index.php/rica/>

MEMORIAS

*1ER CONGRESO INTERNACIONAL DE
INGENIERÍA AMBIENTAL (CIAMB):
PERSPECTIVAS PARA LA SUSTENTABILIDAD*

EDITORES:

María Neftalí Rojas Valencia

Alfonso Durán Moreno

Rodolfo Sosa Echeverría

Alfredo Martínez Cruz



ICA FLUOR



NEWCALGON®
SOLUCIONES PARA TRATAMIENTO DE AGUAS Y PROCESOS



AECOM

CIAMB
2024

ÍNDICE
GENERAL

Revista Internacional de Contaminación Ambiental
<https://doi.org/10.20937/RICA.55306>





Evaluación a nivel laboratorio de la retención de dióxido de azufre con residuos y subproductos de una planta minero-metalúrgica de manganeso 75

Prevención del riesgo de contaminación del agua por el funcionamiento de rellenos sanitarios en América Latina y el Caribe..... 76

Evaluation of the Toxic and Positive Effect of Acidogenic Effluents Enriched in Nickel on the Production of Biogas Enriched with Methane 77

Impacto de los microplásticos presentes sobre la red trófica del *Ambystoma mexicanum*: Evaluación de la bioacumulación en artrópodos del zooplancton en el Lago de Xochimilco, Ciudad de México, México 78

Biodegradación aerobia de bolsas biodegradables, compostables e hidro-degradables en agua de mar bajo condiciones controladas de laboratorio 79

Reciclaje de residuos de poliolefinas para manufacturar legobloques e incorporarlos en procesos constructivos en zonas afectadas por desastres naturales 80

Alternativas para el aprovechamiento de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en el casco urbano del Municipio de San Juan de Pasto-Colombia 81

Actinobacterias aisladas de lixiviados con capacidad de metabolizar una mezcla de insecticidas (organofosforados/piretroides)..... 82

Pretratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios con procesos de oxidación avanzada..... 83

Linear Dose-Response Model to Estimate Niquel ²⁺ Toxicity in Hydrogen-Rich Biogas Production from a Model Substrate..... 84

Tecnológico Nacional de México: 100 % libre de plástico de un solo uso 85

Percepción de los efectos en la salud por el uso de agroquímicos en trabajadores de huertas de aguacate en Michoacán, México 86

Prevención del riesgo de incendio y su impacto ambiental en rellenos sanitarios de Latinoamérica 87

La vida social de las infraestructuras en la recolección de residuos sólidos urbanos en ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, México..... 88

Modelo de una trampa para capturar chinches chagásicas 89

Hacia una industria de mezcal sin desperdicios: estrategia de reutilización de residuos 91

Efecto del aditivo magnetita en la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de la codigestión de sargazo y la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos 92

Contribución al manejo integral de residuos sólidos urbanos en el Municipio de Santa María Atzompa, Oaxaca, México; bajo el enfoque de la economía solidaria 93

Evaluación de un sistema de vermicompostaje para el tratamiento de residuos envejecidos provenientes de un relleno sanitario 94

Proceso mecánico para la extracción de fibras del agave como alternativa para ahorro del agua 95

Desarrollo de un proceso de producción para el aprovechamiento y reciclaje de los residuos de tela en la industria textil..... 96



Evaluación de un sistema de vermicompostaje para el tratamiento de residuos envejecidos provenientes de un relleno sanitario

Rodríguez Candia Thalía, Gómez Rojas Areli, Rodríguez-Díaz Ulises Duván, Estrada-Arriaga Edson Baltazar, Falcón-Rojas Axel, Silva Luna Carlos David, González-Sánchez Alberto, Gutiérrez-Macias Tania, Castillo-Ocampo Netzer Sinue, Ramírez Flores Eduardo Miguel, García-Sánchez Liliana *.

*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Boulevard Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, 62550 Jiutepec, Morelos, México. * Correspondencia: liliana_garcia@tlaloc.imta.mx*

