

Balance de masa y energía de una planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos de digestión anaeróbica y compostaje. Desde la extracción del digestato hasta la obtención del compost.

Ramón E. Mejía¹, Xavier Font², Teresa Gea², Vanessa Abad³

(1) Trabajo de fin de master para optar por el título: Estudios interdisciplinario de sostenibilidad medioambiental, económica y social. Especialidad: Ecología Industrial.

NIU: 1439390 Escola de Ciències Ambientals

Universitat Autònoma de Barcelona

Cerdanyola del Vallès (08193-Barcelona, Spain)

(2) Department of Chemical, Biological and Environmental Engineering

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria

Universitat Autònoma de Barcelona

Cerdanyola del Vallès (08193-Barcelona, Spain)

(3) Consorci per a la Gestió dels Residus del Vallès Oriental

Granollers (08401-Barcelona, Spain)

* Autor principal: Ing. Ramón E. Mejía

Tel.: (34) 603558723

E-mail: ramonmejia82@uab.cat

Fecha de entrega:

04 de Septiembre de 2017



Universitat Autònoma de Barcelona



Journal: Waste Management

Guidelines

Article structure

Subdivision - numbered sections

Divide your article into clearly defined and numbered sections. Subsections should be numbered

1.1 (then 1.1.1, 1.1.2 ...), 1.2, etc. (the abstract is not included in section numbering). Use this numbering also for internal cross-referencing: do not just refer to 'the text'. Any subsection may be given a brief heading. Each heading should appear on its own separate line.

Introduction

State the objectives of the work and provide an adequate background, avoiding a detailed literature survey or a summary of the results.

Material and methods

Provide sufficient detail to allow the work to be reproduced. Methods already published should be indicated by a reference: only relevant modifications should be described.

Results

Results should be clear and concise.

Discussion

This should explore the significance of the results of the work, not repeat them. A combined Results and Discussion section is often appropriate. Avoid extensive citations and discussion of published literature.

Conclusions

The main conclusions of the study may be presented in a short Conclusions section, which may stand alone or form a subsection of a Discussion or Results and Discussion section.

Appendices

If there is more than one appendix, they should be identified as A, B, etc. Formulae and equations in appendices should be given separate numbering: Eq. (A.1), Eq. (A.2), etc.; in a subsequent appendix, Eq. (B.1) and so on. Similarly for tables and figures: Table A.1; Fig. A.1, etc.

AUTHOR INFORMATION PACK 30 Jul 2017 www.elsevier.com/locate/wasman 8
Essential title page information

- **Title.** Concise and informative. Titles are often used in information-retrieval systems. Avoid abbreviations and formulae where possible.

- **Author names and affiliations.** Please clearly indicate the given name(s) and family name(s) of each author and check that all names are accurately spelled. Present the authors' affiliation addresses (where the actual work was done) below the names. Indicate all affiliations with a lowercase superscript letter immediately after the author's name and in front of the appropriate address.

Provide the full postal address of each affiliation, including the country name and, if available, the e-mail address of each author.

- **Corresponding author.** Clearly indicate who will handle correspondence at all stages of refereeing and publication, also post-publication. Ensure that the e-mail address is given and that contact details are kept up to date by the corresponding author.

- **Present/permanent address.** If an author has moved since the work described in the article was done, or was visiting at the time, a 'Present address' (or 'Permanent address') may be indicated as a footnote to that author's name. The address at which the author actually did the work must be retained as the main, affiliation address. Superscript Arabic numerals are used for such footnotes.

Descripción del proyecto

La generación de residuos domésticos en estas últimas décadas se ha visto incrementada por el estilo consumista de nuestra sociedad. Por este motivo se ha llegado a la necesidad de tratarlos y gestionarlos de una manera más eficiente y sostenible.

El proyecto consiste en una recopilación de datos del proceso de compostaje de una planta de tratamiento de residuos de la fracción orgánica de la comarca del Vallés Oriental, Cataluña. La instalación trata aproximadamente 45,000 toneladas de residuos procedentes del contenedor de Fracción Orgánica de Residuos Municipales (FORM). Esta planta trabaja mediante digestión anaeróbica, también denominada biometanización, más un proceso de compostaje final del material digerido. La digestión anaeróbica se trata de un proceso biológico que tiene lugar en ausencia de oxígeno, donde parte de la materia orgánica de los residuos, se transforma por la acción de los microorganismos en una mezcla de gases (biogás), siendo el gas principal el metano. El producto digerido (digestato), se suele deshidratar y mediante el proceso de compostaje se estabiliza aeróbicamente para obtener compost.

El objetivo de este estudio ha sido la realización de un balance de masa y energía del proceso de compostaje. Se inició obteniendo una recopilación de datos, seguida de

sus respectivas y consecuentes mediciones y cuantificaciones con la finalidad de evaluar el rendimiento del proceso en el área de compostaje. Desde la culminación de la digestión anaeróbica, en la que se extrae el digestato, hasta su transformación en compost al salir del proceso de afino, tomando en cuenta la calidad del mismo.

La investigación que se ilustra mediante este trabajo se presenta como crucial, pues se trata de la primera de esta planta para uso externo, siendo así útil para la realización de un análisis comparativo con otras plantas de tratamientos de residuos, entre otros. También contribuye para realizar futuros trabajos en la misma planta que analicen la parte inicial desde la recepción de los residuos sólidos hasta la digestión anaeróbica, para así obtener de manera más profunda el balance de toda la instalación.

Artículos como (Pognani et al., 2012a) o (Ponsá et al., 2010) están relacionados con este estudio y confirman los resultados obtenidos, principalmente en el tema de la biodegradabilidad de la materia orgánica mediante el Índice Respirométrico Dinámico.

Abstracto

En este estudio, una planta de tratamiento de digestión anaeróbica y compostaje diseñada para tratar la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (FORM) fue evaluada por un período de seis meses. Durante ese período, se recopilaban datos sobre el proceso de compostaje desde la culminación de la digestión anaeróbica hasta el proceso de afino del compost. La planta trabaja con pre-tratamiento mecánico, digestión anaeróbica en temperaturas mesofílicas para producir biogás, sistema de túneles de compostaje y fase de curado para obtener compost. Con el fin de evaluar el rendimiento y la eficiencia del proceso, se realizó un balance de masa y energía, seguido de sus respectivas y consecuentes mediciones y cuantificaciones. Mediante el índice respirométrico dinámico (IRD) se analizaron las muestras para determinar el nivel de biodegradabilidad de la materia orgánica. El balance fue calculado y expresado en toneladas y kW, teniendo en cuenta otros parámetros determinantes para medir el rendimiento del proceso. El compost promedio generado en los túneles evaluados fue equivalente al 43% del material digerido entrante, en base a la masa, con una reducción significativa de humedad de 44.24 ± 2.93 % de sólidos totales y 79.89% de sólidos volátiles respecto al digestato. El proceso de estabilización desde el digestato hasta el

compost ha sido 38% de decrecimiento en el IRD, obteniendo un compost como resultado promedio de $0.27 \pm 0.01 \text{ gO}_2 \text{ kg}^{-1}\text{MS h}^{-1}$ en el IRD y una denominación clase B en las analíticas del contenido de propiedades.

