

Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos putrescibles en la ciudad de México

Rafael López¹, Pedro Quinto¹, Heber Aguilar¹, Claudio Garibay²

¹ Instituto Politécnico Nacional, México, arcade260802@hotmail.com

² Labcitec S.A de C.V.

Resumen. En el presente trabajo se llevó a cabo la digestión anaerobia de residuos orgánicos para la producción de biogás en tres reactores de vidrio con volumen de 4,2 l y volumen de operación de 2,0 l. La digestión se llevó a cabo sin agitación y a temperatura ambiente de la ciudad de México. Dos digestores (D₁ y D₂) fueron alimentados con 9 g/l de diversos residuos de frutas y verduras, el tercer digestor (D₃) fue alimentado únicamente con cáscara y pulpa de plátano. Se monitoreó la producción diaria de biogás a los largo de 217 días; se obtuvo una producción promedio de 497 y 477 ml para D₁ y D₂ respectivamente, en el caso de D₃ se obtuvieron 520 ml. Se realizó la detección de ácidos orgánicos por HPLC, se detectó una concentración promedio de 3,55 y 4,55 g/L de ácido acético en D₁ y D₂ respectivamente y 7,36 g/l para el D₃, también se midieron, propiónico, butírico, succínico y láctico. Se midió la producción de metano obteniéndose un máximo de 0,806, 0,688 y 0,136 mmol CH₄/gSV/h para los digestores D₁, D₂ y D₃ respectivamente.

Palabras Claves: biogás, digestión anaerobia, metano

Abstract. In this work the anaerobic digestion of organic waste for biogas production in three glass reactors with a volume of 4,2 l operating volume of 2,0 l was performed. Digestion was performed without stirring at room temperature Mexico City. Two digesters (D₁ and D₂) were fed with 9 g/l of different fruit and vegetable waste, the third digester (D₃) was fed solely banana peel and pulp. Daily biogas production to over 217 days were monitored; an average production of 497 and 477 ml for D₁ and D₂ respectively was obtained; in the case of D₃, 520 ml were obtained. Detection of organic acids was performed by hplc, an average of 3,55 and 4,55 g/l of acetic acid concentration was detected in D₁ and D₂ respectively and 7,36 g/l for D₃ were also measured, propionic, butyric, succinic was detected and lactic. Methane production was measured by gas chromatography using helium as mobile phase, giving a maximum of 0,806, 0,688 and 0,136 mmol CH₄/gSV/h for digesters D₁, D₂ and D₃ respectively.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, methane

1. Introducción

La creciente preocupación sobre los problemas ambientales causados por el incorrecto manejo de la basura y sus conocidas consecuencias como el cambio climático han promovido la búsqueda de un correcto manejo de la fracción orgánica de los desechos (1).

La reducción en la generación de residuos sólidos es una prioridad en la mayoría de los países del mundo (2-3). En México, entre los años 1950 y 2011 la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) por habitante aumento más de tres veces, pasando de 300 a 990 g/día en promedio.

Aproximadamente el 52% de estos RSU corresponden a Residuos Sólidos Orgánicos Putrescibles (ReSOP) los cuales consisten en residuos de alimentos y poda (4). Los ReSOP acumulados en rellenos sanitarios generan contaminantes para acuíferos y suelo del lugar en que se localizan (5); otro aspecto importante es la emisión de metano que es un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático (6).

La digestión anaerobia involucra la degradación y estabilización de materia orgánica bajo condiciones anaeróbicas por medio de microorganismos dando paso a la formación de

biogás (metano y dióxido de carbono) como una fuente de energía renovable y biomasa (7-8).

En este trabajo se evaluó el potencial de generación de biogás y producción de ácidos orgánicos a temperatura ambiente de la ciudad de México utilizando ReSOP como sustrato para establecer la factibilidad del uso de la digestión anaerobia como una alternativa de tratamiento para los ReSOP, disminuyendo la carga de contaminantes en el ambiente y generando un energético al mismo tiempo.

2. Materiales y métodos

2.1 Inóculo

Se utilizó una solución homogénea creada a partir del mezclado de: excretas de diversos rumiantes, aguas residuales y tierra. La mezcla fue filtrada con una malla ASME 80.

