

EL BIOSECADO COMO PROCESO BIOLÓGICO PARA MINIMIZAR LA HUMEDAD DE RESIDUOS DE JARDINERÍA

Francisco J. Colomer

Lidón Herrera

Antonio Gallardo

M^a Dolores Bovea

Universidad Jaume I

Fabián Robles

Instituto Politécnico Nacional (México DF, México)

Abstract

Biodrying consists on reducing moisture and stabilizing organic compounds to obtain a useful product as a fuel or as a previous step to landfill. In order to do so, the warm generated in the aerobic fermentation of the organic compounds is used. The main parameters which control the process are: aeration, the temperature reached in the fermentation and initial moisture

In this work, the substrate was composed of the mowing and pruning waste from the gardens of the University Jaume I of Castellón (Spain).

Biodrying process has been made in a greenhouse, where both the heat generated in the fermentation and the heat of the sun are used. To promote aeration has taken the capacity of the shredded prunings as a bulking agent and a perforated floor, permeable to the passage of air. At the top of the greenhouse was installed an air outlet to promote the "chimney effect". So, we have achieved drying times of 15 to 30 days (depending on the month) and volume reductions greater than 50%. The final residue with low humidity (5 - 15%) has a calorific value suitable for use as fuel (around 3,500 kcal / kg).

Key words: *biodrying; aerobic fermentation; gardening wastes; stabilization.*

Resumen

El biosecado consiste en disminuir la humedad y estabilizar la materia biodegradable para obtener un producto útil como combustible o como paso previo a su depósito en vertedero. Para ello, se aprovecha el calor de la fermentación aerobia de la materia biodegradable. Los parámetros que controlan el proceso son: aireación, temperatura alcanzada y humedad inicial. En este trabajo, se ha empleado como sustrato los residuos de jardinería de la Universidad Jaume I de Castellón.

El biosecado se ha realizado en un invernadero de modo que se aproveche el calor generado en la fermentación y el aportado por el sol. Para favorecer la aireación se ha aprovechado la capacidad texturizante de los restos de poda triturados y un suelo perforado, permeable al aire. En la parte superior del invernadero se ha instalado una salida de aire para favorecer el "efecto chimenea".

Así pues, se han conseguido tiempos de secado de 15 a 30 días (dependiendo del mes) y reducciones de volumen superiores al 50%. El residuo final con baja humedad (5 - 15%) tiene un poder calorífico adecuado para ser usado como combustible (unas 3.500 kcal/kg).

Palabras clave: biosecado, fermentación aerobia, residuos jardinería, estabilización.

1. Introducción

La normativa más reciente en materia de residuos promueve medidas para la prevención y la valorización de los residuos urbanos (RU) y asimilables. Valga como ejemplo el PIR'2010 de la Comunidad Valenciana, en donde se proponen, entre otros, objetivos fundamentales:

- “fomentar estudios e investigación para la búsqueda de alternativas económicas viables que permitan la utilización de los productos obtenidos en la valorización material de los RU”. Como consecuencia, aumento de tecnologías que permitan valorizar energéticamente los residuos urbanos.
- “fomentar la recogida separada de biorresiduos”.
- “exigencia de tratamientos mínimos de recuperación de materiales y compostaje de materiales orgánicos, de la totalidad de “mezclas de residuos municipales” generados antes de su eliminación. Por lo tanto, sólo se depositarán en vertedero aquellos residuos que hayan sido objeto de algún tratamiento previo.

Las tecnologías clásicas de valorización para los residuos urbanos son el compostaje, la biometanización y valorización energética, tal y como indica el PIR 2010. En lo referente a la valorización energética, existen más de 400 incineradoras en toda Europa (BREF, 2006), llegando a incinerar más de 200 millones de t/año de residuos, lo que representa sólo un 20-25% del total. Es muy interesante en este aspecto optimizar el proceso de incineración o bien, mejorar la calidad en las propiedades del residuo a valorizar. Para ello, es necesario mejorar el poder calorífico del residuo, lo cual depende fundamentalmente del contenido en materia combustible. Así pues, para mejorar el poder calorífico de un residuo es importante reducir su humedad.

En este trabajo, se plantea la disminución de la humedad mediante la técnica conocida como biosecado. El biosecado consiste en eliminar parte de la humedad y estabilizar la materia orgánica biodegradable para reducir el peso y volumen para su deposición final, obtener un producto que puede ser utilizado como combustible o simplemente, para abaratar los costes de transporte. Para ello, la acción combinada del calor generado en la fermentación aerobia de la materia biodegradable y un adecuado flujo de aireación, facilitarán que el porcentaje de humedad baje, además de producirse una considerable pérdida de peso y volumen. Por consiguiente, el producto ya biosecado podrá tanto valorizarse energéticamente, como ser llevado a un vertedero, pero en esta ocasión con una menor carga ambiental. Esto es debido a que se trataría de un residuo estabilizado sin apenas generación de lixiviado y con menor cantidad de humedad y peso. Dado que en la Comunidad Valenciana el residuo que alberga el contenedor en masa es un 41% orgánico (PIR, 2010); no existe problema alguno en el suministro de materia fácilmente degradable.

El biosecado es un procedimiento relativamente novedoso, sin embargo se han ensayado varias experiencias con diferentes tipos de residuos: lodos de la industria papelera, agroalimentarios, ROB (residuo orgánico bruto), etc. En concreto, este trabajo se centrará en

una fracción del RU, los restos de poda o jardinería que están considerados como residuos asimilables a los RU.

2. El proceso de biosecado

2.1 Técnicas de biosecado

En principio cualquier material fácilmente biodegradable puede someterse a un proceso de biosecado para reducir su humedad. Sin embargo, en función del contenido en nutrientes e inhibidores para el crecimiento de los microorganismos, el proceso será más o menos eficiente. Así pues, en la actualidad las técnicas de biosecado se aplican ya a distintos tipos de residuos y mediante técnicas diferentes, las cuales se resumen a continuación.

- Biosecado en invernaderos: los invernaderos a escala se utilizan principalmente para residuos con alto contenido en agua. Mediante la acción combinada del microclima generado dentro del invernadero, la acción del sol y el viento, la actividad de las bacterias responsables del biosecado se incrementa notablemente. En la actualidad se están desarrollando varios ensayos experimentales al respecto, ya que la comercialización de este método todavía no se ha llegado a implantar.
- Biosecado en reactores: Uno de los objetivos de la biología del secado o simplemente biosecado es la elevación del contenido de sólidos secos (Choi et al., 2001; Navae-Aedeh et al., 2006). El mecanismo principal del biosecado en los reactores es principalmente la evaporación por convección. Utilizando el calor de la fermentación aeróbica de los residuos y el flujo de aire forzado compatible, parte del agua presente en los residuos se evapora, y debido al arrastre de este flujo se producirá el efecto de secado. Para que se produzca la desorción, la humedad relativa del aire tiene que ser inferior al equilibrio de humedad relativa, es decir, el valor de la humedad relativa del aire en la que el contenido de humedad de la mezcla aire-vapor está en equilibrio con el contenido de humedad de la matriz (Mujumdar, 2007).

