

## La recirculación de lixiviados de rellenos sanitarios en biodigestores a escala de laboratorio

### Recirculation of landfill leachate in laboratory-scale biodigester

MsC. Maria Elena López-Vega<sup>I</sup>, Dr. Ronaldo Santos-Herrero<sup>II</sup>

I Centro de Estudio de Química Aplicada. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba. marialv@uclv.edu.cu

II Departamento de Ingeniería Química. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas

---

#### Resumen

La Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en la ciudad de Santa Clara, Cuba, continúa siendo desfavorable en todas las etapas incluidas dentro de la gestión. Teniendo en cuenta estas deficiencias propusimos como objetivo general del presente trabajo evaluar el proceso de degradación anaerobia en los rellenos sanitarios como biodigestores a escala de laboratorio, comprobando si la recirculación de lixiviados y el material de cobertura tiene influencia sobre la estabilización acelerada de los residuos dentro de los rellenos sanitarios. Fue montado un diseño de experimento 2<sup>2</sup> monitoreado por 38 semanas, teniendo en cuenta la recirculación de los lixiviados y material de cobertura como variables. Las técnicas monitoreadas fueron (pH, DQO y Conductividad) en los lixiviados. Los resultados demuestran que la recirculación de los lixiviados y el empleo de material de cobertura tienen un efecto positivo en la estabilización de los rellenos; lográndose acelerar la estabilización de los mismos destacando que valores de DQO por debajo de 2000 mg/L son indicativos de un relleno sanitario estabilizado [6, 11]. El reactor 1 (R1) al final de la experimentación mantenía la DQO en sus lixiviados en el orden de los 4000 mg/L, siendo el único reactor en el que no se logró la estabilización. Este hecho demuestra la influencia positiva de la recirculación de los lixiviados sobre la estabilización acelerada de los residuos sólidos orgánicos en los rellenos sanitarios, así como en el empleo de material de cobertura [6, 19].

**Palabras clave:** rellenos sanitarios, recirculación lixiviados.

---

### **Abstract**

The Management of Municipal Solid Waste (MSW) in Santa Clara city remains unfavorable in all stages included in the management. We proposed as a general objective of this study, to evaluate the process of anaerobic degradation in landfills as biodigesters at laboratory scale, using leachate recirculation and soil as cover material in the rapid stabilization of waste. It was prepared a design of experiment 2<sup>2</sup> and monitored for 38 weeks, considering recirculation of leachate and cover material. The following parameters were evaluated in the leachates (pH, COD and Conductivity). The results demonstrate that recirculation of leachate and the use of cover material have a positive effect in stabilizing landfills; causing an acceleration in stabilization, achieving COD values below 2000 mg/L, which indicate of a stabilized landfill [6,11]. The reactor 1 (R1) at the end of the experiment showed values the COD in the order of 4000 mg/L, the only reactor at the end of the experiment was not stabilized. This shows the positive influence of the recirculation of leachate on accelerated stabilization in landfills as well as use of cover material [6,19].

**Keywords:** landfill, leachate recirculation.

---

## **INTRODUCCION**

La generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y su manejo adecuado es un desafío para cualquier sociedad. La influencia negativa de las deficientes técnicas de manejo de los (RSU) en todas sus etapas crea la necesidad de desarrollar sistemas de gestión adecuados desde el punto de vista ambiental, social y económico.

Según estadísticas de las Naciones Unidas, América Latina y el Caribe (ALC) tenía 283 millones de habitantes en 1970 y 482 millones en 1995. Para el año 2000 se estimó una población de 524 millones y de 604 millones para el año 2011, por lo que hay que tener muy en cuenta esta creciente urbanización de América Latina y el Caribe para lograr un buen manejo de los residuos sólidos municipales [1].

