

Biodegradabilidad anaerobia y toxicidad de aguas residuales complejas o tóxicas

Beatriz Amparo Wills Betancur

- Universidad de Antioquia - Facultad de Ingeniería
- Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental

RESUMEN

Como una primera aproximación a la clasificación de las aguas residuales (A.R.) en términos de su susceptibilidad al tratamiento por sistemas biológicos anaerobios se realizaron ensayos de biodegradabilidad (BD) anaerobia al lixiviado de un relleno sanitario, a las A.R. de un beneficiadero de café por vía húmeda y a las A.R. de una planta de recuperación de ácido fumárico. A esta última se le hicieron además ensayos de toxicidad anaerobia y toxicidad letal sobre el microcrustáceo Daphnia pulex.

La fase experimental se ejecutó en un lapso de 12 meses en los laboratorios del departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental y en el laboratorio de bioensayos del Centro de Investigaciones Ambientales Y de Ingeniería (CIA) ambos laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

Los bioensayos anaerobios se realizaron fundamentalmente con la metodología propuesta por la Universidad Agrícola de Wageningen, Holanda 1987, y los bioensayos de toxicidad letal se ejecutaron con los procedimientos propuestos por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th edition, 1992, con las modificaciones efectuadas por los investigadores del CIA.

En el desarrollo de esta investigación se encontró que el efluente de la planta de recuperación de ácido fumárico tiene como características una baja BD anaerobia, un alto grado de toxicidad anaerobia y toxicidad letal sobre Daphnia pulex por lo que se puede catalogar como A.R. de características complejas y tóxicas.

Las A.R. procedentes una planta beneficiadora de café por vía húmeda y del lixiviado de un relleno sanitario, resultaron ser altamente biodegradables y por lo tanto no tóxicas, resultado que permite catalogarlas como susceptibles de ser tratadas mediante sistema biológico anaerobio.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de A.R. tiene como finalidad la conversión de la calidad de éstas en un efluente final que sea aceptable y que cumpla con los requerimientos señalados por la legislación ambiental gubernamental. Para el efecto son aplicables operaciones y procesos físicos, químicos y biológicos, aunque casi en todos los casos se debe recurrir a una combinación de ellos, teniendo como base o fundamento para la elección del tren de tratamiento, las características de las A.R. y la manera como se pueden lograr los requerimientos de calidad del efluente en forma técnicamente segura y económicamente factible.

El grado de desarrollo que han alcanzado las tecnologías para el tratamiento de A.R. es bastante satisfactorio, en términos generales, a pesar de que el cambio y la innovación introducen nuevos conceptos para mejorar, e incluso para descartar, tecnologías de uso corriente en la actualidad. Un ejemplo de esta realidad lo constituye el hecho de que los procesos biológicos aerobios otrora indiscutibles han sido sustituidos, en muchas aplicaciones, por los sistemas biológicos anaerobios, con resultados satisfactorios.

Las crisis energéticas de las dos últimas décadas y el desarrollo de nuevas tecnologías han hecho posible que los procesos de digestión anaerobia utilizados tradicionalmente en la estabilización de los lodos producidos en la depuración aerobia de A.R. puedan ser aplicados al tratamiento de A.R. industriales y domésticas.

A pesar de que los procesos anaerobios tienen ventajas significativas sobre los sistemas aerobios convencionales tales como el mayor grado de estabilización de la materia orgánica, baja producción de lodos, bajos requerimientos de nutrientes, menor costo de equipos y consumo de energía son víctimas de una inmerecida mala reputación en su uso para el tratamiento de aguas residuales industriales.

Las dudas que ofrecen se pueden asociar a experiencias negativas, especialmente en algunas de las plantas instaladas en la época en que empezó su introducción al mercado, resultantes de la falta de entendimiento de los procesos fundamentales y del inadecuado manejo de variables como el pH, la temperatura, la alcalinidad y la carga orgánica, entre otras.

Uno de los aspectos más desconocidos, en la aplicación de la fermentación anaerobia a la depuración de las A.R., es su respuesta a la presencia de especies químicas que pueden tener efecto inhibitorio o tóxico. Con información de este tipo se podría ampliar la lista de las ventajas que tiene sobre los sistemas aerobios, o por lo menos garantizar el éxito de su implantación.

En Colombia los estudios e investigaciones sobre tratamientos de A.R. por procesos anaerobios se iniciaron en la ciudad de Cali en 1983. A la experiencia de Cali se le sumaron los trabajos realizados en las ciudades de Medellín y Bucaramanga. Sin embargo, todas las experiencias que se han tenido en Colombia con las tecnologías anaerobias, no son extensivas a A.R. complejas o tóxicas, razón por la cual se encontró justificación para empezar a estudiar localmente el grado de BD y toxicidad anaerobia y toxicidad acuática de A.R. que pudieran tener estas características.

En respuesta a la necesidad de un mejor conocimiento de dichos aspectos y de una adecuada infraestructura de laboratorio, se decidió adelantar la presente investigación, cuyos fines eran adoptar y adaptar una metodología para llevar a cabo los estudios de BD y toxicidad anaerobia de A.R. complejas o tóxicas, o que presumiblemente tuvieran estas características, complementando la información con ensayos de toxicidad acuática de aquellas aguas efectivamente complejas o tóxicas.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1. Información general

Los experimentos y actividades realizados para cada tipo de A.R. aparecen resumidos en la Tabla 1; las condiciones experimentales para los estudios de actividad metanogénica, BD y toxicidad anaerobia se presentan en la Tabla 2.

TABLA 1. Actividades y experimentos realizados en la investigación de la BD anaerobia y toxicidad de A.R. complejas o tóxicas.

Tipo de agua residual	Actividad o experimento
A.R. de una planta de recuperación de ácido fumárico	- Aclimatación del lodo - BD anaerobia - Toxicidad anaerobia - Toxicidad letal sobre <i>Daphnia pulex</i> - AME del lodo
A.R. del beneficio del café vía húmeda	- Aclimatación del lodo - BD anaerobia - AME del lodo
A.R. lixiviado relleno sanitario	- Aclimatación del lodo - BD anaerobia - AME del lodo

TABLA 2. Condiciones experimentales para los ensayos de actividad metanogénica específica (AME), BD anaerobia y Toxicidad anaerobia

Condición experimental	Control	Tratamiento
Volumen (l)	0.50	0.50
Temperatura (°C)	30	30
pH inicial	6.8	6.8
Macronutrientes (ml)	0.0	1.0
Micronutrientes (ml)	0.0	1.0
Extracto de levadura (g)	0.1	0.1
Concentración del lodo (g SSV/l)	1.5	1.5
Tipo de sistema	Estático	Estático
DQO-AGV (mg/l) (AME)	0.0	3500
Composición de los AGV (C2:C3:C4)	---	65:25:10
DQO del A.R. (g/l) (BD)	0.0	Variable
DQO del A.R. (g/l) (Toxicidad)	---	1500 - 2500
DQO-AGV (g/l) (Toxicidad)	1500 - 2500	---
Amortiguador (g NaHCO ₃ /g DQO)	---	1.0

1.2. Reactores

Todos los ensayos de BD, toxicidad y AME se realizaron en frascos humidificadores de 0.5 litros de capacidad. Estos frascos, cuya ilustración aparece en la Figura 1, hacían las veces de reactores de flujo «batch» bajo régimen estático.

1.3. Sistema de desplazamiento del líquido para medición de gas metano

El volumen de gas metano producido durante los ensayos de BD y toxicidad anaerobia y AME se midió haciendo pasar el biogas a través de un sistema de desplazamiento de líquido como los esquematizados en las Figuras 2 y 3. Se utilizó una solución concentrada de NaOH (1.5 N) como líquido receptor del biogas, para remover el CO₂ de la mezcla gaseosa.

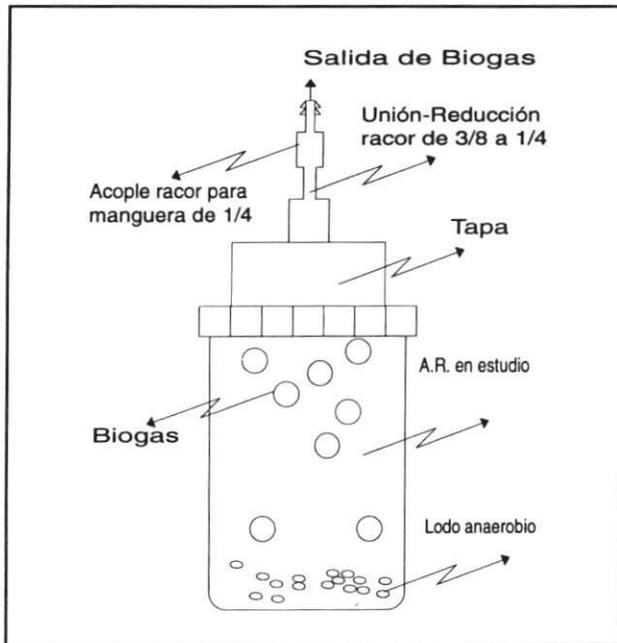


FIG. 1.-Frasco humidificador utilizado como reactor anaerobio

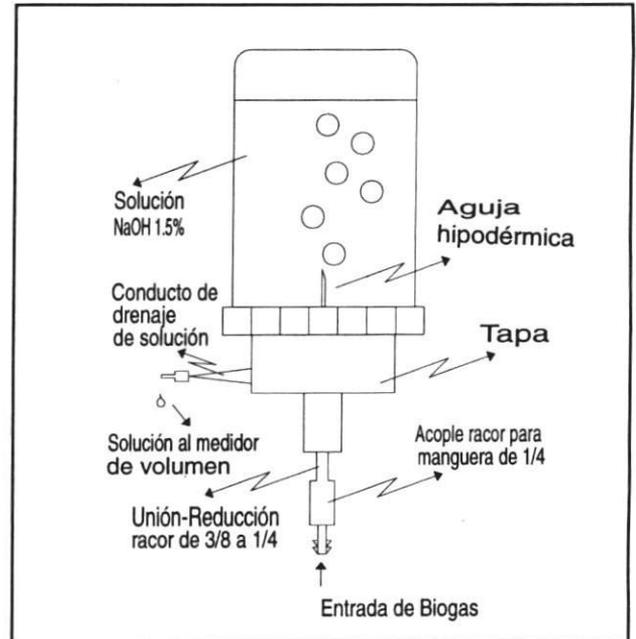


FIG. 2.-Frasco humidificador utilizado para la captación del biogas y desplazamiento del líquido

1.4. Nutrientes

En todos los bioensayos anaerobios se suministraron los nutrientes con la siguiente composición en (mg/l):

Macronutrientes: NH₄Cl (170), KH₂PO₄ (37), CaCl₂·2H₂O (8) y MgSO₄·4H₂O (9).