2.2 Parámetros de control en el biosecado

En el proceso de biosecado, la circulación de aire forzado a través de la masa de residuos y el calor producido en las reacciones de degradación aeróbica de la materia orgánica permiten la evaporación del agua. En cualquier caso, el secado no sólo es producido por estas dos únicas causas, sino por algunas variables más que se encuentran íntimamente ligadas entre sí, siendo en ocasiones difícil discernir que parámetro ha forjado un cambio significativo en el biosecado. Los parámetros a controlar durante el proceso de biosecado son:

- Tipo de muestra: El tipo de muestra tratada determinará las condiciones que se produzcan en el biosecado. Es decir, las características del residuo establecerán tanto el resultado del biosecado, como su duración. Por ejemplo, en aquellas muestras donde la relación C/N sea muy baja, la actividad microbiana será más reducida. Por tanto, la fuente de generación de la muestra (restos de poda, RSU, lodos de depuradoras, etc.), la granulometría, y como consecuencia la aparición de huecos que permitan la aireación y eviten la excesiva compactación, además de las características físico-químicas, serán las responsables del alcance y eficiencia del biosecado y su resultado final.
- Tiempo de permanencia: El tiempo de permanencia es el periodo de funcionamiento de la experiencia, que vendrá establecido por la progresiva caída de temperatura del interior del

residuo y de la humedad de la muestra. En caso de invernaderos a escala, que se encuentran a la intemperie, será función de las condiciones ambientales: humedad relativa (HR) del aire, radiación solar e insolación, temperatura exterior, lluvia, etc. En los reactores se estipula un tiempo mínimo de 15 días para aplicaciones en laboratorio. Sin embargo, la duración se puede prolongar en función de la pérdida de peso y el volumen de lixiviado evacuado. Así pues si los valores siguen una tendencia similar durante dos semanas, es lógico que el experimento se dilate un tiempo más.

- Microorganismos responsables del biosecado: Debido a la presencia de agua, carbono orgánico y sustancias nitrogenadas, la fracción biodegradable es altamente inestable y putrescible, capaz de fermentar tanto por vía aerobia como anaerobia. En el proceso de biosecado la fermentación se realiza por medio aerobio siendo la masa de residuos atacada por una población de microorganismos que se nutren de los componentes más digeribles produciendo calor. Las bacterias responsables de la actividad biológica se pueden clasificar en cuatro grupos, basados en el rango de temperaturas en las que su desarrollo y crecimiento es más favorable: las bacterias psicrófilas (activas entre 0-20°C), mesófilas (activas en 8-48°C), termófilas (activas entre 42-68°C) e hipertermófilas (activas entre 70-110°C) (Madigan y Martinko, 2006).
- Temperatura: La temperatura es un parámetro clave en el biosecado, no sólo influye la temperatura del exterior sino que la actividad microbiana hace que esta temperatura aumente. La falta progresiva de nutrientes y la falta de oxigenación pueden originar un descenso de temperatura en la masa de residuos. Una parte del calor generado biológicamente servirá para mejorar a la evaporación del agua ligada a la masa de residuos (Bailey et al., 1986; Prescott et al., 1993). A causa de esta elevada temperatura alcanzada en el interior de los residuos (50-60°C), el proceso aeróbico es un eficaz sistema de estabilización, desodorización e higienización del material, ya que a esas temperaturas se llega a eliminar los microorganismos patógenos. Uno de los problemas más comunes que se pueden encontrar en estos reactores, es la aparición de un gradiente de temperatura muy acusado. Estas diferencias de temperatura a lo largo de la pila de residuos, son producidas por una mayor actividad microbiológica focalizada en aquellos puntos que tienen condiciones más ventajosas para el crecimiento microbiano. Para mitigar este efecto se debe ventilar la pila de forma difusa, y no con una única fuente de caudal de aire forzado (Sugni et al., 2005). Con esto, la degradación aerobia será lo más homogénea posible adquiriendo unos valores de poder calorífico similares en toda muestra.

En el caso de los invernaderos, la temperatura interior adquiere una cierta variabilidad afectada principalmente por las condiciones climáticas exteriores. El microclima generado en el interior de los invernaderos permite que las diferencias térmicas no sean tan extremas. Por otro lado, Larsen y McCartney (2000) encontraron que el biocalor (temperatura producida por el biosecado) tiene un mayor valor cuando la relación C/N está entre 15 y 30. Fuera de este intervalo se puede afectar de forma perjudicial a la actividad de las bacterias. En algunos tipos de residuos, especialmente en lodos, es necesario un análisis periódico elemental para asegurar un correcto biosecado carbono y nitrógeno.

- Humedad: La presencia de nutrientes y humedad en el sustrato propiciará la proliferación de bacterias que degraden la muestra. La reacción metabólica de los microorganismos se puede llevar a cabo en niveles con una humedad relativamente alta. Sin embargo, con un elevado contenido en agua disminuye la disponibilidad del oxígeno necesario para la descomposición aeróbica, ya que existe una lenta difusión de oxígeno en la película líquida que rodea los microorganismos. Varios autores informaron que el contenido de humedad

óptimo para el correcto desarrollo de la actividad microbiana es entre el 45-65% en peso húmedo (Nakasaki et al., 1994; Liang et al., 2003).

- Aireación: Según Roy et al. (2006), el flujo de aire forzado es necesario para eliminar el agua de la matriz y arrastrar la humedad ambiental hacia el exterior del reactor, además de proporcionar oxígeno a los microorganismos aerobios. Cabe destacar que a mayores caudales de aire, la actividad se limitará debido a los efectos de enfriamiento por la humedad evaporada. Roy et al. (2006) encontraron que la reducción del caudal de aire suministrado favorecía a la actividad microbiológica, debido a que aumentaba la temperatura de la matriz y con ello el crecimiento bacteriano; pero por el contrario, los resultados en el biosecado fueron menores. En el caso de procesos industriales de biosecado, la conexión entre la aireación y la temperatura es tan decisiva que se regula de forma automática. Se trata de mantener una temperatura en los reactores en torno de 45-50°C, que correspondería en la pila de residuos de unos 52-57°C. La regulación se realiza de forma que si la temperatura sube, se aumenta la cantidad de aire y viceversa.
- Presencia de material texturizante (MT): En algunos estudios se demuestra que la introducción de material con granulometría mayor que la del residuo biosecado influye positivamente en el secado, ya que se favorece la aireación en el interior de la pila. La adecuada proporción de cada componente permitirá que la temperatura no descienda del rango óptimo, y se produzca una desecación más rápida. De hecho, en algunas experiencias sobre la elaboración de compost, se ha comprobado que la adición de materiales como paja de trigo, desperdicios de algodón, serrín, tallos de uva, etc., mejora sustancialmente el proceso de compostaje (Madejón et al., 1998; Baèta-Hall et al., 2005), ya que permite el adecuado intercambio de gases, evitando la compactación excesiva del sustrato de compostaje, favoreciendo la estabilización y reduciendo la inhibición de microorganismos en lodos de depuradora (Yañez et al., 2009). Además, el MT es realmente efectivo para el compostaje en aquellos residuos de desecho que tienen una humedad demasiado elevada y un ratio C/N bajo (Chang et al., 2010). En estas circunstancias, la adición de otro material provoca una regulación de estos parámetros, ya que la excesiva humedad inicial queda absorbida por el MT (de mayor sequedad que la muestra para biosecar), y el carbono aumenta debido a la carga de materia orgánica del material añadido.