2.2 Digestión anaerobia de ReSOP y producción de biogás

Para la producción de biogás se usaron 3 digestores de 4,2 litros operando a 48% de su capacidad, con una carga inicial de 20% de sólidos totales. Los D₁ y D₂ se alimentaron con 18 g diarios de diversos residuos de frutas y verduras. En el D₃ sólo se usó plátano (9), para observar el efecto de usar distintos sustratos cada día en D₁ y D₂ (10). Los digestores fueron muestreados diariamente (50 ml) con sustitución del efluente. El volumen de producción de gas se midió por desplazamiento de columna de líquido.

2.3 Detección de ácidos orgánicos

La concentración de ácidos orgánicos se midió por cromatografía líquida de alta resolución, a una longitud de 210 nm y H₂SO₄ 5*10⁻³ N como fase móvil. Las muestras se filtraron con membranas con poro de 0,22 µm. *2.4 Medición de actividad metanogénica específica (AME)*

La AME permite cuantificar la máxima producción de metano por el grupo de microorganismos presente, también sirve para determinar la carga orgánica máxima que puede aplicarse a un sistema. Así, conociendo la cantidad de biomasa presente en forma de sólidos volátiles (SV), en un ambiente controlado y un tiempo determinado se mide la producción de metano. El metano producido se midió usando cromatografía de gases (11).

3. Resultados y discusión

3.1 Producción de biogás

Los digestores fueron alimentados inicialmente de acuerdo a lo descrito en la metodología. A partir del día 21 se comenzó a alimentar con 9 g/l de ReSOP. Las figuras 1, 2 y 3 muestran la producción de biogás (ml biogás/día) obtenida para los digestores D₁, D₂ y D₃ respectivamente.

Cada digestor se inoculó con 0,5 l de la mezcla inicial y se aforó a 2 l usando agua (12). En todos los casos la medición del volumen de biogás recolectado se hizo a presión atmosférica y a temperatura ambiente (13), (14).

En el caso de los digestores D₁ y D₂, la producción de biogás se estabilizó en el día 60 con un volumen aproximado de 420 ml, este mismo comportamiento se presenta en reactores criofílicos reportados por Cardona et al (13), estabilizándose en el día 70. Un resultado semejante se observa en un digestión que duró un total de 251 días, la cual se estabilizó en el día 70 y varió nuevamente después del día 150 (15). Este comportamiento es similar a la producción de biogás que se observa en las figuras 1 y 2.

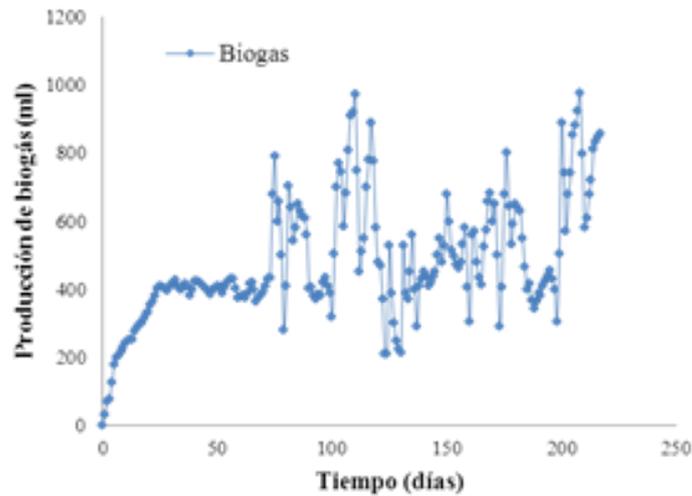


Figura 1. Producción de biogás del digestor D₁.

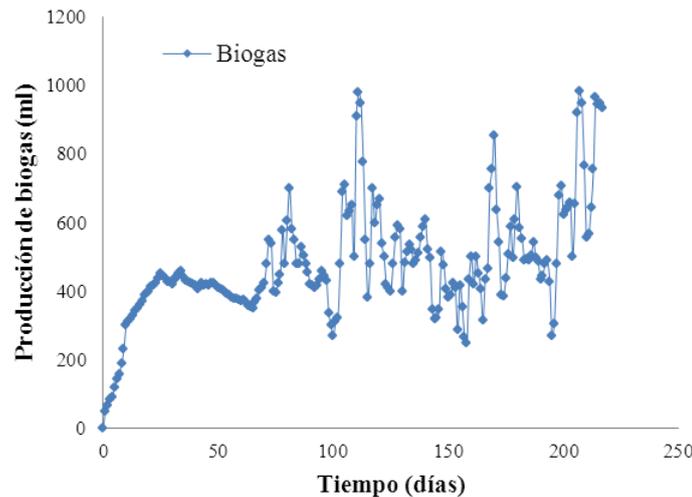


Figura 2. Producción de biogás del digestor D₂.

