Producción de Biogás y Enmiendas Orgánicas a Partir del Residuo Olivícola (Alperujo)

María T. Varnero, Karina Galleguillos, Darío Guerrero y Javiera Suárez

Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, AGRIMED, Casilla 1004, Santiago-Chile.
(e-mail: mvarnero@gmail.com; kgalleguillos@gmail.com; dguerrero10@yahoo.com; javiera.suarez@gmail.com)

Recibido Ene. 14, 2014; Aceptado Mar. 5, 2014; Versión final recibida May. 4, 2014

Resumen

Se desarrolló un sistema combinado de digestión anaeróbica-aeróbica para optimizar la producción de biogás e integrar la estabilización del digestato. En digestores tipo batch, a 30°C, se usaron mezclas de residuos de "alperujo" y de hortalizas para establecer relaciones C/N de 30/1; con y sin inclusión de inoculantes metanogénicos. Después de 72 días, el sistema sin inoculantes, produce biogás de baja calidad que no supera el 13% de metano (CH₄), 60% de dióxido de carbono (CO₂) y un 8% de gases traza. En cambio, con inoculantes, se obtiene biogás con un 69% de CH₄; 26% de CO₂ y un 3% de gases traza, e inicio de la metanogénesis de 20 días, favoreciendo la producción de metano. El período de estabilización del digestato mediante compostaje es menor que la muestra de control, obteniéndose un producto con óptimos estándares para uso agrícola.

Palabras clave: biogás, digestato, digestión anaeróbica, compostaje, digestión aeróbica

Biogas Production and Organic Amendments from Olive Processing Wastes (Alperujo)

Abstract

A system combining anaerobic and aerobic phases for sludge degradation and biogas production was developed. The anaerobic phase was done in a batch type pilot digesters at 30 °C, with mixtures of residue from the oil industry, called "alperujo", and other vegetable waste to obtain C/N ratios of 30/1, with and without inclusion of methanogenic inoculants. After 72 days, the process without inoculant generated poor quality biogas that did not exceed 13% methane (CH₄), with 60% carbon dioxide (CO₂) and 8% trace gases. In contrast, the average composition of biogas produced by treatment with inoculants was about 70% CH₄, 26% CO₂ and 3% trace gases, and the methanogenic phase took 20 days to start, favoring the production of methane. The digestate composting period is less than the control sample, obtaining a product with optimum standards for agricultural use.

Keywords: biogas, digestate, anaerobic digestion, composting, aerobic digestion

INTRODUCCIÓN

La producción de aceite de oliva es una actividad que está muy desarrollada en los países mediterráneos. Los principales productores de aceite de oliva en todo el mundo son España (38%), Italia (22%), Grecia (17%) y en menor medida Turquía, Túnez, Siria, Marruecos, Portugal, Argelia y Jordania. Se espera que aumente el suministro de aceite en un futuro próximo, debido a la puesta en marcha de nuevas plantaciones en los países productores fuera de la Unión Europea. Entre estos países, especialmente Chile y Nueva Zelanda, tienen una ventaja comparativa con respecto a otros competidores y han registrado en los últimos años un aumento de la superficie de plantación de aceitunas. Chile tiene condiciones climáticas y fitosanitarias adecuadas para el cultivo del olivo, lo que ha permitido el desarrollo de esta especie entre las regiones de Arica a Bío-Bío. La superficie nacional plantada en 2010 fue de 24.000 ha, lo que corresponde al 0,3 % de la superficie mundial. Se estima que el 20% de la superficie total plantada se destina a la elaboración de aceitunas de mesa y el resto, a la producción de aceite de oliva. Con esta superficie, la producción de aceite de oliva en Chile llegó a 12.000 toneladas en 2010 (0,3 % de la producción mundial), estimándose una proyección de 35.000 toneladas para el año 2020 (Sudy y Cortés, 2012).

