

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ciencias Ambientales



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“PUESTA EN MARCHA DE UN
REACTOR DE FERMENTACIÓN
AEROBIO DEL COMPLEJO DE
VALORIZACIÓN DE RESIDUOS
DOMÉSTICOS DE
GUADASSUAR”**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

ALINA FEDOTOV FEDOTOVA

Tutor:

JUAN ANDRÉS GONZÁLEZ ROMERO

Cotutor:

JESÚS MENGUAL CUQUERELLA

GANDIA, 2019

Quiero agradecer por todo el apoyo recibido durante estos años de universidad a mi familia, que, a pesar de haberme cambiado de Teleco a Ambientales, lo volvería a hacer una y mil veces más. A todos mis amigos con los que he aprendido y he disfrutado cada uno de los días universitarios. A todos mis profesores por aportarme nuevos conocimientos y sobre todo a mis tutores de este Trabajo de Final de Grado que me han ayudado en mis momentos máximos de estrés.

RESUMEN

Cada año son más las toneladas de residuos sólidos urbanos que hay que eliminar. Las tasas de generación de estos residuos se han incrementado, llegando a producir una ruptura entre la biosfera del planeta y las actividades humanas que, a la larga, si no se realiza un correcto tratamiento y una buena gestión de los residuos, puede conllevar un gran problema a nivel económico, desarrollo social, tecnológico y sobre todo ambiental. No obstante, casi todos los materiales que llegan a una planta se revalorizan, con el objetivo principal de generar el mínimo rechazo posible. El reciclaje junto al compostaje son los principales sistemas que permiten reaprovechar los residuos. La modificación del Plan Integral de Residuos de la Comunitat Valenciana (PIRCV), decreto 81/2013, pretende impulsar un nuevo modelo de gestión de residuos, basado, principalmente, en una economía circular, esto es, políticas que favorezcan el residuo cero. Fomentar la utilización de residuos en cascada y maximizar los recursos disponibles tanto energéticos como materiales es la base de este modelo. Este proyecto trata de la puesta en marcha de un reactor de fermentación aerobia, de una planta fija de clasificación y valorización de residuos sólidos urbanos, en el cual se pretende analizar el proceso de compostaje mediante el control de los parámetros principales, que son la temperatura, la humedad, el pH, la presión y la velocidad del sistema de aspiración forzada, así como la correcta oxigenación del material, intentando optimizar al máximo posible los gastos en el proceso y obtener, finalmente, un material biestabilizado de calidad.

PALABRAS CLAVE: material bioestabilizado, reactor aerobio, residuos sólidos urbanos, compostaje, control de proceso.

ABSTRACT

Proposal Every year, more and more tones of urban toxic waste have to be disposed of. The rate of generation of this type of waste has increased in such a scale that it has even produced a breaking between the planet biosphere and human activities. In due course, an appropriate treatment is not carried out along with a correct waste management enormously, so damaging consequences are expected in economic, social and technological development and environmental terms. Nevertheless, nearly all material arriving to plants is revalved with the main purpose of generating the least possible rejecting. Recycling together with composting are the main systems that allow the possibility of reusing organic waste. The modification of the Integral Plan of Waste in the Comunitat Valenciana (PIRCV) within the 81/2013 decree, is aimed at promoting a new model to waste management mainly built on a circular economy intending to reach zero waste emissions. Promoting the use of waste in cascade along with the maximising of available resources as much in energy as in material terms are the basic of this model. This project refers to the starting of a fermentation reactor, a permanent classification and revaluation plant devoted to home waste. This plan to analyse the management of the composting process based on the control of the main parameters like temperature, humidity, pH level, pressure, the velocity of the forced aspiration system as well as the correct oxygenation of materials to optimize the maximum possible expenses in the process and obtain a biostabilized quality material.

KEYWORDS: biostabilized material, aerobic reactor, urban solid wastes, composting, control process

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. GENERACIÓN DE RSU	1
1.2. MARCO LEGAL DE RSU	3
1.2.1. Ámbito de la Unión Europea	3
1.2.2. Ámbito Estado Español	4
1.2.3. Ámbito de la Comunitat Valenciana	6
1.3. FORMAS DE APROVECHAMIENTO.....	7
1.2.1. Proceso de compostaje	7
1.2.2. Evolución de los sistemas de compostaje utilizados en la planta de Guadassuar	8
1.2.3. Calidad del material bioestabilizado.....	10
1.2.4. Aplicaciones del material bioestabilizado	13
2. OBJETIVO DEL ESTUDIO.....	14
3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA BAJO ESTUDIO	15
3.1. ANTECEDENTES.....	15
3.2. LOCALIZACIÓN.....	16
3.2.1. Área de gestión.....	16
3.3. DESCRIPCIÓN DE LA NUEVA INSTALACIÓN	18
3.3.1. Instalación 2E	18
3.3.2. Instalación 1.....	22
4. CONTROL DEL PROCESO	28
4.1. Proceso de bioestabilización	28
4.2. PARÁMETROS PRINCIPALES.....	29
4.2.1. Oxigenación del material	29
4.2.2. Temperatura	32
4.2.3. Humedad	32