Aparte de las ventajas que se han encontrado en cuanto a la mejora en el proceso de compostaje debido a la adicción de MT, recientes estudios han comprobado su utilidad en el proceso de biosecado en invernaderos. En concreto, se confirmó que al introducir un cierto porcentaje de MT la producción de lixiviado disminuyó. Esta circunstancia es plenamente satisfactoria, ya que residuos orgánicos con una elevada humedad, liberan la mayor parte de agua cuando se rompe la pared o membrana celular en el proceso de degradación (Zhang et al., 2008). Por otro lado, en los trabajos de Robles et al. (2010), se demostró que con la aportación de un 9% de distintos MTs, la reducción de lixiviados generados en el proceso de compostaje fue de un 34% con la viruta de madera, un 54% con restos de poda y un 64,6% para viruta de madera con compost.

3. Objetivos

El objetivo fundamental de este proyecto de investigación es estudiar la reducción de humedad, peso y volumen, variando los diferentes parámetros de los que depende el biosecado en invernaderos a escala. En el proceso de biosecado los parámetros de control del proceso están fuertemente ligados, y por ello es clave investigar cómo pueden afectar al rendimiento del

secado y estabilización de los residuos tratados. Para ello, es necesario realizar diversos experimentos, tanto en reactores como en invernaderos, con ligeras variaciones. Así pues, la consecución del objetivo fundamental se basará en objetivos específicos:

- Determinar el efecto de la ventilación: en los reactores se experimentará diferentes caudales de aire como fuente de desecación y arrastre de la humedad contenida en el residuo. En los invernaderos, se comparará el efecto que produce la colocación de una chimenea de escape de aire o la ausencia de la misma para la reducción de humedad en la muestra.
- Plantear un tiempo de permanencia óptimo: serán los días en los que estará en funcionamiento el experimento, que vendrá determinado por la progresiva caída de temperatura del interior del residuo y de la humedad inicial de la muestra. En caso de los invernaderos a escala, que se encuentran a la intemperie, será función de las condiciones ambientales: HR (humedad relativa) del aire, la radiación solar, la temperatura exterior, la lluvia, etc.
- Controlar las características del tipo de muestra: los restos de poda pueden ser matorrales, césped, pequeños árboles, etc. A pesar de ser triturados previamente al biosecado, las necesidades de aireación y tiempo necesario de permanencia son diferentes, y vendrán determinadas por las condiciones iniciales en las que se encuentre este residuo.
- Contrastar la eficiencia mediante la adición de MT: en ocasiones, según el tipo de residuo, es conveniente añadir un cierto porcentaje de otro tipo de material para facilitar la biodegradación y la aireación.

Dependiendo del resultado de las distintas experiencias de biosecado, la muestra podrá ser utilizada para varios usos, aunque el más sostenible desde el punto de vista ambiental sería la incineración previo pelletizado del residuo.

4. Material y métodos

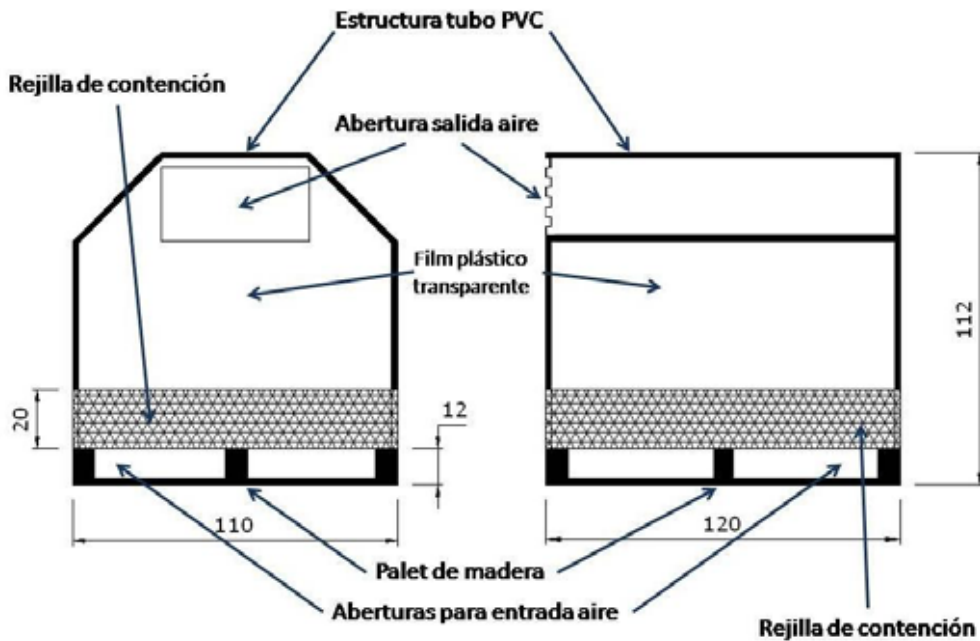
En el presente trabajo de investigación se realizaron distintas experiencias a escala de laboratorio en las que se sometió al proceso de biosecado tres muestras distintas de residuos de poda y jardinería de la zona verde de la Universidad Jaume I de Castellón. Entre las distintas técnicas de biosecado descritas en el apartado 1.2 se optó por la de los invernaderos. De este modo, el calor generado en la fermentación aerobia se suma al calor retenido por el invernadero (Figura 1).

4.1. Toma de muestras

Las muestras de residuos se recogieron de los contenedores donde se depositan los restos de poda de la Universidad previo aviso el mismo día de su generación. En función del residuo generado en ese periodo de tiempo se realizó una toma de muestra por cuarteo hasta obtener una cantidad de unos 50-60 kg. El residuo herbáceo y leñoso de gran tamaño (herbáceo de escarda, poda de árboles, hojas de palmera y caña seca) se trituró con una trituradora doméstica hasta un tamaño de partícula de 2,5 cm. En las experiencias donde se mezclaron dos o más tipos de residuos se homogeneizó el sustrato convenientemente mediante volteos.

Para determinar la humedad inicial del residuo se tomaron tres muestras representativas de cada invernadero de unos 100 g cada una recogidas en puntos distintos y se calentaron en estufa a 105°C hasta que no se observó pérdida de peso, según la norma UNE 32-002.

Figura 1: esquema de los invernaderos para el biosecado construidos a escala de laboratorio
(cotas en cm)



4.2 Descripción de las experiencias

Para la construcción de los invernaderos se aprovecharon palets de madera y se recubrieron con tela metálica. La estructura se elaboró con tubos de PVC de 1". En la parte inferior se instaló una rejilla perimetral de plástico para contener la masa de residuos en su interior. Toda la estructura, excepto los huecos del palet, se recubrió de un plástico film transparente. En la parte superior de uno de los laterales se practicó una abertura para la salida del aire caliente y húmedo. De este modo, se facilita el "efecto chimenea" ya que el aire que entra por los huecos del palet, atraviesa la masa de residuos y, una vez caliente, se evacua por la abertura superior (Figura 2). Una vez construidos los invernaderos se diseñaron las experiencias para desarrollar el biosecado de distintos tipos de residuos de jardinería.

