

III-010 - COMPOSTEO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE ORIGEN VEGETAL CON RECUPERACIÓN DE AGUA

Anabel Díaz Hernández ⁽¹⁾

Tesista de la licenciatura en Ingeniería Química en el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Gabriela Zafra Jiménez ⁽¹⁾

Licenciada en Biología Experimental por la Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Maestra en Biología Celular por la Facultad de Ciencias de la UNAM. Profesora de la División de Ingeniería Química y Bioquímica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Josefina Pérez Vargas ⁽¹⁾

Química Fármaco Bióloga por la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, y Doctora en Biotecnología por el CINVESTAV-IPN. Profesora-Investigadora de tiempo completo de la División de Ingeniería Química y Bioquímica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Alejandra Velasco Pérez ⁽³⁾

Ingeniera Química por el Instituto Tecnológico de Orizaba, Doctora en Ingeniería Química por la Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Profesora-Investigadora en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana

Sergio Esteban Vigueras Carmona ^(1,2)

Ingeniero Bioquímico Industrial y Doctor en Biotecnología por la Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa. Profesor-Investigador de tiempo completo de la División de Ingeniería Química y Bioquímica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Subdirector de Educación y Cultura Ecológica A. C (ECOSOL), Cd. de México.

Dirección: (1) Av. Tecnológico S/N col. Valle de Anáhuac, Ecatepec, Estado de México, 55210. Tel (52) 50002323, e-mail: svigueras@tese.edu.mx

(2). Bulevar de los Lagos núm. 3048, Fracc. Santa Lucía C.P. 22701. Playas de Rosarito, Baja California

(3) Universidad Veracruzana, Prol. de Oriente 6, núm. 1009, C.P. 94340, Orizaba, Veracruz

RESUMEN

En este trabajo se presenta la evaluación de un sistema de tratamiento integral de residuos sólidos urbanos de origen vegetal (RSOUOV), el cual incluye la producción de composta en sistemas de pilas verticales, a escala laboratorio, y un proceso anaerobio de estabilización de lixiviado para generar agua con características para su uso en Riego. La composta fue caracterizada y comparada con un suelo agrícola (muestreado en dos municipios del Estado de Hidalgo, México). El lixiviado fue estabilizado en un reactor de lecho de lodos de flujo ascendente (RAFA) de 9 L, operando a temperatura ambiente, con 7 d de tiempo de retención hidráulica. El agua contenida en los residuos sólidos orgánicos urbanos de origen vegetal, que puede ser reusada, se estimó en 0.466 L.kg⁻¹ RSOUOV. El agua recuperada por el composteo de RSOUOV representa un recurso con alto potencial ya que se podría regar por goteo 1 ha de cultivo de jitomate con 66,972 t de RSOUOV procesado, esta cantidad representa 10 días de recolección de la ZMCM.

PALABRAS CLAVES: Composteo, Digestión anaerobia, lixiviado, tratamiento integral.

INTRODUCCIÓN

En México se tienen problemas de disponibilidad de agua por su distribución fisiográfica y climática, por la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas y por el incremento acelerado de la demanda de agua para uso agrícola, doméstico e industrial. En la región de la frontera sur, la disponibilidad media de agua por habitante es muy alta: 25,000 m³ al año. Esta condición contrasta fuertemente con la que se tiene en las zonas norte y centro donde se asienta el 77 % de la población, en esta región se tiene una disponibilidad de agua menor a 2,000 m³ por habitante al año, valor que se considera como “disponibilidad muy baja”. El caso más extremo es la región del Valle de México que tiene una disponibilidad de sólo 192 m³ por habitante al año, misma que se considera como “extremadamente baja” (CNA, 2007).

El reúso del agua en la agricultura es una práctica conocida en el país. Ante la eminente escasez del recurso en algunas zonas, el reúso del agua se plantea como una alternativa de abastecimiento. La fuente del agua de reúso es esencialmente el agua residual tratada. Pero también es importante considerar otras fuentes, como los

lixiviados generados en el proceso de composteo, si bien, éstos representan una alternativa minoritaria es interesante considerarla. Es importante aclarar que las características de los lixiviados generados en el composteo tienen diferencias importantes con respecto a los lixiviados generados en los rellenos sanitarios, estos últimos suelen tener alto contenido de metales pesados y otros compuestos tóxicos que están presentes en algunos residuos sólidos urbanos que llegan al relleno sanitario.

El potencial de agua contenida en los residuos sólidos puede ser calculada considerando que se producen entre 0.357 y 0.553 m³ de lixiviado/t de residuos sólido orgánico urbano de origen vegetal (datos determinados en este trabajo). De las 18.34 millones de toneladas anuales de residuos sólidos orgánicos que se producen en el país (SEMARNAT, 2008), el potencial de recuperación de agua es de entre 6.55 X 10⁶ y 10.14 X 10⁶ m³ anuales, esta cantidad de agua es suficiente para regar 274 ha de cultivos de jitomate.

Otro de los problemas de las grandes ciudades es la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) y su disposición final. De los RSU generados en México el 53% son residuos orgánicos. La posibilidad de transformar estos residuos a composta es de todos conocido, sin embargo a 40 años de explorada esta posibilidad poco se ha avanzado. Para que el composteo sea una alternativa viable, es necesario el desarrollo de tecnologías que permitan la producción de la composta y la recolección de los lixiviados, éstos servirán como agua de riego una vez que hayan sido caracterizados y estabilizados. Es por eso que la investigación en los procesos de composteo debe ser enfocada a la generación de los conocimientos que nos permitan desarrollar la tecnología adecuada para el aprovechamiento integral de los residuos. El desarrollo de proyectos productivos que utilicen a los residuos orgánicos urbanos de origen vegetal (RSOUOV) como materia prima, sin duda detonarán su explotación y por ende su cambio en la disposición final. El modificar la práctica de disposición de los residuos orgánicos traerá beneficios importantes, no solo en la reducción de basura, sino también en la generación de empleos y la participación de las ciudades en el abasto de alimentos.