Micronutrientes: FeCl₃·4H₂O (2000), CaCl₂·6H₂O (2000), MnCl₂·4H₂O (500), CuCl₂·2H₂O (30), ZnCl₂ (50), H₃BO₃ (50), (NH₄)₂Mo₇O₂₄·H₂O (90), Na₂SeO₃·5H₂O (100), N; Cl₂·6H₂O (50), EDTA (1000), HCl 36% (1), Resazurina (500) y Extracto de levadura 0.2 g/l.

1.5. Análisis

Las determinaciones analíticas se hicieron de acuerdo a los métodos normalizados. Los Ácidos Grasos Volátiles (AGV) se determinaron únicamente para los experimentos de BD anaerobia. Las muestras se tomaron al iniciar y al terminar el experimento y fueron analizadas por titulación.

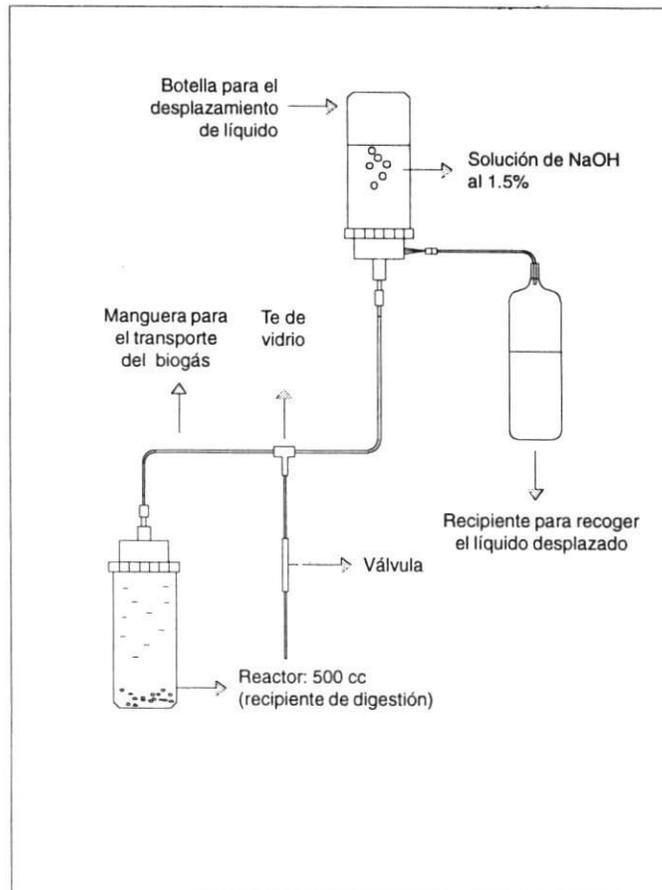


FIG. 3.- Diagrama esquemático del sistema del desplazamiento del líquido.

1.6. Características del lodo

Como lodo de inóculo se utilizó un lodo activo el cual fue observado en un microscopio eléctrico binocular marca Olympus para constatar su actividad biológica y detallar la morfología macroscópica de la población bacteriana y una vez aclimatado mediante la exposición del mismo a incrementos graduales de los AGV, con los cuales se efectuó el experimento se le determinó su AME.

1.7. Ensayo de BD anaerobia

El lodo utilizado en los ensayos de BD de las A.R. del beneficio del café por vía húmeda y del lixiviado de relleno sanitario provino de la operación a escala de laboratorio de reactores UASB alimentados con estos dos substratos. En el caso del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico el lodo utilizado provino de la operación a escala de laboratorio de un reactor UASB alimentado durante largo tiempo con A.R. de un matadero de aves.

El proceso de aclimatación se realizó únicamente para el lodo que se utilizó en las pruebas de BD del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico, puesto que para los ensayos de BD del A.R. del beneficio del café por vía húmeda y lixiviado de relleno sanitario se contó con lodo de reactores UASB operados a escala de laboratorio con estos dos substratos.

El proceso de aclimatación del lodo consistió en agregar de manera gradual, concentraciones crecientes de DQO del

A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico y soluciones patrón de macro y micronutrientes. Las concentraciones de DQO oscilaron entre 500 y 3000 mg/l.

Durante todo el proceso de aclimatación se midió diariamente el pH antes y después de aplicar el A.R.. Durante los 65 días que duró el proceso de aclimatación se realizaron periódicamente observaciones al microscopio, para detectar la actividad biológica del mismo; adicionalmente se hicieron mediciones de DQO, a intervalos de tiempo durante 24 horas, para evaluar la eficiencia de remoción de la carga orgánica y el grado de aclimatación del lodo.

Una vez se terminó el proceso de aclimatación el lodo se sometió a digestión durante 45 días, para estabilizarlo y poder realizar los ensayos de BD.

Como se presumía de antemano la toxicidad y complejidad de los sustratos ensayados en todos los casos se realizaron los experimentos con concentraciones menores de 3 g DQO/l. Para la preparación de las diferentes concentraciones se agregaron las cantidades necesarias de sustrato a partir del conocimiento de la DQO inicial del mismo. Sin embargo, al iniciar cada experimento se midieron la DQO y los AGV.

Para impedir que la formación de los AGV durante la digestión, pudiera causar una elevada acumulación de ácidos no neutralizados en el medio, se añadió aproximadamente 1 g NaHCO_3 por gramo de DQO del A.R..

A los digestores de A.R. («tratamientos») se les agregaron el lodo, A.R. en cantidad necesaria para obtener la concentración deseada de DQO en el volumen efectivo, las soluciones patrón de nutrientes, el extracto de levadura y el NaHCO_3 de acuerdo con lo indicado en la Tabla 2 y se completó el volumen con agua previamente desaireada. Simultáneamente a cada uno de los «tratamientos» se le montó su respectivo testigo («control»), al cual lo único que no se le agregó fue el A.R.

A los digestores de lodos en el «control» y en el «tratamiento» se les burbujeó nitrógeno libre de O_2 por 3 minutos, para crearles condiciones anaerobias. Finalmente, los recipientes se taparon e incubaron en baño maría a 30°C. Cada serie de ensayos se corrió por duplicado.

La DQO y los AGV se midieron el día cero, cuando se arrancó el experimento, y el último día, al terminar el mismo.

La medición del gas metano se inició en todos los casos 12 horas después de iniciado el experimento y siguió haciéndose con una frecuencia de 3 veces diarias hasta que terminó el experimento. Debido a que los experimentos se llevaron a cabo en un sistema de régimen estático, fue necesario agitar los reactores de digestión varias veces al día, con el fin de que los lodos y el sustrato hicieran contacto y para desalojar el biogas.

Los experimentos fueron realizados a 30°C ($\pm 1^\circ\text{C}$), condición que se mantuvo poniendo los reactores de digestión en baños maría programados a la temperatura indicada con regulación termostática.

1.8. Ensayo de toxicidad anaerobia

El ensayo de toxicidad anaerobia se realizó utilizando como tóxico el A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico.

El lodo utilizado en el ensayo de toxicidad anaerobia fue el mismo que se utilizó para los ensayos de BD anaerobia.

En el experimento de toxicidad se realizaron tres ensayos exploratorios que finalmente permitieron definir las concentraciones de la DQO del tóxico. El ensayo definitivo se realizó con las concentraciones anotadas en la Tabla 2.

El ensayo de toxicidad se realizó exponiendo el lodo a las concentraciones del tóxico indicadas en la Tabla 2 («tratamientos») y cada concentración de tóxico tuvo un testigo («controles») al cual en vez de A.R. se le agregó como sustrato una mezcla de AGV. Tanto los tratamientos como los controles se corrieron por duplicado.

El procedimiento propiamente dicho consistió en efectuar una primera alimentación, «alimentación de exposición», al final de la cual se dejó sedimentar el lodo tanto en los «tratamientos» como en los «controles», con el fin de descartar el sobrenadante. Para la segunda alimentación, «alimentación de recuperación», a los tratamientos y a los controles se les agregó AGV como sustrato.

1.9 Ensayo de toxicidad letal sobre *Daphnia pulex*

El tóxico utilizado para el ensayo de toxicidad letal sobre *Daphnia pulex* fue el A.R. de una planta de recuperación de ácido fumárico.

Para los ensayos de toxicidad se utilizó la especie *Daphnia pulex*, cultivada bajo condiciones de laboratorio. La edad de los ejemplares experimentales varió entre 40 y 48 horas.

Para la preparación de las diferentes concentraciones del tóxico, se utilizó como agua de dilución agua reconstituida dura. Este mismo tipo de agua fue utilizada para los controles experimentales. Para la preparación de las diferentes concentraciones se hicieron diluciones en porcentaje (V/V) a partir de una solución patrón al 1%, preparada con el desecho puro (100%). El volumen de cada solución fue de 100 ml.

Debido a que el pH del tóxico es muy ácido (2.0 unidades), se realizaron dos tipos de experimentos, uno sin neutralizar y otro neutralizando el pH de las diferentes diluciones empleadas. Esto con el fin de detectar si este factor tenía efecto sobre la mortalidad de la especie. Para neutralizar las soluciones se utilizó NaOH 0,1 N. En todos los experimentos se hizo un control de pH en las diferentes diluciones durante el tiempo que se prolongó el ensayo.