Para la correcta toma de decisiones en la gestión de residuos se hace necesario el conocimiento de los impactos presentes y futuros de la generación de residuos, la recogida selectiva y la disposición final de los mismos. Las estimaciones en las que no se tenga en cuenta las características de la generación de residuos pueden dar lugar a la superación de la capacidad de las plantas de tratamiento de residuos con el consiguiente encarecimiento económico [8]. El análisis Sectorial de Residuos Sólidos para Cuba

determinó que uno de los problemas más importantes del Manejo de Residuos Sólidos era precisamente la disposición final. Una de las primeras acciones encaminadas a solucionar de manera parcial el manejo de los RSU a partir del año 1999 fue diferenciar y seleccionar los sectores poblacionales de hasta 20 000 habitantes y de más habitantes para así comenzar con la construcción de rellenos sanitarios manuales para las ciudades más pequeñas [3]. En estos momentos se cuenta con alrededor de 200 rellenos sanitarios manuales, pocas plantas de reciclaje, un gran número de vertederos a cielo abierto, sitios de disposición final donde los residuos son tapados sin existir impermeabilización y vertederos donde se continúa la quema de residuos sin ningún control. En nuestro país más del 60 % de los residuos sólidos que se generan corresponden a la fracción orgánica que puede ser reciclada mediante económicos procesos. Esta fracción se considera una de las más contaminantes, principal generadora de lixiviados altamente contaminados y de gases como el metano. Los daños que provocan estos residuos en el medio ambiente pueden ser mitigados en gran medida si los tratamos mediante métodos biológicos aerobios o anaerobios, para así disminuir la contaminación que provocan [2].

Muchos de las actuales métodos sobre la disposición de los RSU no son ambientalmente factibles debido fundamentalmente a la carencia de un adecuado Sistema de Gestión que desde el origen logre una segregación adecuada de los residuos, contribuyendo así a un mayor reciclado y valorización de los residuos.

Los rellenos sanitarios han sido ampliamente usados en el mundo, aunque su tendencia es a ir desapareciendo debido a la baja disponibilidad de suelos, así como a la cada vez más costosa tecnología para la impermeabilización de los mismos con vistas al tratamiento de los lixiviados y para el control del gas metano; el que resulta 23 veces más contaminante que las de CO<sub>2</sub> [4].

Los desechos sólidos enterrados en el relleno sanitario están sometidos a un número de cambios biológicos, físicos y químicos simultáneos. La degradación biológica de los componentes orgánicos empieza en condiciones aeróbicas, consumiendo el aire atrapado dentro del relleno; al agotarse el oxígeno, la descomposición a largo plazo sigue bajo condiciones anaerobias. La degradación de los residuos está influida por el grado de compactación, la composición de los Residuos Sólidos Municipales, la humedad, y la temperatura; la tasa de producción de gases es el principal indicador de las reacciones biológicas en un relleno sanitario.

El tiempo de estabilización de los residuos depende de la intensidad de los procesos biológicos; para llegar a un estado "inerte" de los residuos depositados en un relleno sanitario tradicional, los datos que existen indican un periodo entre 10 y hasta más de 100 años en donde lixivian compuestos orgánicos e inorgánicos. En general, para evaluar el funcionamiento del relleno se deberá monitorear el cumplimiento de las normas de emisión y de calidad ambiental aplicables y el estudio o declaración de impacto ambiental. El monitoreo de agua subterránea y el biogás debe comprender un período posterior a la etapa de clausura, generalmente hasta que las concentraciones estén por debajo de las que indica la normatividad [5]. Teniendo en cuenta todos estos largos periodos para lograr la estabilización de la materia orgánica en los rellenos sanitarios, es que se hace necesario influenciar y propiciar la aceleración de estos fenómenos anaerobios estudiando la recirculación de los lixiviados y operar los rellenos sanitarios como biodigestores; aprovechando el biogás generado en los mismos [8].