La producción de biogás en el D₃ se estabilizó en el día 60 con un volumen de 435 ml de biogás, comenzando a variar 10 días después, resultado que coincide con lo descrito por Chanakya et al (16). La Tabla 1 muestra la producción de biogás obtenida para cada digestor.

Si bien el D₃ muestra una mayor producción de biogás, también muestra una mayor variación en la misma a lo largo del tiempo de digestión. En el caso de los digestores D₁ y D₂ la producción de biogás es menor en comparación con D₃, sin embargo, muestran una menor tendencia a la variación en la producción de biogás.

Existen reportes de digestiones anaerobias en las que se obtienen una mayor producción de biogás utilizando diversos residuos en un mismo proceso que utilizando un solo tipo de residuo (17).

3.2 Producción de ácidos orgánicos

Los ácidos orgánicos monitoreados fueron: ácido acético, ácido propiónico, ácido butírico, ácido succínico y ácido láctico. Se reportan concentraciones en g/l usando como referencia el volumen de operación de los digestores. La Tabla 2 muestra las concentraciones de ácidos orgánicos detectados en los digestores D₁, D₂ y D₃.

El ácido acético detectado en los digestores D₁ y D₂, es comparable con una concentración de 7,80 g/l obtenida en un experimento desarrollado a 35 °C con una carga orgánica igual a la del presente trabajo (18).

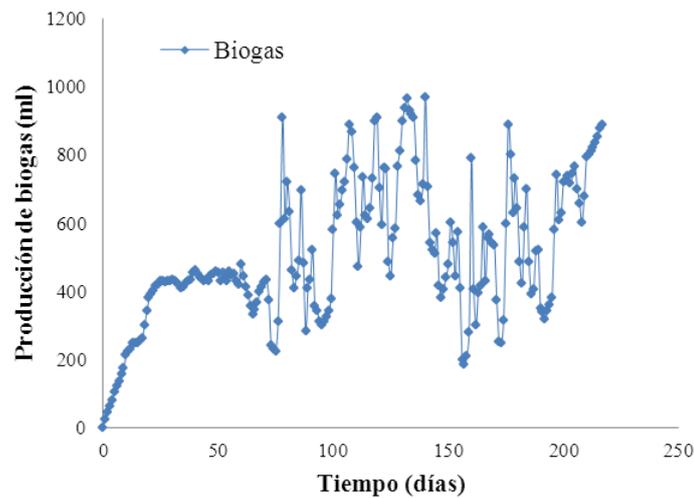


Figura 3. Producción de biogás del digestor D₃.

Tabla 1. Producción de biogás promedio.

Producción de biogás (ml/día)	D ₁	D ₂	D ₃
Promedio	497±170	477±48	520±203
Máximo	975	970	1005
Mínimo	215	255	165

Otra investigación reporta una concentración promedio de 11,0 g/l de ácido acético en condiciones mesofílicas (12).

Los digestores D₁ y D₂ tuvieron concentraciones de ácidos propiónico y butírico, menores a las obtenidas en otra investigación en la que se reporta un máximo de 6,74 g/l de ácido.

Tabla 2. Concentración de ácidos orgánicos.

Ácidos orgánicos (g/l)	D ₁	D ₂	D ₃
Acético	3,34±0,94	4,55±1,40	7,36±2,50
Propiónico	1,02±0,75	3,47±1,90	5,29±2,46
Butírico	1,02±0,75	3,79±1,30	3,78±1,14
Succínico	1,45	0,83	1,75
Láctico	0,58	0,64	2,64

Propiónico y 5,10 g/l de butírico. En el mismo trabajo se obtuvo una concentración de 2,57 g/l de ácido succínico (18). De acuerdo al rango de temperaturas en el que se llevó a cabo la digestión, el proceso fue psicofílico.

La acumulación de ácido succínico en el D₁ fue 1.74 veces la del D₂, por otro lado la concentración de ácido propiónico detectada en el D₂ fue de más de tres veces la detectada en D₁, por lo se considera un estado de equilibrio en la generación de ácidos orgánicos. Las concentraciones de ácido propiónico y butírico detectadas en este trabajo son similares a lo reportado en una digestión mesofílica de 35 días en la que se obtuvieron 2,50 g/l de propiónico y 3,10 g/l de butírico (14). Considerando que la digestión anaerobia realizada en este trabajo se lleva a cabo en condiciones psicrófilicas se puede deducir que el proceso se lleva a cabo de manera eficiente.