Para ambos tipos de experimentos se realizaron inicialmente ensayos exploratorios y, de acuerdo con los resultados de estos, se llevaron a cabo los ensayos definitivos.

A las 24 y 48 horas de exposición se hicieron conteos de la mortalidad de los animales en cada concentración, tanto para los ensayos exploratorios como para los definitivos.

El número de individuos expuestos fue de 10 por réplica. Los ensayos exploratorios se hicieron por duplicado y los definitivos por triplicado, siendo entonces 20 y 30 el total de Daphnias expuestas por cada concentración, respectivamente. Para cada serie de concentraciones se tenía un control experimental con el mismo número de individuos. Adicionalmente, se hicieron repeticiones de los ensayos definitivos.

Con base en los resultados de los ensayos definitivos, se hicieron los cálculos de la concentración letal media (CL_{50}) del desecho y su respectivo intervalo de confianza, utilizando el método probit computarizado.

Con el objeto de medir las variaciones de pH de las diluciones sin Daphnias se hizo un seguimiento del pH a cuatro soluciones. Dos de ellas corresponden a dos de las concentraciones trabajadas en los experimentos y que fueron neutralizadas con NaOH. Las otras dos corresponden al agua de dilución y a la solución patrón.

2. RESULTADOS

2.1 Aclimatación lodo

El pH del lodo utilizado en los ensayos de actividad metanogénica y biodegradabilidad y toxicidad anaerobia del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico durante seguimiento en el proceso de aclimatación osciló entre 6.1 y 7.9. Se registraron disminuciones de hasta el 40.9% en demanda bioquímica de oxígeno filtrada (DQO_f), la cual se determinó varias veces en un período de 24 horas. Finalmente, en las observaciones hechas al microscopio durante el proceso de aclimatación se registró la presencia de ciliados, bacterias (bacilos y cocos), rotíferos, flagelados, protozoos, vibriones, etc.

2.2 Actividad metanogénica específica (AME) de los lodos

El lodo para los ensayos con A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico en los dos ensayos realizados arroja una AME promedio de 0.1 g DQO_{CH4}/g SSV * d.

El lodo para los ensayos del A.R. del beneficio del café por vía húmeda, en el ensayo realizado se encontro una AME del lodo de 0.25 g DQO_{CH4}/g SSV * d.

2.3 Ensayos de biodegradabilidad anaerobia

2.3.1 A.R. planta de recuperación de ácido fumárico

Las Figuras 4 a 6 muestran los resultados de la producción acumulada de metano para los tratamientos y los controles en cada uno de los tres ensayos realizados.

La Tabla 3 muestra los datos de AGV y DQO_F obtenidos al inicio y al final de cada uno de los ensayos.

TABLA 3. Datos de AGV y DQO_F inicial y final para los ensayos de biodegradabilidad anaerobia del A.R. de la planta de recuperacion de ácido fumárico.

Ensayo Nº	Tiempo de digestión (horas)	DQO (mg/l)			
		Control		Tratamiento	
		AGV	DQOf	AGV	DQOf
1	0	205	1300	1070	3000
	342	60	887	395	2420
2	0	200	717	410	3692
	496	0	681	305	3238
3	0	210	593	255	3355
	496	40	508	340	2869

En la Tabla 4 se registran los resultados de la conversión del gas metano producido durante los tres ensayos de biodegradabilidad a DQO equivalente.

TABLA 4. Resultados de la conversión del gas metano producido a DQO equivalente, en los ensayos de biodegradabilidad anaerobia del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico

Ensayo Nº	Tiempo de digestión (horas)	Conversión de producción acumulada de CH4 a mg/l DQO-CH4			
		Control		Tratamiento	
		CH4 (ml)	DQO (mg/l)	CH4 (ml)	DQO (mg/l)
1	342	104	444.6	176	752.4
2	504	106	453.2	203	867.9
3	496	88	376.2	189	808.0

FIGURA 4. Biodegradabilidad anaerobia A.R. planta de recuperación ácido fumárico producción de metano. Ensayo 1.

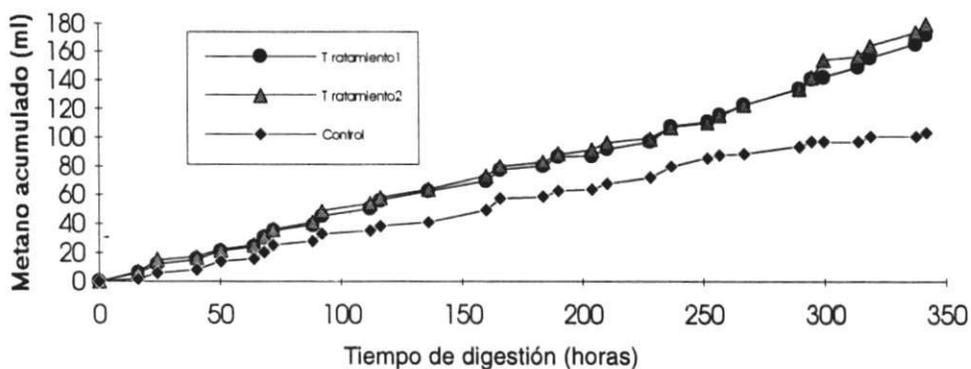


FIGURA 5. Biodegradabilidad anaerobia A.R. planta de recuperación ácido fumárico producción de metano. Ensayo 2.

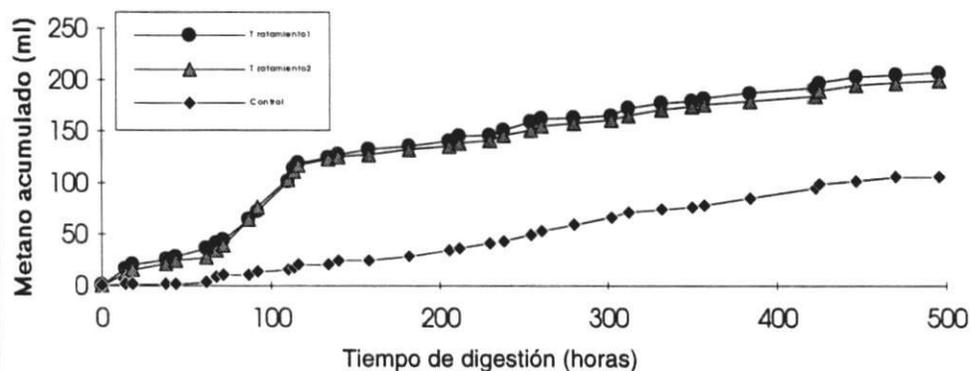
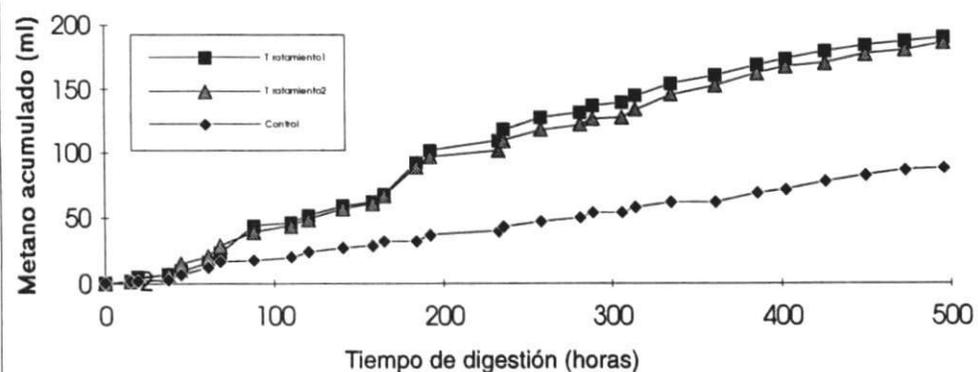


FIGURA 6. Biodegradabilidad anaerobia A.R. planta de recuperación ácido fumárico producción de metano. Ensayo 3.



Finalmente en la Tabla 5 se reportan los datos de biodegradabilidad anaerobia.

TABLA 5. Biodegradabilidad anaerobia del A.R. de una planta de recuperación de ácido fumárico

Ensayo N°	Tiempo de digestión (horas)	DQOM %	DQOAGV %	DQOA %	DQOE %	DQOBD %	DQOR %	DQOC %	Ycel
1	0	0	50.9	50.9	0	---	---	---	---
	342	18.1	19.7	37.8	9.8	29.5	70.5	-8.2	-0.28
2	0	0	7.1	7.1	0	---	---	---	---
	496	14	10.2	24.2	14.1	24.3	75.5	0.1	0
3	0	0	1.6	1.6	0	---	---	---	---
	496	15.6	11.2	26.8	14.5	25.4	74.5	-1.1	-0.04

2.3.2 A.R. del beneficio del café por vía húmeda

Las Figuras 7 a 10 muestran los resultados de la producción acumulada de metano para los tratamientos y los controles en cada uno de los tres ensayos realizados.

La Tabla 6 muestra los datos de AGV y DQO_F obtenidos al inicio y al final de cada uno de los ensayos. En la Tabla 7 se presentan los resultados de la conversión del gas metano producido durante los tres ensayos de BD a DQO equivalente. Finalmente en la Tabla 8 se muestran los datos de BD anaerobia.