Desde hace más de 30 años se comenzaron a desarrollar este tipo de estudios considerando los rellenos sanitarios como biodigestores fundamentalmente en los Estados Unidos de América [15, 16]. Más recientemente se han desarrollado estudios similares en países como Turquía, Tailandia, España y México [17, 11]. Particularmente en México se han estudiado a profundidad los rellenos sanitarios como biodigestores con el objetivo de determinar los tiempos de generación de metano y su producción cuando se acelera la degradación de los RSU mediante la recirculación de sus lixiviados [6]. En Cuba han sido desarrollados estudios del proceso de digestión anaerobia de residuos muy específicos como la cachaza, y se encuentra en funcionamiento una planta de biogás a partir de residuos orgánicos procedentes de los mercados agropecuarios de La Habana, pero han sido poco estudiados estos fenómenos de degradación teniendo en cuenta las composiciones de RSU y que simulen lo que ocurre en los rellenos sanitarios controlados con recirculación de lixiviados.

## **MATERIALES Y METODOS**

La digestión anaerobia es un proceso en etapas, en el que cada grupo microbiano, relacionado tróficamente, aprovecha como sustrato los productos generados por el metabolismo de los microorganismos responsables del paso anterior.

Cada una de las poblaciones microbianas que forman parte del proceso de digestión presenta unas condiciones óptimas para su crecimiento y adecuado desarrollo. Sin embargo, las condiciones globales de operación han de ser tales que todos los grupos microbianos puedan ser activos simultáneamente, siendo de especial importancia, por tanto, el equilibrio entre la velocidad de generación de productos por parte de un grupo microbiano y la de consumo del mencionado producto por el siguiente grupo o grupos implicados [18].

Este equilibrio se ve favorecido por la capacidad tampón del medio de digestión, que condiciona el pH del sistema.

### **Selección de la tecnología, tipo de reactor**

A los efectos de la simulación lo más real posible de los fenómenos que ocurren dentro de los rellenos sanitarios como biodigestores y las condiciones materiales del laboratorio, se seleccionó el siguiente sistema.

Sistema tipo **batch** estático: Son los más simples y económicos. Los reactores se llenan con los residuos, y una vez finalizada la digestión, se vacían para poder continuar la operación en cargas individuales. La operación es similar a la realizada en los rellenos sanitarios de RSU con recirculación de lixiviados producidos.

Según el régimen de recirculación de lixiviados que se establezca se pueden definir varios sistemas, el nuestro es uno de etapa simple, donde el lixiviado se recircula directamente al propio reactor [14].

Para desarrollar la experimentación lo más acorde posible a lo que ocurre en los propios rellenos, a cada digestor le fue añadida agua destilada para simular las precipitaciones que como promedio ocurren sobre el sitio de disposición final actual en la ciudad de Santa Clara y donde con posterioridad será construido un relleno sanitario controlado.

### **Diseño de experimento 2<sup>2</sup>, escala de laboratorio**

Variabes  $X_1$  = Empleo de suelo de la región donde se encuentra ubicado el vertedero municipal de Santa Clara, como material de cobertura.

$X_2$  = Recirculación del lixiviado.

Nivel (+), uso del suelo como material de cobertura y recirculación del lixiviado.

Nivel (-), Sin empleo de suelo y sin recirculación

Ver a continuación la tabla 1.

**Tabla 1**  
Matriz

<b>Digestor o Reactor</b>	$X_1$	$X_2$
R1	-	-
R2	-	+
R3	+	+
R4	+	-

Variabes respuesta = DQO, pH y Conductividad eléctrica

Las condiciones específicas de trabajo de cada reactor según propuesta de diseño de experimento son las siguientes.

R1: Reactor que trabaja sin material de cobertura y sin recirculación de sus lixiviados.

R2: Reactor que trabaja sin material de cobertura y con recirculación de sus lixiviados.

R3: Reactor que trabaja con material de cobertura y con recirculación de sus lixiviados.

R4: Reactor que trabaja con material de cobertura y sin recirculación de sus lixiviados.

Selección de los residuos:

Los reactores fueron cargados con la misma composición de la mezcla de residuos.

Todas las fracciones de residuos fueron recogidas separadamente, en áreas de la Universidad Central de Las Villas. Para la preparación de la muestra sintética, fueron usados los siguientes equipos:

- Balanza digital industrial OHAUS 5000 (Max 150 kg)
- Molino de Cuchillas Retsch SM 2000

En la tabla 2 se puede apreciar la composición de las muestras sintéticas de las mezclas de residuos, según caracterización realizada en la ciudad de Santa Clara en el año 2005, así como el porcentaje de cada fracción para cada reactor.