Palabras claves: residuos sólidos municipales, materia orgánica, compostaje, índice respirométrico, balance de masa, planta de tratamiento de residuos.

1. Introducción

Las estrategias europeas para el desarrollo sostenible están priorizando el uso eficiente de los recursos y la gestión de los residuos, por ser uno de los pilares de la sociedad del reciclaje. Los residuos sólidos urbanos generados por los habitantes y por las actividades realizadas en una ciudad, se gestionan para minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud de las personas. Además de evitar efectos nocivos y no deseables desde un punto de vista ambiental, también debe potenciarse el valor de los residuos como recursos para la obtención de materiales que se puedan integrar de nuevo en los procesos productivos y contribuir, de este modo, a que Cataluña pase a ser un referente de sociedad económica y socialmente sostenible (ARC, 2013). De la generación de residuos que produce Cataluña, el 36% corresponde a materia orgánica, es la mayor porción respecto a cantidad y respecto a calidad es la más relevante (ARC, 2012).

Las alternativas más convenientes para la gestión de residuos sólidos orgánicos consisten en procesos biológicos como la digestión anaeróbica y el compostaje (Agdag & Sponza, 2005). La planta donde se ha realizado el estudio trabaja mediante digestión anaeróbica, también denominada biometanización. Se trata de un proceso biológico que tiene lugar en ausencia de oxígeno, en el que parte de la materia orgánica de los

residuos, se transforma por la acción de los microorganismos en una mezcla de gases (biogás), compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono y otros gases en pequeñas cantidades (NH_3 , H_2 , H_2S , etc.). El biogás generado, se puede considerar un buen combustible, y es útil para la ignición y generación de calor y/o energía eléctrica (un metro cúbico de biogás contiene la energía equivalente a unos 0.6 L de combustible diésel, CresidusVO, 2017). El producto digerido también denominado como digestato, se suele deshidratar y estabilizar aeróbicamente para obtener compost.

El compost es un producto que aporta nutrientes pudiendo ser utilizado en la agricultura orgánica como acondicionador de suelos o fertilizante natural. El mismo suele ser utilizado como mejorador de algunas propiedades físicas del suelo como son su aireación, retención de agua y nutrientes. La aplicación de compost a los suelos, aumenta la población microbiana existente (responsable de la mineralización de la materia orgánica y liberación de nutrientes esenciales como C, N, P) y por ende la producción de sustancias biológicas activas útiles para mejorar y promover el crecimiento y desarrollo vegetal (Comisión Nacional Del Medio Ambiente, 2000). El compostaje es un proceso termófilo, el cual requiere que el oxígeno estabilice los residuos orgánicos y el contenido de humedad óptimo para el desarrollo de microorganismos (Haug, 1993). El mismo permite que los residuos sean valorizados, y que reduzcan su masa y volumen, obteniendo así una materia prima, para un nuevo ciclo de vida apropiado para el medio ambiente. El proceso de compostaje de digestato mezclado con agente estructurante (astilla), se desarrolla en dos fases: primeramente se descompone la mezcla de astilla y digestato en la fase de aireación de los túneles. La astilla o material estructurante es reutilizada y finalmente el compost es depositado en pilas para realizar la fase de curado (Pognani, et al., 2012). Tras la fase de aireación, el digestato contiene un nivel de estabilización adecuada, la estabilidad previene que las sustancias nutritivas sean accesibles para el crecimiento microbiano, permitiéndole estar apto para ser un buen abono para las plantas (Cesaro et al., 2015).

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), el consumo de un hogar en España es de aproximadamente 4,000 kWh anualmente. Durante el año 2016 la planta donde se ha realizado el estudio ha ahorrado alrededor de 3,035 toneladas de emisión de dióxido de carbono (CO_2) debido a que la electricidad generada sustituye a la electricidad generada a partir de combustibles fósiles. Además ha producido más de 5,000 toneladas de compost para los productores agrícolas y los ayuntamientos de la comarca del Vallés Oriental.

Con el fin de evaluar el rendimiento y la eficiencia de un proceso, la realización de un balance de masa y energía se presentan como dos etapas fundamentales (Felder & Rousseau, 2005). Muchos de los análisis de flujo de masas y energía disponibles hoy en día se han utilizado exclusivamente para uso interno. Su realización ha sido posible gracias a la construcción y puesta en funcionamiento en los últimos años de plantas de tratamientos a nivel industrial para el aprovechamiento de los residuos mediante compostaje y/o digestión anaeróbica. Estudios (presentados por de Araújo, 2008; Pognani et al., 2012a) han realizado balances de masa en distintas plantas similares, desde la recepción de los residuos hasta la última fase, mostrando resultados contabilizados de la cantidad de biogás generado, midiendo la cantidad de rechazos y finalmente mostrando la calidad del compost obtenido y su contenido de impuros.

La investigación que se ilustra mediante este trabajo se presenta como crucial, pues se trata de la primera de esta planta realizada en coordinación con una institución académica siendo así útil, entre otros, para la realización de un análisis comparativo con otras plantas de tratamientos de residuos. Además permite detectar puntos de mejora en la planta que serán detallados posteriormente. Por lo tanto, la necesidad de investigaciones para usos científicos en otras plantas a nivel nacional como internacional es innegable. De esta manera los procesos podrán ser comparados y estandarizados para resultar lo más eficaces posible.

El objetivo de este estudio es la realización de un balance de masa en una instalación de tratamiento de Fracción Orgánica de Residuos Municipales (FORM). Para ello, se ha estudiado en primer lugar la realización de una recopilación de datos, seguida de sus respectivas y consecuentes mediciones y cuantificaciones con la finalidad de evaluar el rendimiento del proceso en el área de compostaje, desde la culminación de la digestión anaeróbica, en la que se extrae el digestato hasta su transformación en compost al salir del proceso de afino, tomando en cuenta la calidad del mismo (recuadro de líneas punteadas en la Fig. 1).

Para cumplir con dicho propósito se creó una herramienta de Excel, que contabiliza la masa entrante y saliente tomando en cuenta parámetros que serán mencionados posteriormente. Así mismo, se analizaron numerosas muestras con la intención de determinar la estabilidad de la materia mediante la medición de la actividad de Índice Respirométrico Dinámico (IRD). Este índice permite caracterizar los residuos y conocer su nivel de biodegradabilidad durante su tratamiento (Barrena et al., 2013).

