

(04-009) - BIBLIOGRAPHIC REVIEW OF ADVANCES IN THE BIODRYING TECHNOLOGIES OF THE COMPOSTING PLANTS REJECTS OF MUNICIPAL SOLID WASTE

Bar, Madalina Alexandra ¹; Gallardo Izquierdo, Antonio ¹

¹ Universitat Jaume I

The heterogeneity of the materials in the composition of the urban solid waste is high and with high humidity, hindering the recovery of materials and consequently giving high percentages of rejects in all waste treatment plants. These rejects can be converted into solid recovered fuel, and for this is necessary to lower the humidity as much as possible, having the biodrying as an easy and economical technique. This technique consists in an aerobic fermentation that is carried out through the biological activity of microorganisms to reduce the moisture of the waste that has a fraction of biodegradable material. A methodology for searching scientific documents in databases has been designed and this methodology has been used to carry out a bibliography review with the aim of publicizing the progress of biodrying in recent years. The scarce bibliography found and focused on biodrying is constituted by the study of the technologies and variables of this process. In this work the main results obtained are presented.

Keywords: biodrying; municipal solid waste; refused derived fuel; composting; biowaste.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LOS AVANCES EN LAS TECNOLOGÍAS DE BIOSECADO DEL RECHAZO PROCEDENTE DE PLANTAS DE COMPOSTAJE DE RSU

La heterogeneidad de los materiales en la composición de los residuos sólidos urbanos es alta y con una elevada humedad, dificultando la recuperación de materiales y en consecuencia dando elevados porcentajes de rechazos en todas las plantas de tratamiento de residuos. Estos rechazos se pueden convertir en combustible sólido recuperado, para lo cual es necesario reducir su humedad lo máximo posible y para ello, una técnica sencilla y económica es el biosecado. Este consiste en una fermentación aerobia que se realiza mediante la actividad biológica de microorganismos para disminuir la humedad de los residuos que tengan una fracción de material biodegradable. Se ha diseñado una metodología de búsqueda de documentos científicos en bases de datos y se ha usado esta metodología para realizar una revisión bibliografía con el objetivo de dar a conocer el avance del biosecado en los últimos años. La escasa bibliografía encontrada y enfocada al biosecado está constituida por el estudio de las tecnologías y variables de este proceso. En este trabajo se presentan los principales resultados obtenidos.

Palabras clave: biosecado; residuo sólido urbano; combustible sólido recuperado; compostaje; biorresiduo

Correspondencia: Antonio Gallardo Izquierdo; gallardo@uji.es

Agradecimientos: Al Proyecto TED2021-131142B-I00 de investigación financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR y titulado "Aplicación del biosecado en la elaboración de combustible sólido recuperado procedente de plantas de compostaje de residuos sólidos urbanos" y al Proyecto UJI-B2022-25 de investigación financiado por la Universitat Jaume I y titulado "Aplicación del biosecado en la fabricación de combustible sólido recuperado procedente de plantas de compostaje de residuos sólidos urbanos".



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

En 2016 se generaron en el mundo aproximadamente 2,01 mil millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) (Kaza et al., 2018). El 44% de estos residuos correspondieron a la comida y los residuos vegetales (Kaza et al., 2018). También se ha estimado que se generarán globalmente 2,59 mil millones de toneladas de residuos sólidos urbanos para 2030 y 3,40 mil millones de toneladas para 2050 (Kaza et al., 2018). Los RSU tienen un grado de heterogeneidad alta y un elevado grado de humedad (Akademia Baru et al., 2015), dificultando la recuperación de materiales y en consecuencia dando elevados porcentajes de rechazos en todas las plantas de tratamiento. En España, en 2021, el 49,9% de los residuos peligrosos y no peligrosos generados tuvieron como tratamiento el reciclado, seguido del vertido (41,1%), del relleno (4,8%) y por último de la incineración (3,9 %) (Instituto Nacional de Estadística, 2023).

Las tecnologías de tratamiento de la fracción biodegradable de los RSU (biorresiduos) actuales son el compostaje, la biometanización, la incineración y otras tecnologías como la pirólisis o la conversión a etanol (Bao et al., 2023); el depósito en vertedero es la tecnología de gestión a la que se recurre si el residuo no se puede tratar mediante las demás tecnologías. Sin embargo, las técnicas como el depósito a vertedero o la incineración no han tenido un impacto positivo sobre el medio ambiente además de que no compensan económicamente (Cho et al., 2020; Y. Ma & Liu, 2019); y es por ello por lo que la mejora en la eficiencia del tratamiento y recuperación de los RSU es importante para proteger el medio ambiente y las personas, para conservar los recursos y para el desarrollo económico (Chilakamarry et al., 2022).

Gallardo Izquierdo et al. (2014) indicaron que las plantas mecánico-biológicas de tratamiento de residuos ubicadas en España generan rechazos cuyo destino es el vertedero. Estos rechazos están formados principalmente por materiales combustibles, útiles para su transformación en combustibles sólidos recuperados (CSR), aprovechándolos energéticamente. Este rechazo representa el 48% respecto al total que ingresa en vertedero. El rechazo en la salida, respecto a la cantidad entrada en las plantas, se sitúa en un 73% en las plantas de recuperación y compostaje y un 31% en las plantas de compostaje de la fracción orgánica recogida separadamente. Muzaber et al. (2023) analizaron la composición de los rechazos procedentes de las plantas mecánico-biológicas españolas siguiendo los estándares de calidad europeos, donde se observó que la humedad de las corrientes es demasiado elevada para algunos de estos estándares; por tanto, esto crea la necesidad de reducir esta humedad para poder transformar estos rechazos en CSR y una forma de reducir esta humedad es mediante el biosecado.