**Tabla 2**  
Fracciones de residuos para los 4 reactores

<b>Materiales</b>	<b>%</b>	<b>kg de cada fracción</b>	<b>Total por fracciones (kg)</b>
Papel y cartón	0,40	0,40	1,6
Aluminio	3,01	0,18	0,72
Hierro	1,43	0,08	0,32
Trapo (textiles)	3,12	0,19	0,75
Plástico	3,63	0,22	0,88
Vidrio	6,02	0,36	1,44
Materiales orgánicos biodegradables	65,53	3,93	15,72
Metales(cobre y otros)	10,8	0,41	1,64
<b>Total</b>			<b>23,06</b>

Tanto el monitoreo de los lixiviados, como la recirculación de los mismos se realizó una vez a la semana.

Las técnicas analíticas involucradas en el monitoreo son las siguientes: Ver tabla 3.

**Tabla 3**  
Métodos analíticos empleados

<b>Parámetros</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Método empleado</b>
Potencial de hidrógeno	pH	U de pH	Método electrométrico
Conductividad eléctrica a 25 °C	CE	μS/cm	Método electrométrico
Demanda química de oxígeno	DQO	mg O <sub>2</sub> /L	Método dicromato

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Resultados del diseño de experimento

Los lixiviados pueden contener grandes cantidades de materia orgánica, nitrógeno amoniacal, metales pesados y sales. Las características químicas de los lixiviados varían de manera significativa en función de numerosos factores como son: el clima, la edad del relleno, la composición de la basura y la geología del terreno. A los efectos de los objetivos de este trabajo, el monitoreo del diseño de experimento se realizó por 38 semanas.

El análisis de varianza ANOVA (STATGRAPHICS Centurion XV) fue realizado para las mediciones de pH, CE y DQO entre los 4 reactores y para cada una de las etapas (hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis).

### Resultados analíticos en el monitoreo de los lixiviados para la variable pH

Se realizaron mediciones del pH a los lixiviados generados en cada uno de los reactores, una vez a la semana. Para estas mediciones fue usado el equipo JENWAY 3020 pH Meter. En la figura 1 se puede apreciar la tendencia de este parámetro en los 4 reactores en el periodo de tiempo monitoreado.

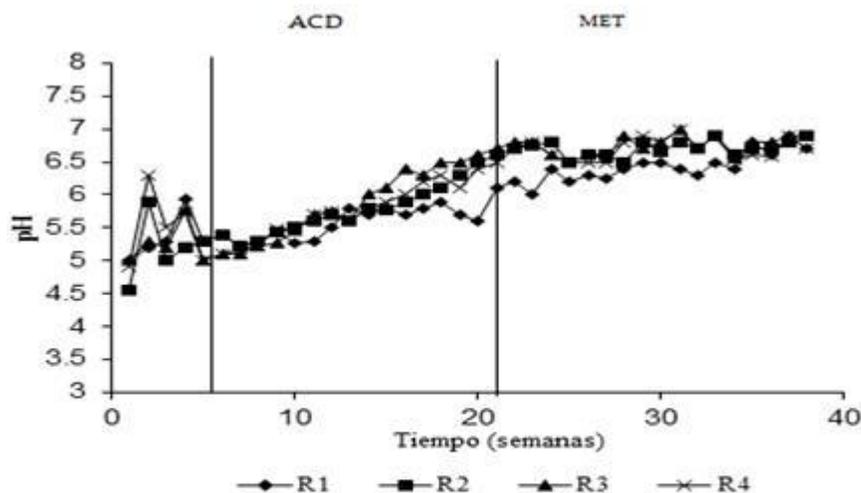


Fig. 1 Variación del pH en los lixiviados de los 4 reactores.