2. Materiales y Métodos

2.1 Características técnicas de la planta

La planta donde se realizó el estudio está ubicada en el polígono industrial El Raiguer de Granollers, de la Comarca Vallés Oriental, Cataluña, España. Es la planta encargada de tratar todos los residuos de las zonas pertenecientes a la comarca anteriormente mencionada. Dispone de una plataforma de 1,500 m² para la descarga de los residuos y se reciben aproximadamente 45,000 toneladas de Fracción Orgánica de Residuos Municipales (FORM) procedentes de recogida selectiva. El proceso inicia al alimentar mediante una pala de ruedas de goma maciza un rompebolsas (ver la Fig. 1) que realiza la función de abrirlas y homogeneizar los residuos. Tras ser vertido al triturador, el material pasa sobre cintas transportadoras a la criba rotatoria (trómel) de clasificación volumétrica con una malla de 100 mm. Los materiales comprendidos entre 0 y 100 mm son tratados, pasando el resto a un área de rechazo para someterse a un proceso de estabilización aeróbica. Esta planta cuenta con separador balístico pero no es utilizado debido a que se realizaron caracterizaciones del material rodante y se perdía una cantidad muy importante de materia orgánica. Por ello actualmente funciona como una cinta transportadora. En otras plantas similares estudiadas en otros trabajos si está en funcionamiento y los resultados son notables (Pognani et al., 2012a). Como consecuencia, la materia contiene considerables impropios y además existe mayor posibilidad de atascamiento.

Los materiales a tratar son transportados a un separador magnético y se obtienen de este modo dos fracciones: los metales, que son enviados a un contenedor y transportados a una planta externa para ser valorizados, y el resto asumidos como materia orgánica, que son dirigidos a la zona de los pulpers. El material entrante a los pulpers es mezclado durante unos 45 minutos por vía húmeda, (90% de agua recirculada y 10% de materia orgánica) en base al volumen. Durante este tiempo gran parte de los impropios ligeros se retiran mediante un sistema hidráulico de extracción por la parte superior y los pesados se retiran mediante un sinfín a un contenedor de rechazo para ser posteriormente enviados a la zona de rechazos ligeros. El resto forman una suspensión de materia orgánica disgregada en agua. Esta es enviada al proceso de hidrociclones donde se eliminan las arenas. Seguido de este proceso se envía al tanque

de suspensión con agitación desde el que se alimentan los dos digestores anaerobios de 3,000 m³ cada uno.

El biogás generado en los tanques se almacena en el Gasómetro (PVC-Poliéster-Textil) con una capacidad de 1,000 m³. Desde aquí se alimenta el motor de cogeneración o en caso de parada del mismo, a la antorcha. Se evita así la emisión directa del metano a la atmósfera. Este motor ha producido durante el año 2016, un total de 7,886,149 kWh, con la fracción orgánica tratada por la planta. De la Fracción Orgánica de Residuos Municipales (FORM) se obtiene 150-240 m³ de biogás por cada tonelada (Campos et al., 2001). De forma adicional ha generado anualmente, una producción equivalente al consumo eléctrico de 6,942 habitantes durante un año.

La digestión tiene lugar a temperatura mesofílica alrededor de unos 36-39° C y algunas de sus ventajas son el consumo mínimo de energía térmica y la baja emisión de amoníaco en los sólidos tras la deshidratación (Fernández, 2010).

Una vez ha terminado el proceso de los tanques digestores, la suspensión que ahora tiene solamente un 3% ST (sólidos totales), se bombea a los tornillos deshidratadores de 30 m³/h para la separación sólido-líquido previa adición del floculante.

A continuación, el digestato saliente es mezclado con astillas procedentes de madera industrial o restos de podas para: en primer lugar disminuir la densidad de los restos orgánicos aumentando la porosidad, que favorece la aireación del proceso de compostaje, en segundo lugar, para disminuir la humedad del material compostable a rangos del 50-60% creando las condiciones adecuadas para el compostaje, entre otras ventajas (Haug, 1993). La mezcla se introduce en los túneles de compostaje que contiene la instalación. Posteriormente, el material se estabiliza aeróbicamente mediante aeración forzada a través de ventiladores, tanto por la parte superior como la inferior. Después de un período estimado entre 12 y 17 días, el material es descargado para ser vertido en el alimentador de afino, donde se separan el material estructurante y algunos impropios por cribas de 20 mm del compost.

Un punto importante que conviene señalar sobre la instalación concierne las emisiones de gases producidas durante este proceso. Estas son dirigidas hacia un depurador de ácidos y tratadas por un sistema de biofiltros.

En el diagrama mostrado a continuación (Fig. 1), se indica el área de estudio para el que se realizó la herramienta del balance de masa que dio soporte a este trabajo.

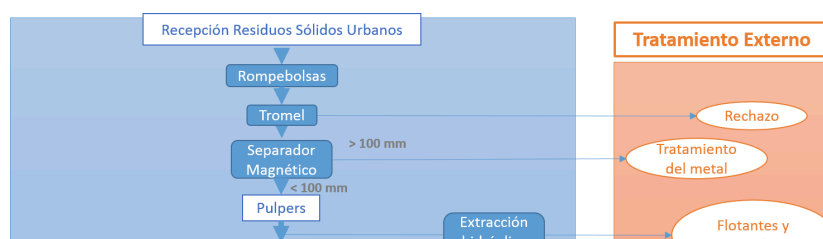


Figura 1: Esquema de la instalación, incluyendo todos los procesos realizados y especificando el área de trabajo que presenta este estudio.

2.2 Herramienta para balance de masa

La suma de toda la masa en un proceso de transformación de la materia es definido como un balance de masa (Felder & Rousseau, 2005). El método para llevar a cabo este estudio fue basado inicialmente en datos tomados semanalmente durante 6 meses, introducidos posteriormente en la herramienta Excel creada específicamente para calcular el compost saliente con respecto al digestato entrante. Para ello se tomaron en cuenta parámetros como: sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), densidad, caudal de los tornillos deshidratadores, tiempo de carga/descarga, rendimiento y consumo energético de las maquinarias. Se obtuvieron los promedios de cada parámetro para definir ratios que se han utilizado en la herramienta para así determinar un balance más preciso. Los resultados obtenidos son primordiales tanto para uso interno de la planta como para comparar con otras instalaciones el rendimiento económico y ambiental.

2.3 Procesos analizados

Se asignaron tres túneles, para evaluarlos y contabilizarlos por completo. La masa total entrante fue pesada por separado; tanto el agente estructurante (astilla) como el digestato, fueron mezclados en una relación 3:1 (astilla:digestato) mediante la báscula integrada de la pala cargadora.

Después de haber cargado el túnel, se mantuvo un monitoreo constante desde la sala de control, la cual suministró distintos datos respectivos a todas las fases del proceso de compostaje. Entre ellos, conviene destacar la temperatura. Este parámetro es uno de los factores más importantes para el buen desarrollo de este proceso, puesto que la degradación aeróbica es una transformación altamente exotérmica y el calor producido tiene como resultado un incremento de la temperatura en la masa que se está compostando. A temperaturas elevadas, se eliminan los organismos patógenos o malas hierbas y el proceso de maduración se realiza correctamente. Parámetros como el caudal de aire (generado por los ventiladores) y el nivel de oxígeno también fueron tomados en cuenta.