El biosecado es un proceso de fermentación aerobia que se realiza mediante la actividad biológica de microorganismos (bacterias y hongos) para disminuir la humedad de los residuos biodegradables (Sadaka et al., 2010). Es decir, el biosecado utiliza la autogeneración de calor causada por los microorganismos para el secado en vez de otros tipos que utilizan fuentes convencionales (Tom et al., 2016). Por tanto, esta es una tecnología atractiva para el secado de todo tipo de biorresiduos con un contenido indeseado de humedad que dificulta su valorización.

El objetivo de este trabajo es realizar una revisión bibliográfica exhaustiva sobre las tecnologías actuales de biosecado de biorresiduos y las variables más importantes que gobiernan el proceso. Para ello se ha diseñado una metodología de búsqueda en bases de datos para dar a conocer el avance internacional de esta tecnología en los diferentes campos de estudio relacionados con los residuos.

2. Metodología

Para la consecución de dicho objetivo se ha propuesto la siguiente metodología:

- 1.- Determinar las bases de datos internacionales de mayor impacto donde se publican artículos relacionados con el biosecado.
- 2.- Definir un conjunto de palabras clave.
- 3.- Establecer las posibles combinaciones de las palabras clave y realizar la búsqueda.
- 4.- Priorizar aquellos artículos que más se aproximan al tema de estudio.
- 5.- Analizar los resultados (relevancia del tema, tecnologías existentes y variables influyentes en el proceso).
- 6.- Establecer las principales conclusiones.

2.1 Bases de datos elegidas

Se ha realizado una búsqueda de las bases de datos que contienen documentos científicos relacionados con la ingeniería de residuos. Se han encontrado las siguientes bases de datos: IEE Xplore, Scopus, Web of Science, Science Direct, PubMed, JSTOR, ERIC y Directory of Open Access Journals. Se ha obtenido que las bases más completas son: Scopus, Web of Science y Science Direct. Se ha elegido Scopus frente a las otras bases de datos porque algunas de estas bases contienen documentos especializados que no estaban relacionados directamente con la ingeniería de residuos, porque están focalizadas en una zona geográfica determinada o porque la cantidad de documentos científicos era muy inferior. Scopus puede ayudar a cumplir el objetivo de este trabajo ya que es considerada la mayor base de datos, abarcando más de 16.000 revistas científicas.

Durante las diferentes búsquedas en Scopus se ha observado que algunos autores de documentos científicos relacionados con las palabras clave son de origen español e iberoamericano. Es por ello por lo que se ha decidido buscar las bases de datos más relevantes en esta zona geográfica. Las bases de datos más importantes encontradas han sido, Dialnet, CSIC y Latindex. Se ha elegido el portal Dialnet porque es considerada una de las bases de datos más grandes y con mayor variedad de literatura científica en español.

2.2 Palabras clave y posibles combinaciones

La revisión bibliográfica se ha realizado usando las palabras clave y diferentes combinaciones de estas. Las establecidas y utilizadas han sido: “municipal solid waste”, “biodrying”, “composting”, “biodegradable waste”, “biowaste” y “solid recovered fuel”; las combinaciones realizadas han sido las siguientes:

1. “Biodegradable waste” y “composting”
2. “Biowaste” y “composting”
3. “Biodrying” y “biodegradable waste”
4. “Biodrying” y “biowaste”
5. “Biodrying” y “solid recovered fuel”
6. “Biodrying” y “municipal solid waste”
7. “Biodrying” y “municipal solid waste” y “composting”
8. “Municipal solid waste” y “composting”
9. “Municipal solid waste” y “biodegradable waste”
10. “Municipal solid waste” y “biowaste”
11. “Solid recovered fuel” y “biodegradable waste”
12. “Solid recovered fuel” y “biowaste”

Los biorresiduos en inglés se pueden denominar como “biodegradable waste” o “biowaste”, pero lo más común es usar la palabra “biowaste”; por ello, estas dos palabras han sido consideradas por separado en la búsqueda.

2.3 Priorización de los artículos

La selección de los documentos científicos encontrados, para su revisión, se ha realizado mediante la siguiente priorización de temas:

1. Estudio sobre el biosecado
2. Estudio sobre los biorresiduos
3. Estudio sobre el combustible sólido recuperado
4. Estudio sobre el compostaje
5. Estudio sobre los residuos sólidos urbanos

3. Resultados

3.1 Análisis de resultados

Relevancia del tema a nivel internacional

El número de resultados encontrados en Scopus y Dialnet para las palabras clave elegidas se muestran en la **Tabla 1**. En Scopus se han filtrado los resultados considerando el periodo comprendido entre 2010 y 2023 para poder utilizar la información más actualizada. Las búsquedas en Dialnet se han realizado usando las mismas combinaciones de palabras clave, pero traducidas al español y sin filtrar por años ya que el buscador de esta base de datos no lo permite.