Para el caso del D₃ en el que solo se alimentó plátano, la concentración de ácido acético fue mayor que en D₁ y D₂. En un ensayo semejante con plátano, en condiciones mesofílicas, se han reportado concentraciones de hasta 7,5 g/l, así como 3,00 g/l de propiónico y 6 g/l de butírico. Estos valores se pueden deber a la inhibición de la metanogénesis por la acumulación del almidón contenido en la pulpa del plátano (10).

3.3 Actividad Metanogénica Específica (AME)

La detección de AME se llevó a cabo utilizando muestras de biogás correspondientes a 10 días del proceso de digestión en cada uno de los reactores.

Los digestores D₁ y D₂ fueron inoculados y alimentados en igualdad de condiciones, sin embargo, presentan una clara diferencia entre la AME de ambos digestores.

El digestor D₁ tuvo una AME máxima de 806 mmol CH₄/gSV/h y el D₂ solo obtuvo el 85,3% con respecto al D₁. Estos valores se pueden comparar con la AME obtenida en un proceso de digestión anaerobia con duración de 15 días y obtuvo un rendimiento de 0,062 mmol CH₄/gSV/h en condiciones parecidas al ensayo realizado en este trabajo (19).

Se ha reportado una AME de 0,064 mmol CH₄/gSV/h en una digestión anaerobia de residuos variados con duración de 15 días en condiciones mesofílicas (20). En un ensayo en donde el 30% de la mezcla estuvo constituida por naranja se obtuvo un máximo de 0,056 mmol CH₄/gSV/h en un periodo de 21 días en condiciones termofílicas (21). De acuerdo a lo anterior, los resultados obtenidos en este trabajo están dentro del rango de lo reportado por otros equipos de investigación.

Un factor importante para el desarrollo del proceso de digestión fue la alimentación, debido a que la relación: peso sustrato/volumen digestor, siempre fue la misma, sin embargo el contenido de carbono y azúcares aportado por cada residuo, variaba con el mismo, por lo cual los digestores no siempre contaron con la misma cantidad de materia orgánica para producir biogás.

La AME detectada en los digestores D₁ y D₂ es superior a aquellos trabajos en los que se usa un solo tipo de residuo como sustrato (10,21-22); y similar con la obtenida para mezclas de residuos de frutas y vegetales.

La máxima AME obtenida para el digestor D₃ fue de 0,136 mmol CH₄/gSV/h, que se encuentra dentro del rango de lo obtenido en la digestión anaerobia de plátano en condiciones parecidas (23). Esto podría deberse a que la carga orgánica que fue variada diariamente, afecta de forma directa la velocidad de digestión de la misma.

El uso de un solo residuo orgánico para la producción de biogás proporciona una alta estabilidad al proceso de digestión anaerobia, sin embargo disminuye el rendimiento. Por otro lado, en los procesos que se usa una alimentación de mezclas de residuos orgánicos el comportamiento es menos estable, pero se obtiene un mayor rendimiento de biogás (20-21,23).

3.4 Perspectiva de uso de ácidos orgánicos para generar electricidad

Una celda de combustible microbiano (CCM) es un dispositivo normalmente compuesto por dos cámaras (anódica y catódica) en el que bajo condiciones anaerobias, se utilizan bacterias capaces de generar un biofilm (película formada por bacterias) en el ánodo para catalizar la conversión de materia orgánica en electricidad.

La fuente de carbono es oxidada por las bacterias generando electrones y protones en el ánodo. Los electrones son transferidos a través de un circuito externo mientras los protones difunden a través de una membrana de intercambio de protones hacia el cátodo, dónde los electrones se combinan con protones y oxígeno formando agua (24), (25).

En contraste con la digestión anaerobia, las CCM crean corriente eléctrica y sus productos de salida están comprendidos principalmente por dióxido de carbono e hidrógeno (26).

En la literatura se encuentra reportada la operación de CCM con cultivos puros (sólo un tipo de microorganismo en específico). Sin embargo, se ha probado que las bacterias presentes en las aguas residuales son capaces de generar corriente eléctrica en una CCM (25), por lo que la presencia de una comunidad mixta de microorganismos como la que se encuentra en los lixiviados provenientes de la digestión anaerobia no representa una desventaja, además se ha reportado que las comunidades mixtas tienden a producir más energía que los cultivos puros cuando son usadas en CCM (27).