La cantidad de paladas realizadas y el tiempo total del llenado del túnel fueron registrados. Se cronometraron además los tiempos fuera de proceso, es decir; de

limpieza, organización de las pilas y transporte de los materiales. En los resultados se muestran la importancia que tuvieron estas tareas para el balance.

Continuando con la progresión de la transformación de la materia, en el momento del vaciado del túnel se repitió el proceso de contabilización, midiendo la masa total saliente y tomando las muestras correspondientes. De este modo fue posible analizar las pérdidas de peso y volumen del material debido a su reducción en el contenido de humedad y conversión de materia orgánica en CO₂. Finalmente, se procedió a afinar el material para separarlo del agente estructurante y así medir la masa de compost y la de astilla reutilizada.

2.4 Índice Respirométrico Dinámico

El índice de respirometría dinámica (IRD) consiste en la medida de O₂ consumido por microorganismos que degradan la fracción orgánica fácilmente degradable bajo condiciones aeróbicas estandarizadas (Adani, et al., 2004). Aproximadamente 100 g de cada muestra fueron mezclados con 5 g de un agente estructurante inerte (Spontex, Ibérica), consistente en pequeñas piezas (20 x 10 mm) de paños de cocina que mejoran la porosidad de las muestras, ya que tanto el digestato como el compost contienen un bajo nivel de porosidad según Puyuelo, 2011. Se utilizaron reactores cilíndricos de plástico de 500 mL que contienen una malla de metal en la parte inferior que sostiene la materia y proporcionaban una cámara de distribución de aire. Se sumergieron los triplicados de cada muestra en un baño termostático a 37° C durante 4 días y a través de tubos conductores se inyectó aire a los reactores.

Este proceso se puso en funcionamiento ajustando manualmente desde el programa un flujo constante de $20.5 \pm 0.5 \text{ mL min}^{-1}$ mediante un controlador de caudal de aire (Bronkhorst Hitec, the Netherlands). El aire saliente de los reactores fue enviado a un sensor de O₂ paso previo a una trampa de deshumidificación de agua. Tanto los sensores de O₂, como el caudalímetro de aire están conectados al sistema que almacena continuamente los valores para el cálculo del índice respirométrico dinámico. Los valores del IRD han sido expresados en dos maneras: en gramos de oxígeno consumido por kilogramos de MS (Materia seca) por hora que consiste en el promedio medido durante las 24 horas de máxima actividad ($\text{g O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ MSh}^{-1} \text{ h}$). En segundo lugar, como el consumo de O₂ acumulado en 4 días después del período de latencia (AT4),

expresado en gramos de O₂ consumido por kilogramos de MS. Más detalles sobre el método pueden ser encontrados en otros documentos (Ponsá et al., 2010).

2.5 Procedimiento de toma de muestras y análisis

En cada uno de los tres túneles, las muestras se realizaron por triplicado para cada una de las cuatro etapas consideradas (deshidratación, carga, descarga y afino), obteniendo así un total de treinta y seis muestras, a partir de las cuales, las materias fueron analizadas. Estas materias corresponden a digestato, mezcla de entrada (E), mezcla de salida (S) y compost.

Los porcentajes de las muestras de ST y de SV fueron tomadas poniendo en práctica las normativas del manual de compostaje del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (TMECC, 2002): Sólidos totales (Método 03.09-A) y sólidos volátiles (Método 03.09-A). Se utilizó el método (detallado en Cooperband, 2002) para calcular la densidad de los materiales en sus diferentes etapas. El consumo energético se obtuvo utilizando las fichas técnicas de las máquinas, más el tiempo específico de uso durante se analizaban las fases.

Las muestras fueron obtenidas mediante el método de cuarteo. Fueron tomadas pilas de 1,000 kg de cada material, con la misma pala se dividieron en 4 pilas de 250 kg c/u, se descartaban dos de las cuatro de forma diagonal y luego se unificaban las otras dos para hacer un total de 500 kg, se repetía el proceso para obtener 250 kg. De los 250 kg fueron obtenidas 5 kg de sub-muestras de seis diferentes puntos de la pila para mezclarlas nuevamente, obteniendo una masa final de aproximadamente 30 kg como indica J Colón et al., 2017. Se transportaron al laboratorio una cantidad aproximadamente de 1-1.5 kg de cada una para congelarlas hasta completar el total de muestras de entrada y de salida de cada túnel. Se introdujeron en bolsas plásticas cerradas al congelador comercial a -18°C durante 2-15 días dependiendo del tipo de pruebas a realizar. Para analizar los ST y SV eran necesarias muestras frescas. Sin embargo, las muestras para calcular el IRD no requieren un tiempo determinado en el congelador, pues estas no presentan cambios durante las primeras 52 semanas según los resultados de Pognani et al, 2012b. Antes de montar los reactores en los baños termostáticos, han de mantenerse los triplicados a temperatura ambiente por un mínimo de 6h hasta que estas se descongelen.

3. Resultados y Discusiones

3.1 Caracterización de materiales y mezclas

Se realizó una completa caracterización de la instalación en el área de estudio respecto al porcentaje de ST, SV y densidad (Tabla 1). Con un promedio de los valores de los tres túneles, en el digestato se ha obtenido 28.83 ± 2.08 % ST y el contenido de SV de 68.8 ± 0.4 % mientras que en trabajos como (Pognani et al., 2012c) han obtenido una menor fracción de materia sólida de digestato debido a que en la instalación de dicho estudio no cuentan con la fase de deshidratación.

Tabla 1: Analíticas promedio en porcentaje de Sólidos totales, volátiles y densidad de la materia en sus etapas analizadas. Muestra los valores promedio de ST y SV obtenidos en los túneles de cada uno de los materiales analizados. Son datos requeridos para calcular el IRD de cada muestra. La densidad es fundamental para el balance de masa.

Características de las muestras		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
Sólidos Totales (% smh)	Digestato	26.50 ± 0.74	30 ± 0.02	30.20 ± 0.01
	Mezcla (Entrada)	46.33 ± 0.03	48.45 ± 0.02	45.90 ± 0.02
	Mezcla (Salida)	49.39 ± 0.01	52.16 ± 0.01	52.08 ± 0.01
	Compost	41.08 ± 0.08	46.73 ± 0.01	45.16 ± 0.02
Sólidos volátiles (% sms)	Digestato	82.53 ± 2.70	61.54 ± 0.80	62.33 ± 0.60
	Mezcla (E)	75.96 ± 3.34	61.04 ± 4.76	75.96 ± 7.15
	Mezcla (S)	66.6 ± 4.26	75.96 ± 8.71	74.89 ± 8.72

	Compost	66.62 ± 0.16	77.6 ± 7.78	68.41 ± 0.43
Densidad (ρ) T/m ³	Digestato	0.92	0.91	0.90
	Mezcla (E)	0.53	0.62	0.59
	Mezcla (S)	0.49	0.52	0.49
	Compost	0.57	0.57	0.52

Un total promedio de 77.15 T de digestato ocuparon los túneles en una mezcla 3:1, la astilla recirculada (52% ST, 90.68% SV) representa el resto 137.57 T, esto equivale a una mezcla de 214.72 T con 47% de ST y 70.98% SV. Una capacidad promedio de 27m x 4.5m x 2.6m fue ocupada en los túneles, equivalente a 315.49m³ de mezcla ($\rho=0.59T/m^3$) mediante la pala cargadora para iniciar el proceso de compostaje. La pala cargadora utilizada es capaz de llenar cada túnel con un promedio de 130 paladas.