Por esto es necesario generar proyectos que promuevan el uso de los residuos orgánicos vegetales generados en los mercados para la producción de composta y que los lixiviados producidos en este proceso sean recolectados y estabilizados para su uso como agua de riego enriquecida, ya que tendrá aportes de micronutrientes que requieren tanto los microorganismos del suelo y la planta.

En este trabajo se presenta la evaluación de un sistema de tratamiento integral de residuos sólidos orgánicos urbanos de origen vegetal (RSOUOV), el cual incluye composteo aerobio en sistemas de pilas verticales a escala laboratorio, y un proceso anaerobio para la estabilización de lixiviados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluó un sistema de tratamiento integral de RSOUOV, Figura 1. Éste incluye la producción de composta en sistemas de pilas verticales y la estabilización de lixiviado por digestión anaerobia. La evaluación del sistema se realizó en función de las características de la composta y del lixiviado estabilizado.

Compostaje

Los residuos utilizados para el composteo fueron aportados por tres familias, dos de ellas del municipio de Ecatepec: la primera familia con 7 miembros, la segunda familia con 10 miembros y la tercera familia pertenece al municipio de Netzahualcóyotl conformada por dos miembros. En promedio estas familias produjeron 28 litros de RSOUOV semanalmente. Para el composteo se utilizaron tres composteros de plástico de 40 L y tres de 60 L, empacados con 70 % de RSOUOV y 30 % de viruta de madera (como soporte) esta última con una humedad de 22.6 %. El tiempo de composteo fue de 4 meses. Una vez alcanzado el volumen de operación los composteros fueron montados sobre un recipiente para la recolección de los lixiviados. La aireación de los composteros se realizó semanalmente por volteo. El lixiviado fue recolectado y caracterizado cada vez que se acumularon más de 100 mL en el recipiente.

Caracterización de la composta

La composta generada fue caracterizada y comparada con dos suelos agrícolas de la región del Valle del Mezquital. Uno fue muestreado en el Municipio de Actopan y otro en el Municipio de Cardonal, en Hidalgo, México. Para la caracterización se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: porcentaje de humedad (Viguera y Albarran, 2004), retención de agua (Ojeda *et al.* 2006), densidad de empaque (Amezquita, 1989),

distribución del tamaño de partícula (Fernández *et al* 2006), cantidad de coliformes fecales y salmonella (como indicadores de patógenos) según lo descrito en la norma mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Para determinar la materia orgánica, 10 g de muestra en un crisol a peso constante fue (1) calcinada a 550 °C durante 2 horas, transcurrido este tiempo, (2) se pasó a un horno a 105 °C y permaneció ahí durante 15 min, (3) posteriormente se pasó a un desecador, 30 minutos y se pesó. Los pasos 1, 2 y 3 se repiten hasta llevar la muestra a peso constante. El contenido de materia orgánica se calculó con la ecuación 1.

$$\% \text{ materia orgánica} = \frac{\text{gramos de la muestra} - \text{gramos de la muestra calcinada}}{\text{gramos de la muestra}} 100$$

ecuación 1.

Caracterización del lixiviado

La caracterización del lixiviado se realizó en función de los siguientes parámetros: proteína (Lowry *et al.*, 1951), carbohidratos (Dubois *et al.*, 1956), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos y pH (APHA, 1998), ácidos grasos volátiles y alcalinidad (Powell y Archer 1989), biodegradabilidad anaerobia (Field *et al.*, 1986), coliformes fecales según lo descrito en la norma mexicana NMX-AA-42-1987. Salmonella, para preparar la muestra se realizó una dilución 10^{-1} bajo condiciones de asepsia, diluyendo 1 mL de lixiviado en 9 mL de agua de dilución. Posteriormente se agrega en 36 mL de caldo de tetratiónato para enriquecimiento incubado durante 22 ± 2 horas a 37 ± 0.2 °C. Una vez transcurrido el tiempo de enriquecimiento se prepararon las diluciones decimales seriadas transfiriendo 1 mL de caldo de tetratiónato en 9 mL de agua de dilución (10^{-2} - 10^{-10}). 1 mL de cada dilución fue inoculado en 10 mL de caldo selenito cistina e incubado a 41 ± 0.2 °C, durante de 24 ± 2 h.

Puesta en marcha del reactor RAFA

El reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) es de sección circular de PVC con diámetro interno de 12 cm, altura 82 cm y volumen de 9 L; dispone de una campana para recolección de biogás conectada a un sistema de medición por desplazamiento de líquido (gasómetro), Figura 1. El reactor fue inoculado (un tercio del volumen) con biosólidos proveniente de un reactor anaerobio de lodos residuales, enriquecido con estiércol de vaca. Los sólidos suspendidos volátiles del inóculo fueron de 24 g.L^{-1} . El reactor fue operado durante 3 meses, alimentado con lixiviado proveniente del composteo de RSOUOV, adicionado con minerales (Field *et al.*, 1986). El reactor se consideró estable cuando la remoción de DQO fue mayor a 60 %.

El reactor fue operado a un tiempo de retención hidráulica de 7 d, alimentando continuamente con 1.28 L.d^{-1} de lixiviado, con concentraciones entre 70 y 5 g DQO.L⁻¹. Los parámetros de control del RAFA fueron la remoción de DQO, concentración de AGV y alcalinidad. El primero indica la eficiencia del reactor, los AGV indican la adecuada metanización de los intermediarios y la alcalinidad representa el equilibrio ácido base del sistema.