El crecimiento de la población ha provocado un aumento desmedido en la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) los cuales son depositados en rellenos sanitarios. Los RSU se estabilizan a medida que la materia orgánica se degrada gradualmente y las sustancias inorgánicas solubles se disuelven, los desechos resultantes estabilizados se denominan residuos envejecidos (RE) que contienen una gran cantidad de metales pesados, compuestos tóxicos; lo que dificulta su uso como tierra para cultivo. Una alternativa para el tratamiento de RE es el uso de vermicompostaje. Se evaluaron dos RE provenientes de diferentes rellenos sanitarios (Estado de México y Morelos). Se realizaron mezclas de los RE con diferentes proporciones de biosólido proveniente de una PTAR municipal en combinaciones masa: masa 100:0, 50:50, 10:90 y 5:95. En cada mezcla (1 kg) se sembraron 10 lombrices de la especie *Eisenia foetida* para determinar su supervivencia. En la muestra del 100 % de RE (Estado de México), se encontró una mortalidad del 100 % de las lombrices. Después de 28 días de exposición se observó en el resto de las muestras de ambos rellenos una tasa de supervivencia mayor al 80 % de las lombrices. Además, se registró un incremento superior al 60 % en el peso corporal de los organismos, así como la reproducción de las lombrices ya que se encontró la presencia de cocones y crías.

Pretratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios con procesos de oxidación avanzada

Castillo-Ocampo Netzer Sinue *, Silva Luna Carlos David, Sánchez García Liliana, Estrada-Arriaga Edson Baltazar, Rodríguez Rosales Miriam Guadalupe, Gómez Rojas Areli.

*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Boulevard. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, México. *Correspondencia: netzer1233@gmail.com*

Se colectó lixiviado de tres sitios de disposición final, se les ajustó el pH a 3, 7 y 11 con H_2SO_4 y NaOH , se les pretrató con O_3 a un flujo de aire de 2 L min^{-1} , durante 40 minutos, se continuó con un tratamiento de ultrasonido por 20 min a 20kHz a fin de mejorar la biodegradabilidad y disminuir el color haciendo de estos aptos para un posterior tratamiento biológico. Se evaluaron los cambios en demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5) y color aparente y verdadero durante cada etapa del tratamiento. Para el lixiviado viejo el tratamiento con ozono produjo un incremento de la DQO hasta en un 25.4 % y 21.6 % a pH de 3 y 7 respectivamente y una disminución del 18.2 % a pH 11, también se obtuvo incremento en la DBO_5 en 90 %, 92 % a pH 3 y 7 respectivamente y disminución de color verdadero en 83.3 % a pH 3; el ultrasonido disminuyó la DBO_5 , e incrementó el color verdadero. Para el lixiviado intermedio la acción del O_3 produjo una disminución de la DQO en 12.6 % a pH 11 y remoción de color verdadero 83.3 a pH 3, se produjo un ligero un aumento a de DBO_5 a pH 7; el ultrasonido incrementó la DBO_5 previamente disminuida por el ozono a pH 3. Para el lixiviado joven el O_3 disminuyó la DQO en 12.6 % a pH 11, se redujo la DBO_5 a los tres niveles de pH y se obtuvo remoción de color en 78.2, el 5 % a pH 3.

COMPORTAMIENTO DE LA TOXICIDAD EN UN SISTEMA BIOLÓGICO GRANULAR PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS.

Ulises Duvan Rodríguez-Díaz¹, Edson Baltazar Estrada-Arriaga², Gissel Trujillo-Domínguez³ y Liliana García-Sánchez⁴.

^{1,2,3,4}Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) - México

¹ulises.rodriguez@posgrado.imta.edu.mx, ⁴liliana_garcia@tlaloc.imta.mx (Autor de la correspondencia)

Introducción

El crecimiento de la población ha provocado un incremento en la generación de residuos sólidos urbanos (RSU), los cuales son depositados en sitios de disposición final conocidos como rellenos sanitarios. Al degradarse la materia orgánica e inorgánica presente en los RSU, se genera un líquido con altas concentraciones de sustancias contaminantes, conocido como lixiviado. Los lixiviados pueden infiltrarse fuera de los sitios de confinamiento, dando lugar a la contaminación del suelo y de los cuerpos de agua, provocando su deterioro y representando un riesgo a los organismos vivos y a la salud humana (Luo et al. 2020). Existen muchas investigaciones que se enfocan en el tratamiento de lixiviados, sin embargo, son escasas las que identifican el impacto tóxico de los mismos antes y después de su tratamiento, ya que generalmente se evalúa la remoción de materia orgánica, nutrientes y metales. Es por ello, que en la presente investigación se evaluó el comportamiento de la toxicidad en un sistema biológico granular para el tratamiento de lixiviados.

Metodología

Se realizó la caracterización fisicoquímica (APHA, 2017) de un lixiviado proveniente de un relleno sanitario ubicado en el estado de Morelos, México. El lixiviado fue tratado utilizando un sistema biológico granular a escala laboratorio conformado por un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) de 3.19 L de volumen útil, acoplado a un Reactor Biológico Secuencial (RBS), del mismo volumen que el anterior, el cual fue operado en ciclos de 4 h. El RAFA se operó a una temperatura de 35°C, mientras que el RBS se operó a temperatura ambiente. La eficiencia del tratamiento fue evaluada a través de cuatro experimentos en los que se modificó la carga orgánica y el tiempo de residencia hidráulica (TRH), tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los experimentos realizados.