Figura 2: invernaderos con el residuo antes de ser recubiertos por el film de plástico transparente.



- Primera experiencia: se realizó entre el 15 y el 30 de junio de 2010. La temperatura y humedad relativa medias del periodo fueron de 23°C (entre 15,7°C y 30,5°C) y 70% (entre 33 y 99%) respectivamente. La primera experiencia consistió en habilitar tres invernaderos con diferentes tipos de residuos (Tabla 1). En el primero se introdujo alrededor de 25 kg de residuo herbáceo, procedente de la escarda de las zonas verdes. En el segundo se mezcló al 50% residuo herbáceo similar al anterior con residuo leñoso+hojas, obtenido de la poda de árboles, sumando un total de alrededor de 33 kg. El tercer invernadero se llenó con unos 53 kg de césped segado. Se pretendía analizar la influencia de introducir un MT (residuo leñoso) en el tiempo de biosecado.
- Segunda experiencia: se realizó entre el 6 y el 28 de julio de 2010. La temperatura y humedad relativa medias del periodo fueron de 27,3°C (entre 23°C y 31,8°C) y 80,9% (entre 35 y 99%). En esta segunda experiencia se habilitaron tres invernaderos con diferentes mezclas de residuos (Tabla 1). En el primer caso se realizó una mezcla de unos 41 kg compuestos de un 25% de residuo herbáceo de escarda y un 75% de poda de ramas de morera (*Morus alba*). El segundo invernadero se llenó con 53,4 kg de una mezcla compuesta por un 15% de herbáceo de escarda, un 20% de hojas de palmera (*Phoenix dactylifera*) y un 65% de césped segado. El tercer invernadero se llenó con 55 kg de césped segado. Se quiso determinar la influencia de la heterogeneidad del sustrato en el tiempo del biosecado.
- Tercera experiencia: se realizó entre el 22 de septiembre y el 15 de octubre de 2010. La temperatura y humedad relativa medias del periodo fueron de 21,9°C (entre 15,9°C y 29,7°C) y 79,5% (entre 37 y 99%) respectivamente. En la tercera experiencia se habilitaron

dos estructuras con la misma mezcla de residuos: 40 kg de una mezcla compuesta por un 30% de herbáceo de escarda, hojas de palmera y caña seca (*Arundo donax*) en proporciones iguales y un 70% de césped segado (Tabla 1). La diferencia radicaba en que en uno de ellos se dejó a la intemperie, sin cubrir con film de plástico. El objetivo de esta experiencia fue estudiar el efecto invernadero en el tiempo de biosecado, o dicho de otra manera, observar la influencia de las condiciones climatológicas (temperatura y humedad ambiente, precipitaciones, etc.) sobre el biosecado.

Tabla 1: resumen de las tres experiencias realizadas

experiencia	Invernaderos	residuos	Peso (kg)
1ª experiencia	Invernadero 1	residuo herbáceo	25
	Invernadero 2	residuo herbáceo (50%) + residuos leñoso y hojas (50%)	33
	Invernadero 3	césped	53
2ª experiencia	Invernadero 1	residuo herbáceo (25%) + residuo leñoso y hojas (75%)	41
	Invernadero 2	residuo herbáceo (15%) + hojas de palmera (20%) + césped (65%)	53,4
	Invernadero 3	césped	55
3ª experiencia	Invernadero 1	[residuo herbáceo + hojas de palmera + caña seca] (30%)+ césped (70%)	40
	Invernadero 2 (sin cubrir)	[residuo herbáceo + hojas de palmera + caña seca] (30%)+ césped (70%)	40

4.3 Recogida de datos

Una vez que el residuo se había depositado, el invernadero se cubrió con un film de plástico transparente en el que se practicó una abertura para la salida del aire caliente y húmedo (Figura 1). A partir de entonces, diariamente se hacía tomas de muestras en las cuales se determinaban los parámetros necesarios.

La temperatura y humedad relativa ambientales se tomaron de datos proporcionados por la estación meteorológica de “Penyeta Roja” en Castellón, ubicada a unos 2 km de la universidad. Esta estación meteorológica ofrece datos horarios.

La medición de la temperatura y humedad relativa del aire dentro del invernadero se realizó mediante un termohigrómetro a las 12:00 h durante todos los días que duraron las experiencias. Además se instaló un *datalogger* en el interior de los invernaderos para medir las oscilaciones de estos parámetros entre el día y la noche.

La temperatura en el interior de la masa y la humedad de los residuos se realizó también a las 12:00 h, siendo cada dato mostrado de temperatura, el promedio de cinco tomas en distintos puntos, los cuales seguían dos diagonales entre la esquina superior izquierda y la esquina inferior derecha y viceversa. La humedad del sustrato se determinó mediante el dato promedio de tres tomas diarias de 100 g cada una en distintos puntos del invernadero. Estas muestras se secaban en estufa a 105°C siguiendo el procedimiento normalizado de la norma UNE 32-002.

El residuo seco se trituró en un molino de cuchillas hasta un tamaño de partícula en el que el 98,75% pasan por un tamiz de 2 mm. El residuo triturado de cada tres días se mezcló de forma homogénea y se determinó el poder calorífico mediante calorímetro isoperibólico (UNE 32 006:1995). El contenido en nitrógeno se analizó mediante el equipo de conductividad térmica (LECO FP-528®). Carbono y azufre se analizaron con equipo de espectrometría infrarroja (LECO SC 144 DR®) y el hidrógeno se determinó por espectrometría atómica de masas. Mediante las normas UNE 32-004-84 y UNE 32-019-84 se analizó también el contenido en cenizas y sólidos volátiles respectivamente de cada mezcla de residuos. Los datos mostrados han sido el promedio de cuatro análisis en todos los casos. Con estos datos se puede estimar las condiciones en las que se realizará la valorización energética. Con el poder calorífico inferior (PCI) del residuo se podrá prever el calor que se va a desprender, lo cual puede ser transformado en energía eléctrica. Con el contenido en sólidos volátiles, carbono, azufre y nitrógeno se podrán estimar las emisiones de gases contaminantes en el proceso de combustión (CO₂, NO₂ y SO₂) y determinará la necesidad o no de instalar sistemas de depuración de gases. Por último, el contenido en cenizas obtenido de las muestras estipulará el peso de residuos (escorias) que quedarán tras la incineración.

5. Discusión de resultados

En las tres experiencias realizadas, los resultados han sido razonablemente satisfactorios, ya que se ha conseguido disminuir la humedad de los residuos hasta un 90% en algún caso, incrementando su poder calorífico hasta en un 400%. Además, el secado se produce mediante dos energías sin coste como son la producida en la fermentación de los residuos y la generada por el sol.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada una de las experiencias descritas en la Tabla 1.