TABLA 6. Datos de AGV y DQO_F inicial y final para los ensayos de BD anaerobia del A.R. del beneficio del café por vía húmeda

Ensayo N°	Tiempo de digestión (horas)	DQO (mg/l)			
		Control		Tratamiento	
		AGV	DQOf	AGV	DQOf
1	0	50	68.8	60	2533
	188	20	61.8	60	445
2	0	50	68.8	50	2471
	188	20	61.8	70	510
3	0	30	81	120	4130
	428	0	36.9	0.4	261
4	0	30	81	70	4130
	428	0	36.9	0	221

TABLA 7. Resultados de la conversión del gas metano producido a DQO equivalente, en los ensayos BD anaerobia del A.R. del beneficio del café por vía húmeda

Ensayo N°	Tiempo de digestión (horas)	Conversión de producción acumulada de CH ₄ a mg/l DQO-CH ₄			
		Control		Tratamiento	
		CH ₄ (ml)	DQO (mg/l)	CH ₄ (ml)	DQO (mg/l)
1	188	32	137	568	2428
2	188	32	137	565	2415
3	426	101	432	760	3249
4	426	101	432	758	3241

FIGURA 7. Biodegradabilidad anaerobia A.R. del beneficio del café por vía húmeda producción de metano. Ensayo 1.

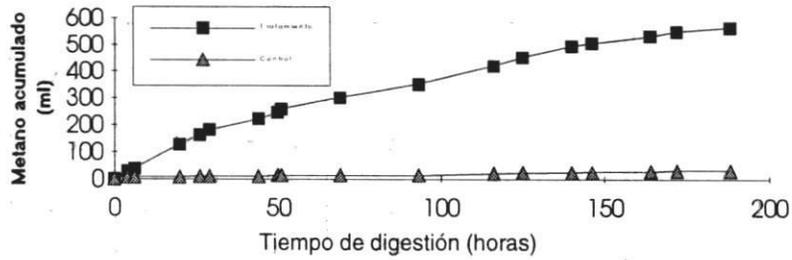


FIGURA 8. Biodegradabilidad anaerobia A.R. del beneficio del café por vía húmeda producción de metano. Ensayo 2.

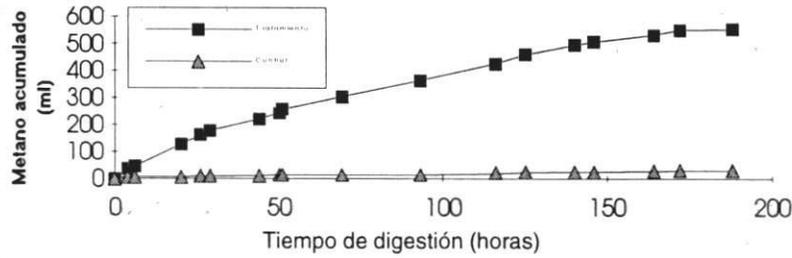


FIGURA 9. Biodegradabilidad anaerobia A.R. del beneficio del café por vía húmeda producción de metano. Ensayo 3.

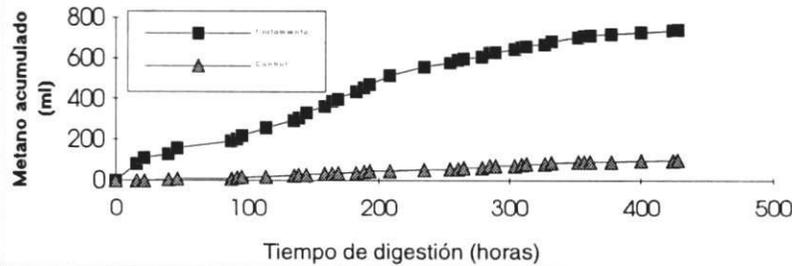


FIGURA 10. Biodegradabilidad anaerobia A.R. del beneficio del café por vía húmeda producción de metano. Ensayo 4.

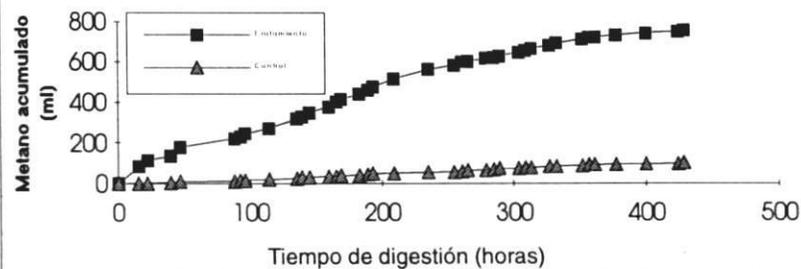


TABLA 8. BD anaerobia del A.R. del beneficio del café por vía húmeda

Ensayo Nº	Tiempo de digestión (horas)	DQO - M %	DQO - AGV %	DQO - A %	DQO - E %	DQO - BD %	DQO - R %	DQO - C %	Ycel
1	0	0	0.46	0.46	0	---	---	---	---
	188	92.98	1.62	94.6	84.46	86.08	13.92	-8.52	-0.098
2	0	0	0	0	0	---	---	---	---
	188	94.83	2.08	96.92	81.35	83.73	16.27	-13.05	-0.155
3	0	0	2.22	2.22	0	---	---	---	---
	426	69.57	0	69.57	94.35	94.35	5.65	24.78	0.262
4	0	0	0.99	0.99	0	---	---	---	---
	426	69.37	0	69.37	95.46	95.46	4.54	26.09	0.273

2.3.3 A.R. lixiviado relleno sanitario

Las figuras 11 a 13 muestran los resultados de la producción acumulada de metano para los tratamientos y los controles en cada uno de los tres ensayos realizados.

La Tabla 9 muestra los datos de AGV y DQO_f al inicio y al final de cada uno de los ensayos.

TABLA 9. Datos de AGV y DQO_f inicial y final para los ensayos de BD anaerobia del A.R. del lixiviado del relleno sanitario

Ensayo Nº	Tiempo de digestión (horas)	Conversión de producción acumulada de CH ₄ a mg/l DQO			
		Control		Tratamiento	
		AGV	DQO _f	AGV	DQO _f
1	0	74	97	261	2780
	426	69	82	309	435
2	0	74	97	256	2820
	426	69	82	59	367
3	0	74	97	248	2749
	426	69	82	58	375

En la Tabla 10 se registran los resultados de la conversión del gas metano producido durante los tres ensayos de BD, a DQO equivalente.

TABLA 10. Resultados de la conversión del contenido de DQO en el gas metano para los ensayos de BD anaerobia del A.R. del lixiviado del relleno sanitario

Ensayo Nº	Tiempo de digestión (horas)	Conversión de producción acumulada de CH ₄ a mg/l DQO			
		Control		Tratamiento	
		CH ₄ (ml)	DQO (mg/l)	CH ₄ (ml)	DQO (mg/l)
1	426	19.7	84.2	452.8	1935.8
2	426	19.7	84.2	456.7	1952.5
3	426	19.7	84.2	445.6	1905.1

FIGURA 11. Biodegradabilidad anaerobia A.R. lixiviado relleno sanitario producción de metano. Ensayo 1.

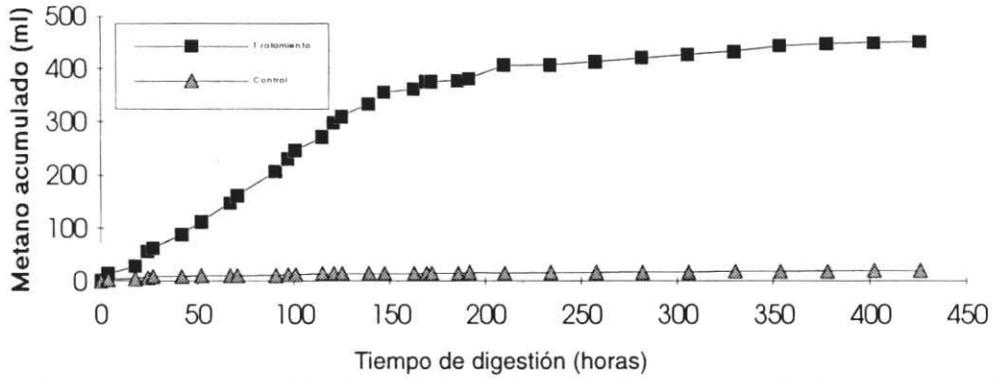


FIGURA 12. Biodegradabilidad anaerobia A.R. lixiviado relleno sanitario producción de metano. Ensayo 2.

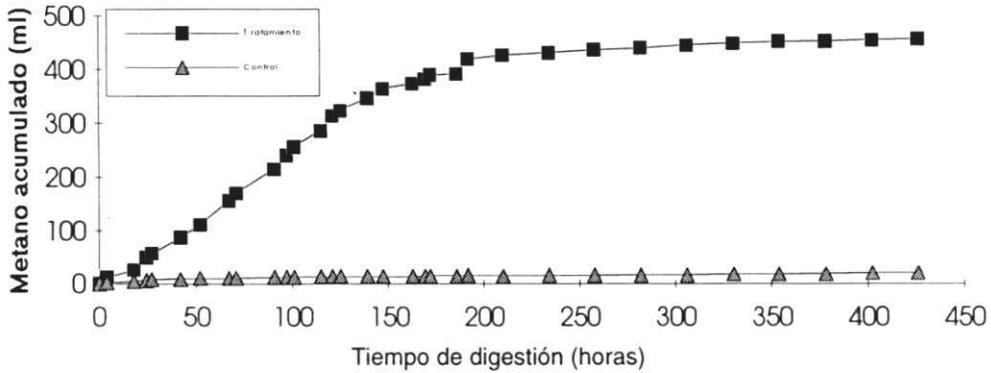
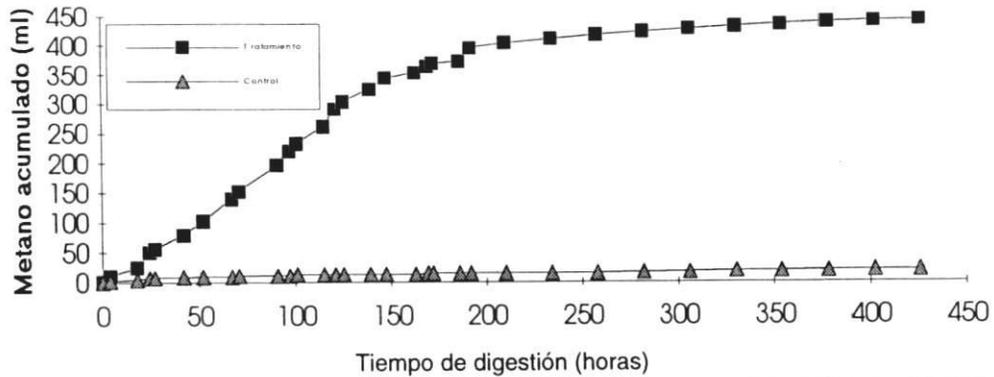


FIGURA 13. Biodegradabilidad anaerobia A.R. lixiviado relleno sanitario producción de metano. Ensayo 3.