La **Tabla 1** refleja la importancia de la investigación en el campo de los residuos sólidos urbanos y del compostaje mediante un gran número de resultados en la base de datos. Esta importancia también se ve reflejada en la base de datos de Dialnet, ya que el número de resultados obtenido también es el mayor frente a las otras palabras clave.

El campo con menos resultados obtenidos en las dos bases de datos ha sido el del biosecado, demostrando así la menor investigación realizada en el periodo seleccionado.

Tabla 1. Número de resultados en Scopus usando las palabras clave en el periodo 2010-2023.

Palabra clave	Nº resultados búsqueda	
	SCOPUS	DIALNET
Municipal solid waste	25.589	1.630
Biodrying	193	8
Composting	19.920	1.078
Biodegradable waste	11.071	469
Biowaste	3.375	72
Solid recovered fuel	1.175	115

La **Tabla 2** presenta las diferentes combinaciones y número de resultados encontrados en Scopus y Dialnet. Refleja un resultado similar respecto al campo más estudiado ya que las mayores cifras obtenidas están relacionadas con el conjunto de palabras “residuos sólidos urbanos” y “compostaje” de ambas bases de datos. Sin embargo, en este caso los conjuntos de palabras situados en la cola son los relacionados con el biosecado y combustible sólido recuperado.

Tabla 2. Número de resultados en Scopus usando las combinaciones de las palabras clave en el periodo 2010-2023.

Combinación de palabras	Nº resultados búsqueda	
	SCOPUS	DIALNET
Biodegradable waste and composting	810	58
Biowaste and composting	385	35
Biodrying and biodegradable waste	9	1
Biodrying and biowaste	6	1
Biodrying and solid recovered fuel	9	-
Biodrying and municipal solid waste	74	-
Biodrying and municipal solid waste and composting	12	-
Municipal solid waste and composting	2.283	93
Municipal solid waste and biodegradable waste	866	64
Municipal solid waste and biowaste	318	9
Solid recovered fuel and biodegradable waste	22	1
Solid recovered fuel and biowaste	12	1

En la **Figura 1** se puede ver la evolución de artículos publicados desde el 2010 al 2023 en Scopus. En este gráfico no se han incluido las búsquedas con un número inferior a 50 resultados ya que, comparadas con las demás, no se han considerado relevantes en la evolución. Se observa una tendencia positiva en los estudios relacionados con el conjunto de palabras “compostaje” y “residuos sólidos urbanos” y con el conjunto de palabras “compostaje” y “biorresiduos”. Por su parte, los conjuntos de palabras “residuos sólidos urbanos” y “biosecado” muestran la menor evolución respecto a los documentos científicos publicados en la última década ya que la línea de tendencia en estos casos se mantiene prácticamente horizontal.

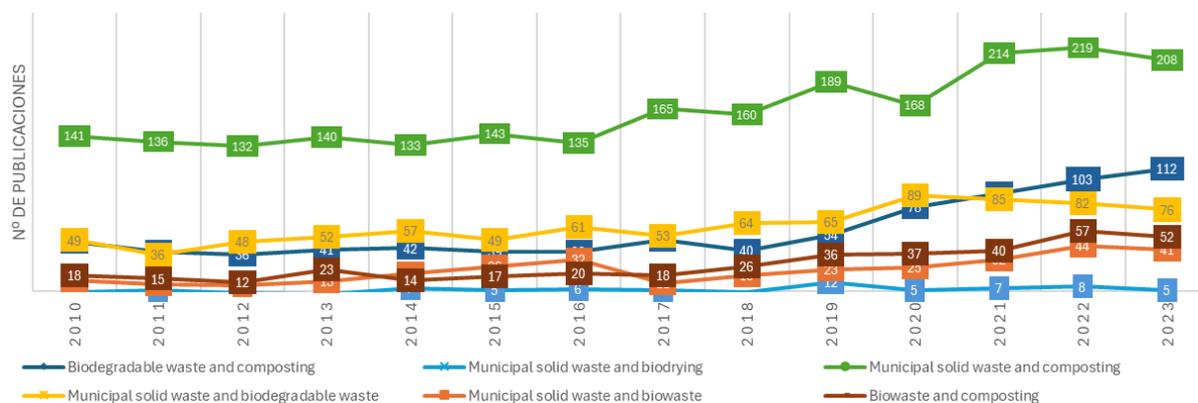


Figura 1. Evolución de los estudios específicos en Scopus en el periodo 2010-2023.

En la **Figura 2** se puede ver la evolución de artículos publicados desde el 2010 al 2023 correspondientes a las búsquedas usando las palabras clave. Se observa una tendencia positiva y similar en los temas sobre los residuos sólidos urbanos, compostaje y biorresiduos, con un aumento considerable anual de estos documentos científicos publicados a partir del 2017. Por otra parte, la evolución de los temas relacionados con el combustible sólido recuperado o con el biosecado ha sido más lenta.



Figura 2. Evolución de los estudios en Scopus en el periodo 2010-2023.