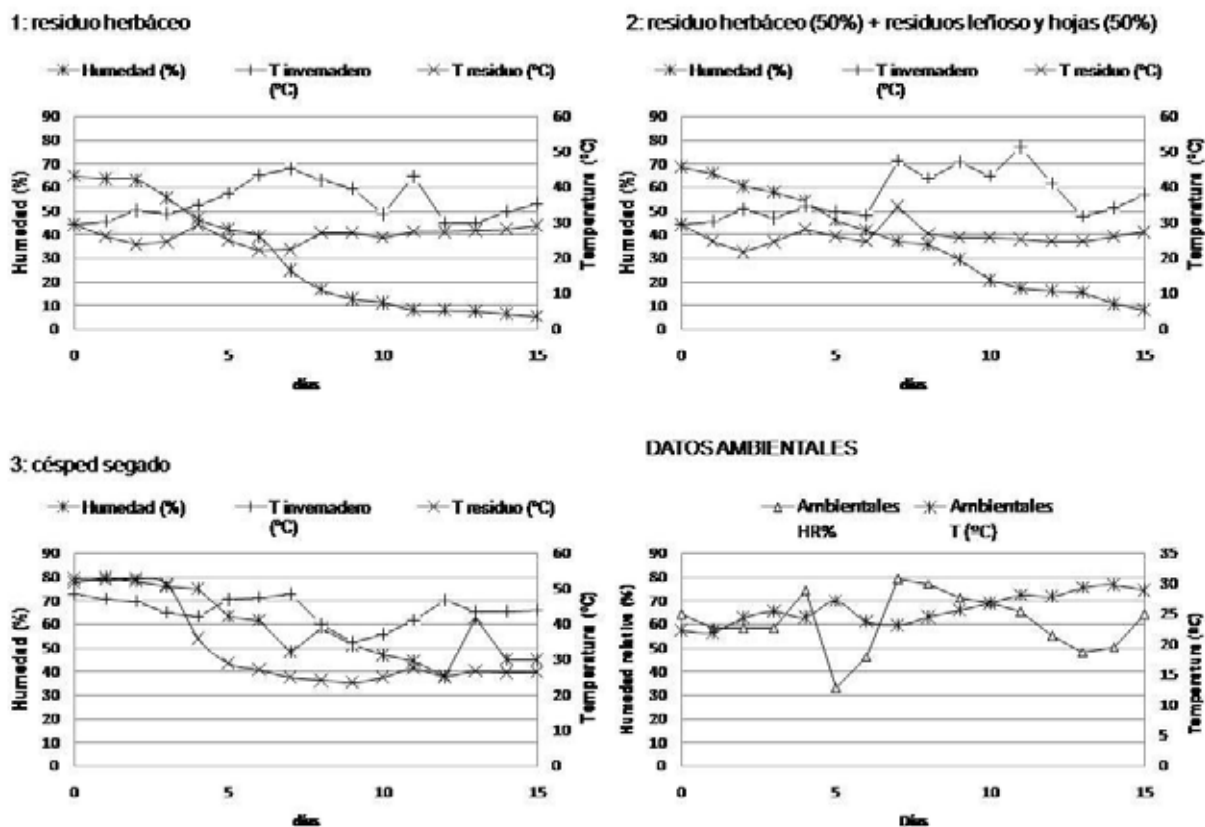
5.1. Primera experiencia

Los datos de humedad, temperatura del interior del invernadero y de temperatura de la masa de residuos se representan en la Figura 3. Se adjuntan también los valores de la temperatura y humedad relativa del ambiente exterior durante ese periodo de tiempo con valores tomados a las 12:00 h. Se realizó entre el 15 y el 30 de junio de 2010

Se observa que en los dos invernaderos con material texturizante (1 y 2) el descenso de humedad es mayor (alrededor de un 90%), mientras que en el que sólo tiene césped segado la humedad no desciende por debajo del 37% (un 51% de descenso de humedad). En el momento de interrumpir el proceso, se observó que en el invernadero 3 se habían formado apelmazamientos, los cuales no permitían el paso de aire a su través y por tanto, la pérdida de humedad se ralentizó, incluso parece que estos apelmazamientos tuvieron cierto poder higroscópico, ya que la humedad ascendió, quizá propiciado por un incremento de la humedad ambiente. Del mismo modo, la presencia de material texturizante facilita el paso del aire a

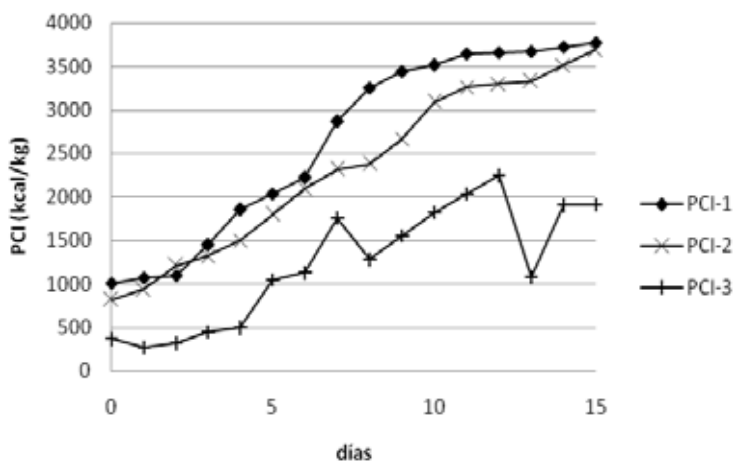
través de los residuos, por lo que controla el aumento de temperatura producido por la fermentación.

Figura 3: Datos de humedad y temperatura en los tres invernaderos de la primera experiencia



Por otro lado, se ha determinado también el PCI de las muestras. Como es lógico, a medida que va disminuyendo la humedad del residuo, va aumentando el PCI. En efecto, el incremento del PCI después de 16 días de biosecado llega a alcanzar en el invernadero 1 un 274% (de 1066,67 kcal/kg a 3773,80 kcal/kg), mientras que en el invernadero 2 el aumento llega a un 350% (de 820,09 kcal/kg a 3693,81 kcal/kg). Sin embargo, el invernadero 3 sólo con césped segado, pese a que ha sido el que menor descenso de humedad ha registrado, es el que mayor porcentaje de incremento del PCI ha tenido con respecto al residuo húmedo inicial, ya que este descenso ha llegado a un 419% (de 367,4 kcal/kg a 1911,58 kcal/kg). Esto es lógico en parte, ya que al tener una humedad inicial tan elevada, su PCI es muy bajo. Los datos de incremento del PCI pueden observarse en la Figura 4. Los datos del contenido en cenizas, sólidos volátiles, carbono, azufre y nitrógeno se pueden observar en la Tabla 2.

Figura 4: valores del PCI del residuo secado en cada uno de los invernaderos de la primera experiencia.