La extracción industrial del aceite de oliva genera una elevada cantidad de residuos y subproductos que requieren una gestión adecuada para minimizar su impacto ambiental (Pozzi *et al*, 2010). En la industria olivícola, han surgido nuevas tecnologías en el proceso de extracción de aceite de oliva, en el cual, además de aceite, se produce un residuo denominado “alperujo”. Esta modificación, representa un problema a la hora de disponer los importantes volúmenes de residuo que se generan. En consecuencia, resulta necesario buscar alternativas para el tratamiento de estos subproductos. Por un lado, es posible destinar el “alperujo” a la cogeneración de energías renovables mediante combustión anaeróbica (biogás). Sin embargo, luego de la obtención de biogás, es necesario disponer los nuevos residuos (digestato) de manera que no ocasionen daño al medio ambiente. El digestato es un producto semi-estabilizado que tiene el aspecto de lodo con alto contenido de humedad y diversas propiedades físicas y químicas que impiden su incorporación directa al suelo; dentro de éstas, se destaca la presencia de elementos fitotóxicos (polifenoles hidrosolubles), elevada relación carbono/nitrógeno, alto contenido de sales solubles y elevado contenido de aceite (Alburquerque *et al*, 2006; Tortosa *et al*, 2012). Es posible, terminar de estabilizar el digestato mediante compostaje, obteniendo un producto final inocuo, que puede ser utilizado como acondicionador orgánico, mejorando las propiedades físicas del suelo.

La estabilización del “alperujo” mediante procesos de compostaje es una técnica bien conocida que permite convertir este residuo, en una enmienda para su uso como fertilizante orgánico (Alburquerque *et al*, 2006; Alburquerque *et al*, 2007; Cegarra *et al*, 2006; Filippin *et al*, 2012; Tortosa *et al*, 2012; Varnero *et al*, 2011). Las experiencias realizadas que utilizan digestión anaerobia son escasas (Borja *et al*, 2006; Roig *et al*, 2006; Rincón y Borja, 2012) y casi inexistente la que USA acoplamiento sucesivo de ambos métodos, anaeróbico y aeróbico, para producir biogás y un residuo orgánico estable y maduro para uso agrícola. Por otro lado, como se mencionó anteriormente, el “alperujo” presenta compuestos aromáticos, como fenoles, y ácidos grasos de largas cadenas que pueden ser tóxicos para las bacterias metanogénicas, afectando el proceso de digestión anaeróbica que reduce los contenidos de materia orgánica en los residuos, produciendo así biogás (Blika *et al*, 2009). Es por ello, que es necesario evaluar un pre-tratamiento que elimine dichos compuestos, como la dilución de sólidos o la utilización de microorganismos que degraden previamente el residuo, disminuyendo la toxicidad para las bacterias metanogénicas. El objetivo de esta investigación fue desarrollar un sistema combinado para el tratamiento de estos residuos con alta carga orgánica, que integre fases de degradación anaeróbica y aeróbica, con inoculantes metanogénicos incorporados, para optimizar la producción de biogás y estabilizar mediante compostaje el digestato generado en metanogénesis, el cual, se puede utilizar como acondicionador físico o enmienda orgánica del suelo.

MATERIALES Y MÉTODO

El estudio se realizó en la planta piloto del Campus Antumapu, de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. Las materias primas utilizadas fueron residuos de la industria olivícola “alperujo” y hortaliza. Se realizó una caracterización química de estos residuos (Tabla 1), y se preparó con ellos una mezcla en forma proporcional para obtener una relación carbono/nitrógeno (C/N) de 30/1.

Tabla 1. Caracterización química de los residuos orgánicos (materias primas).

Residuos	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	C/N	pH
Alperujo	57	93,1	79,6	6,0
Hortalizas	15	75,6	12,1	6,5

Digestión anaeróbica

Se trabajó con digestores Batch de 60 L de capacidad, manteniendo temperaturas de 30°C. La temperatura se controló mediante un termostato Campini, conectado a un calefactor que estaba inmerso en un contenedor con agua, dentro del cual se sumergieron los digestores. Se prepararon las mezclas de residuos con 8% de sólidos totales, conformadas por "alperujo" (27%) y residuo de hortalizas (68%); además, se consideró la inclusión de bacterias metanogénicas en base a guano de bovino (5%), por lo tanto, se dispuso de dos tratamientos, con y sin inoculante (T1 y T0), con tres repeticiones. Se monitoreó diariamente la temperatura del contenedor con agua y el biogás generado. Se determinó al inicio y término de la digestión, sólidos totales, sólidos volátiles, relación C/N, conductividad eléctrica y pH.

Digestión aeróbica

Con el digestato obtenido en la fase anaeróbica (Tabla 2), se elaboraron pilas de compostaje, de forma piramidal (Fig.1) de 1m³ con volteos manuales periódicos. Además se dispuso de pilas control, conformadas con materias primas frescas (Tabla 1). Se realizaron controles de humedad y temperatura interna de las pilas cada 7 días. A los productos estabilizados por compostaje se determinó pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), relación carbono/nitrógeno (C/N), estabilidad biológica y madurez química mediante fitotoxicidad en germinación de semillas de rabanito (*Raphanus sativus* var. *Cherry belle*). (Raj y Antil, 2011; Varnero *et al.*, 2007; Barrera *et al.*, 2006).