Los datos de BD anaerobia son los que aparecen en la Tabla 11.

TABLA 11. BD anaerobia del A.R. del lixiviado de un relleno sanitario

Ensayo N°	Tiempo de digestión (horas)	DQO - M %	DQO - AGV %	DQO - A %	DQO - E %	DQO - BD %	DQO - R %	DQO - C %	Y _{cel}
1	0	0	6.7	6.7	0	---	---	---	---
	426	66.6	9.0	75.6	87.3	96.3	3.7	20.7	0.215
2	0	0	6.4	6.4	0	---	---	---	---
	426	66.2	7.1	73.3	89.9	97.0	3.0	23.7	0.244
3	0	0	6.3	6.3	0	---	---	---	---
	426	66.2	6.9	73.5	86.35	93.2	6.8	19.7	0.211

2.4 Ensayo de toxicidad anaerobia A.R. planta de recuperación de ácido fumárico

Las Figuras 14 y 15 muestran los resultados de la producción de metano durante la exposición del lodo al tóxico (alimentación de exposición), y las Figuras 16 y 17 muestran los resultados de la producción de metano durante la exposición de los lodos a los AGV (alimentación de recuperación).

En las Figuras se identifican con la letra «a» minúscula los intervalos de tiempo en los cuales se determinó la tasa de producción de metano (R) en ml CH₄/h, que se utiliza para calcular las AME reportadas en la Tabla 12, en la que también aparece los aumentos de actividad para las dos concentraciones del tóxico ensayadas.

TABLA 12. AME y aumento de la actividad durante las alimentaciones de exposición y recuperación de ensayo de toxicidad del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico.

Ensayo	Alimentación	AME g DQO - CH ₄ /g SSV*d	Aumento de actividad	
			ITEAA	IOAA
Control 11	Exposición	0.11	0.63	0.18
	Recuperación	0.13	0.53	
Tto 11	Exposición	0.03	2.55	2.84
	Recuperación	0.10	0.67	
Control 12	Exposición	0.11	0.61	0.18
	Recuperación	0.13	0.52	
Tto 12	Exposición	0.03	2.47	2.79
	Recuperación	0.10	0.65	
Control 21	Exposición	0.17	0.67	0.11
	Recuperación	0.18	0.60	
Tto 21	Exposición	0.03	3.80	2.87
	Recuperación	0.11	0.98	
Control 22	Exposición	0.16	0.71	0.24
	Recuperación	0.19	0.57	
Tto 22	Exposición	0.03	3.66	2.38
	Recuperación	0.10	1.08	

FIGURA 14. Toxicidad A.R. planta de recuperación ácido fumárico sobre la actividad metanogénica alimentación de exposición DQO = 1500 mg/l.

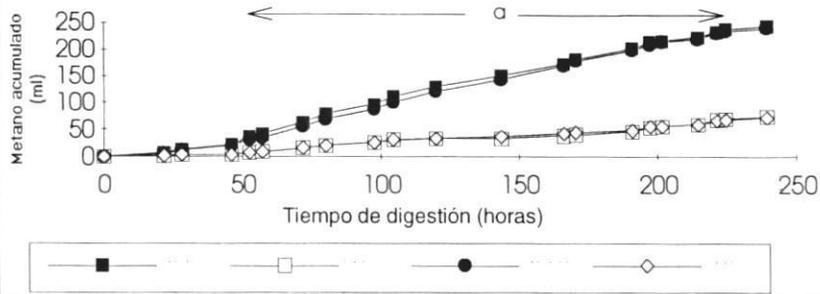


FIGURA 15. Toxicidad A.R. planta de recuperación ácido fumárico sobre la actividad metanogénica alimentación de exposición DQO = 2500 mg/l.

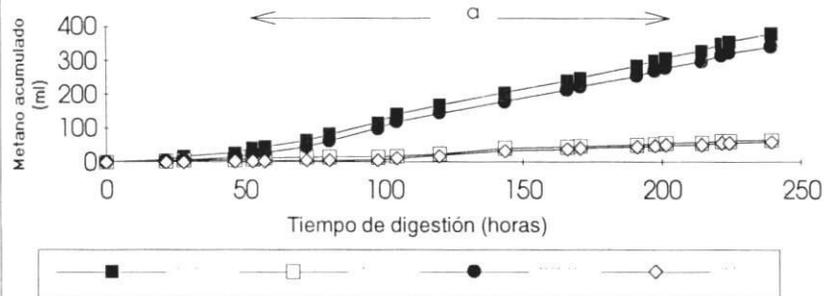


FIGURA 16. Toxicidad A.R. planta de recuperación ácido fumárico sobre la actividad metanogénica alimentación de recuperación DQO = 1500 mg/l.

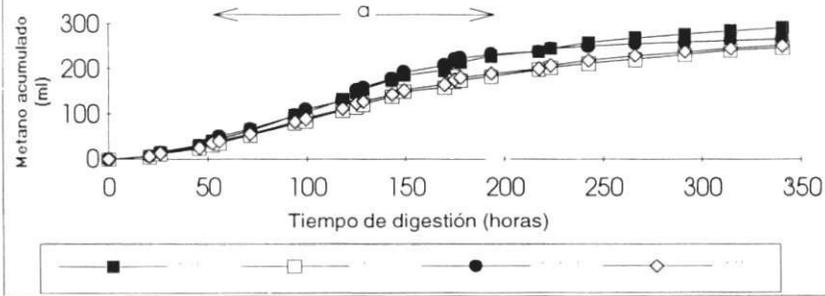
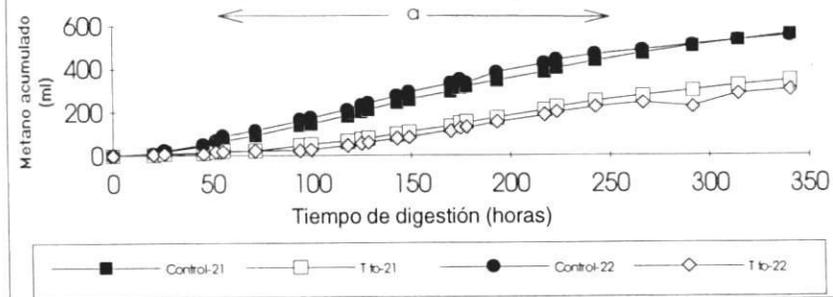


FIGURA 17. Toxicidad A.R. planta de recuperación ácido fumárico sobre la actividad metanogénica alimentación de recuperación DQO = 2500 mg/l.



En la Tabla 13 se presentan los porcentajes de actividad y los porcentajes de inhibición de los tratamientos, para contrastarlos con los respectivos de los controles.

TABLA 13. Porcentajes de actividad y de inhibición ensayo de toxicidad anaerobia del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico

Ensayo	Tóxico DQO (mg/l)	AME	% ACT	% INHIB
Control 11	1500	0.1063		
Tto 11	1500	0.0261	24.54	75.45
Control 12	1500	0.1094		
Tto 12	1500	0.0269	24.64	75.35
Control 21	2500	0.1660		
Tto 21	2500	0.0292	17.61	82.38
Control 22	2500	0.1568		
Tto 22	2500	0.0303	19.32	80.67

En las figuras 18 y 19 se muestran los resultados de las producciones de metano durante las alimentaciones de exposición y recuperación para las concentraciones de 1500 y 2500 mg/l.

2.5 Ensayo de toxicidad letal A.R. planta de recuperación de ácido fumárico sobre daphnia pulex

2.5.1 Ensayos sin neutralizar el pH

Las Tablas 14 a 17 muestran los resultados obtenidos de los bioensayos realizados sin neutralizar el pH de las soluciones de ensayo. La Tabla 14 corresponde al ensayo exploratorio, el cual se realizó con un rango amplio de concentraciones con el fin de determinar rangos de concentraciones más estrechos para los ensayos definitivos (Tablas 15 a 17). Por esta razón con los datos del primer experimento no se hicieron cálculos de la concentración letal media del desecho (CL_{50}).

La Tabla 15 contiene los resultados del segundo experimento, correspondiente al primer ensayo definitivo. Las Tablas 16 y 17 presentan los resultados de los experimentos tercero y cuarto realizados para un rango de concentraciones más estrecho con el propósito de estimar un valor de mayor confiabilidad. El cuarto experimento se realizó con el fin de corroborar los resultados obtenidos en el tercer experimento.

2.5.2 Ensayos con neutralización del pH de la solución

Los resultados de los bioensayos que se realizaron neutralizando el pH de las soluciones de ensayo con NaOH se muestran en las Tablas 18, 19 y 20; la secuencia de estos ensayos fue la misma que para los experimentos anteriores correspondiendo de esta manera el quinto al ensayo exploratorio.

FIGURA 18. Producción de metano durante las alimentaciones de exposición y recuperación. Ensayo de toxicidad DQO = 1500 mg/l.