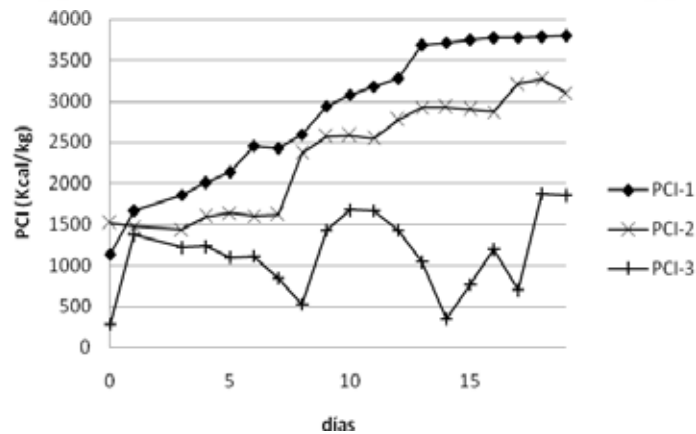
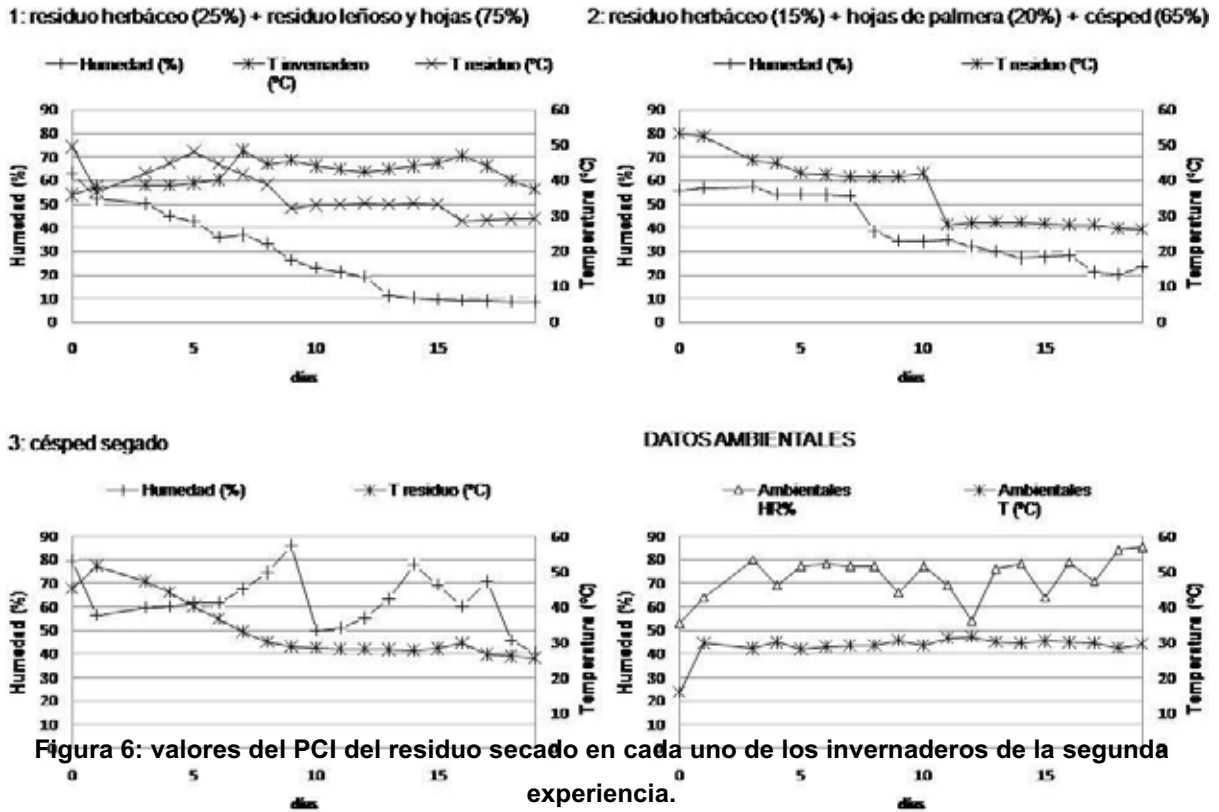
5.2. Segunda experiencia

Los datos de humedad, temperatura del interior del invernadero y de temperatura de la masa de residuos se representan en la Figura 5. Se adjuntan también los valores de la temperatura y humedad relativa del ambiente exterior durante ese periodo de tiempo con valores tomados a las 12:00 h. Se realizó entre el 6 y el 28 de julio de 2010.

Se observa que en los dos invernaderos con MT (1 y 2) el descenso de humedad es mayor (alrededor de un 86%) en el que cuenta con un mayor porcentaje de MT, mientras que en el que sólo tiene césped segado la humedad no desciende por debajo del 45% (un 42% de descenso de humedad). En el momento de interrumpir el proceso, se observó que en el invernadero 3, al igual que en la primera experiencia, se habían formado apelmazamientos, los cuales no permitían el paso de aire a su través y por tanto, la pérdida de humedad se ralentizó, incluso parece que estos apelmazamientos tuvieron cierto poder higroscópico, ya que la humedad ascendió, quizá propiciado por un incremento de la humedad ambiente.

Por otro lado, se ha determinado también el PCI de las muestras. El incremento del PCI después de 20 días de biosecado llega a alcanzar en el invernadero 1 un 234% (de 1133,28 kcal/kg a 3794,49 kcal/kg), mientras que en el invernadero 2 el aumento llega a un 104% (de 1514,87 kcal/kg a 3097,08 kcal/kg). Sin embargo, al igual que en la primera experiencia, el PCI del césped es porcentualmente el que más aumenta, llegando hasta un 552% (de 284,27 kcal/kg a 1854,96 kcal/kg). Los datos de incremento del PCI pueden observarse en la figura 6. Los datos del contenido en cenizas, sólidos volátiles, carbono, azufre y nitrógeno se pueden observar en la tabla 2.

Figura 5: Datos de humedad y temperatura en los tres invernaderos de la segunda experiencia