3.2 Compostaje

Según los parámetros de compostaje las cuatro fases han sido cumplidas: fase de latencia, crecimiento, termófila y maduración (Vigneswaran et al., 2016). Las tres primeras fases mencionadas anteriormente tienen lugar dentro del túnel. Las nomenclaturas utilizadas en la Tabla 2 que indican las distintas fases del proceso son proporcionadas por el sistema de la sala de control de la instalación. La fase de latencia corresponde a la etapa inicial justo al cargar el túnel, que las temperaturas se encuentran por debajo de 26°. Entre 26° y 38° corresponde a la fase de crecimiento. Finalmente la fase termófila que comprende las fases desde calentamiento hasta compostaje (ver Tabla 2) y la fase de maduración que corresponde a la etapa de curado en pilas.

Tabla 2: Fases de proceso de compostaje en túneles CresidusVO. Muestra el promedio de las temperaturas de los tres túneles en sus diferentes fases. Datos y nombres de fases son proporcionados por el sistema de la empresa.

Fases	T ^a Puerta (°C)	T ^a Centro (°C)	T ^a Fondo (°C)	T ^a Promedio (°C)	O ₂ (%)	Ta. Aire Entrada (°C)	Ta. Aire Salida (°C)	% Ventilador
Nivelación	25.5	31.4	37.1	31.3	17.4	39.0	32.3	80.0

Calentamiento	43.0	43.6	43.4	43.2	18.5	37.0	43.3	40.0
Pre-compostaje	49.1	47.8	48.2	48.5	17.1	46.2	44.9	61.0
Calentamiento/Higienización	56.6	54.9	55.5	56.6	16.9	48.9	50.6	20.0
Higienización	63.0	57.5	55.8	58.8	14.0	30.6	48.2	0.0
Enfriamiento/Higienización	72.7	57.5	58.3	62.8	16.6	27.6	54.7	0.0
Compostaje	57.4	48.7	49.9	52.0	19.3	44.8	49.6	42.0
Enfriamiento antes Vaciado	43.9	42.5	43.4	43.2	20.5	40.0	36.6	79.8

En los primeros días el proceso inicia en régimen de temperatura mesofílico (30 a 38 °C), pero la subida de temperatura, debida a las reacciones exotérmicas que tienen lugar en los residuos, hace que el proceso se desarrolle en el régimen termofílico (55-60 °C) como muestra en la Tabla 2. Al alcanzar las altas temperaturas en las fases relacionadas a higienización, los microorganismos patógenos son eliminados, por ende los ventiladores se detienen para iniciar la fase de compostaje. Cuando ya casi se ha agotado la fracción fácilmente biodegradable se vuelve a cargar de potencia el ventilador para finalmente iniciar la fase de “enfriamiento antes de vaciado”, obteniendo así una temperatura apta para descargar el material.

Las fases desde nivelación hasta enfriamiento/higienización tienen una duración promedio de un día y medio, iniciando con temperaturas entre 31.3°C hasta 62.8°C (Tabla 2). Después se mantiene un período entre 4-5 días en fase de compostaje con una media de 52°C. Por último, la fase de “enfriamiento antes de vaciado”, donde las temperaturas disminuyen entre 50°C hasta 25°C durante 4-7 días. Quince días fue el tiempo promedio del proceso de compostaje de los tres túneles. Se considera un tiempo bajo por mantener un control constante (mediante aireación forzada) de las variables determinantes como temperatura, entre otros. La potencia del ventilador es regulada por la fase del proceso de compostaje, basándose en la temperatura de la mezcla. El ventilador se mantuvo un caudal de aire promedio de 5,800 m³/h en los tres túneles y un nivel de oxígeno promedio de 18.8%.

Este aumento en la temperatura de la masa de residuos ya digeridos que observamos en la Tabla 2 es un factor determinante para que el compost final sea un producto estable (Garrido et al., 2015), y nos permite afirmar que el proceso se está desarrollando correctamente. Ya terminado el proceso dentro de los túneles, inicia la fase de descarga y afino que en este estudio se ha denominado “Post compostaje”.

3.3 Post Compostaje

El material compostado suma una masa promedio de los tres túneles de 183 T debido a su reducción en el contenido de humedad durante el proceso de aireación y a la estabilización de la materia orgánica. Se determinó una reducción promedio de un 16% respecto a la masa total de entrada al túnel. De forma adicional, es posible confirmar la reducción del porcentaje de humedad mediante los resultados de las muestras de ST mostrados en la Tabla 1 que indica un aumento de un 4% en ST entre la mezcla (E) y la mezcla (S).

Durante el proceso de afino, la malla de 20 mm separa el agente estructurante que por ser recirculado ya ha obtenido un alto nivel de absorción de humedad. Otros trabajos muestran la influencia que tiene el agente estructurante presente en el compost final (Ruggieri et al., 2008). Tanto la remoción del agente estructurante como materiales no-compostables permiten una maduración más efectiva.

Las analíticas mostradas en la tabla 3 sobre el compost, fueron realizadas por un laboratorio externo de acuerdo a la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005 de la comisión Europa. Según las normas del Real Decreto 824/2005 sobre productos fertilizantes, la calidad del compost pertenece a Clase B, para prácticas agronómicas, sin restricción alguna. Los límites de contenido de metales pesados para compost establecidas por el RD824/2005 determinan que varios parámetros se encuentran en la clase A (N amoniacal 0.65%, Cd 0.57 mg/kg, Cr 36 mg/kg, Hg <0.40 mg/kg, Ni 13.8 mg/kg, y Pb 43 mg/kg).

Muestra	Cantidad	Unidad	Clase a ₁	Clase b ₁
pH (ext. 1:5 H ₂ O)	8.5	UpH	7-8	7-8
N Amoniacal (N)	0.65%	s.m.s.	< 1	< 1
Materia Orgánica	52%	s.m.s.	50-60	< 50
Hierro (Fe)	1.30%	s.m.s.		< 3%
Cadmio (Cd)	0.57	mg/kg	0.7	2
Cromo (Cr)	36	mg/kg	70	250
Cobre (Cu)	93	mg/kg	70	300

Mercurio (Hg)	<0.40	mg/kg	0.4	1.5
Níquel (Ni)	13.8	mg/kg	25	90
Plomo (Pb)	43	mg/kg	45	150
Zinc (Zn)	287	mg/kg	200	500
Relación C/N	10.4	C:N	<10	<20
Carbono Orgánico	30.45%	s.m.s.		