Experimento	Carga orgánica volumétrica (kg DQO m ⁻³ d ⁻¹)	TRH (d)	Dilución de lixiviado (%)
1	1	1	5
2	2.5	1	12.5
3	1	2	5
4	2.5	2	12.5

Se utilizó como parámetro de respuesta la remoción de materia orgánica (DQO) y la reducción de la

toxicidad aguda utilizando como organismo de prueba el pez *Danio rerio* en pruebas de exposición de 72 h (OECD, 1998).

Resultados

La caracterización fisicoquímica (Tabla 2) del lixiviado crudo mostró una concentración de DQO de 23,508 mg L⁻¹, concentración que corresponde, de acuerdo a la bibliografía, a un lixiviado joven, sin embargo, la fracción orgánica de este lixiviado (<0.5) corresponde a lixiviados estabilizados o viejos (Tyagi et al. 2023).

Tabla 2. Caracterización del lixiviado crudo.

Parámetro	Unidades	Lixiviado crudo
DQO	mg O ₂ L ⁻¹	23,508
DBO ₅	mg O ₂ L ⁻¹	686
Fracción DBO ₅ /DQO	-	0.03
Toxicidad	UT	238.10
pH	-	8.48

Respecto a la toxicidad del lixiviado crudo, se obtuvo una concentración letal media CL_{50-72h} de 0.420 % ± 0.013 equivalente a 238.10 UT (V/V), al utilizar alevines de *Danio rerio*, concentración que resulta ser 10 veces más tóxica que los reportados por Costa et al. 2023, para lixiviados maduros con una CL_{50-48h} de 4.26 %. Estos resultados muestran que el lixiviado evaluado no puede ser clasificado dentro de los parámetros existentes, probablemente debido a su alta toxicidad, lo cual indicaría que la clasificación puede corresponder a lugares donde se realiza una adecuada separación de los RSU.

Con respecto a la eficacia del tratamiento biológico granular, se encontró que el experimento 4 alcanzó una remoción de la DQO del 21.83% (Figura 1), la cual es más alta que la reportada en la investigación de Anna Tałaj et al. 2021, en la que se obtuvo una remoción de DQO del 10.8 % utilizando un reactor RBS. El experimento 4 sobresalió estadísticamente (p<0.05) en comparación con los demás experimentos realizados, cuyos rangos de valores oscilaron entre el 13.11 y el 21.23 % de remoción de DQO.

De acuerdo a los resultados de DBO₅ obtenidos (Figura 2), el experimento 1 presentó mayores remociones de este parámetro (53.99%), en comparación con los otros experimentos, cuyas remociones de DBO₅ se encuentran en un rango de valores entre 37.64 al 48.72%.

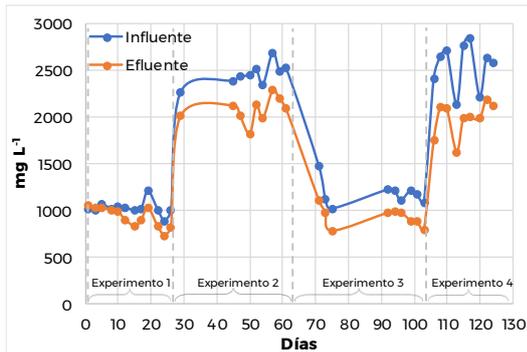


Figura 1. Comportamiento de la DQO en el tren de tratamiento biológico granular.

El análisis estadístico no mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los experimentos, lo que significa que existe una remoción de materia orgánica similar en los experimentos realizados. Los resultados obtenidos con respecto a la DBO₅ son menores a los reportados por Bueno et al. 2020, quienes al utilizar un reactor RBS obtuvieron una remoción de DBO₅ del 90%.

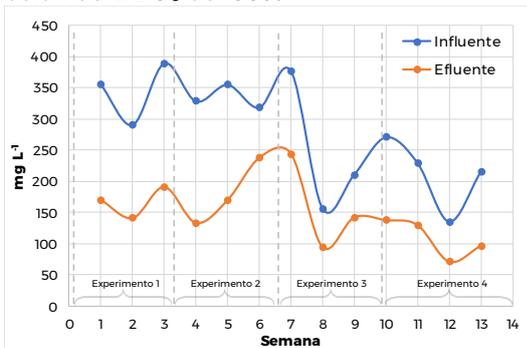


Figura 2. Comportamiento de la DBO₅ en el tren de tratamiento biológico granular.