Tecnologías existentes de tratamiento de biosecado

Una vez visto el número de publicaciones sobre el biosecado de residuos sólidos urbanos y de biorresiduos, se ha hecho un trabajo de revisión de las tecnologías utilizadas en aquellos artículos relacionados con las palabras clave, revisando el título y el *abstract* y se han elegido aquellos que más relación tiene con el biosecado. No se han revisado las palabras clave sin agruparlas en conjuntos porque el número de resultados obtenidos ha sido demasiado elevado.

Los residuos a los que se les ha aplicado el biosecado se resumen en la **Figura 3**, mostrando así la versatilidad de la tecnología y su posible aplicación a otros tipos de residuos.

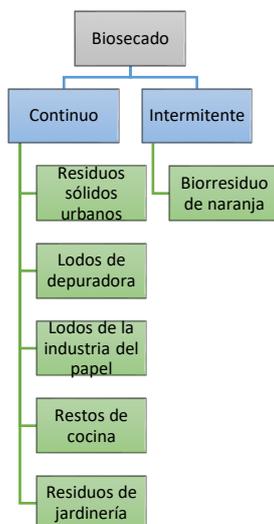


Figura 3. Tecnologías de biosecado.

Hay estudios enfocados al biosecado de todo tipo de residuos. Tom et al. (2016) han diseñado un reactor para el biosecado de residuos sólidos urbanos con un alto grado de humedad; este reactor tiene la parte inferior de fibra recubierta de lana con una bandeja para recoger lixiviado, llevando a cabo el biosecado sin lixiviado; Maia et al. (2023) ha estudiado el biosecado intermitente aplicado a los biorresiduos de naranja. Otro estudio realizado por Zaman et al. (2023) se ha enfocado en el uso de un flujo de aire caliente para transformar los RSU en CSR, con la particularidad de componer el reactor con ladrillos estancos, cumpliendo con la función de retener el calor.

Se ha estudiado el modelado matemático para el biosecado de RSU (Lawrance et al., 2022) con el objetivo de aplicar la cinética de la degradación, absorción y evaporación junto a los

balances de masa en el biosecado de RSU con una heterogeneidad alta. Villegas & Huiliñir (2014) también han trabajado en desarrollos teóricos relacionados con el biosecado, mediante el desarrollo de una ecuación cinética que describe la biodegradación de los sólidos volátiles durante el biosecado de lodos secundarios procedentes de una estación de depuración de aguas residuales de una industria papelera, usando bibliografía estudiada sobre el comportamiento de estos sólidos volátiles durante el compostaje.

En los últimos años se ha estudiado el biosecado con otros tipos de residuo como bien puede ser los restos de comida o los restos de jardinería. Li et al. (2022) han estudiado el biosecado de restos de comida usando un flujo de aire caliente, obtenido unos resultados satisfactorios respecto a la reducción de agua en el periodo de tiempo estimado. El flujo de aire utilizado en el experimento que se obtuvo la mayor pérdida de agua (37,45%) se introdujo a una temperatura de 65°C. Colomer-Mendoza et al. (2012) han realizado un estudio sobre el biosecado de residuos de jardinería y poda con el objetivo de disminuir su humedad. Para ello, usaron un invernadero que permitió completar el biosecado y disminuir la humedad sin el uso de fuentes externas de energía, ya que, gracias a la biodegradación, al sol y a la aireación creada mediante el “efecto chimenea” ha permitido obtener una disminución de la humedad del 87,8%.

Variables que determinan el biosecado

El trabajo de revisión de las variables que determinan el biosecado se ha realizado como en el caso anterior: se ha revisado el título y el *abstract* y se han elegido aquellos artículos que tenían relación con las variables más importantes del proceso. En este caso tampoco se han revisado las palabras clave sin agruparlas en conjuntos porque el número de resultados obtenidos ha sido demasiado elevado. Las variables que intervienen en el biosecado se resumen en la **Figura 4**.

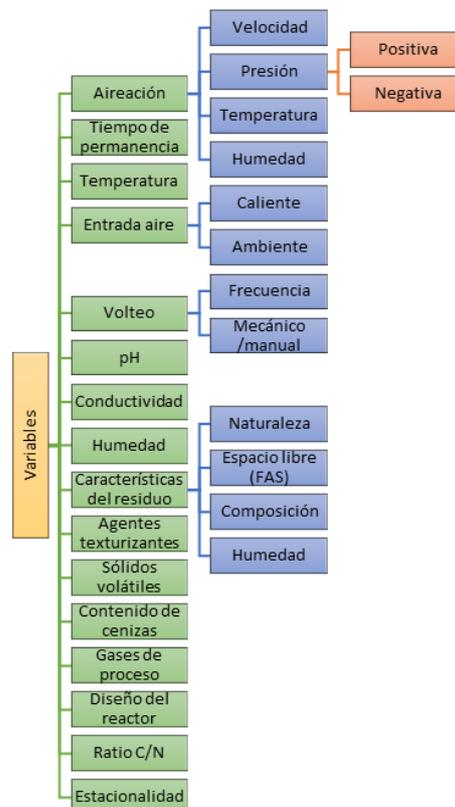


Figura 4. Variables del proceso de biosecado

La variación de la temperatura del proceso durante el biosecado se puede dividir en tres etapas: la etapa termofílica (entre los 45 y 55 °C), la etapa con temperatura moderada (entre los 40 y 45 °C) y la etapa de enfriamiento (inferior a los 30°C) (Zhao et al., 2010). Ghosh et al. (2018) también menciona la etapa termofílica, situada entre los 30 y 35°C.