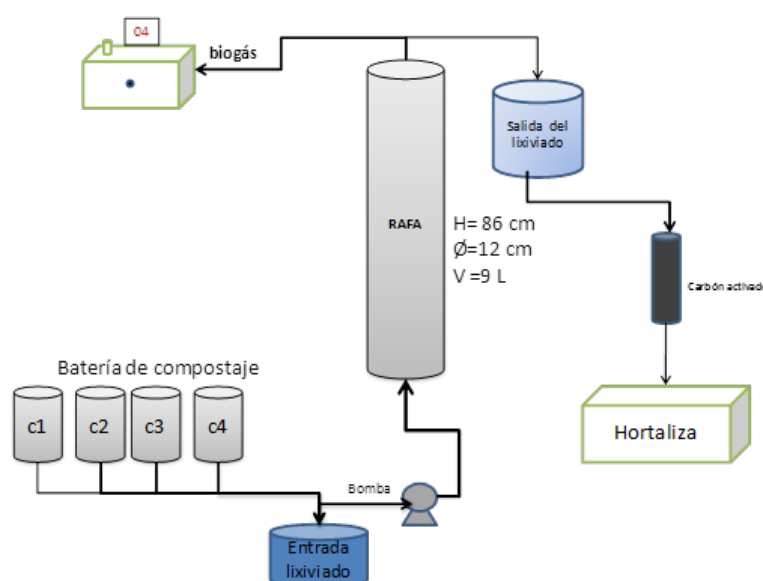


Figura 1. Sistema integral de tratamiento de residuos sólidos orgánicos.

RESULTADOS

CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS PARA COMPOSTEO

Los residuos sólidos orgánicos urbanos de origen vegetal aportados por cada familia fueron caracterizados antes de llenar los composteros (Tabla 1). La segunda columna de la Tabla 1, representa la fracción masa de cada residuo en el compostero.

Tabla 1. Masa de RSOUOV y composición en el proceso de composteo.

CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS											
COMPOSTERO 1		COMPOSTERO 2		COMPOSTERO 3		COMPOSTERO 4		COMPOSTERO 5		COMPOSTERO 6	
22.4 kg		18.60 kg		20.65 kg		30.74 kg		30.45 kg		27.74 kg	
Tuna	0.398	Tuna	0.157	Tuna	0.164	Tuna	0.033	Tuna	0.052	Tuna	0.043
Limon	0.045	Limon	0.058	Limon	0.094	Limon	0.032	Limon	0.031	Limon	0.017
Platano	0.049	Platano	0.087	Platano	0.101	Platano	0.069	Platano	0.026	Platano	0.155
Coliflor	0.008	Naranja	0.012	Coliflor	0.037	Naranja	0.220	Naranja	0.157	Naranja	0.115
Naranja	0.076	Lechuga	0.036	Naranja	0.017	Chayote	0.036	Chayote	0.006	Chayote	0.013
Chayote	0.005	Melon	0.002	Chayote	0.004	Lechuga	0.017	Lechuga	0.003	Lechuga	0.012
Lechuga	0.074	Mango	0.046	Lechuga	0.012	Mango	0.034	Melon	0.092	Melon	0.088
Melon	0.014	Pepino	0.011	Melon	0.083	Pepino	0.008	Mango	0.021	Pepino	0.005
Mango	0.038	Tomate	0.0005	Mango	0.031	Tomate	0.007	Pepino	0.049	Tomate	0.004
Pepino	0.012	Papaya	0.080	Pepino	0.064	Papaya	0.071	Tomate	0.028	Papaya	0.058
Pitajaya	0.004	Zanahoria	0.028	Tomate	0.004	Zanahoria	0.018	Papaya	0.037	Zanahoria	0.048
Mamey	0.013	Papa	0.020	Papaya	0.042	Papa	0.003	Zanahoria	0.027	Papa	0.001
Tomate	0.005	Chicharo	0.029	Zanahoria	0.010	Chicharo	0.005	Papa	0.146	Chicharo	0.015
Papaya	0.076	Manzana	0.002	Papa	0.006	Manzana	0.040	Chicharo	0.014	Manzana	0.019
Zanahoria	0.051	Sandia	0.057	Chicharo	0.009	Sandia	0.076	Manzana	0.0001	Sandia	0.061
Papa	0.005	Brocoli	0.065	Manzana	0.008	Brocoli	0.015	Sandia	0.019	Brocoli	0.030
Chicharo	0.008	Jitomate	0.014	Sandia	0.037	Jitomate	0.006	Brocoli	0.002	Jitomate	0.009
Manzana	0.008	Chile	0.007	Brocoli	0.005	Chile	0.007	Jitomate	0.070	Chile	0.012
Sandia	0.052	Cebolla	0.001	Jitomate	0.040	Calabaza	0.006	Chile	0.017	Calabaza	0.010
Brocoli	0.010	Cascaron	0.010	Chile	0.006	Ejotes	0.002	Calabaza	0.040	Ejotes	0.009
Jitomate	0.005	Rosas	0.004	Calabaza	0.010	Cebolla	0.004	Ejotes	0.008	Cebolla	0.008
Chile	0.004	Piña	0.212	Ejotes	0.013	Cascaron	0.022	Cebolla	0.022	Cascaron	0.018
Calabaza	0.006	Uvas	0.012	Cebolla	0.005	Piña	0.046	Cascaron	0.006	Uvas	0.007
Ejotes	0.012	Rabano	0.002	Cascaron	0.020	Uvas	0.0003	Aguacate	0.013	Granada	0.074
Cebolla	0.003	Ciruela	0.008	Uvas	0.005	Aguacate	0.021	Papalo	0.001	Rabano	0.001
Cascaron	0.009	Pera	0.002	Rabano	0.006	Papalo	0.0005	Cilantro	0.006	Ciruela	0.033
Granada	0.005	Aguacate	0.002	Aguacate	0.012	Mandarina	0.011	Col	0.003	Pera	0.005
Tamarindo	0.004	Berro	0.007	Papalo	0.004	Cilantro	0.028	Durazno	0.002	Aguacate	0.022
		Mandarina	0.004	Mandarina	0.008	Azelgas	0.008	Perejil	0.003	Papalo	0.002
		Cilantro	0.023	Cilantro	0.014	Durazno	0.011	Espinacas	0.001	Mandarina	0.001
				Epazote	0.003	Espinacas	0.002	Hierbabuena	0.001	Cilantro	0.012
				Col	0.002	Toronja	0.046	Guayaba	0.025	Epazote	0.001
				Azelgas	0.099	Fresa	0.001	Jicama	0.011	Col	0.003
				Durazno	0.006	Hierbabuena	0.001	Huazontle	0.005	Durazno	0.038
				Perejil	0.001	Guayaba	0.001	Abas	0.004	Espinacas	0.008
				Espinacas	0.003	Jicama	0.023	Nuez	0.002	Toronja	0.036
				Nopales	0.003	Ajo	0.0005	Vaina	0.001	Jicama	0.010
				Toronja	0.010	Apio	0.012	Verdolaga	0.048		
				Fresa	0.0003	Vaina	0.002	Elote	0.001		
						Huazontle	0.012	Fresa	0.001		
						Abas	0.036	Cacahuete	0.0001		
						Nuez	0.004				
						Ciruela	0.001				

PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS DURANTE EL COMPOSTEO

El volumen y peso inicial y final de cada compostero se muestran en la Tabla 2. La cantidad de lixiviado generado durante el composteo fue de 0.466 L de lixiviado.kg⁻¹de RSOUOV, con una desviación estándar de 0.08 L.kg⁻¹ de RSOUOV. El porcentaje de reducción promedio del volumen del residuo fue del 57.8 % ± 7.8 %. Utilizando estos rendimientos podemos determinar la cantidad de agua de reúso que podría utilizarse para el riego agrícola de un cultivo, si consideramos por ejemplo un cultivo de jitomate y tomamos como base, que por cada planta de jitomate se requieren 2 L H₂O.d⁻¹, y que se pueden cultivar 12 plantas por m² en un lapso de 130 días en promedio (Gómez *et al.*, 2003); entonces con el composteo con recuperación de agua de 66,972 t de RSOUOV se puede regar 1 ha de cultivo de jitomate (1 ciclo de 130 d), esto representaría la recolección de 10 días de RSOUOV de la ZMCM.

Tabla 2. Volumen y peso de los composteros al inicio y final del proceso.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Volumen de compostero inicial (L)	44	44	44	60	60	60
Peso del compostero inicial (kg)	27	23	36	32	37	36
Volumen acumulado de lixiviado (L)	8.1	9.8	12.5	16.8	16.6	13.6
Peso del compostero final (kg)	10	10	10	22.5	22	15
Volumen de compostero final (L)	16	16	20	25	34	23

C: compostero

CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL LIXIVIADO

En la Tabla 3, se presentan las características físicoquímicas del lixiviado. La relación promedio de SV/ST para todos los composteros es de 0.43 ± 0.05 , y la de SST/ST es de 0.27 ± 0.05 . En promedio el 89 % de la DQO son carbohidratos (medidos como azúcares totales) y 24 % son proteínas.

Tabla 3. Características físicoquímicas del lixiviado

	C1 \pm DS	C2 \pm DS	C3 \pm DS	C4 \pm DS	C5 \pm DS	C6 \pm DS
ST	22.5 ± 8.9	20.5 ± 8.7	28.8 ± 22.4	20.7 ± 12.9	25.1 ± 17.2	18.9 ± 12.7
SV	10.3 ± 7.2	8.6 ± 6.9	15.5 ± 20.2	10.7 ± 10.4	16.6 ± 19.7	10.9 ± 15.9
SV/ST	0.4 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.2	0.4 ± 0.2	0.5 ± 0.2	0.4 ± 0.3
SST/ST	0.3 ± 0.3	0.3 ± 0.2	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.2	0.3 ± 0.3	0.3 ± 0.2
SSV/SV	0.8 ± 0.9	0.2 ± 0.2	0.5 ± 0.5	0.5 ± 0.3	0.3 ± 0.3	0.5 ± 0.5
SST	7.3 ± 6.9	5.9 ± 3.5	6.8 ± 9.2	5.0 ± 3.5	8.0 ± 11.3	5 ± 4.7
SSV	6.0 ± 6.4	1.4 ± 0.8	5.1 ± 7.2	4.2 ± 3.1	5.2 ± 6.8	4.3 ± 4.6
DQO g/L	19.8 ± 19.7	21.7 ± 21.0	19.5 ± 19.3	18.8 ± 21.4	23.8 ± 22.9	14.1 ± 18.0
g DQO/gST	0.7 ± 0.5	0.9 ± 0.7	0.6 ± 0.4	0.8 ± 0.5	0.8 ± 0.50	0.6 ± 0.7
g CHOS/g DQO	0.7 ± 0.9	0.9 ± 0.5	0.7 ± 0.5	0.9 ± 0.4	0.9 ± 0.4	1.2 ± 0.6
g Prot/gDQO	0.3 ± 0.3	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.2
g DQO/g SST	4.7 ± 6.3	5.8 ± 11.1	3.6 ± 3.1	3.7 ± 2.2	4.2 ± 2.9	2.5 ± 1.9
Prot g/L	5.0 ± 5.0	3.4 ± 3.1	2.7 ± 1.8	2.7 ± 2.5	4.2 ± 3.4	1.8 ± 1.2
CHOS g/L	14.1 ± 18.0	17 ± 21.5	8.4 ± 8.1	10.3 ± 10.6	16.3 ± 19.5	8.0 ± 4.8
pH	7-9.4	4-8.8	6.5-9	6-8.8	4-8.7	8.0-9.5
alcalinidad (mg/L)	6042 ± 4392	7563 ± 6944	5365 ± 2204	4361 ± 1666	4133 ± 1739	4762 ± 1888

C = compostero, DS = desviación estándar, CHOS = carbohidratos, Prot = proteínas, ST sólidos totales, SV sólidos volátiles totales, SST sólidos suspendidos totales, SSV sólidos suspendidos volátiles

Durante los primeros 20 días de composteo, la DQO de los lixiviados está por arriba de 20 g.L^{-1} , llegando a valores máximos de 70 g.L^{-1} (Figura 5), por lo que los lixiviados generados durante este periodo, podrían generar problemas de acidificación en la operación de reactores anaerobios, debido a la alta carga orgánica que tendría que tratar el reactor. En el periodo comprendido entre el día 50 y 85, la DQO estuvo por debajo de 5 g.L^{-1} , en la etapa de maduración de la composta (85 a 120 días) no hubo generación de lixiviado, Figura 2.