Para analizar estos resultados, es importante primeramente destacar que los procesos de biodegradación están fuertemente influenciados por el pH del medio de reacción. El seguimiento del pH es determinante para comprobar que el medio se encuentra dentro del rango óptimo para el desarrollo de los diferentes grupos de microorganismos predominantes en cada etapa de la digestión anaerobia. Los microorganismos tienen un pH óptimo de crecimiento que está comprendido en el intervalo entre 6 y 8.

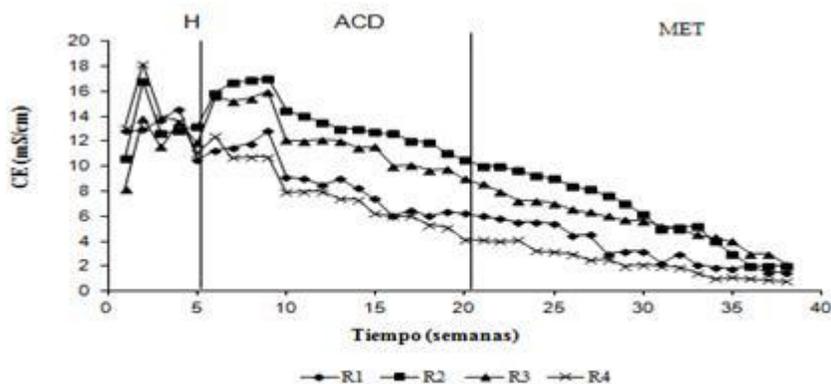
En análisis de varianza (ANOVA) para el pH para las tres etapas de la digestión anaerobia muestran que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del pH entre los 4 reactores, con un nivel del 95,0% de confianza para la etapa acidogénica. En las otras etapas no se evidencian diferencias significativas.

Es importante destacar que el reactor 1 (R1) fue el que mantuvo una mayor acidez en todas las etapas del proceso; señalando que el mismo operaba sin material de cobertura y sin régimen de recirculación de lixiviados.

A partir de la semana 5 comienza a estabilizarse el sistema estableciéndose posteriormente totalmente las condiciones anaerobias y en general todos los reactores se mantuvieron operando en un rango de acidez óptimo.

### Resultados analíticos en el monitoreo de los lixiviados para la variable Conductividad Eléctrica (CE)

Teniendo en cuenta la figura 2, se puede apreciar que la conductividad para los 4 reactores fue muy elevada desde el comienzo del monitoreo. Esto es debido a la disolución de muchas sales en los lixiviados. Es de destacar que en la última semana del monitoreo en los 4 reactores se aprecia un descenso de dicho parámetro.



**Fig. 2 Variación de la Conductividad Eléctrica (CE) en los lixiviados de los 4 reactores.**

En análisis de varianza (ANOVA) para la CE para las tres etapas de la digestión anaerobia muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias y la desviación estándar de los 4 reactores con un nivel del 95,0 % de confianza para la etapa de acidogénesis y metanogénesis. En la otra etapa no se evidencian diferencias significativas. Estas diferencias en este parámetro vienen dadas fundamentalmente a que hay un fenómeno de acumulación de sales disueltas con el proceso de recirculación de lixiviados, lo cual no afecta en ninguna medida la digestión anaerobia.

### Resultados analíticos en el monitoreo de los lixiviados para la variable DQO en los cuatro reactores

Al analizar los resultados de la DQO en los 4 reactores se aprecia la elevada carga orgánica que se puso de manifiesto en todo momento de la experimentación (figura 3), demostrándose lo reportado en la literatura sobre que estos líquidos son aproximadamente 100 veces más contaminantes que las aguas albañales. Estos valores elevados de DQO también indican la factibilidad de este residual para ser aprovechado en una mayor producción de biogás mediante la recirculación de los lixiviados al propio sistema de relleno sanitario. Es de destacar además que se han reportado cargas orgánicas de hasta 30 000 mg/L y 70 000 mg/L en sistemas a nivel de laboratorio y piloto, con buenos resultados de degradación de residuos y producción de metano.