Tabla 2. Caracterización de las mezclas usadas en la preparación de las pilas de compost.

Residuos	Parámetros				
	Sólidos totales (%)	Materia Orgánica (%)	C/N	C.E.dS/m	pH
T0 (Materias frescas)	47	92,6	30/1	3,1	6,2
T1 (digestato)	53	90,0	48/1	2,75	6,6

Fig. 1: Pilas de compostaje: a base de digestato (T1) y con materias primas frescas (T0)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Digestión anaeróbica

Los resultados obtenidos indican que en el tratamiento sin inoculante (Tabla 3), a pesar de las condiciones mesofílicas (30°C), presenta un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 72 días; generando un biogás de baja calidad, con valores promedio de metano (CH₄) que no superan el 13%; de dióxido de carbono (CO₂) del orden del 60% y un 8% de gases traza, tales como sulfuro de hidrógeno (H₂S), nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂) y monóxido de carbono (CO). En cambio, en el tratamiento con inoculante (Tabla 4) se obtiene un biogás con valores promedio de un 69% de CH₄; 26% de CO₂ y 3% de gases traza, junto con tiempos de inicio de la fase metanogénica en torno a los 20 días. La producción media de biogás por kg de materia prima fue de 0,03L para T0 y 0,3L para T1; con un rendimiento total de biogás para T0 de 0.7L y para T1 de 9,3L.

Al respecto, se ha descrito (Hilbert, 2000; FAO, 2011) que en el caso de sistemas Batch o discontinuos, el TRH coincide con el tiempo de permanencia del sustrato orgánico (materias primas) dentro del digestor. El TRH está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura interna del sistema. La selección de una mayor temperatura implica una disminución del TRH, en la medida que se disponga del sustrato adecuado para el desarrollo de bacterias metanogénicas. Con relación al tipo de sustrato (Vargas, 2005; FAO, 2011), generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como celulosa demandará mayores TRH para ser totalmente digeridos. Por otra parte, en un sistema continuo, el límite mínimo del TRH está dado por la tasa de reproducción de las bacterias

metanógenicas debido a que la continua salida de efluente del digestor, extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el efluente. Esta extracción debe ser compensada por las bacterias que permanecen dentro del digestor (Hilbert, 2000; Insam *et al*, 2009). En sistemas Batch, la inclusión de inóculos metanogénicos, en base a guano de bovino, constituye un aporte tanto de bacterias metanogénicas como del sustrato adecuado para la reproducción y crecimiento microbiano.

Tabla 3: Composición del biogás generado: sin inclusión de inoculantes metanogénicos.

Tratamientos	Composición del biogás generado					
	% CH ₄	% CO ₂	% O ₂	% H ₂ S	% CO	Otros gases
T ₀ R ₁	10	66	10	0,4	0	14
T ₀ R ₂	16	58	20	1	0	5
T ₀ R ₃	13	58	6	1	2	20

Tabla 4: Composición del biogás generado: con inclusión de inoculantes metanogénicos.

Tratamientos	Composición del biogás generado					
	% CH ₄	% CO ₂	% O ₂	% H ₂ S	% CO	Otros gases
T ₁ R ₁	71	27	1.6	0	0	0.4
T ₁ R ₂	72	26	1.7	0	0	0.3
T ₁ R ₃	64	24	2.1	0	0	9.9

Digestión aeróbica

A través de la medición periódica de la temperatura interna de las pilas, se aprecia que los tratamientos analizados se diferenciaron en la duración de las distintas etapas del proceso de compostaje (Fig.2).

Fig. 2. Evolución de la temperatura interna de las pilas de Compost, conformadas con materias primas frescas (T0) y con digestato (T1), durante el proceso de compostaje (Valores promedios).

El tratamiento control (T0), tuvo una etapa inicial mesofílica de una duración de 80 días promedio entre las tres repeticiones, evidenciando el difícil manejo de este residuo, dado en primer lugar por su alto porcentaje de compuestos lipídicos y ácidos orgánicos, y segundo, por su alta susceptibilidad a la compactación, originada por el pequeño tamaño de partículas, escasa porosidad y elevado contenido de humedad, como indican diversos autores (Albuquerque *et al*, 2004; Cegarra *et al*, 2006; Tortosa *et al*, 2012). Luego comenzó la etapa termofílica que duró en promedio 45 días. En cambio, el tratamiento T1 no tuvo etapa mesofílica. El material extraído de los biodigestores ingresó al proceso de compostaje con una temperatura termofílica de 52,9°C. La etapa termofílica en este tratamiento duró 51 días. En ambos tratamientos la temperatura se mantuvo entre el rango termofílico óptimo señalado por la Normativa Chilena de Compost 2880 (INN, 2004) de 45 a 65°C, y se constató una gran actividad biológica por parte de los microorganismos termofílicos que biodegradaron las fracciones orgánicas de menor estabilidad, tales como productos celulósicos, hemicelulósicos y productos ricos en azúcares y proteínas. El porcentaje del contenido de agua