El tiempo de permanencia en el reactor para la eliminación del 90% del agua se sitúa durante los días 14-16 y si se aumenta el flujo de aire, en el día 12 (Yuan et al., 2018). Sin embargo, otro estudio considera que el biosecado finaliza cuando la temperatura del interior de la pila es igual a la de la superficie (Robles-Martínez et al., 2010).

Cai et al. (2016) determinaron que el volteo mecánico es más adecuado porque permite controlar la temperatura; por otra parte, Zhao et al. (2010) determinaron que la frecuencia de volteo permite una mayor eliminación del agua si se realiza cada dos días en vez de cada cuatro días.

La utilización de agentes texturizantes facilita la presencia de espacios libres en las partículas del residuo, aumentando su porosidad, ya que, a causa de la humedad, estas partículas tienden a compactarse y por tanto no es posible que el aire se mueva a través del residuo, dando lugar a una inhibición de la descomposición aerobia. Algunos agentes texturizantes usados son la paja de trigo (Song et al., 2017; Zhao et al., 2011), el salvado y las cáscaras de arroz (Chang & Chen, 2010), las mazorcas de maíz (Song et al., 2017), el aserrín (Chang & Chen, 2010; Song et al., 2017; Zhao et al., 2011), las astillas de madera (Iqbal et al., 2010), los residuos de poda (Colomer-Mendoza et al., 2012) y el caucho triturado (Liggins et al., 1986). Vásquez et al. (2022) llegaron a la conclusión de que la cáscara blanda y dura de coco, la cascarilla de avena, las hojas y tallos de las mandarinas y el bagazo de las cañas de azúcar también serían unos buenos agentes texturizantes. También se ha estudiado el uso de producto biosecado para que actúe como agente texturizante (Cai et al., 2018). El producto biosecado usado como agente texturizante permite acelerar el proceso biológico (Yu et al., 2023) y, por tanto, mejorar la población bacteriana que conlleva a una aceleración de la degradación de los sólidos volátiles y la eliminación de agua (D. Q. Zhang et al., 2009).

El flujo de aire es una variable muy importante en el biosecado ya que permite suministrar oxígeno a los microorganismos, distribuir el calor generado en la pila y extraer el vapor de agua y CO₂ producidos (Muzaber et al. 2023). A continuación, se muestran varios estudios sobre el tiempo, la velocidad, la presión, la temperatura y la humedad de la aireación durante el biosecado:

- El tiempo de aireación usado durante el biosecado influye en el resultado del proceso. Ab Jalil et al. (2016) han demostrado un periodo mayor de tiempo suministrando aire no se traduce en la obtención de un biosecado óptimo, ya que si se utiliza una aireación prolongada se pueden crear desequilibrios en la actividad biológica y si se utiliza una aireación demasiado corta no se elimina la cantidad suficiente de humedad.
- El biosecado bajo diferentes tipos de ventilación fue estudiado por Shao et al. (2012) obteniendo el mejor índice de biosecado bajo la ventilación continua con presión negativa.
- Por su parte, Muzaber et al. (2023) indican que la temperatura y humedad de entrada del aire puede verse afectada por las condiciones climatológicas del lugar donde se realiza el secado y por tanto hay que tenerlas en cuenta a la hora de realizar el biosecado.
- Maia et al. (2023) han estudiado el biosecado en biorresiduos de naranja variando el valor del flujo de aire introducido en el proceso, obteniendo una mejora en el transporte de agua.

A lo largo de los últimos años también ha aumentado el desarrollo de estudios enfocados en los microorganismos que intervienen en el biosecado. J. Zhang et al. (2015) usaron el biosecado de lodos de depuradora para estudiar la interacción entre la comunidad de

microorganismos y la materia orgánica disuelta, considerada como la fracción orgánica activa principal que los microorganismos pueden usar con más facilidad (Said-Pullicino & Gigliotti, 2007), obteniendo que la degradación de la fracción orgánica activa se da en la fase termofílica, fase en la que el microorganismo *Ureibacillus* fue el más presente. Esto viene directamente relacionado con que en esta etapa termofílica se encuentra la mayor actividad biológica (Ahmad & Sur, 2023) y, en consecuencia, la mayor parte de la disminución de humedad.

Por su parte, Xin et al. (2022) han dado un paso más allá, dando importancia a la degradación de los componentes bioquímicos del residuo a secar, que en este caso fueron restos de comida de cocina, mediante el estudio de la degradación de los componentes bioquímicos y la evaluación de la contribución de estos componentes al biosecado; los autores llegaron a la conclusión de que la mayor contribución al calor autogenerado y la mayor degradación se dio en los carbohidratos.

Las variables que se pueden asociar a los microorganismos, ya que en función de ellos habrá más o menos actividad biológica son (Hao & Jahng, 2019; Sutthasil et al., 2023; Xin et al., 2023; Muzaber, et al. 2023; Wang et al., 2020): Contenido de sólidos volátiles, Ratio C/N, pH y Conductividad.