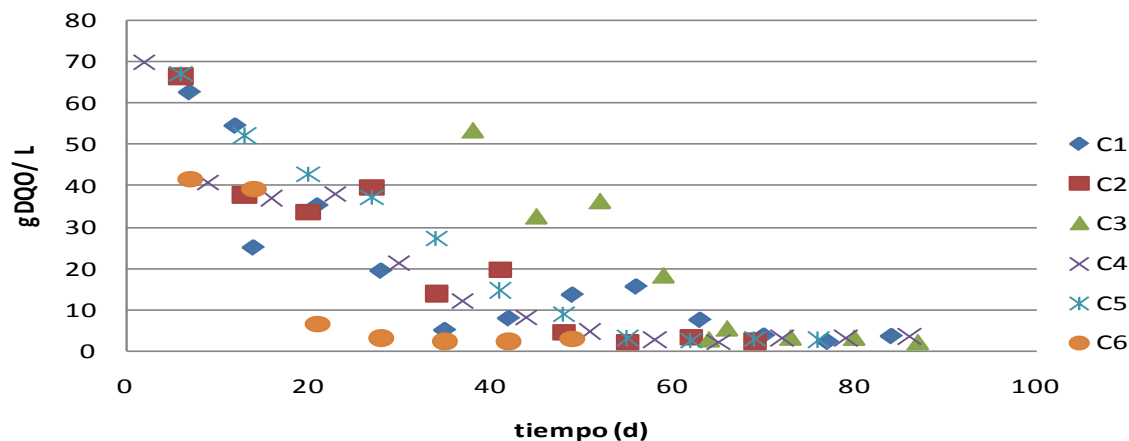


Figura 2. Evolución de DQO durante 4 meses de composteo de RSOUOV

Los ST tienen una evolución parecida a la DQO. En los primeros 20 días se obtienen los mayores valores de ST, mayor 10 g.L^{-1} con valores máximos de 50 g.L^{-1} , excepto el compostero C5, que llega a valores de 70 g.L^{-1} (Figura 3). La variación en los ST en el lixiviado, en el periodo de 20 a 85 días, está vinculada al aumento en los SST en el lixiviado, debido a que la disminución del tamaño de partícula de los residuos, provoca que éstos sean fácilmente arrastrados durante la lixiviación del agua liberada por los residuos.

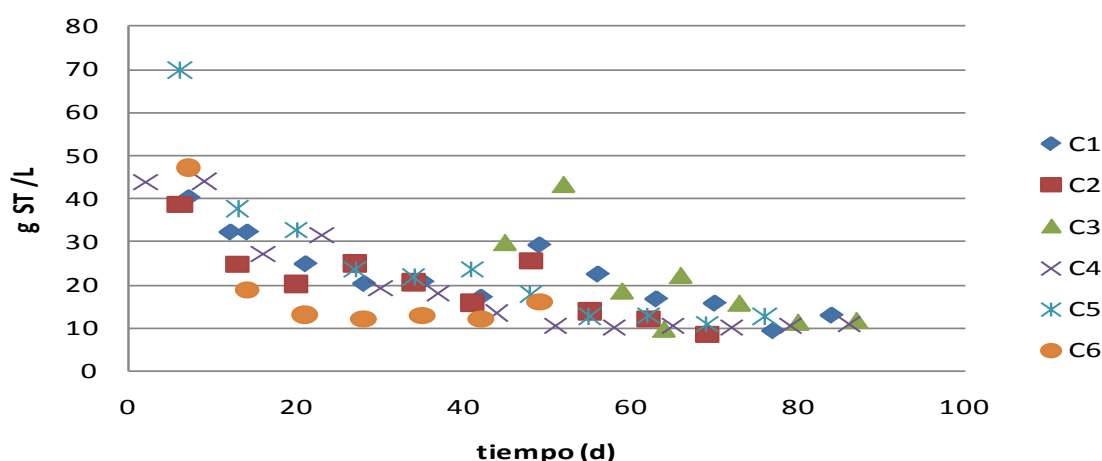


Figura 3. Evolución de ST durante 4 meses de composteo de RSOUOV

Los SV representan la materia orgánica presente en los ST, y su evolución sigue la misma tendencia que éstos (Figura 4), excepto tres puntos atípicos de los composteros C3, C5, C6. Utilizando los datos de las figuras 3 y 4 se determinó que la relación promedio de SV/ST es de 0.43 ± 0.05 y está permanece prácticamente constante durante todo el proceso.

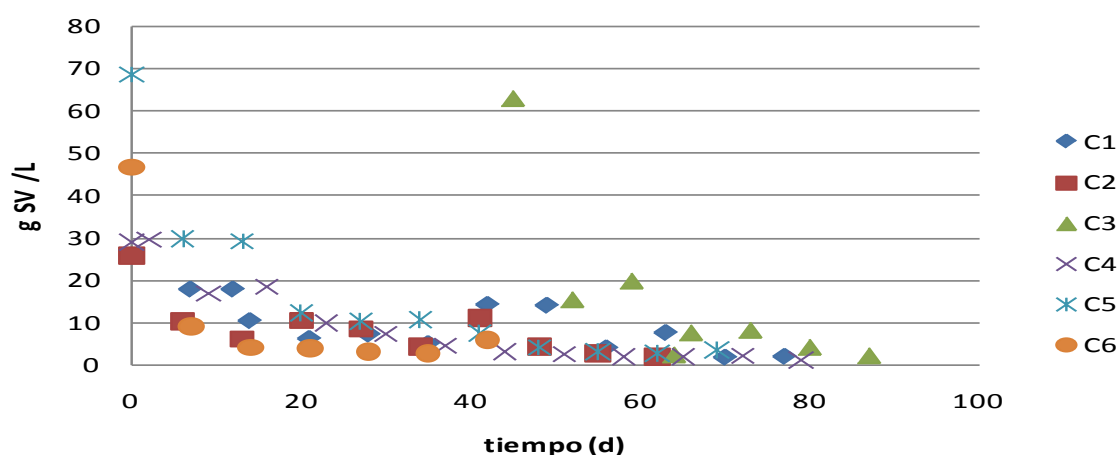


Figura 4. Evolución de SV durante 4 meses de composteo de RSOUOV.