Tabla 3: Resultados de las propiedades contenidas del compost.

REAL DECRETO 824/2005, sobre productos fertilizantes. Ministerio de la Presidencia. España.

3.4 Balance del proceso

Los resultados han sido divididos en diferentes secciones, que son las distintas etapas que se realizaron en este estudio, son también discutidas y comparadas con otros trabajos y/u otras instalaciones de tratamientos de residuos. La Fig. 2 contiene el diagrama del proceso del área de estudio señalada anteriormente.

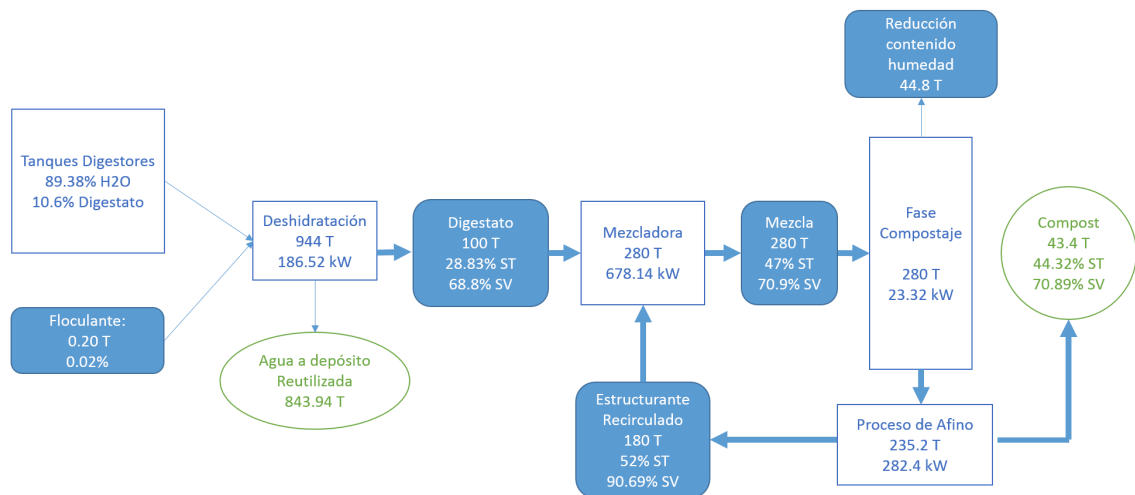


Figura 2: Diagrama del balance del proceso. Los siguientes valores fueron determinados por los ratios de la herramienta y el promedio de los tres túneles. Son mostrados en base a 100 T de digestato.

El balance de masa y energía (Fig. 2) se determinó en base al valor promedio de los tres túneles evaluados tomando en cuenta los ratios obtenidos durante la recopilación de datos. Los cálculos se han referido a 100 T de entrada de digestato.

La deshidratación que es realizada mediante los tres tornillos deshidratadores, separa el agua que representa el 89.38%, extrae el digestato con una masa equivalente al 10.6% del caudal deshidratado y el floculante añadido representa un 0.02% (ver Fig. 2).

Se añade 1 kg de floculante por cada 5.5 m³ deshidratado, para un total de 0.18 T (toneladas) por cada 100 T de digestato extraído. El consumo energético de los tornillos deshidratadores es de 1.98 kW cada uno, y hacen un total de 186.52 kW para obtener la cantidad de digestato especificado en la Fig. 2. Teniendo en cuenta que trabajan con un rendimiento de 30 m³/h. Comparando el rendimiento de esta máquina con otras similares ubicadas en otras instalaciones, se puede confirmar que trabaja en óptimas condiciones (Mancomunidad de la Ribera, 2010).

Las 100 T de digestato contiene valores promedio entre los tres túneles de 28.83% ± 0.1 ST y 68.8% ± 0.17 SV, esto confirma que la fase de digestión anaeróbica por vía húmeda está obteniendo los resultados deseados. Se utilizó un promedio de 1.8 T de agente estructurante por cada T de digestato (ver Fig. 2) para hacer las mezclas.

La mezcladora consume 51.04 kW, es posible (según los datos analizados) mezclar las 100 T de digestato en 13.5 horas de funcionamiento ininterrumpido de la mezcladora, por lo tanto tiene un consumo de 678.14 kW. La misma, mientras está en funcionamiento es capaz de mezclar 21.3 T/h, en un tiempo promedio de 25 minutos por mezcla incluyendo los tiempos fuera de proceso. Estos datos son fundamentales para medir y comparar el rendimiento tanto de los operadores como de las maquinarias.

El consumo de los ventiladores de los túneles durante la fase de compostaje, ha sido proporcionado por las fichas técnicas trabajando en su potencia máxima (30 kW). Según datos de otra empresa suministradora de maquinarias similares (Millarium Aureum, S.L, 2004) estos consumen 30kW durante todo el proceso a un uso promedio de 40%. Este valor coincide con el porcentaje promedio de los valores mostrados en la tabla 2 respecto a la potencia de los ventiladores (40.3%) durante todas las fases (12-17 días). Es decir, que la empresa (CresidusVO) cuenta con un consumo en este proceso menor a los datos proporcionados por la referencia mencionada recientemente.

La generación de los lixiviados se encuentra principalmente en las fases de: pre-tratamiento, compostaje y los condensados derivados del post-tratamiento del biogás (Pognani et al., 2012a). También las lluvias que descienden alrededor del perímetro de la instalación producen lixiviados. Desafortunadamente, debido a

limitaciones en el sistema de recolección de la instalación no fue posible cuantificarlos ni analizarlos.

El alimentador de afino presenta un rendimiento promedio de 20 T/h, con un consumo de 13.20 kW. Además de las cinco cintas que transportan hacia la criba que suman un consumo 14.78 kW entre todas, trabajando a su máxima potencia.

Durante el proceso de descarga se presentaron datos que crearon incertidumbres, una de las razones posibles es debido a que la pala cargadora proporciona los pesos en múltiplos de 50, por ello no se pudo determinar con certeza los datos de la masa obtenida del agente estructurante saliente (180 T) ni el valor de reducción de peso (44.8 T) para obtener un balance exacto. Del mismo modo, la relación entre el peso del agente estructurante entrante respecto al saliente no se pudo determinar de manera precisa, ya que la diferencia fue incongruente, por ende se tomó en cuenta para temas del balance, el peso de compost obtenido.

El compost promedio generado en los tres túneles es equivalente al 41% del digestato entrante en base a la masa, con una reducción significativa de humedad de $43.4\% \pm 2.93$ ST y 70.89% SV respecto al digestato. Este dato presenta un alto rendimiento por haber obtenido un porcentaje mayor que resultados de otros trabajos como el de (Mancomunidad de la Ribera, 2010).

Los datos que se obtuvieron en la instalación por medio de este estudio, han aportado mejoras en la planta debido a que permitieron una mayor planificación respecto al rendimiento en los operadores. Se pudieron identificar puntos débiles y fueron fortalecidos. Adicional a esto, los datos contribuyeron a alcanzar una mayor eficiencia y organización para así cumplir los objetivos propuestos por la administración.