Otras variables que intervienen en el biosecado son:

- Contenido de cenizas: indica la cantidad de material inerte presente en el proceso; un menor contenido de cenizas se traduce en un mejor proceso de biosecado ya que los materiales inertes afectan la generación de calor (Wang et al., 2020).
- Gases producidos durante el biosecado: los compuestos orgánicos volátiles, el NH₃ y el H₂S se producen durante la degradación aerobia (Guerra-Gorostegi et al., 2021) así como también el CO₂ (Contreras-Cisneros et al., 2021) que permite medir la actividad de los microorganismos (Hao & Jahng, 2019).
- Diseño del reactor: se han usado tanto reactores verticales (Hao et al., 2018; Zhao et al., 2010) como horizontales (J. Ma et al., 2016; Wang et al., 2020).
- Estacionalidad: Edo-Alcón et al. (2018) estudian la variación anual de la composición y humedad de los rechazos de una planta mecánico-biológica, llegando a la conclusión de que hay variación en la composición y humedad de estos dependiendo de la estación del año. Por tanto, se quieren biosecar será necesario tener en cuenta la estacionalidad.

4. Conclusiones

Las bases de datos más extensas y con mayor relación directa con la ingeniería de residuos son Scopus y Dialnet. La definición de palabras clave y su posterior combinación para la búsqueda en estas bases de datos ha sido una metodología útil y eficiente para poder conocer las investigaciones novedosas desarrolladas en la última década.

Los resultados obtenidos en las búsquedas realizadas a través de Scopus, usando solo las palabras clave, reflejan el desarrollo avanzado del campo de los residuos sólidos urbanos y del compostaje, con una evolución muy positiva en el periodo situado entre 2010 y 2023, a diferencia del campo del biosecado que ha tenido una menor evolución. Este resultado también es visible a la hora de realizar las búsquedas mediante combinaciones de palabras clave, ya que el mayor resultado pertenece a la combinación de palabras “municipal solid waste” y “composting”. Por tanto, esto es un indicador de que, en los últimos años, las investigaciones se han centrado en el campo del compostaje de los residuos sólidos urbanos. La escasa bibliografía encontrada en relación con el biosecado indica que es un campo de investigación incipiente. Está enfocada solo en el uso de tecnología a nivel de escala piloto y

laboratorio, y estudia cómo afectan los diferentes tipos de reactores al proceso y a la investigación de las variables que intervienen.

Los residuos que se han utilizado en el biosecado en los estudios revisados han sido RSU, restos de cocina, residuos de jardinería, los lodos procedentes de las diferentes industrias y mezclas de biorresiduos; sin embargo, esto abre las puertas al estudio del biosecado de otros tipos de residuos con características similares, como puede ser el caso de los rechazos procedentes de las plantas de tratamiento mecánico-biológicas de RSU.

La tecnología utilizada en el proceso de biosecado se divide en procesos continuos o discontinuos. Las variables estudiadas y que intervienen son la aireación, la temperatura, la humedad, texturización, los agentes texturizantes, la frecuencia y tipo de volteo, la naturaleza del residuo, el tiempo de permanencia, la aireación, el contenido en sólidos volátiles, el ratio C/N, el pH, la conductividad, el contenido de cenizas, los gases producidos, el diseño del reactor y la estacionalidad. La población biológica que interviene en el proceso es clave y no menos importante que otras variables para lograr el objetivo establecido en cuanto a la disminución de la humedad de los residuos secados mediante esta tecnología.

5. Bibliografía

- Ab Jalil, N. A., Basri, H., Ahmad Basri, N. E., & Abushammala, M. F. M. (2016). Biodrying of municipal solid waste under different ventilation periods. *Environmental Engineering Research*, 21(2), 145–151. <https://doi.org/10.4491/eer.2015.122>
- Ahmad, A., & Sur, S. (2023). Biodegradable solid waste management by microorganism: Challenge and potential for composting. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 12(4), 735–745. <https://doi.org/10.30486/ijrowa.2023.1958655.1465>
- Akademia Baru, P., Jalil, N. A. A., Basri, H., Basri, N. E. A., & Abushammala, M. F. M. (2015). The Potential of Biodrying as Pre-treatment for Municipal Solid Waste in Malaysia. In *Journal of Advanced Review on Scientific Research ISSN* (Vol. 7, Issue 1).
- Bao, N. D., Fujiwara, T., Cuong, L. D., & Song Toan, P. P. (2023). *A Short Review on the Situation of Municipal Biodegradable Solid Waste Treatment*. 15–19. <https://doi.org/10.1109/atigb59969.2023.10364548>
- Cai, L., Chen, T. Bin, Gao, D., & Yu, J. (2016). Bacterial communities and their association with the bio-drying of sewage sludge. *Water Research*, 90, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.12.026>
- Cai, L., Chen, T. Bin, Zheng, S. W., Liu, H. T., & Zheng, G. Di. (2018). Decomposition of lignocellulose and readily degradable carbohydrates during sewage sludge biodrying, insights of the potential role of microorganisms from a metagenomic analysis. *Chemosphere*, 201, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.177>
- Chang, J. I., & Chen, Y. J. (2010). Effects of bulking agents on food waste composting. *Bioresource Technology*, 101(15), 5917–5924. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.042>
- Chilakamarry, C. R., Mimi Sakinah, A. M., Zularisam, A. W., Sirohi, R., Khilji, I. A., Ahmad, N., & Pandey, A. (2022). Advances in solid-state fermentation for bioconversion of agricultural wastes to value-added products: Opportunities and challenges. In *Bioresource Technology* (Vol. 343). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126065>