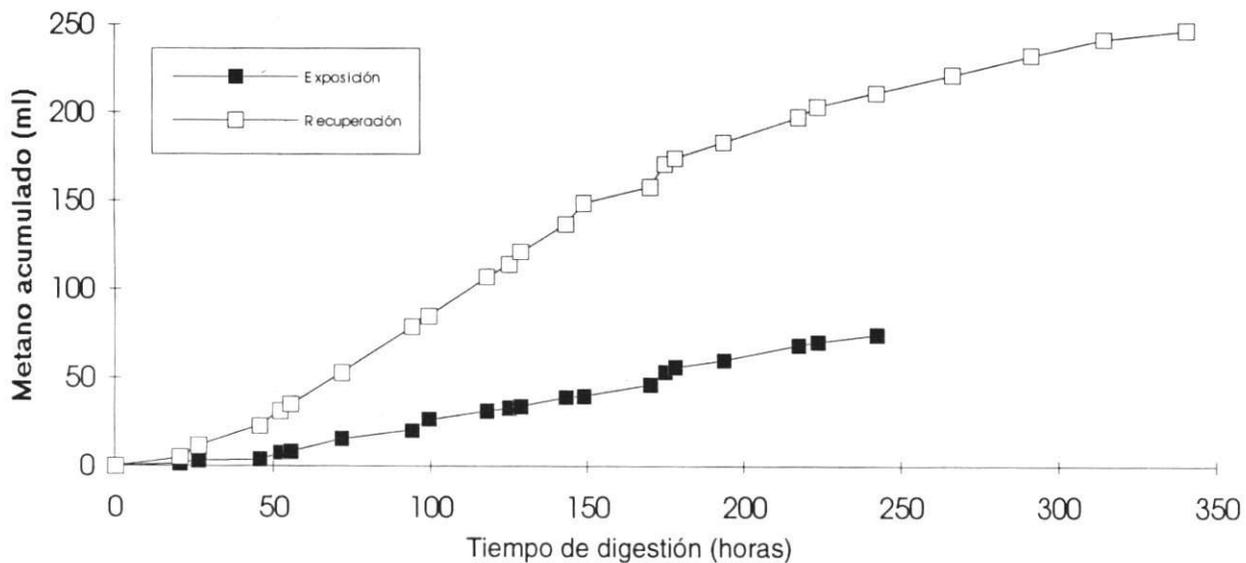


FIGURA 19. Producción de metano durante las alimentaciones de exposición y recuperación. Ensayo de toxicidad DQO = 2500 mg/l.

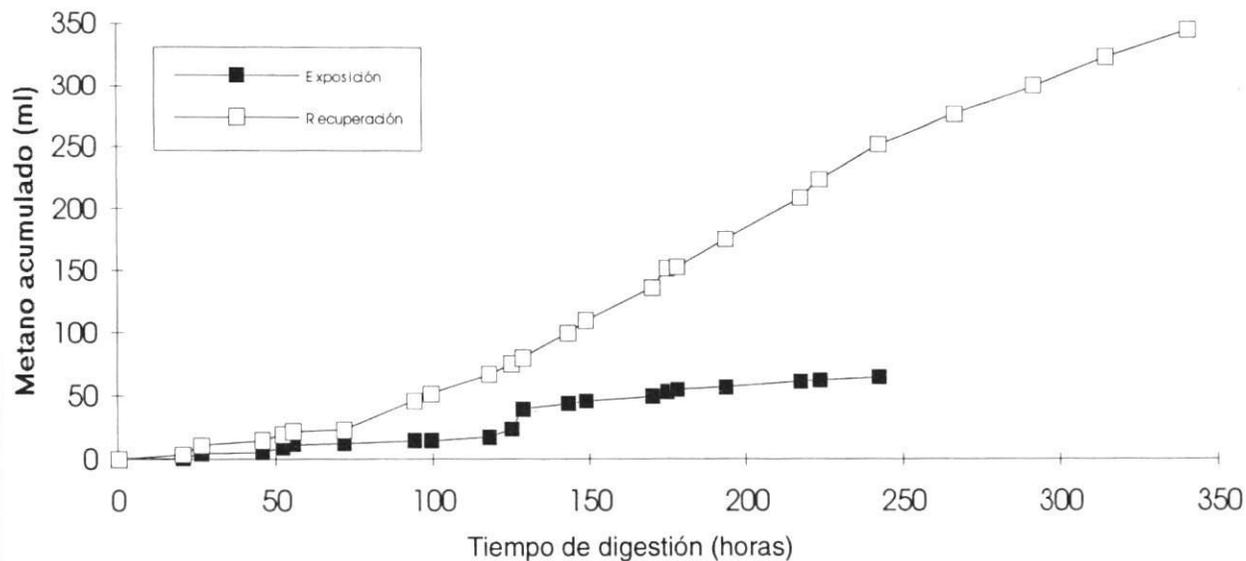


TABLA 14. Toxicidad del desecho sin neutralizar el pH, sobre *Daphnia pulex*. Ensayo 1.

Concentración (%)	pH			Porcentaje de mortalidad	
	Inicial	24 h	48 h	24 h	48 h
0.0031	7.69	7.83	8.00	0.00	0.00
0.0062	7.40	7.75	7.85	0.00	0.00
0.0125	7.05	7.62	7.73	0.00	0.00
0.0250	6.58	7.37	7.55	0.00	0.00
0.0500	5.95	6.43	6.58	66.67	90.00
0.1000	3.97	4.04	4.15	100.00	100.00
Control	8.00	7.95	8.16	0.00	0.00

TABLA 15. Toxicidad del desecho sin neutralizar el pH, sobre *Daphnia pulex*. Ensayo 2.

Concentración (%)	pH			Porcentaje de mortalidad	
	Inicial	24 h	48 h	24 h	48 h
0.0230	6.31	----	7.90	0.00	0.00
0.0280	6.24	----	7.80	0.00	0.00
0.0330	6.15	----	7.73	0.00	0.00
0.0400	5.98	----	7.54	0.00	0.00
0.0480	5.89	----	7.16	13.33	63.33
0.0570	5.82	----	6.51	46.66	96.66
0.0690	5.52	5.91	----	100.00	100.00
0.0830	5.10	5.43	----	100.00	100.00
0.1000	4.18	4.41	----	100.00	100.00
Control	7.97	----	8.15	0.00	0.00
CL50 (%)				0.0559	0.04734
Intervalo de confianza				(0,0537 - 0,0582)	(0,0457 - 0,4898)

TABLA 16. Toxicidad del desecho sin neutralizar el pH, sobre *Daphnia pulex*. Ensayo 3.

Concentración (%)	pH		Porcentaje de mortalidad	
	Inicial	48 h	24 h	48 h
0.0400	5.99	7.37	0.00	0.00
0.0420	5.99	7.34	0.00	0.00
0.0440	6.01	7.29	13.33	20.00
0.0460	6.08	7.21	3.33	13.33
0.0490	6.01	7.02	6.66	13.33
0.0510	5.99	6.82	13.33	20.00
0.0540	5.93	6.63	16.13	77.42
0.0560	5.90	6.51	24.14	89.65
0.0590	5.83	6.38	36.66	76.66
0.0620	5.75	6.24	33.33	96.66
Control	8.04	8.17	0.00	0.00
CL50 (%)			0.0668	0.0522
Intervalo de confianza			(0,0621 - 0,0771)	(0,0497 - 0,0550)

TABLA 17. Toxicidad del desecho sin neutralizar el pH, sobre *Daphnia pulex*. Ensayo 4.

Concentración (%)	pH		Porcentaje de mortalidad	
	Inicial	48 h	24 h	48 h
0.0420	6.12	7.30	0.00	0.00
0.0450	6.07	7.15	0.00	0.00
0.0480	6.05	7.03	6.66	13.33
0.0510	5.89	6.78	20.00	63.33
0.0540	5.88	6.64	18.52	62.96
0.0580	5.80	6.36	36.66	100.00
0.0620	5.70	6.21	26.66	96.66
Control	7.97	8.15	0.00	0.00
CL50 (%)			0.0657	0.0515
Intervalo de confianza			(0,0621 - 0,07651)	(0,0492 - 0,0540)

TABLA 18. Toxicidad del desecho neutralizando el pH, sobre *Daphnia pulex*. Ensayo 5.

Concentración (%)	pH				Porcentaje de mortalidad	
	Inicial	Neutralización	24 h	48 h	24 h	48 h
0.0031	6.31	----	8.03	7.98	0.00	0.00
0.0062	6.24	----	7.96	7.94	0.00	0.00
0.0125	6.15	----	7.83	7.84	0.00	3.33
0.0250	5.98	7.09	7.69	7.75	0.00	3.33
0.0500	5.89	7.59	7.75	7.78	56.66	66.66
0.1000	5.82	7.30	7.72	7.76	100.00	100.00
Control	7.97	----	8.06	8.00	0.00	0.00

TABLA 19. Toxicidad del desecho neutralizando el pH, sobre *Daphnia pulex*. Ensayo 6

Concentración (%)	pH			Porcentaje de mortalidad	
	Inicial	Neutralización	24 h	24 h	48 h
0.0230	6.70	7.58	7.87	0.00	0.00
0.0280	6.51	7.33	7.77	3.44	3.44
0.0330	6.40	7.33	7.88	0.00	0.00
0.0400	6.25	7.89	7.93	48.38	51.65
0.0480	6.02	7.55	7.93	53.33	53.33
0.0570	5.93	7.57	7.82	59.37	78.12
0.0690	5.60	7.57	7.90	93.33	100.00
0.0830	5.44	7.26	7.88	75.86	89.65
0.1000	4.50	7.49	----	100.00	100.00
Control	8.17	----	7.88	0.00	0.00
CL50 (%)				0.0497	0.0459
Intervalo de confianza				(0,0413 - 0,0600)	(0,0394 - 0,0534)

TABLA 20. Toxicidad del desecho neutralizando el pH, sobre *Daphnia pulex*. Ensayo 7.