en los dos tratamientos se mantuvo entre un 45-55% durante el proceso de compostaje. Se observó que el tiempo de compostaje requerido para obtener un producto final maduro y estable en el digestato, se reduce respecto del control (Fig. 2). Al finalizar el proceso de compostaje, que tiene lugar cuando la temperatura interna de las pilas de compost, es similar a la temperatura del aire, se determinó en ambos tratamientos, una reducción en la relación carbono-nitrógeno (Tabla 5). En T1 la disminución de la relación C/N fue mayor que en T0 posiblemente por una mayor degradación de los compuestos orgánicos sometidos a procesos de degradación anaeróbica y aeróbica. Además, el contenido de materia orgánica en ambos tratamientos disminuye con el tiempo; reducción asociada probablemente con las transformaciones que se producen en la etapa termófila (Cegarra *et al.*, 2006), debido principalmente a la respiración microbiana oxidativa. Por otra parte, tanto en el tratamiento T0 y T1 los valores correspondientes a desprendimiento de CO₂ están por debajo de 8 mg C-CO₂/g MO/día, valor que exige la normativa chilena para considerar un compost estabilizado y maduro. Por lo tanto, es posible afirmar que ambos tratamientos tienen una baja actividad microbiológica, dando cuenta de que los microorganismos han agotado el stock de materia orgánica fácilmente descomponible (Varnero *et al.*, 2007; Barrena *et al.*, 2006).

Tabla 5. Caracterización química y biológica de los materiales compostados.

Parámetros	T0	T1	Rango Norma INN (2004)
pH	6,5	7,1	5,5 – 8,5
C.E. (dSm ⁻¹)	1,24	0,99	Clase A <3; Clase B <8
Humedad (%)	36	31	30-45
Materia Orgánica (%)	62,4	67,7	>20
Relación C/N	29,7	24,3	Clase A ≤25/1; Clase B ≤30/1
Desprendimiento CO ₂ (mgC-CO ₂ /g MO/día)	0,51	0,09	≤ a 8
Germinación semillas rabanito (%)	91	97	≥ a 80

Las pruebas de germinación indican que las sustancias fitotóxicas han desaparecido después de este período, observándose (Tabla 5) que el 91% de las semillas germinó en el tratamiento control después del quinto mes. En cambio en T1, a los tres meses de compostaje, germina el 97% de las semillas. En ambos casos, las evidencias son claras sobre la posibilidad de utilizar estos materiales tratados como enmiendas orgánicas, para el desarrollo de cultivos. Además, los valores de pH medidos al comienzo de cada tratamiento (Tabla 2) indican que el tratamiento control (T0) tenía un pH promedio de 6,2; lo que corresponde a un nivel moderadamente ácido. Esto obedecería principalmente a la presencia de ácidos orgánicos presentes en el "alperujo" (Alburquerque *et al.*, 2004; Tortosa *et al.*, 2012). En el caso del digestato, se determinó un valor inicial de 6,6; lo que indicaría que el proceso de biogás se llevó a cabo bajo condiciones controladas para la fermentación anaeróbica. Al final del proceso de compostaje, se observa un pH ligeramente ácido de 6,5 para T0 y neutro (7,1) para T1 (Tabla 5). En ambos tratamientos disminuyó la conductividad eléctrica, proporcionando un residuo sin restricciones como fertilizante. El compostaje de digestato genera un compost clase A; en cambio, con el "alperujo" sin tratamiento previo, el producto compostado es clase B (Tabla 5).

CONCLUSIONES

El uso de inoculantes microbianos en el proceso de digestión metanogénica, permite que los períodos de obtención de metano sean menores, optimizando así el proceso e incrementando la producción de metano. El digestato residual estabilizado mediante compostaje, genera un compost clase A, pudiendo utilizarse con fines agronómicos sin restricciones. Se reduce el período de estabilización y maduración en la pila construida a base de digestato, respecto de la pila testigo conformada con materias primas frescas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Energía por el financiamiento otorgado para la realización de este trabajo a través del proyecto "Biogás y Aplicaciones"

REFERENCIAS

Alburquerque, J. A., J. González y D. García, Agrochemical characterisation of alperujo, a solid by-product of the phases centrifugation method for olive oil extraction. *Bioresource Technology*. 91: 195-200, (2004).