- Cho, E. J., Trinh, L. T. P., Song, Y., Lee, Y. G., & Bae, H. J. (2020). Bioconversion of biomass waste into high value chemicals. In *Bioresource Technology* (Vol. 298). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122386>
- Colomer-Mendoza, F. J., Robles-Martinez, F., Herrera-Prats, L., Gallardo-Izquierdo, A., & Bovea, M. D. (2012). Biodrying as a biological process to diminish moisture in gardening and harvest wastes. *Environment, Development and Sustainability*, 14(6), 1013–1026. <https://doi.org/10.1007/s10668-012-9369-1>
- Contreras-Cisneros, R. M., Orozco-álvarez, C., Piña-Guzmán, A. B., Ballesteros-Vásquez, L. C., Molina-Escobar, L., Alcántara-García, S. S., & Robles-Martínez, F. (2021). The relationship of moisture and temperature to the concentration of O₂ and CO₂ during biodrying in semi-static piles. *Processes*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/pr9030520>
- Edo-Alcón, N., Gallarzo Izquierdo, A., Colomer Mendoza, F. J., Esteban-Altabella, J., & Albarrán Vargas Zúñiga, F. (2018). ANALYSIS OF ANNUAL VARIATION OF THE REJECTS COMPOSITION IN A MBT PLANT FOR MUNICIPAL SOLID WASTE (22).
- Gallardo Izquierdo, A., Edo, N., Colomer, F. J., & Gómez, A. (2014). ESTUDIO COMPARATIVO DE VARIOS CSR PROCEDENTES DE LOS RECHAZOS DE DIFERENTES PROCESOS DE TRATAMIENTO DE RSU.
- Ghosh, A., Debnath, B., Ghosh, S. K., Das, B., & Sarkar, J. P. (2018). Sustainability analysis of organic fraction of municipal solid waste conversion techniques for efficient resource recovery in India through case studies. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(4), 1969–1985. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0721-x>
- Guerra-Gorostegi, N., González, D., Puyuelo, B., Ovejero, J., Colón, J., Gabriel, D., Sánchez, A., & Ponsá, S. (2021). Biomass fuel production from cellulosic sludge through biodrying: Aeration strategies, quality of end-products, gaseous emissions and techno-economic assessment. *Waste Management*, 126, 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.036>
- Hao, Z., & Jahng, D. (2019). Variations of organic matters and extracellular enzyme activities during biodrying of dewatered sludge with different bulking agents. *Biochemical Engineering Journal*, 147, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.04.001>
- Hao, Z., Yang, B., & Jahng, D. (2018). Spent coffee ground as a new bulking agent for accelerated biodrying of dewatered sludge. *Water Research*, 138, 250–263. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.049>
- Instituto Nacional de Estadística. (2023). *Cuentas medioambientales: Cuenta de los residuos Año 2021*. 6–7.
- Iqbal, M. K., Shafiq, T., & Ahmed, K. (2010). Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost. *Bioresource Technology*, 101(6), 1913–1919. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.030>
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*.
- Lawrance, A., Haridas, A., Savithri, S., & Arunagiri, A. (2022). Development of mathematical model and experimental Validation for batch bio-drying of municipal solid waste: Mass balances. *Chemosphere*, 287, 132272. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132272>
- Li, J., Ju, T., Lin, L., Meng, F., Han, S., Meng, Y., Du, Y., Song, M., Lan, T., & Jiang, J. (2022). Biodrying with the hot-air aeration system for kitchen food waste. *Journal of*

Environmental Management, 319, 115656.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115656>