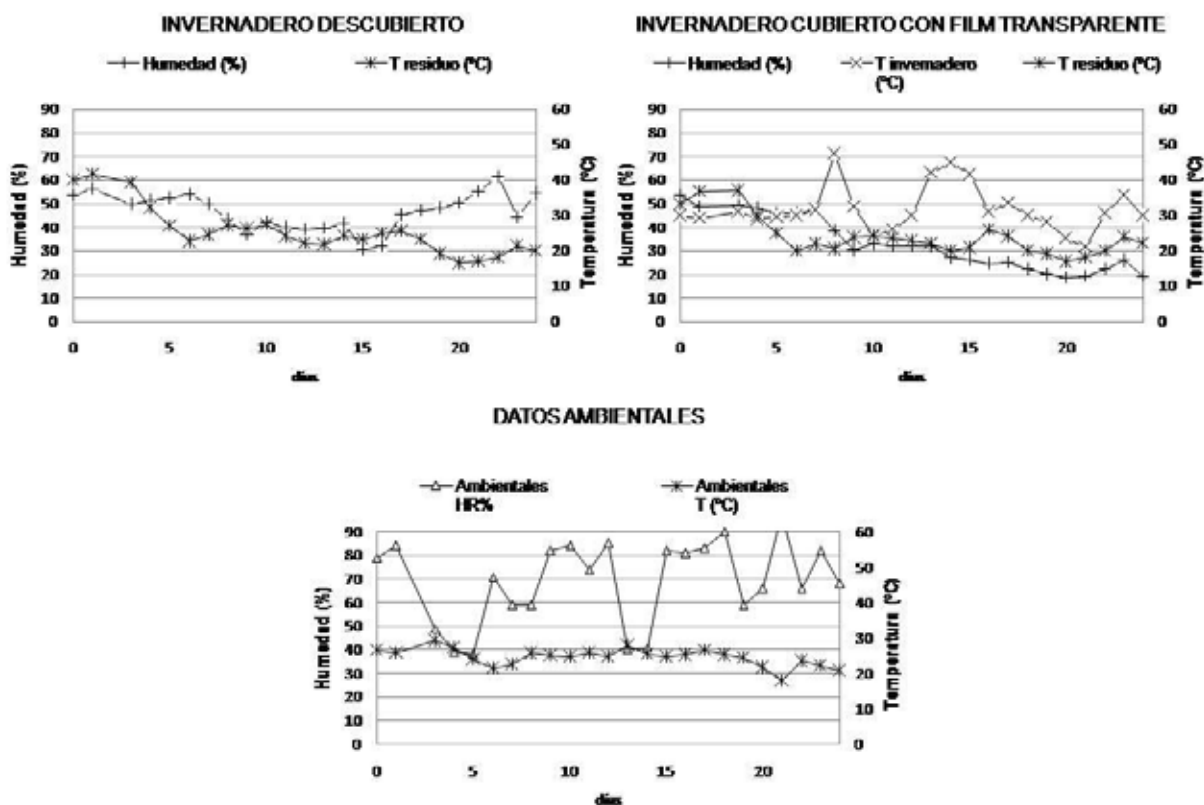
5.3. Tercera experiencia

En esta tercera experiencia se contrastan los datos recogidos de un invernadero con residuo y otro invernadero al que se le ha quitado el recubrimiento de film plástico transparente, siendo en ambos la misma mezcla de residuos (Tabla 1). Los datos de humedad, temperatura del interior del invernadero (en el caso cubierto) y de temperatura de la masa de residuos se representan

en la Figura 7. Se adjuntan también los valores de la temperatura y humedad relativa del ambiente exterior durante ese periodo de tiempo con valores tomados a las 12:00 h. Se realizó entre el 22 de septiembre y el 15 de octubre de 2010.

En este punto hay que destacar que el día 17 llovió, por lo que el residuo almacenado en el invernadero descubierto se mojó. Sin embargo, si se comparan los datos de los días sin lluvia, también se observa que el descenso de humedad es más importante en el invernadero cubierto (un 54% de descenso frente a un 40%). El dato final, después de 21 días es que el residuo del invernadero cubierto tuvo una humedad del 18,73% (64,85 de disminución) y el invernadero descubierto no bajó del 30,54% (un 42,70% de disminución el día 16). También se puede observar que la disminución de humedad en estas mezclas es menos que en las otras experiencias, lo cual es debido a la menor presencia de material texturizante, lo cual dificulta el paso del aire y, por tanto, el arrastre de la humedad.

Figura 7: Datos de humedad y temperatura en los dos invernaderos de la tercera experiencia [residuo herbáceo + hojas palmera + caña seca] (30%) + césped (70%)



Por otro lado, se ha determinado también el PCI de las muestras. El incremento del PCI después de 21 días de biosecado llega a alcanzar en el invernadero cubierto un 80% (de 1813,71 kcal/kg a 3269,29 kcal/kg). Evidentemente, en el invernadero descubierto, este

incremento es menor. Los datos del contenido en cenizas, sólidos volátiles, carbono, azufre y nitrógeno se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2: Datos analíticos del contenido en azufre, carbono, nitrógeno, cenizas y sólidos volátiles

experiencia	Residuos	S (%)	C (%)	N (%)	Cenizas (%)	Sólidos Volátiles (%)
1 ^a experiencia	residuo herbáceo (50%) + residuos leñoso y hojas (50%)	0,21	32,65	1,84	9,32	74,18
	residuo herbáceo	0,31	32,78	2,33	7,90	78,22
	Césped	0,45	29,39	3,52	13,85	81,33
2 ^a experiencia	residuo herbáceo (25%) + residuo leñoso y hojas (75%)	0,21	34,94	2,81	8,50	73,67
	residuo herbáceo (15%) + hojas de palmera (20%) + césped (65%)	0,30	33,15	2,20	9,21	83,09
	Césped	0,56	33,89	3,65	12,74	77,48
3 ^a experiencia	[residuo herbáceo + hojas de palmera + caña seca] (30%)+ césped (70%)	0,32	33,81	1,75	6,82	81,07

6. Viabilidad de la valorización energética

La reducción de peso en las experiencias realizadas ha llegado a alcanzar un 60%, fundamentalmente debido a la pérdida de humedad (Tabla 3). Como término medio se puede considerar un consumo de unas 750 kcal/kg de agua evaporada, lo que equivale a 0,87 kWh/kg de agua evaporada. Así pues, en caso de que la humedad del residuo hubiese sido eliminada mediante secado térmico, se habría requerido una cierta cantidad de energía. En la Tabla 3 se muestra los requerimientos energéticos para evaporar la cantidad equivalente de agua que se ha eliminado mediante biosecado. Sin embargo, cabe destacar en este punto que la humedad contenida en los residuos es, en su mayor parte, intracelular, por lo que la eliminación requeriría de un mayor aporte energético.

Se puede observar que, aunque los invernaderos con césped han sido los que han registrado una humedad final mayor, son los que han tenido un mayor rendimiento en cuanto al peso de agua evaporada por unidad de tiempo.

Por otro lado, como se ha podido observar en los epígrafes anteriores, el PCI de los residuos de jardinería secados por tratamiento biológico en invernadero suele ser bastante homogéneo (superando en todos los casos las 3.000 kcal/kg, con una humedad inferior al 20% excepto en los que tenían 100% de césped segado y llegando hasta las 3.800 kcal/kg). Además, los distintos resultados analíticos registrados por el calorímetro para cada tipo de residuo muestran

unos resultados con alta desviación típica, por lo que no se puede decir que la diferencia entre un tipo de residuo y otro sea estadísticamente significativa. Lo mismo ocurre con los datos del análisis elemental de la Tabla 2, los cuales tampoco se puede decir que exista una diferencia estadísticamente significativa entre ellos.

Así pues, la valorización energética de estos residuos de jardinería es viable ya que su PCI es superior al recomendado por las plantas incineradoras ($PCI > 2.000 \text{ kcal/kg}$) y el nivel de S, C y N es lo suficientemente bajo como para no dar problemas de contaminación atmosférica. Por otro lado, el contenido en cenizas del residuo final es lo suficientemente bajo como para no tener un volumen importante de cenizas después de la valorización energética.

De este modo, el residuo una vez seco mediante biosecado, podría pelletizarse y transportarse hasta la planta de valorización energética con una disminución de peso que, en algunos casos alcanza el 60% y de volumen en torno al 50% con respecto al residuo antes de biosecar.