CARACTERIZACIÓN BIOLÓGICA EL LIXIVIADO

La eficiencia de los reactores anaerobios para la estabilización de lixiviados está en función de las características fisicoquímicas de éstos y de su biodegradabilidad anaerobia (BD), por lo que es importante conocer esta última para establecer las condiciones de operación del reactor. Los lixiviados generados durante todo el proceso de composteo de RSOUOV, se muestra en la Tabla 4. El valor promedio de biodegradabilidad (> 50 %) nos permite clasificar a los lixiviados como jóvenes (Méndez *et al.*, 2002).

El porcentaje de metano producido, representa la fracción de materia orgánica biodegradable que se transforma a metano, este porcentaje es menor del 50 % en todos los composteros, excepto en el compostero C2, implica que la materia orgánica tiene biodegradabilidad media, es decir requeriría de más de 7 días para lograr la metanización completa de la materia orgánica hidrolizada.

Las fluctuaciones de la biodegradabilidad son dependientes del tiempo de composteo, cuando empieza el proceso de maduración de la composta (después de 60 días) hay una disminución en la producción de metano y por lo tanto de la biodegradabilidad del lixiviado, Figura 5. El comportamiento de la figura 5, es representativo de los lixiviados de los seis composteros estudiados. La disminución de la producción de metano con el tiempo de composteo, podría implicar que la materia orgánica presente en el lixiviado cambia en su biodegradabilidad, es decir, se vuelve más recalcitrante.

Tabla 4. Biodegradabilidad

Compostero	BD (%)	METANO (%)
C1	72 ± 11	30 ± 15
C2	56 ± 21	56 ± 21
C3	64 ± 23	50 ± 24
C4	52 ± 25	41 ± 21
C5	51 ± 23	23 ± 15
C6	57 ± 27	18 ± 13

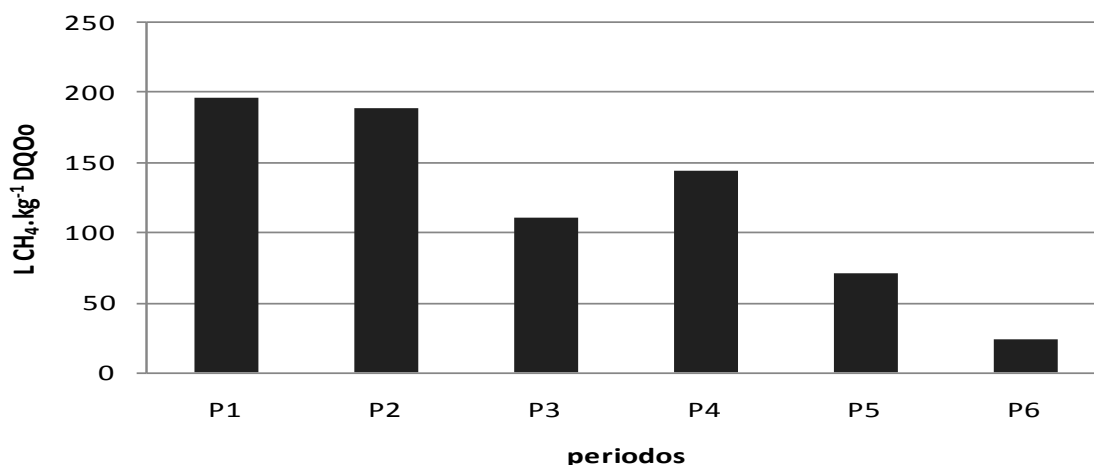


Figura 5. Rendimiento de metano durante el proceso de composteo. Pi es el periodo de recolección en días de proceso. P1 (7-14), P2 (14-20), P3 (20-40), P4 (40-60), P5 (60-70) P6 (70-85)

ESTABILIZACIÓN ANAEROBIA DE LIXIVIADOS

Los lixiviados producidos durante el proceso de composteo fueron alimentados al RAFA. En la Figura 6 se observa que al inicio del proceso la eficiencia de DQO es menor al 60 % y es también en este periodo en el que la concentración de entrada de la DQO es mayor a 50 g.L⁻¹. Por lo que es importante diluir el lixiviado en los primeros días de generación para lograr mejores eficiencias de remoción de DQO. También se observa que el máximo rendimiento (82 % a 91 %) se dio cuando la concentración de entrada de DQO fue de entre 10 y 27 g.L⁻¹ y una ligera reducción en la eficiencia a concentraciones de entrada de DQO menores a 5 g.L⁻¹. Al lixiviado se le ajustó el pH a 7 antes de ser alimentado al reactor RAFA, para favorecer a las bacterias metanogénicas y lograr un equilibrio cinético entre los distintos grupos microbianos que participan en la degradación anaerobia de la materia orgánica. La evolución del pH en el reactor se muestra en la Figura 7. Se observa que el reactor tiene buena capacidad de amortiguamiento pues el pH de salida se mantiene alrededor de 8 independientemente de la carga alimentada al reactor. El valor de pH 8 a la salida del RAFA es característico de reactores anaerobios con buena estabilidad (Monroy, 1998). La capacidad de amortiguamiento del reactor anaerobio es fundamental para neutralizar los ácidos orgánicos producidos durante la acidogénesis de la materia orgánica en el lixiviado. El efecto de la acumulación de ácidos orgánicos se manifiesta con una baja en el pH del sistema, provocando un desequilibrio en las velocidades de crecimiento de los distintos grupos microbianos, provocando una desestabilización en el reactor.