- Liggins, A. J., Suhr, J. L., Rahman, M. S., Singley, M. E., & Rajput, V. S. (1986). SHREDDER RUBBER TIRES AS A BULKING AGENT IN SEWAGE SLUDGE COMPOSTING. In *Waste Management & Research* (Vol. 4).
- Ma, J., Zhang, L., & Li, A. (2016). Energy-efficient co-biodrying of dewatered sludge and food waste: Synergistic enhancement and variables investigation. *Waste Management*, 56, 411–422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.007>
- Ma, Y., & Liu, Y. (2019). Turning food waste to energy and resources towards a great environmental and economic sustainability: An innovative integrated biological approach. In *Biotechnology Advances* (Vol. 37, Issue 7). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.06.013>
- Maia, G. D., Horta, A. C. L., & Felizardo, M. P. (2023). From the conventional to the intermittent biodrying of orange solid waste biomass. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 188, 109361. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2023.109361>
- Muzaber, V. G., Gallardo Izquierdo, A., & Colomer Mendoza, F. (2023). *Análisis de las variables que determinan la eficiencia del biosecado* (M. D. Bovea Edo, M. Braulio Gonzalo, M. Carlos Alberola, F. J. Colomer Mendoza, A. Gallardo Izquierdo, V. Ibáñez Forés, & G. Monrós Tomás, Eds.; 10th ed.). UNIVERSITAT JAUME I.
- Muzaber, V. G., Mendoza, F. J., & Gallardo Izquierdo, A. I. (2023). *Análisis de los rechazos producidos en el proceso de compostaje de una planta de tratamiento mecánico-biológico* (M. D. Bovea Edo, M. Braulio Gonzalo, M. Carlos Alberola, F. J. Colomer Mendoza, A. Gallardo Izquierdo, V. Ibáñez Forés, & G. Monrós Tomás, Eds.; 10th ed.). UNIVERSITAT JAUME I.
- Robles-Martínez, F., Ramírez-Sánchez, I. M., Piña-Guzmán, A. B., & Colomer-Mendoza, F. J. (2010). EFFECT OF BULKING AGENTS ADITION TO HORTICULTURAL WASTES IN AEROBIC TREATMENTS. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 2(1), 45–51. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2010.08.010>
- Sadaka, S., VanDevender, K., Costello, T., & Associate Professor Mahmoud Sharara, P. (2010). *Agriculture and Natural Resources FSA1055 Partial Composting for Biodrying Organic Materials*. <http://www.uaex.edu>
- Said-Pullicino, D., & Gigliotti, G. (2007). Oxidative biodegradation of dissolved organic matter during composting. *Chemosphere*, 68(6), 1030–1040. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.02.012>
- Shao, L. M., He, X., Yang, N., Fang, J. J., Lü, F., & He, P. J. (2012). Biodrying of municipal solid waste under different ventilation modes: Drying efficiency and aqueous pollution. *Waste Management and Research*, 30(12), 1272–1280. <https://doi.org/10.1177/0734242X12462278>
- Song, X., Ma, J., Gao, J., Liu, Y., Hao, Y., Li, W., Hu, R., Li, A., & Zhang, L. (2017). Optimization of bio-drying of kitchen waste: inoculation, initial moisture content and bulking agents. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(1), 496–504. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0450-3>
- Sutthasil, N., Ishigaki, T., Ochiai, S., Yamada, M., & Chiemchaisri, C. (2023). Carbon conversion during biodrying of municipal solid waste generated under tropical Asian conditions. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(18), 16791–16805. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02284-1>

- Tom, A. P., Pawels, R., & Haridas, A. (2016). Biodrying process: A sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content. *Waste Management*, 49, 64–72. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2016.01.004>
- Vásquez, B., Robles-Martínez, F., Contreras-Cisneros, R. M., Piña-Guzmán, & Osorio-Mirón. (2022). *Residuos agrícolas y agroindustriales biosecados como alternativa energética Biodried agricultural and agroindustrial waste as an energy alternative*. www.riiit.com.mx
- Villegas, M., & Huiliñir, C. (2014). Biodrying of sewage sludge: Kinetics of volatile solids degradation under different initial moisture contents and air-flow rates. *Bioresource Technology*, 174, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.136>
- Wang, K., Wang, Y. Y., Chen, T. Bin, Zheng, G. Di, Cao, M. K., & Cai, L. (2020). Adding a recyclable amendment to facilitate sewage sludge biodrying and reduce costs. *Chemosphere*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127009>
- Xin, L., Qin, Y., Lou, T., Xu, X., Wang, H., Mei, Q., & Wu, W. (2023). Rapid start-up and humification of kitchen waste composting by an innovative biodrying-enhanced process. *Chemical Engineering Journal*, 452. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139459>
- Xin, L., Yan, X., Xu, X., Qin, Y., Nan, Q., Wang, H., & Wu, W. (2022). Carbohydrate degradation contributes to the main bioheat generation during kitchen waste biodrying process: A pilot study. *Waste Management*, 137, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.021>
- Yu, B., Chen, T., Wang, X., Yang, J., Zheng, G., Fu, L., Huang, X., & Wang, Y. (2023). Insights into the effect mechanism of back-mixing inoculation on sewage sludge biodrying process: Biodrying characteristics and microbial community succession. *Science of The Total Environment*, 857, 159460. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.159460>
- Yuan, J., Zhang, D., Li, Y., Li, J., Luo, W., Zhang, H., Wang, G., & Li, G. (2018). Effects of the aeration pattern, aeration rate, and turning frequency on municipal solid waste biodrying performance. *Journal of Environmental Management*, 218, 416–424. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.04.089>
- Zaman, B., Hardyanti, N., Purwono, P., Suryantara, A. R., Putri, N. S., & Failusuf, T. A. M. (2023). Application of biodrying with hot air aeration system to process solid waste into rdf. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1268(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1268/1/012034>
- Zhang, D. Q., He, P. J., Yu, L. Z., & Shao, L. M. (2009). Effect of inoculation time on the bio-drying performance of combined hydrolytic-aerobic process. *Bioresource Technology*, 100(3), 1087–1093. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.059>
- Zhang, J., Cai, X., Qi, L., Shao, C., Lin, Y., Zhang, J., Zhang, Y., Shen, P., & Wei, Y. (2015). Effects of aeration strategy on the evolution of dissolved organic matter (DOM) and microbial community structure during sludge bio-drying. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(17), 7321–7331. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6640-z>
- Zhao, L., Gu, W. M., He, P. J., & Shao, L. M. (2010). Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge. *Water Research*, 44(20), 6144–6152. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.002>
- Zhao, L., Gu, W. M., He, P. J., & Shao, L. M. (2011). Biodegradation potential of bulking agents used in sludge bio-drying and their contribution to bio-generated heat. *Water Research*, 45(6), 2322–2330. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.01.014>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