Con relación al comportamiento de la toxicidad aguda, los experimentos 1 y 3, mostraron que al término del tratamiento del lixiviado la toxicidad aguda medida en alevines de *Danio rerio*, es eliminada, dado que todos los organismos expuestos permanecieron con vida, sin embargo, observaciones adicionales efectuadas sobre la condición de los juveniles para todos los experimentos, mostraron daños en el tejido, e inmovilidad (Figura 3), similares a los presentados por Wang et al. 2022, quienes investigaron los efectos en el desarrollo embrionario de *Danio rerio*, al exponerlo a lixiviados maduros, reportando hipoplasia de cabeza y ojos, deformidad espinal, inhibición del crecimiento y movilidad de los alevines, efectos de orden crónico que deben ser considerados para estudios posteriores. Los experimentos 2 y 4, presentaron una reducción de la toxicidad del 29.56 y 84.64 %, respectivamente.

Al comparar los resultados obtenidos en la presente investigación con los presentados por Qui et al. (2016), quienes utilizaron un sistema combinado de coagulación - sedimentación, un reactor anaerobio, electrólisis y un reactor aerobio para el tratamiento de lixiviados, obtuvieron una reducción de la

toxicidad del 86.08 %, similar a la presentada en este estudio, diferenciando que en dicha investigación se utilizó un tratamiento más complejo.

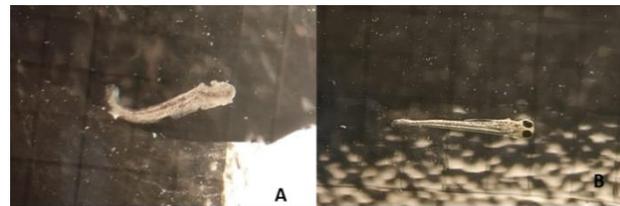


Figura 3. A. *Danio rerio* a 72 horas de exposición en diferentes concentraciones de lixiviados. B. *Danio rerio* control negativo.

Conclusiones

Se demostró que el tratamiento de lixiviados utilizando un sistema de tratamiento biológico granular, que incluye un reactor RAFA acoplado a un reactor aerobio RBS, puede disminuir contaminantes que afectan al medio ambiente medidos como DQO y DBO₅, en un 21.83 % y 53.88 %, respectivamente, además de reducir la toxicidad en más del 84.64 %. Aunque los resultados muestran una reducción de la toxicidad aguda con el pez *Danio rerio* en las condiciones experimentales, se sugiere evaluar la toxicidad crónica con el fin de verificar la afectación de los lixiviados en otros organismos.

Referencias

- Anna Talaaj I., Bartkowska I. and Biedka P. (2021). Treatment of young and stabilized landfill leachate by integrated sequencing batch reactor (SBR) and reverse osmosis (RO) process. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 16, 100502.
- APHA. (2017). American Public Health Association, & American Water Works Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. In *Standard methods for the examination of water and wastewater*.
- Bueno, R. D. F., Faria, J. K., Uliana, D. P., & Liduino, V. S. (2020). Simultaneous removal of organic matter and nitrogen compounds from landfill leachate by aerobic granular sludge. *Environmental technology*, 1-15.
- Costa, A. M., dos Santos Valentim, M. R., de Azevedo, D. J. M., Quintaes, B. R., Daflon, S. D. A., & Campos, J. C. (2023). Evaluation of the main pollutants present in Brazilian landfill leachates using ecotoxicity assays. *Process Safety and Environmental Protection*, 173, 426-436.
- Luo, H., Zeng, Y., Cheng, Y., He, D., & Pan, X. (2020). Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *The Science of the Total Environment*, 703 (135468).
- OECD. (1998). Test no. 212: Fish, short-term toxicity test on embryo and sac-fry stages. OECD Publishing
- Qiu, A., Cai, Q., Zhao, Y., Guo, Y., & Zhao, L. (2016). Evaluation of the treatment process of landfill leachate using the toxicity assessment method. *International journal of environmental research and public health*, 13(12), 1262.
- Tyagi, V. K., & Ojha, C. S. P. (2023). *Landfill Leachate Management*. IWA Publishing.
- Wang, Y., Li, L., Ning, X., Sang, N., & Li, G. (2023). Potential toxicity of landfill leachate to zebrafish and mung beans. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(34), 82807-82817.