Tabla 3: Cálculo matemático de la energía necesaria para evaporar el agua que se ha eliminado en el biosecado

experiencia	residuos	Peso (kg)	Agua evaporada (kg)	kWh necesarios	kWh/día	% pérdida de peso
1ª experiencia	residuo herbáceo	25	15,7	13,7	0,9	37,2
	residuo herbáceo (50%) + residuos leñoso y hojas (50%)	33	20,5	17,8	1,1	37,9
	césped	53	40,1	34,9	2,2	24,4
2ª experiencia	residuo herbáceo (25%) + residuo leñoso y hojas (75%)	41	24,3	21,2	1,1	40,6
	residuo herbáceo (15%) + hojas de palmera (20%) + césped (65%)	53,4	22,4	19,5	1,0	60,0
	césped	55	36,0	31,3	1,6	34,5
3ª experiencia	[residuo herbáceo + hojas de palmera + caña seca] (30%)+ césped (70%)	40	16,9	14,7	0,6	57,8

7. Conclusiones

El presente trabajo se ha realizado con residuos procedentes de la zona ajardinada de la Universidad Jaime I de Castellón. El objetivo consistía en secar estos residuos mediante un tratamiento biológico en el cual el calor generado por la fermentación aerobia evapora el agua contenida en los residuos. Además, al haber realizado el biosecado en un invernadero, al calor de la fermentación se le suma el calor aportado por el sol.

Se han conseguido reducciones de la humedad de hasta el 90% y tasas de evaporación de agua de hasta 4 kg de agua/100 kg de residuo-día. Esto equivale a decir que en 15 días se

podría disminuir la humedad de un residuo de este tipo hasta valores aptos para su valorización energética, ya que el PCI después de estos 15 días es superior a las 3000 kcal/kg. Con estos datos se consigue un ahorro energético de más de 0,87 kWh/kg de agua evaporada con un coste nulo. Una vez seco, el residuo podría utilizarse como combustible una vez pelletizado o valorizarse energéticamente en una planta de incineración, minimizando los costes de transporte por su disminución en humedad y peso.

Así pues, el biosecado se presenta como una alternativa de tratamiento de los residuos biodegradables con un mínimo coste energético, aun en zonas costeras con una humedad relativa tan alta como la de Castellón. Sin embargo, a nivel industrial sería necesario contar con una superficie suficiente como para instalar los invernaderos. De este modo, este tratamiento físico-biológico sería viable en zonas con espacio disponible.

8. Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España por la financiación concedida mediante el proyecto ACI2009-0993 en la modalidad Convocatoria de Ayudas del Programa Nacional de Internacionalización de la I+D. Subprograma de Fomento de la Cooperación Científica Internacional (ACI-PROMOCIONA).

También se agradece a la técnico de laboratorio, D^a Sara Romero Sales su ayuda inestimable y desinteresada colaboración en la parte empírica de este trabajo de investigación.

9. Referencias

- Baèta-Hall, L., Céu, M., Lourdes, M., Anselmo, A. & Fernanda, M. (2005) Biodegradación of olive oil husk in composting aerated piles, *Bioresource Technology*, 96, pp. 69-78.
- Bailey, J.E. & Ollis, D.F. (1986) *Biochemical Engineering Fundamentals*. New York, NY: Mc Graw-Hill. International Editions Inc.
- BREF, (2006) Resumen del documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en el sector de incineración de residuos/ IPTS (The Institute for Prospective Technological Studies).
- Chang, J.I. & Chen Y.J. (2010) Effects of bulking agents on food waste composting. *Bioresource Technology*, 101, pp. 5917-5924.
- Choi, H.L., Richard, T.L. & Anh, H.K. (2001) Composting high moisture materials: biodrying poultry manure in a sequentially fed reactor. *Compost Science and Utilization*, 9 (4), pp. 303-311.
- Larsen, K.L. & McCartney, D.M. (2000) Effect of C/N ratio on microbial activity and N retention. *Compost Science and Utilization*, 8 (2), pp. 147-159.
- Liang, C., Das, K.C. & McClendon, R.W. (2003) The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, 86 (2), pp. 131-137.
- Madejón, E., Galli, E. & Tomati, U. (1998) Composting of wastes produced by low water consuming olive-mill technology. *Agrochimica*, 42, pp. 3-4.
- Madigan M.T. and Martinko J.M. (2006) *Brock Biology of Microorganisms*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

- Mujumdar, A.S. (2007) Handbook of Industrial Drying CRC Press Boca Raton, FL, USA: Taylor and Francis.
- Nakasaki, K., Aoki, N. & Kubota, H. (1994) Accelerated composting of grass clippings by controlling moisture level. *Waste Management & Research*, 12 (1), pp. 13-20.
- Navaee-Aedeh, S., Bertrand, F. & Stuart, P.R. (2006) Emerging biodrying technology for the drying of pulp and paper mixed sludges. *Drying Technology*, 24, pp. 863-876.
- Norma UNE 32-002 Combustibles minerales sólidos. Determinación de la humedad de la muestra para análisis.
- Norma UNE 32-004-84. Combustibles minerales sólidos. Determinación de cenizas
- Norma UNE 32-006. Combustibles minerales sólidos. Poder calorífico mediante determinación en calorímetro automático.
- Norma UNE 32-019-84 Combustibles minerales sólidos. Determinación del contenido en materias volátiles.
- PIR, Plan Integral de Residuos 2010: DOCV/Generalitat Valenciana. Consejería de medio ambiente, agua, urbanismos y vivienda. 2010.
- Prescott, L.M., Harley, J.P. & Klein, D.A. (1993) Microbiology. Dubuque, Iowa: W.C. Communications Inc.
- Robles, F., Ramírez, I., Piña, A.B. & Colomer, F.J. (2010) Efecto de la adición de agentes estructurantes a residuos hortícolas en tratamientos aeróbicos, *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 2 (1), pp. 45-51.
- Roy, G., Jasmin, S. & Stuart, P.R. (2006) Technical modelling of a bath biodrying reactor for pulp and paper mil sludge. In: 17th CHISA International Congress of Chemical and Process Engineering. Prague, Czech Republic.
- Sugni, M., Calcaterra, E. & Adani, F. (2005) Biostabilization-biodrying of municipal solid waste by inverting airflow. *Bioresource Technology*, 96, pp. 1331-1337.
- Velis, C.A., Longhurst, P.J., Drew, G.H., Smith, R. & Pollard, S.T.J. (2009) Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. *Bioresource Technology*, 100, pp. 2747-2761.
- Yañez, R., Alonso, J.L. & Díaz, M.J. (2009) Influence of bulking agent on sewage sludge composting process. *Bioresource Technology*, 100, pp. 5827-5833.
- Zhang, D., He, P., Shao, L., Jin, T. & Han, J. (2008) Biodrying of municipal solid waste with high water content by combined hydrolytic-aerobic technology. *Journal of Environmental Sciences*, 20, pp. 1534-1540.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Francisco J. Colomer Mendoza
Depto. Ingeniería Mecánica y Construcción
Universidad Jaume I
Avda. Vicent Sos Baynat s/n, 12071 Castellón, España
Phone: +34964728111
Fax: +34964728106
E-mail : fcolomer@emc.uji.es
URL : www.ingres.uji.es www.redisa.uji.es