3.5 Índice de Respirometría

Los índices de estabilidad biológica en sus distintas maneras (dinámico o acumulativo) son altamente recomendados cuando se requiere llevar a cabo una evaluación sobre la eficiencia en general de una instalación de tratamiento de residuos (Cossu & Raga, 2008). Los valores IRD, IRD_{24h} y AT₄ son presentados en la tabla 4 y expresados en materia seca para evitar resultados afectados por su variación en el contenido de materia orgánica como parte del proceso de biodegradación. También porque el agente estructurante que se encuentra presente en el proceso de compostaje

podría causar distorsión (Barrena et al., 2005). Con relación al comportamiento que tuvo cada muestra, se puede notar que el mayor consumo de oxígeno la obtuvo el digestato indicando que el material se va estabilizando a lo largo del proceso. Cada fase, principalmente en el túnel 1 presenta una reducción progresiva.

Tabla 4: Valores promedios de los triplicados de las muestras de cada fase en el Índice respirometría dinámico.

Túnel 1			
gO ₂ kg ⁻¹ MSh ⁻¹	IRD	AT4	
Digestato	1.344 ± 0.09	104.94	±
		39.00	
Mezcla (E)	0.586 ± 0.20	41.160 ± 13.54	
Mezcla (S)	0.371 ± 0.07	29.260 ± 4.29	
Compost	0.366 ± 0.08	26.990 ± 7.21	

Túnel 3			
gO ₂ kg ⁻¹ MSh ⁻¹	IRD	AT4	
Digestato	1.157 ± 0.05	51.36 ± 5.86	
Mezcla (E)	0.449 ± 0.03	21.77 ± 2.48	
Mezcla (S)	0.138 ± 0.04	6.55 ± 1.54	
Compost	0.28 ± 0.06	19.57 ± 1.57	

Los datos de respiración dinámica del túnel 2 no son presentados por errores técnicos durante la instalación de los reactores en los baños termostáticos. El proceso de estabilización desde el digestato hasta el compost ha sido un promedio de 26% de decrecimiento en el IRD. Esto indica un significativo y eficiente proceso de estabilización de la materia. En el túnel 3 se observa una ligera diferencia en la mezcla (S) con relación al compost, debido a que algunas de las astillas superaban los 40 mm y eran capaces de pesar hasta 30 g cada una, analizando las muestras en reactores con mayor capacidad, posiblemente se obtengan mezclas más homogéneas, ya que las muestras eran de 100 g, por ende, impedían poder introducir mayor cantidad de digestato. En el túnel 1 no se observa debido a que se introdujeron muestras que

contenían astillas más ligeras, y permitía que haya mayor cantidad de digestato en la mezcla consumiendo oxígeno.

AT4 es un indicativo de la materia orgánica total biodegradable en la muestra. Existe una variación significativa entre los dos túneles en las muestras del digestato (ver Tabla 4), en cambio, en los valores del IRD presentan valores similares. Esto es posible que se deba a que el contenido de materia orgánica biodegradable era diferente por algún cambio presentado en el proceso de digestión o durante la deshidratación, dando lugar a valores ligeramente distintos.

Podemos también notar que, independientemente del nivel de estabilidad de las muestras, los resultados del IRD tienen un consumo menor que $1.5 \text{ g O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ MSh}^{-1}$ debido a que la FORM ha sido digerida de manera anaeróbica previamente.

Los resultados mostrados del compost son similares a otros trabajos realizados en otras plantas de tratamientos de residuos municipales mediante procesos combinados aeróbico/anaeróbico (Pognani et al., 2012a). Estos resultados confirman la eficiencia que ha tenido el proceso de compostaje y la obtención de un material estable que no seguirá su proceso de degradación una vez aplicado al suelo.

4. Conclusiones

La metodología utilizada para realizar el balance de masa ha permitido una evaluación de la eficiencia del proceso de compostaje. En el transcurso de la recopilación de datos se fueron introduciendo mejoras en el área de estudio. Los resultados muestran que el compost tiene un bajo nivel de biodegradabilidad, sin embargo cuenta con cierta cantidad de metales pesados debido a carencias de máquinas que son fundamentales para obtener mejor calidad en el producto final. El proceso de estabilización del compost cumple con todos los parámetros necesarios para considerarlo estable. Los resultados proporcionados por el índice respirométrico confirman también una disminución progresiva en la biodegradabilidad de la materia orgánica. El compost resultante del proceso puede ser utilizado para jardinería y prácticas agronómicas sin restricción, según las normativas mencionadas anteriormente.

Este estudio determinó que la instalación trabaja con rendimientos altos en comparación a otras instalaciones. El mismo puede ser de gran aporte para el desarrollo

de nuevas instalaciones, con el objetivo de transformar los desechos en fuente de riqueza y reducir las emisiones que tanto afectan al medioambiente.

5. Bibliografía

- Adani, F., Confalonieri, R., & Tambone, F. (2004). Dynamic respiration index as a descriptor of the biological stability of organic wastes. *Journal of Environmental Quality*, 33(5), 1866–1876. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.1866>
- Ağdağ, O. N., & Sponza, D. T. (2005). Co-digestion of industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling reactors. *Process Biochemistry*, 40(5), 1871–1879. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.06.057>
- Agència de Residus de Catalunya. (2012). *More responsible food consumption - Proposals to prevent and avoid food wastage*. Retrieved from [http://www20.gencat.cat/docs/arc/Home/LAgencia/Publicacions/Centre catala del reciclatge \(CCR\)/guia_consum_responsable_EN.pdf](http://www20.gencat.cat/docs/arc/Home/LAgencia/Publicacions/Centre_catala_del_reciclatge(CCR)/guia_consum_responsable_EN.pdf)
- Agència de Residus de Catalunya. (2013). Programa general de prevención y gestión de residuos y recursos de Cataluña 2020. Retrieved from http://residus.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/planificacio/precat2