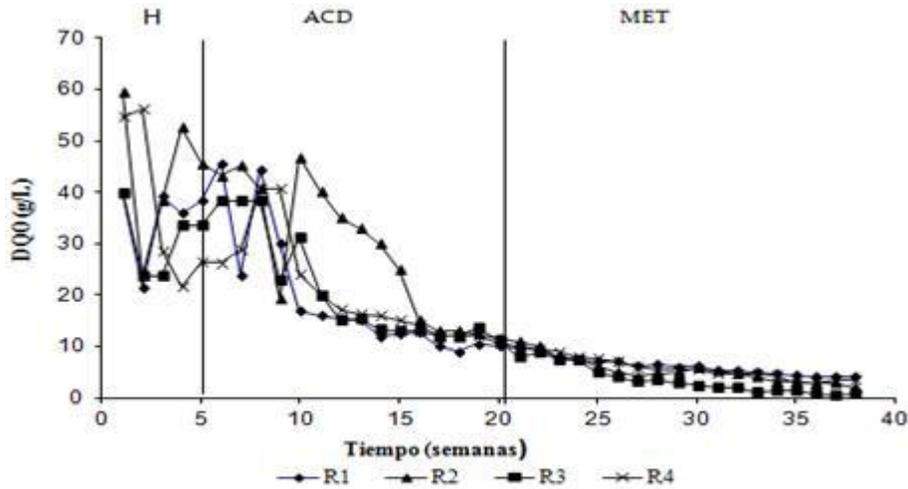


Fig.3 Variación de la DQO en los lixiviados de los 4 reactores

Para los 4 reactores la DQO se mantuvo fluctuando en valores comprendidos entre 18 y 60 g/L. Hacia la semana 10 de monitoreo los reactores que mayor DQO presentaban eran el 2 y 3, los que operan con recirculación del lixiviado. Esto es debido a que con la recirculación se está agregando una carga orgánica adicional con respecto a los que no tienen recirculación. Obviamente con la recirculación de los lixiviados se concentra la carga orgánica dentro de los reactores; y teniendo en cuenta que aun los reactores no se encontraban en la fase metanogénica esta carga orgánica continuaba apareciendo en los lixiviados.

En análisis de varianza (ANOVA) para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) para las tres etapas de la digestión anaerobia muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los 4 reactores con un nivel del 95,0% de confianza para la etapa metanogénica. No hay diferencias significativas entre las desviaciones estándar.

Esto presumiblemente es debido a que ya en esta etapa aumenta la generación de biogás, en unos reactores más que en otros y por ende comienza a disminuir la DQO en los lixiviados.

En la fase metanogénica la DQO comienza a caer por debajo de 20 g/L hasta alcanzar valores por debajo de 1000 mg/L en el reactor (R3) y cerca de 2000 mg/L para (R2) y (R4). El reactor 1 (R1) en el final de la experimentación mantenía la DQO en sus lixiviados en el orden de los 4000 mg/L. Considerando valores = 2000 mg/L de DQO como el límite para considerar estabilizados los lixiviados podemos decir que el único reactor que al finalizar la experimentación no estaba estabilizado fue el R1.

## **CONCLUSIONES**

- El seguimiento de los parámetros pH, Conductividad y DQO en los lixiviados de los 4 biodigestores durante 38 semanas ha mostrado los efectos positivos en cuanto a la estabilización de los residuos sólidos orgánicos en los rellenos sanitarios mediante la implementación de la recirculación de sus lixiviados; lográndose alcanzar en cortos periodos de tiempo valores de DQO cercanos a los 2000 mg/L indicativos de rellenos estabilizados.
- Se mostró que el biodigestor (R1), que funcionó sin material de cobertura y sin la recirculación de lixiviados no llegó a la estabilización en el periodo monitoreado.
- Los lixiviados generados en los simuladores de rellenos sanitarios son altamente contaminantes. No cumplen con los requisitos de vertimiento según la Norma Cubana NC-27:1999[13]. Esta evidencia apoya la idea de aplicar la recirculación de lixiviados para eliminar carga orgánica y con posterioridad poder aplicar un tratamiento más convencional.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. CEPIS, OPS, OMS. "Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipal en América Latina y el Caribe", 2002.
2. CHRIST, O., WILDERER, P., ANGERHÖFER, R. "Mathematical modeling of the hydrolysis of anaerobic processes". *Water Science and Technology*, Vol. 41 No 3, 2007, pp: 61-65.
3. DELGADO, J. Relleno sanitario manual. Solución a la disposición final en poblaciones hasta 20 mil habitantes. Experiencia Cubana. XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.
4. GONZALEZ, J., Situación actual de la producción de lixiviados en los vertederos provinciales de ciudad de la Habana. Impacto Ambiental y propuesta de sistemas de tratamiento. Revista Electrónica de la Agencia de Medioambiente, Cuba. Año 5, Nº.8. 2005.