Otra ventaja de usar un cultivo mixto en las CCM, es que la fuente de carbono usada es importante para cualquier proceso biológico, la eficiencia y la viabilidad económica para convertir desechos orgánicos a bioenergía dependen de las características y componentes del material de desecho (28). En el caso de un cultivo mixto, las poblaciones de bacterias complementan sus funciones, tomando cada una las fuentes de carbono que le son accesibles a su metabolismo.

Como se mencionó antes, la producción de corriente eléctrica varía en función del sustrato. Un ejemplo claro de esto es el ensayo llevado a cabo por Cheng et al (25) en el que se usaron acetato y butirato como fuentes de carbono para alimentar bacterias provenientes de aguas residuales obteniéndose los siguientes resultados: en el caso del acetato, la remoción fue del 99% obteniéndose una densidad de potencia de 506 mW/m² (se toma como referencia la superficie en donde se formó el biofilm); en el caso del butirato se obtuvo una remoción del 98% y una densidad de potencia de 305 mW/m².

Otro estudio, toma como fuente de carbono la celulosa, usando como inóculo para la producción de electricidad a la bacteria *Enterobacter cloacae* obteniéndose una máxima densidad de potencia de 1,8 mW/m² (29). La corriente eléctrica producida por las CCM es mínima comparada con la que se puede obtener usando el metano proveniente de la digestión anaerobia como combustible en un generador eléctrico. Sin embargo, las reacciones biológicas llevadas a cabo en la CCM permiten eliminar la carga orgánica presente en los lixiviados provenientes del proceso de digestión anaerobia.

4. Conclusiones

Se realizaron ensayos para caracterizar la AME de diferentes ReSOP generados en la Ciudad de México usando un inóculo de fuentes variadas, Se obtuvo una AME máxima de 0,038 mmol CH₄/gSV/h. Se obtuvo un mayor rendimiento de metano para los digestores D₁ y D₂ que fueron alimentados con residuos distintos cada día que en el D₃ en el que solo se usó plátano.

Los tres digestores fueron operados en un rango de temperatura de 16-26 °C y se obtuvo una alta producción de metano. Lo anterior implica la factibilidad del uso de digestores

anaerobios a nivel de casa habitación sin un gasto extra de energía, disminuyendo la disposición de residuos orgánicos en basureros municipales y generando un energético que al ser usado como combustible disminuye el efecto invernadero que normalmente causaría la liberación del metano al medio ambiente.

Las concentraciones de ácidos orgánicos obtenidas durante el monitoreo del proceso de digestión anaerobia son constantes, el hecho de que el digester D₃ muestre un mayor contenido que los digestores restantes explica la inhibición de la producción de metano en el mismo, esto puede estar dado por el alto contenido de almidón del plátano usado para alimentar el D₃. Las concentraciones de ácidos orgánicos detectadas no tienen que representar un contaminante, puesto que los residuos líquidos de la digestión anaerobia pueden ser usados en una celda de combustible microbiano para la producción de energía eléctrica.

Referencias

1. Ofira, A. and Mordechai, S. Solid waste treatment as a high-priority and low-cost alternative for greenhouse gas mitigation. *Environmental Management*, 2001, 27(5), 697-704. ISSN: 1432-1009.
2. Winkler, J. and Bilitewski, B. Comparative evaluation of life cycle assessment models for solid waste management. *Waste Management*, 2007, (27), 1021-1031. ISSN: 1614-7502
3. Chen, X., Geng, Y. and Fujita T. An overview of municipal solid waste management in China. *Waste Management*, 2010, (30)4, 716-724.
4. SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México 2012
5. Abu-Zeid, N., Bianchini, G., Santarato, G. and Vaccaro, C. Geochemical characterization and geophysical mapping of Landfill leachates: the Marozzo canal case study (NE Italy). *Environmental Geology*, 2004, (45)4, 439-447, 2004. ISSN: 1432-0495.
6. Einola, J.K., Karhu, A.E and Rintala, J.A. Mechanically-biologically treated municipal solid waste as a support médium for microbial methane oxidation to mitigate landfill greenhouse emissions. *Waste Management*, 2008, (38)1, 97-111.
7. Kelleher, B.P., Leahy, J.J., Henihan, A.M., O'Dwyer, T.F., Sutton, D. and Leahy, M.J. Advances in poultry litter disposal technology-a review. *Bioresource Technology*, 2000, (83), 27-26.
8. Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J. and Jones, D.L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 2008, (99), 7928-7940.
9. Kalia, V.C., Sonakya, V. and Raizada, N. Anaerobic digestion of banana stem waste. *Bioresource Technology*, (23)2, 191-193.
10. Gómez, X., Cuetos, M.J., Cara, J., Morán, A. and García, A.I. Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable Energy*, 2006, (31)12, 2017-2024.
11. Torres, P. y Pérez, A. Actividad metanogénica específica. Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Ingeniería de los recursos naturales del ambiente*, 2010, (9). ISSN: 1692-9918.
12. Castillo, E., Cristancho, D.E. and Arellano, A.V. A study of operational conditions for anaerobic digestion of solid urban waste. *Revista colombiana de biotecnología*, 2003, (2)5, 11-22. ISSN: 0123-3475.