Concentración (%)	pH			Porcentaje de mortalidad	
	Inicial	Neutralización	24 h	24 h	48 h
0.0420	6.11	7.30	7.89	0.00	0.00
0.0450	6.00	7.37	7.94	0.00	0.00
0.0480	5.98	7.42	7.86	3.33	3.33
0.0510	5.97	8.01	7.81	76.67	80.00
0.0540	5.92	7.60	----	46.67	66.67
0.0580	5.77	7.48	7.88	63.33	86.67
0.0620	5.69	7.34	7.73	36.67	63.33
0.0660	5.56	7.68	7.87	100.00	100.00
Control	7.92	----	8.13	0.00	0.00
CL50 (%)				0.0561	0.0533
Intervalo de confianza					(0,0439 - 0,0651)

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Aclimatación del lodo

El lodo para los bioensayos anaerobios con A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico presentó buena capacidad de amortiguación puesto que su pH osciló entre 7.9 y 6.1 a pesar de que el pH del A.R. utilizada para el proceso de aclimatación varió entre 1.5 y 2.5.

la remoción de la carga orgánica, como un indicativo del grado de aclimatación del lodo, muestran que las bacterias efectivamente oxidan el sustrato puesto que en un periodo de 24 horas removieron la carga orgánica en un 40.9%.

Las observaciones al microscopio de la actividad y clase de bacterias del lodo mostraron en todos los casos la presencia de población microbial activa.

El período de estabilización a que se sometió el lodo utilizado en los bioensayos con A.R. del beneficio del café por vía húmeda y lixiviado de relleno sanitario fue suficiente porque en los ensayos de BD la producción de metano en los controles de las dos A.R. mencionadas, siempre estuvo por debajo del 20% del total de metano producido por los tratamientos.

3.2 Actividad metanogénica específica de los lodos (AME)

La AME del lodo utilizado en los bioensayos anaerobios del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico (0.1 g DQO_{CH4}/g SSV-d) permite catalogarlo como un lodo floculento de regular desempeño¹

La AME del lodo utilizado en los bioensayos anaerobios del A.R. del beneficio del café por vía húmeda (0.25 g DQO_{CH4}/g SSV-d) permite catalogarlo como un lodo floculento de regular a buen desempeño¹

3.3 Biodegradabilidad anaerobia

3.3.1 BD del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico

La BD anaerobia del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico osciló entre un 24.3 y un 29.5 por ciento con un valor promedio del 26 por ciento lo que implica un comportamiento muy similar en los tres ensayos realizados con tiempos de digestión de 14 a 21 días .

Las figuras 4, 5 y 6 ilustran la metanogenización del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico durante la digestión anaerobia tipo «batch» con el lodo floculento previamente aclimatado. Aproximadamente un 14 a un 18% de la DQO es convertida a metano (%DQO_M) pero después de un tiempo de digestión muy largo 14 a 21 días aproximadamente.

El crecimiento celular (Y_{cel}) nulo para los tres ensayos, está en relación directa con la baja metanogenización del desecho y hace prever tasas de Y_{cel} muy bajas en sistemas a escala piloto y real, lo cual dificultaría el arranque, puesta en marcha y operación de un reactor anaerobio para A.R. de estas características.

El valor de BD encontrado es muy bajo e indica que no es procedente tratar esta A.R. mediante un proceso anaerobio, salvo que previamente y por otros medios se remuevan las especies inhibitorias o tóxicas.

El ácido fumárico puede no ser el responsable de la inhibición de la BD, puesto que Guyot² cita investigaciones en las cuales encontró eficiencias de remoción de este sustrato del orden del 85% utilizando filtros anaerobios. El A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico puede contener además del ácido fumárico, compuestos o materias tóxicas, capaces de inhibir funciones enzimáticas claves de las bacterias involucradas en el proceso de fermentación metanogénica.

3.3.2 BD del A.R. del beneficio del café por vía húmeda

La BD anaerobia del A.R. del beneficio del café por vía húmeda se encontró entre el 84 y el 95% para tiempos de digestión 8 y 18 días aproximadamente.

Las figuras 7, 8, 9 y 10 ilustran la metanogenización del A.R. del beneficio del café por vía húmeda. Aproximadamente del 93 al 70% de la DQO es convertida a metano en un lapso de tiempo de 8 a 18 días.

Los resultados de BD de A.R. del beneficio del café por vía húmeda obtenidos en la presente investigación son similares a los obtenidos por Ijspeert (1984)², datos sin publicar, en los cuales se reporta una BD del 80 al 84 por ciento para aguas mieles del café y eficiencias de remoción de carga orgánica del 81 al 86% operando un reactor anaerobio tipo UASB con A.R. de la misma procedencia.

El valor de BD encontrado da pie a pensar que el tratamiento de este tipo de A.R. puede ser abordado de manera exitosa mediante la aplicación de un proceso anaerobio; tal es el caso de Castro y Hernández⁴ que operando un reactor UASB a escala piloto, en la finca Combia del municipio de Calarcá con aguas mieles del beneficio del café por vía húmeda entre los años de 1988 a 1991, obtuvieron porcentajes de remoción de la DQO por encima del 90%. Esta experiencia muestra las bondades de este tipo de tratamiento y la confiabilidad de los resultados de BD obtenidos.

La selección del A.R. del beneficio del café por vía húmeda como un sustrato complejo o tóxico se basó en el hecho de que tres componentes naturales de la pulpa del café son toxinas potenciales: La cafeína, el ácido clorogénico y los taninos.

Estudios realizados por Witkowski y Jerris (1983)³ y Lane (1983)³, mostraron que la cafeína no es tóxica, mientras que el ácido clorogénico presentó una BD parcial en condiciones anaerobias. Según datos de investigación de Field³, aun no publicados, la toxicidad de los taninos que inhibe el 50 por ciento de la metanogénesis está por los alrededores de los 600 a los 800 g DQO/l; Por lo cual se recomienda que este tipo de A.R. se diluya a concentraciones de DQO inferiores a 7 g DQO/l (suponiendo que los taninos contribuyan con un 10 por ciento de la DQO). A pesar de que Ijspeert (1984)² constató que concentraciones afluentes de hasta 26 g DQO/l en un reactor UASB no tuvieron efecto inhibitorio, en la presente investigación los ensayos fueron realizados a concentraciones de DQO inferiores al valor límite propuesto por Field.

3.3.3 BD de A.R. de un relleno sanitario

La BD anaerobia del A.R. de Relleno Sanitario fue del 95.5% en promedio para un tiempo de digestión de 17 días aproximadamente. De acuerdo con lo anterior este tipo de A.R. es altamente BD y la posible presencia de trazas de metales y otro tipo de sustancias parece no tener un efecto significativo sobre la actividad metanogénica de las bacterias.

Los altos valores de BD permiten concluir que este tipo de A.R. puede ser tratado anaeróbicamente con muy buenas posibilidades de éxito. Eficiencias de remoción de DQO entre el 70 y el 90% obtenidas por Agudelo⁵ en investigación adelantada durante los años 1992 y 1993, en un reactor UASB operado a escala de laboratorio con un lodo floculento con una AME entre 0.08 y 0.2 g DQO/g SSV-d, corroboran la afirmación anterior y permiten ratificar la confiabilidad de los resultados de BD anaerobia obtenidos en la presente investigación.

3.4 Toxicidad anaerobia del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico

Los dos ensayos realizados con sendas concentraciones del tóxico, fueron muy consistentes como se aprecia en las figuras 14, 15, 16 y 17 que muestran la producción acumulada de metano para las alimentaciones de exposición y de recuperación respectivamente.

Para la concentración de 1500 mg/l de DQO del A.R., se presentó un porcentaje de inhibición de la DQO metanogénica del 75% en los dos ensayos; para la concentración de 2500 mg/l de DQO del A.R. el porcentaje de inhibición varió entre el 80.7 y el 82.4%.

En las figuras 14 y 15 puede observarse claramente el efecto inhibitorio que tiene el A.R. sobre la población microbiana, medido en términos de un marcado descenso en el biogas producido para las dos concentraciones ensayadas.

Durante la alimentación de exposición el control presenta la máxima actividad metanogénica entre las horas 50 y 250 de experimentación, mientras que para los tratamientos a las concentraciones de 1500 y 2500 mg/l de DQO del A.R. se presentaron períodos de retardo de 50 y 100 horas respectivamente. A partir de estos tiempos el lodo parece recuperar un poco su actividad.

Las figuras 16 y 17 muestran la capacidad que tiene el lodo de recuperar su actividad después de una descarga tóxica

y, además, permiten identificar el tipo de toxicidad que causa el A.R. ensayada.

El efecto tóxico de la concentración de 1500 mg/l de DQO del A.R. sobre la actividad metanogénica del lodo es del tipo «Toxicidad metabólica», como se puede apreciar en la Figura 18, puesto que en la alimentación de recuperación la actividad metanogénica del lodo se recupera muy rápidamente.

El efecto tóxico de la concentración de 2500 mg/l de DQO del A.R. sobre la actividad metanogénica del lodo es del tipo «Toxicidad fisiológica» según se puede apreciar en la Figura 19, puesto que al suspender la exposición al A.R. se necesita un intervalo de tiempo de aproximadamente 100 horas para iniciar la actividad metanogénica. Es evidente que para esta concentración del tóxico, las bacterias disminuyen apreciablemente su capacidad metanogénica. El proceso de inhibición de la acción enzimática es muy fuerte sobre todo al comienzo; sin embargo, dentro de la primera fase (alimentación de exposición), la población bacteriana se adapta y presenta un período retardado de recuperación.

Como se puede apreciar en la Tabla 12, en la segunda fase de la experiencia (alimentación de recuperación) el lodo muestra una buena capacidad de recuperación de la actividad metanogénica, 77% para la concentración de 1500 mg/l de DQO del A.R. y 57% para la concentración de 2500 mg/l de DQO del A.R.

Esto permite pensar que no se puede descartar la posibilidad de que en un período más prolongado de experimentación pueda ocurrir la aclimatación de las bacterias a concentraciones del tóxico del orden de 2500 mg/l o mayores, lo cual puede deducirse a partir de los resultados de la segunda fase, en la que se midió la capacidad de recuperación del lodo. Sin embargo, no se puede desconocer que los largos períodos de retardo que presenta la recuperación de la actividad, constituyen un problema muy difícil de abordar para la puesta en marcha y operación de una planta de tratamiento anaerobio con A.R. de estas características.