5. GUERECA, L. "Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis de ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales". Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña. (2006).
- 6- HERNANDEZ-BERRIEL, Ma.C, MAÑÓN SALAS, Ma.C., BUENROSTRO-DELGADO, O., SÁNCHEZ-YÁÑEZ, J M., MÁRQUEZ-BENAVIDES, L. "Landfill leachate recirculation. Part I: Solid waste degradation and biogas production". *Environmental Engineering and Management Journal*. Vol.13, Nº 10, p. 2687-2695.
7. HYOHAK, S., WILLIAM, P. Cellulose hydrolysis by a methanogenic culture enriched from landfill waste in semi continuous reactor. *Bioresource technology*. Vol.100, No. 3, 2009. pp. 1268-1273.
8. JIANGOU, J. Pilot-Scale experiment on anaerobic bioreactor landfills in China. *Waste Management*, Vol. 27 No 5, 2007, pp. 893-901.
9. LAY, J., LI, Y. "The influence of pH and ammonia concentration on the methane production in high-solids digestion processes". *Water Environment Research*, Vol. 70 No 5, 1998, pp. 1075-1082.
10. MARIN, J., KENNEDY, K., ESKICROGLU, C. "Effect of microwave irradiation on anaerobic degradability of model kitchen waste". *Waste Management*. Vol. 30, Nº. 10, 2010, pp. 1772-1779.
11. MEHTA, R., BARLAZ, M. Refuse decomposition in the presence and absence of leachate recirculation. *Journal of Environmental Engineering*. Vol. 128, No. 3, 2002, pp. 228-236.
12. NEDWELL, D., REYNOLDS, P. "Treatment of landfill leachate by methanogenic and sulphate-reducing digestion". *Waste Management*. Vol. 30, No 1, 1996, pp. 21-28.
13. Norma Cubana NC- 27:1999. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones.
14. ÖZTURK, M. Conversion of acetate, propionate and butyrate to methane under thermophilic conditions in batch reactors. *Water Research*, Vol. 25 No 12, pp: 1509-1513.
15. POHLAND, F., KIM, J. In situ anaerobic treatment of leachate in landfill bioreactors. *Water Science Technology*, Vol. 40, No 8, pp.203-210.
16. REINHART, D. TOWNSEND, T. The Status of Bioreactor Landfills. *Waste Management and Research*. Vol.20, pp.172-186.
17. SINAN, M. Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid waste. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 143, pp. 177-183.
18. SPARLING, R., RISBEY, D. Hydrogen production from inhibited anaerobic composters. *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 22 No 6, pp. 563-566.

19. SUNA, A. "Comparison of aerobic and anaerobic degradation of municipal solid waste in bioreactor landfills". *Bioresourse Technology* Vol. 99, 2008, pp. 5418-5426.

20. SUNG, S., LIU, "Tammonia inhibition on thermophilic anaerobic digestion". *Chemosphere*. Vol. 53, 2003, pp. 43-52.

21. VIEITEZ, E. "Kinetics of accelerated solid state fermentation of organic municipal solid waste". *Water Science and Technology*, Vol. 41. No 3, 2000, pp. 231-238.

Recibido: Noviembre 2016

Aprobado: Marzo 2017

*MSc. Maria Elena López-Vega<sup>1</sup>*. Centro de Estudio de Química Aplicada. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba. marialv@uclv.edu.cu