0/pinfrecat20__webcast.pdf

- Aida, G. (Universidad de S. (2015). Trabajo de Fin de Grado - Ingeniería Básica de una planta de compostaje en túneles. Retrieved from <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90483/fichero/TFGAidaGarrido.pdf>
- Barrena Gómez, R., Vázquez Lima, F., Gordillo Bolasell, M. A., Gea, T., & Sánchez Ferrer, A. (2005). Respiriometric assays at fixed and process temperatures to monitor composting process. *Bioresource Technology*, *96*(10), 1153–1159. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.026>
- Barrena Raquel, Artola Adriana, Font Xavier, Ponsa Sergio, Colón Joan, & Sánchez Antoni. (2013). La respirometría como herramienta para la clasificación de la biodegradabilidad de residuos orgánicos. Resultados de la experiencia de 10 años. Retrieved from <http://www.redisa.uji.es/artSim2013/CaracterizacionDeResiduosSolidos/RespirometriaClasificacionBiodegradabilidad.pdf>
- Campos, E., Bonmatí, A., Teira, M. R., & Flotats, X. (2001). *Aprovechamiento energético de lodos residuales y purines. Producción de biogás*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/251855102>
- Cesaro, A., Russo, L., & Belgiorno, V. (2015). Combined anaerobic / aerobic treatment of OFMSW: Performance evaluation using mass balances. *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, *267*, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.110>
- Colón, J., Ponsá, S., Álvarez, C., Vinot, M., Lafuente, F. J., Gabriel, D., & Sánchez, A. (2017). Bioresource Technology Analysis of MSW full-scale facilities based on anaerobic digestion and / or composting using respiration indices as performance indicators, *236*, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.172>
- Comisión Nacional Del Medio Ambiente - Departamento Descontaminación, P. Y. N. (2000). Norma de calidad de compost, 1–18.
- Cooperband, L. (2002). The Art and Science of Composting A resource for farmers and compost producers. *University of Wisconsin-Madison, Center for Integrated Agricultural Systems*, 1–14. Retrieved from <http://www.cias.wisc.edu/wp-content/uploads/2008/07/artofcompost.pdf>
- Cossu, R., & Raga, R. (2008). Test methods for assessing the biological stability of biodegradable waste. *Waste Management*, *28*(2), 381–388. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.014>
- Council, U. (2002). Test methods for the examination of composting and compost.

- Rokonkoma, NY, (December 1995). Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Test+Method+s+for+the+Examination+of+Composting+and+Compost#0>
- CresidusVO. (2017). Consorci per a la Gestió dels Residus del Vallès Oriental. Retrieved September 3, 2017, from <http://cresidusvo.info/conres/apartats/index.php?apartat=201>
- de Araújo Morais, J., Ducom, G., Achour, F., Rouez, M., & Bayard, R. (2008). Mass balance to assess the efficiency of a mechanical-biological treatment. *Waste Management*, 28(10), 1791–1800. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.002>
- Fernández, J. (2010). *Optimización de la digestión anaerobia seca de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura*. Universidad de Cádiz. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.046>
- Haug, R. T. (1993). *The practical handbook of compost engineering*. Lewis Publishers. Retrieved from <https://www.crcpress.com/The-Practical-Handbook-of-Compost-Engineering/Haug/p/book/9780873713733>
- Mancomunidad de la Ribera. (2011). Biometanización de residuos orgánicos. Retrieved from <http://www.mancoribera.com>
- Pognani, M., Barrena, R., Font, X., & Sánchez, A. (2012a). A complete mass balance of a complex combined anaerobic/aerobic municipal source-separated waste treatment plant. *Waste Management*, 32(5), 799–805. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.12.018>
- Pognani, M., Barrena, R., Font, X., & Sánchez, A. (2012b). Effect of freezing on the conservation of the biological activity of organic solid wastes, 104, 832–836. <https://doi.org/10.1018/j.biortech.2011.11.097>
- Pognani, M., Barrena, R., Font, X., & Sánchez, A. (2012c). Effect of freezing on the conservation of the biological activity of organic solid wastes. *Bioresource Technology*, 104, 832–836. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.097>
- Ponsá, S., Gea, T., & Sánchez, A. (2010). Different indices to express biodegradability in organic solid wastes. *Journal of Environmental Quality*, 39(2), 706–712. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0294>
- Puyuelo, B., Ponsá, S., Gea, T., & Sánchez, A. (2011). Determining C/N ratios for typical organic wastes using biodegradable fractions. *Chemosphere*, 85(4), 653–659. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.07.014>

- Richard M. Felder, & Ronald W. Rousseau. (2005). *Elementary Principles of Chemical Processes* (Third). Retrieved from [http://197.14.51.10:81/pmb/CHIMIE/Elementary Principles of Chemical Processes 3.pdf](http://197.14.51.10:81/pmb/CHIMIE/Elementary%20Principles%20of%20Chemical%20Processes%203.pdf)
- Vigneswaran, S., Kandasamy, J., & Johir, M. A. H. (2016). Sustainable Operation of Composting in Solid Waste Management. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.022>

6. Anexo

Anexo I:

Herramienta de Excel utilizado como soporte del balance de masa, utilizando ratios de las analíticas tomadas y los datos obtenidos del promedio de los tres túneles.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
2				Analíticas AVG.					* MESCLA DIGEST I ASTELLA + CÀRREGA TÚNEL				
3			Datos de Túnel						Massa a compostar (T/d)			71.762	
4		* CARACTERITZACIÓ FLUXOS							Volum a compostar (m3/d)			80.0	
5		Volum a deshidratar (m3)			677				Volum astella (m3/d)			280.4	
6		% ST digestor			2.8				Massa astella (T)			131.5	
7		ro digestor (T/m3)			1				Massa Cama astella (T)			7.888079	
8		% T digest/m3 a deshidratar			10.6%				Massa TOTAL mescla (T)			203.2	
9		% ST digest			30%				Volum Mescla			346.978	
10		ro digest (T/m3)			0.90				% Túnel omplert			99.49%	
11		% ST astella			54%				Massa digest pendent (T) x 100% Túnel			0.36	
12		ro astella (T/m3)			0.47								
13		% ST mescla			46%				TOTAL a mesclar digest Samurai (Unitats)			24.7	
14		ro mescla (T/m3)			0.59				Temps TOTAL Samurai (h)			0.381	
15		Relació digest			1				(Càrrega+descàrrega+entr. Túnel)				
16		Relació astella			3				Temps TOTAL amb X unitats (h)			9.42	
17		% ST sort. Túnel			52%				* DESCÀRREGA TÚNEL + REFÍ				
18		ro sort. túnel (T/m3)			0.49				Massa a descarregar (T)			198.1	
19		Volum túnel (m3)			348.7				Índice Reducció Pes			6.17%	
20		* MASSA MATERIAL							nº palades descàrrega (un.)			90.9	
21		Pes pala astella (T)			1.65				Temps TOTAL x descarregar túnel (h)			2.52	
22		Pes palada digest (T)			2.9				Temps refinar tot el material (h)			19.8	
23		Pes palada mescla(T)			2.8				TEMPS TOTAL (h)			22.33	
										TOTAL (h)	TRANSF /	PLANTA	
24		Pes palada sort. Túnel (T)			2.18				TORN MATÍ	7	2	5	
25		*CAPACITAT EQUIPS	min	seg					TORN TARDA	7	2	5	
26		t càrrega digest (h)	1	0	0.017				TORN NIT	6.58	4.58	2	
27		t càrrega astella (h)	1	15	0.021				TORN REFORÇ NIT	7		7	
28		t Samurai (h)	7	0	0.117				* COMPOSTATGE 20mm				
29		t càrrega túnel(h)	1	30	0.025				Relacion Compostatge/Descarrega			20%	
30		t descàrrega túnel (h)	1	40	0.028				Massa TOTAL de Compost (T)			39.6	