3.5 Toxicidad letal del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico sobre Daphnia pulex

3.5.1 Ensayos sin neutralizar el pH

Los valores estimados de la concentración letal media (CL_{50}) para Daphnia pulex en el primer ensayo definitivo fueron de 0.055900 y 0.0477335 por ciento para 24 y 48 horas de exposición respectivamente. Sin embargo, sólo se presentaron mortalidades intermedias en dos de las concentraciones ensayadas y aunque fue posible estimar el valor de la CL_{50} a partir de estos resultados, se hicieron dos ensayos adicionales con un rango de concentraciones más estrecho, con el propósito de estimar un valor de mayor confiabilidad.

Tanto en el tercero como en el cuarto ensayo se registraron mortalidades intermedias en un número mayor de diluciones, con relación al segundo ensayo. Esto permitió estimar la CL_{50} y su intervalo de confianza de una forma más confiable estadísticamente.

Al comparar los resultados del tercero y cuarto ensayo, se encontró que la diferencia entre los valores estimados de la CL_{50} y sus respectivos intervalos, no es significativa.

De acuerdo con lo anterior se infiere que el valor de la concentración letal media del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico sobre la Daphnia pulex, sin neutralizar el pH, se estima en 0.051472 por ciento, valor que se encuentra entre 0.049159 y 0.054027 por ciento con un nivel de confianza del 95%.

3.5.2 Ensayos neutralizando el pH

Con los resultados del sexto ensayo fue posible estimar la CL_{50} del A.R. sobre *Daphnia pulex* para ambos períodos de exposición, pero los valores observados en los porcentajes de mortalidad son muy inconsistentes, ya que se presentaron mortalidades mayores en concentraciones menores. La misma situación se presentó en el séptimo ensayo, en el que además no fue posible hacer la estimación del intervalo de confianza para las 24 horas de exposición.

Al comparar los resultados de los ensayos sexto y séptimo se encontró que las diferencias que se presentaron entre los valores de la CL_{50} para 48 horas de exposición no son significativas.

Es posible que las inconsistencias observadas en los porcentajes de mortalidad de la especie experimental se deban a un efecto adicional producido por la sustancia utilizada para neutralizar el pH de las soluciones (NaOH), aunque ésta es la recomendada para este tipo de pruebas. Sin embargo, con los resultados de los experimentos realizados no es posible confirmar lo anterior.

Comparando los valores de la CL_{50} a 48 horas, del desecho sin neutralizar el pH, 0.051472 por ciento en la Tabla 17, y del desecho neutralizado, 0.045913 por ciento en la Tabla 19, se encontró que la diferencia entre los dos valores no es significativa y además que el valor para el desecho neutralizado es menor. Esto significa una mayor toxicidad y sugiere que el efecto letal del A.R. se debe al tóxico mismo y no al efecto de acidificación que tiene sobre las aguas. Para hacer las comparaciones anteriores se tomaron los valores mínimos estimados de la CL_{50} .

De otro lado fue notorio en todos los ensayos, tanto en los que se neutralizó el pH como aquellos en los que no se hizo, que este valor tendía a neutralizarse en el transcurso del tiempo, alcanzando valores de pH cercanos a los de los controles experimentales. Es probable que estas variaciones se deban en parte a que el desecho sea volátil, lo que haría disminuir su concentración, también es posible que se haya presentado un efecto amortiguador por parte de las sales utilizadas para preparar el agua de dilución (agua reconstituida).

4. CONCLUSIONES

4.1 Ensayos de BD anaerobia

El valor de BD obtenido para el A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico es muy bajo y es un indicativo de la existencia de factores limitantes para tratar este tipo de A.R. por proceso anaerobio.

La alta BD anaerobia de las A.R. del beneficio del café por vía húmeda y del lixiviado de un relleno sanitario, da buenas posibilidades de tratamiento por proceso anaerobio. Lo anterior valida la utilidad de los ensayos de BD porque a pesar de que se suponía que estos dos tipos de A.R. eran complejas o tóxicas dada su procedencia, se encontró todo lo contrario.

Las modificaciones hechas al montaje de laboratorio, reactores y sistema de desplazamiento de líquido, para realizar las pruebas de BD anaerobia garantizaron una muy buena reproducibilidad de los resultados. Puede concluirse que el sistema modificado, utilizado en esta investigación, podría sustituir al que tradicionalmente se venía utilizando.

Los ensayos de BD resultan ser una excelente herramienta de análisis que permiten planificar fases posteriores de un estudio de tratabilidad por proceso anaerobio de A.R. complejas o Tóxicas.

4.2 Ensayo de toxicidad anaerobia

La AME del lodo se ve fuertemente inhibida a concentraciones de 1500 mg/l de A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico y en mayor proporción para la concentración de 2500 mg/l.

Los porcentajes de inhibición de la actividad del lodo fueron del 75.4% para la concentración de 1500 mg/l de DQO del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico y del 81% para la concentración de 2500 mg/l.

La toxicidad de la actividad metanogénica para la concentración de 1500 mg/l de DQO del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico es del tipo metabólica, mientras que para la concentración de 2500 mg/l las bacterias metanogénicas experimentan toxicidad del tipo fisiológico.

La actividad residual del lodo, o capacidad de recuperación de la actividad es alta, 77% para la concentración del 1500 mg/l de DQO del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico, mientras que para la concentración de 2500 mg/l es media, 52% en promedio.

Aunque la actividad metanogénica del lodo presenta inhibición significativa para 1500 mg/l de DQO del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico, en realidad no se presentó fase de retardo en la alimentación de recuperación.

Para una concentración de 2500 mg/l de DQO del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico el lodo exhibe una pronunciada fase de latencia, 100 horas aproximadamente, que persiste aun después de retirar dicha A.R. A esta concentración el lodo sólo recupera parcialmente su actividad.

Sería interesante ensayar concentraciones menores que 1500 mg/l de DQO del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico, para determinar con exactitud la concentración límite del A.R. que podría soportar el lodo.

La pequeñísima diferencia en los porcentajes de inhibición para cada una de las concentraciones en los dos ensayos, es garantía de que las modificaciones introducidas al sistema de desplazamiento de líquido, permiten realizar este tipo de pruebas con muy buena reproducibilidad.

4.3 Ensayo de toxicidad letal sobre *Daphnia pulex*

La concentración letal media (CL_{50}) a 48 horas sobre el microcrustáceo *Daphnia pulex* del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico sin neutralizar es de 0.051472% y, con un nivel de confianza del 95%, este valor se halla en un intervalo entre 0.049159 y 0.054027%.

Cuando se neutralizan las diluciones de A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico, la CL_{50} es de 0.045913%, con un intervalo entre 0.039400 y 0.053417% para un nivel de confianza del 95%.

La diferencia entre las estimaciones de la CL_{50} del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico neutralizada y sin neutralizar, no es significativa.

A través de bioensayos estáticos de corta duración, con organismos adecuados y métodos normalizados, es posible determinar en forma rápida directa y sencilla, los niveles de toxicidad aguda de A.R.I., lo que facilita la identificación de aquellas industrias con las que se deben tomar medidas correctivas, desde el punto de vista de la toxicidad.

La *Dahpnia pulex* es un microcrustáceo de amplia utilización en la ecotoxicología, pues es un organismo de fácil manejo en condiciones de laboratorio y sensible a los tóxicos. Los resultados presentados en esta investigación demuestran que la *Dahpnia pulex* presenta sensibilidad a niveles de concentración muy bajos del A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico.

Los resultados de este ensayo están en absoluta concordancia con el resto de experimentos realizados, puesto que el A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico presentó una baja BD, una alta inhibición del potencial metanogénico de la población bacteriana y una baja actividad metanogénica del lodo.

La realización de ensayos de toxicidad letal, antes de la realización de los bioensayos anaerobios, daría indicios del grado de toxicidad del A.R. en estudio, lo que permitiría definir estrategias de manejo de este tipo de aguas.

Se sugiere realizar este tipo de pruebas para los efluentes de reactores anaerobios alimentados con A.R. de la planta de recuperación de ácido fumárico con el ánimo de identificar la persistencia o no de los tóxicos de esta A.R.

REFERENCIAS

1. FIELD, Jin. Parámetros operativos del manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente. p.B-1 - B-35. En: ARRANQUE Y OPERACION DE SISTEMAS DE FLUJO ASCENDENTE CON MANTO DE LODOS (1987: Santiago de Cali). Curso Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos. Santiago de Cali: Universidad del Valle, 1987.
2. GUYOT, Jean-Pierre. Generalidades sobre biodegradación anaerobia de algunos compuestos de la industria petroquímica. 33p. En: BIOPROCESOS ANAEROBIOS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES INDUSTRIALES (1992: UAM-IZTAPALAPA). ORSOM-UAM-I-IMP. 1992.
3. FIELD, Jin. Aguas residuales de café. p.H-1 - H-11. En: ARRANQUE Y OPERACION DE SISTEMAS DE FLUJO ASCENDENTE CON MANTO DE LODOS (1987: Santiago de Cali). Curso Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos. Santiago de Cali: Universidad del Valle, 1987.
4. CASTRO, R. y HERNADEZ, G. Identificación de un sistema de tratamiento anaerobio para las aguas residuales del beneficio del café y aguas negras rurales. 14p En: DIGESTION ANAEROBIA (1994 Santafe de Bogotá) Primer Simposio Colombiano sobre Digestión Anaerobia. Santafe de Bogotá Universidad de los Andes. 1994.
5. AGUDELO, R.A. Tratabilidad de lixiviados producidos en rellenos sanitarios. 13p En: DIGESTION ANAEROBIA (1994 Santafe de Bogotá) Primer Simposio Colombiano sobre Digestión Anaerobia. Santafe de Bogotá Universidad de los Andes. 1994.