13. Cardona, C., Sánchez, O., Ramírez, J. y Alzate, L. Biodegradación de residuos orgánicos de plaza de mercado. *Revista colombiana de biotecnología*, 2004, (6)2, 78-89. ISSN: 0123-3475.
14. Chaiprasert, P., Bhumiratana, S. and Tanticharoen, M. Mesophil and termophilic anaerobic digestion of pineapple Cannery wastes. *Thammasat International Journal Science Technology*, 2001, (6)2, 1-9.
15. Vazquez, V., Valderi, D.L. and Jurandyr, P. Digestión anaerobia de residuo sólido generado en restaurante inoculado con lodo de reactores UASB. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental XXV, México 1996.
16. Chanakya, H.N., Shrama, I. and Ramachandra, T.V. Micro-scale anaerobic digestion of point source components of organic fraction. *Waste Management*, 2009, (29)4, 1306-1312.
17. Sundararajan, R., Jayanthi, S. and Elango, R. Anaerobic digestion of organic fractions of municipal solid waste and domestic sewage of Coimbatore. *Indian Journal of Environmental Health*, 1997, (39)3, 193-196. ISSN: 0367-827X.
18. Lim, S.J., Kim, B.J., Jeong, C.M., Ahn, Y.H. and Chang, H.N. Anaerobic organic acid production of food waste in once day feeding and drawing-off bioreactor. *Bioresource Technology*, 2008, (99), 7866-7874. ISSN: 0960-8524.
19. Viturtia, A., Mata, J., Cecchi, F. and Fazzini, G. Two-phase anaerobic digestion of a mixture of fruit and vegetable wastes. *Biological Wastes*, 1989, (29), 189–199.
20. Wu, M., Sun, K. and Zhang, Y. Influence of temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of municipal organic solid waste. *Journal Zhejiang University Science B*, 2006, (7)3, 180-185. ISSN: 1673-1581.
21. Özmen, P. and Solmaz, A. Biogas production from municipal waste mixed with different portions of orange peel. Master Thesis, University of Bötas, 2009
22. Gunaseelan, V. Biochemical methane potential of fruit and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 2009, (26), 389-399.
23. Viswanath, P., Sumithra, S. and Nand, K. Anaerobic digestion of fruit and vegetable processing wastes for biogas production. *Bioresource Technology*, 1992, (40)1, 43-48.
24. Rabaey, K., Lissens, G., Siciliano, S.D. and Verstraete, W. A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnology Letters*, 2003, (25), 1531-1535.
25. Cheng, S., Liu, H. and Logan, B.E. Power densities using different cathode catalysts (Pt and CoTMPP) and polymer binders (nafion and PTFE) in single chamber microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*, 2006, (40), 364-369.
26. Rabaey, K. and Verstraete, W. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 2005, (23)6, 291-298. ISSN: 0167-7799.
27. Nevin, K.P., Richeter, H., Covalla, S.F., Johnson, J.P., Woodard, T.L., Orloff, A.L., Jia, H., Zhang, M. and Lovley, D.R. Power output and coulombic efficiencies from biofilms of *Geobacter sulfurreducens* comparable to mixed community microbial fuel cells. *Environmental Microbiology*, 2008, (10)10, 2505-2514.
28. Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L. and Vanbroekhovem, K. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 2010, (101)6, 1533-1543.

29. Rezaei, F., Xing, D., Wagner, R., Regan, J.M., Richard, T.L. and Logan, B.E. Simultaneous Cellulose Degradation and Electricity Production by *Enterobacter cloacae* in a Microbial Fuel Cell. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, (75)11, 3673-3678.