Alburquerque, J.A. y otros tres autores, Effects of bulking agent on the composting of "alperujo", the solid by-product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction, *Process Biochemistry*: 41, 127-132, (2006).

Albuquerque, J.A. y otros tres autores, Effects of a compost made from a solid by-product ("alperujo") of a two-phase centrifugation system for olive oil extraction and cotton gin waste on growth and nutrients content ryegrass (*Lolium perenne* L.), *Bioresource Technology*: 98, 940 – 945, (2007).

Barrena R., F. Vázquez y A. Sánchez, The use of respiration indices in the composting process: a review. *Waste Management and Research* 24: 37-47, (2006).

Blika, P.S. y otros tres autores, Anaerobic digestion of olive mill wastewater. *Global Nest Journal*. Vol. 11 (3): 364-372. (2009).

Borja, R., Rincón, B. y Raposo, F., Anaerobic biodegradation of two-phase olive mill solid wastes and liquid effluents: Kinetic studies and process performance. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 81 (9), pp. 1450-1462. (2006).

Cegarra, J. y otros cuatro autores, Effects of the forced ventilation on composting of a solid olive-mill by-product ("alperujo") managed by mechanical turning. *Waste Management*, 26 (12), pp. 1377-1383. (2006).

FAO, Manual de Biogás. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. 315p. (2011) Disponible en: http://www.fao.org/alc/file/media/pubs/2011/manual_biogas.pdf. Acceso 2 de abril (2014).

Filippin, A.E y otros cuatro autores, Evolución de la lignina y celulosa durante el compostaje de mezclas de alperujo. *Argentina y Ambiente* 374-379. (2012).

Hilbert, J., Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural. INTA, Castelar, Argentina, 57p. (2000).

Insam, H., I. Franke-Wittke y M. Goberna, Microbes in aerobic and anaerobic waste treatment. In: *Microbes at work. From wastes to resources*. Insam, H., I. Franke-Wittke y M. Goberna (Eds). Pp. 1-34, Springer, Heidelberg, Dordrecht London, New York, (2009).

NCh 2880-2004, Norma Chilena de Compost 2880-2004: Compost – Clasificación y requisitos, Instituto Nacional de Normalización (INN), 23 p, Santiago, Chile (2004).

Pozzi, M. y otros tres autores, Posibilidad de usar el alpechín en fertilización de tierras agrícolas, *Información Tecnológica*: 21(4), 117-123 (2010).

Raj, D y R.S. Antil, Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. *Bioresource Technology*. 102: 2868-2873. (2011).

Rincón B. y R. Borja, Influence of Substrate Concentration on the Anaerobic Degradability of Two-Phase Olive Mill Solid Waste: A Kinetic Evaluation Biogas. Dr Sunil Kumar (Ed.), ISBN: 978-953-51-0204-5, InTech, 408 p. (2012). Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/biogas/influence-of-substrate-concentration-on-the-anaerobic-degradability-of-two-phase-olive-mill-solid-wa>. Acceso: 2 de abril (2014).

Roig, A., M.L.Cayuela, y M. A. Sánchez-Monedero, An overview on olive mill wastes and their valorisation methods. *Waste Management*. Vol. 26: 960 – 969. (2006).

Sudy, A. y P. Cortés, Aceite de Oliva. Oficina de Estudios y Política Agraria (ODEPA) (2012). Disponible en: <http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/doc/2394.pdf>. Acceso: 15 de diciembre (2013).

Tortosa, G. y otros tres autores, The production of comercial organic amendments and fertilisers by composting of two phase olive mil waste ("alperujo"). *Journal of Cleaner Production* 26: 48 – 55 (2012).

Vargas, G., Estudio de la generación de biogás a partir de la sinergia en mezclas de algas marinas, biodegradables en un sistema de bioconversión anaerobias de dos etapas. Memoria de Título. Universidad Católica de Temuco. Facultad de Ciencias. Temuco, Chile, 95p. (2005).

Varnero, M.T., C. Rojas y R. Orellana, Índices de fitotoxicidad de residuos orgánicos durante el compostaje, *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 7 (1), 28 – 37 (2007).

Varnero, M.T., K. Galleguillos y R. Rojas, Sistemas de compostaje para el tratamiento de alperujo. *Información Tecnológica*: 22(5), 49-56 (2011).