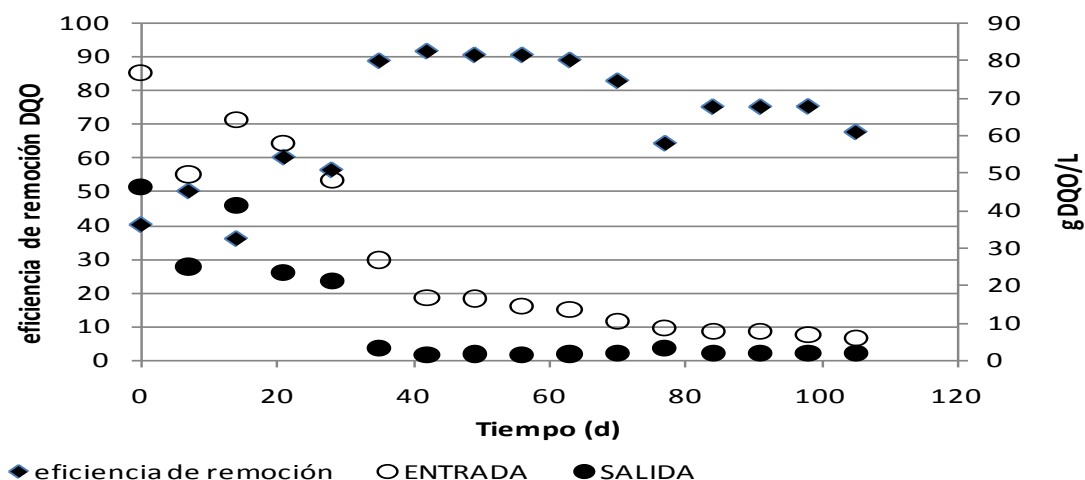


Figura 6 Eficiencia de remoción de DQO en el reactor RAFA .

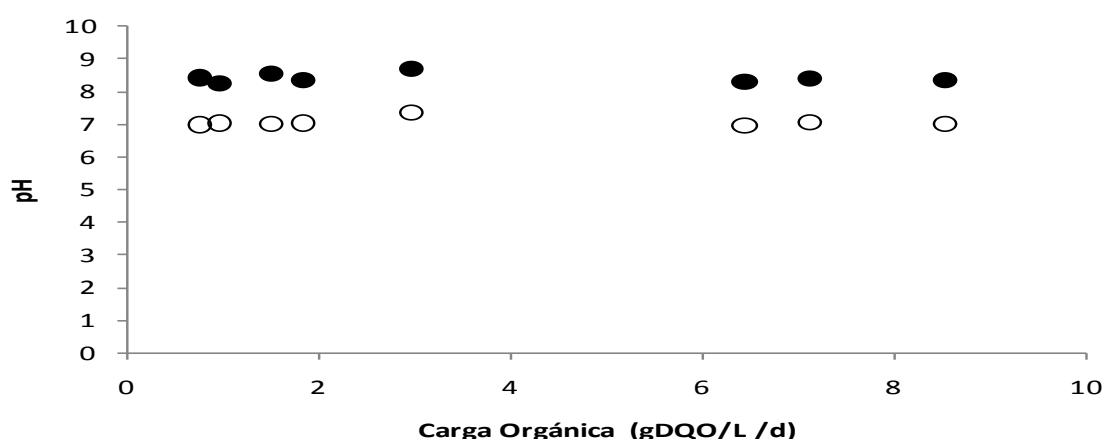


Figura 7 Evolución del pH con la carga orgánica

CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LA COMPOSTA Y SUELOS DE CULTIVO.

Las características de la composta y suelos de cultivo de Actopan y Cardonal, se muestran en la Tabla 5. La composta es rica en materia orgánica por lo que puede ser utilizada como mejorador de suelo o fertilizante. No es recomendable usarla como sustrato para el cultivo, porque su densidad de empaque es menor a 0.3 g.mL^{-1} . El suelo agrícola utilizado como control tiene las características de un suelo franco arcilloso, en términos de su densidad de empaque, según la clasificación de Archer y Smith(1972).

Tabla 5. Características de la composta y suelo de cultivo (Actopan y Cardonal).

	pH	Retención de H ₂ O (%)	Humedad (%)	Materia Orgánica (%)	Densidad de empaque g/mL
Unidades		%	%	%	
C1	9.83	79	25	93	0.256
C2	9.61	81	28	94	0.229
C3	9.77	81	39	87	0.250
C4	9.69	80	80	98	0.270
C5	9.71	84	28	94	0.243
C6	9.7	75	27	89	0.209
ACTOPAN	7.91	64	18	8.9	1.150
CARDONAL	7.96	44	10	6	1.170

USO DE LIXIVIADOS ESTABILIZADOS PARA EL RIEGO DE COMPOSTA Y SUELO.

La presencia de microorganismos patógenos en los efluentes utilizados para el riego agrícola debe evitarse. La norma mexicana establece que la cantidad de patógenos en agua de reúso para servicios al público debe ser menor de $1.0\text{E}+03 \text{ NMP}/100 \text{ mL}$ (NOM-003-ECOL-1997). Por lo que el uso de los lixiviados estabilizados por digestión anaerobia para el riego agrícola está condicionado al contenido de patógenos. En la tabla 6 se observa que el lixiviado estabilizado por digestión anaerobia contiene $3\text{E}+03 \text{ NMP}/100 \text{ mL}$. Durante la estabilización del lixiviado en el RAFA, se logró una remoción de 9 unidades logarítmicas de coliformes y 6.7 unidades logarítmicas de *Salmonella*, sin embargo el lixiviado estabilizado no cumple con la norma mexicana para patógenos en agua de reúso para servicios al público, por lo que se requiere de un pos tratamiento para lograr la reducción satisfactoria en la concentración de patógenos.

En la tabla 6 se incluye el contenido de coliformes fecales y *Salmonella* para la composta producida en este proyecto, así como para los suelos agrícolas de Actopan, (suelo regado con agua residual sin tratamiento), y el Cardonal (suelo de riego por temporal, abonado con estiércol de bovino). Se observa que los suelos pueden adquirir concentraciones altas de patógenos, muy parecidas a los valores de patógenos en el agua residual sin tratamiento. En el agua residual la concentración de coliformes fecales están en el intervalo de $7.80\text{E}+08$ hasta

1.20E+09 NMP/100 mL (Jiménez *et al.*, 2002). La composta producida, también presentó alto contenido de coliformes, esto debido al origen de los residuos sólidos orgánicos.

Finalmente se observa (Tabla 6) que la composta no retiene patógenos, durante el riego con lixiviados pues su contenido de patógenos no cambia después de 90 días de riego con lixiviado estabilizado (lixiviación-composta). También podemos observar que el suelo tiene mayor capacidad de retención de patógenos pues el suelo agrícola testigo (Cardonal) presentó mayor contenido de patógeno después del riego con lixiviados (lixiviación-Cardonal).

Tabla 6. Patógenos en suelos agrícolas, composta y lixiviados

	Coliformes NMP/g ST	Salmonella NMP/g ST
*Lixiviado lote 1	2.40E+07	2.40E+06
*Lixiviado lote 2	3.60E+05	3.00E+03
Lixiviado estabilizado	3.00E+03	3.00E+03
Composta1	2.30E+05	3.00E+03
Composta2	6.40E+06	2.40E+05
Cardonal	2.30E+04	3.00E+03
Actopan	2.40E+06	2.40E+08
**Lixiviación – Composta	3.00E+05	3.00E+03
**Lixiviación – Actopan	2.40E+06	2.40E+08
**Lixiviación – Cardonal	4.30E+04	4.60E+06
**Lixiviación – Composta y Cardonal	2.30E+04	3.00E+03

CONCLUSIONES

El agua contenida en los residuos sólidos orgánicos urbanos de origen vegetal, se estima en 0.466 L.kg⁻¹ RSOUOV. El agua recuperada por el composteo de RSOUOV representa un recurso con alto potencial ya que se podría regar por goteo 1 ha de cultivo de jitomate con 66,972 t de RSOUOV procesado. Sin embargo se debe incluir un postratamiento al lixiviado para que este cumpla con la norma mexicana para su reúso en suelo agrícola.

La biodegradabilidad del lixiviado generado por composteo fue mayor a 50 %. El porcentaje de metanización fue en descenso con respecto al tiempo de composteo, esto podría ser debido a que la materia orgánica empieza a tener un carácter recalcitrante.

El reactor RAFA mantiene eficiencias de remoción mayores al 60 % para variaciones en la concentración de entrada de 5 y 27 g DQO/L, por lo que representa una tecnología potencial para la estabilización de lixiviados producidos durante el procesos de composteo de RSOUOV.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMEZQUITA E. Algunas consideraciones agroclimático y edáficas para uso y manejo integral de suelos. En curso de Actualización sobre Suelo y Fertilizaciones. 1989.
2. ARCHER JR y Smith PD. La relación entre la densidad aparente, capacidad de agua disponible y la capacidad de aire de los suelos. Diario de la Ciencia del Suelo 34: 475-480, 1972.
3. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Subdirección Técnica y subdirección de construcción. 2007.
4. DUBOIS M., Gilles K. A., Hamilton J. K., Rebers P. A. y Smith F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Analytical Chemistry. 28, 3:350-356. 1956.

5. FERNÁNDEZ Linares C., Rojas Aveliza G., Roldan Carrillo G. Manual de Técnicas de Análisis de Suelos Aplicados a la Remediación de Sitios Contaminados. Instituto Mexicano del Petróleo. México D.F. 2006.
6. FIELD J., Sierra R., Lettinga G. Ensayos Anaerobios, Proc. of on Wastewater Anaerobic treatments. Valladolid Spain. 1986.
7. GÓMEZ Hernández T., Sánchez del Castillo F. Soluciones nutritivas diluidas para la producción de jitomate a un racimo. TERRA Latinoamericana, 21 (1) 57-63, 2003.
8. JIMÉNEZ B., Chávez A., Silva V. Riego agrícola con agua residual y sus implicaciones en la salud. Caso práctico. XXVIII Congreso Internacional de Ingeniería Sanitaria, Cancún, México, 1-8, 2002.
9. LOWRY O. H. Rosebrough W. J., Farr A. L. y Randall R. J. (1951). Protein measurement with the folin phenol reagent. Journal de Biology and Chemistry, 193, 256-275.
10. MÉNDEZ Novelo R. I., Medina Hernández E., Quintal Franco C., Castillo Borges E. R., Sauri Riancho M. R. Tratamiento de lixiviados con carbón activado. Ingeniería 6-3, 19-27, 2002.
11. MONROY H. O.(1998). Modelamiento y control de un sistema de digestión anaerobia en dos etapas. Tesis doctoral, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.
12. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
13. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-ECOL-1997, establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
14. NORMA OFICIAL MEXICANA NMX-AA-42-1987, calidad del agua determinación del numero mas probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termo tolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva.
15. OJEDA G. Perfect., Alcaniz JM Ortiz.. Fractal analysis of soil water hysteresis as influenced by sewage sludge application Geoderma, 2006.
16. POWELL G.E. y Archer D.B. On- line titration method for monitoring buffer capacity and total volatile fatty acid levels in anaerobic digesters. Biotechnol. Bioeng.33:570-577. 1989.
17. SEMARNAT. Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales. Primera Edición Subsecretaria de Gestión para la Protección Ambiental. México .D.F. 2008.
18. VIGUERA Rubio Javier, Albarrán Liso Ángel. Estudio de suelos y su Analítica, México, Ed. @becedario. 2004.