4.2.4 pH.....	33
5. MATERIAL Y MÉTODOS.....	33
5.1 MATERIAL E INSTRUMENTOS PARA MEDIDAS DE LABORATORIO.....	33
5.1.1 Temperatura de la biomasa	34
5.1.2 Velocidad y temperatura del aire	34
5.1.3 Presión.....	34
5.1.4 pH.....	35
5.1.5 Humedad	35
5.2 MÉTODO DE MUESTREO.....	35
5.3 MÉTODOS UTILIZADOS	36
5.3.1 Determinación de temperatura.....	36
5.3.2 Determinación de la humedad	37
5.3.3 Determinación del pH.....	38
5.3.4 Control del sistema de aspiración forzada.....	38
5.3.4. Caracterización del material bioestabilizado	39
6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	40
6.1 RESULTADOS DEL PROCESO BIOMAX.....	40
6.2 RESULTADOS DE LA BIOMASA	40
6.3 RESULTADOS DEL MATERIAL BIOESTABILIZADO.....	43
6.4 RESULTADOS DEL CONTROL DE LA AIREACIÓN.....	44
6.5 RESULTADOS CARACTERIZACIÓN.....	47
6.6 ANÁLISIS MATERIAL BIOESTABILIZADO	47
7. CONCLUSIONES	49
8. REFERENCIAS.....	51

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, son muchos los aspectos económicos, sociales y culturales que aceleran la continua generación de residuos, principalmente debido a los hábitos consumistas que caracterizan nuestra sociedad. Es por eso por lo que es necesario dar una salida a estos residuos de forma más social, económica y ambiental. Para realizar una correcta gestión de los residuos, tal y como indica la Directiva Europea 2008/98/CE, debemos de seguir cinco niveles de jerarquización durante todo el ciclo de vida de un producto que son: la prevención, preparación para la reutilización, reciclado, otro tipo de valorización (recuperación energética) y eliminación (vertedero).

La fracción biodegradable, tanto de recogida separada como aquella que corresponde a la recogida mezclada, puede destinarse a instalaciones de tratamiento mecánico-biológico, como es el caso del Complejo de Tratamiento de Residuos de Guadassuar. El tratamiento mecánico-biológico es la combinación de procesos físicos y biológicos que transforma la fracción biodegradable en material estable e higienizado. En el caso estudiado, el tratamiento biológico se realiza de forma aerobia, en el que el proceso se produce bajo condiciones de humedad, aireación y temperatura controladas, con el objetivo de poder separar las diferentes fracciones de materiales valorizables. Entre otros, el producto final obtenido es un material bioestabilizado que puede ser utilizado como enmienda orgánica en agricultura.

1.1. GENERACIÓN DE RSU

Cada año son más las toneladas de residuos sólidos urbanos recogidos y que hay que eliminar. Como se muestra en la tabla 1.1, gracias a los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en 2016 se recogieron en la Comunitat Valenciana un total de 2.209.773 (INE, 2018) toneladas de residuos urbanos. La cantidad de residuos mezclados ha ido decayendo a partir del 2010, pero se ha vuelto a incrementar a partir del 2015. Como se observa las toneladas de residuos de recogida separada decae con los años. Tanto la cantidad recogida de residuos de vidrio y envases mixtos ha ido aumentando, en cambio, la recogida de papel sufre más oscilaciones en cuanto a cantidades.

Tabla 1.1 Cantidad de residuo urbano recogido clasificado tipo de residuo recogido.

Fuente: Instituto Nacional de estadística.

	CANTIDAD DE RESIDUOS EN LA COMUNITAT VALENCIANA (TONELADAS)						
	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010
Residuos de vidrio	82.254	80.869	79.025	80.869	79.540	74.444	77.146
Residuos de papel y cartón	62.387	54.032	57.928	54.032	60.294	66.658	75.158
Envases mixtos y embalajes mezclados	43.424	42.150	40.546	39.796	40.158	41.815	41.120
TOTAL RESIDUOS MEZCLA-DOS	1.937.324	1.910.187	1.887.879	1.827.633	1.857.388	1.896.795	1.928.610
TOTAL RESIDUOS DE RECOGIDA SEPARADA	272.449	277.192	278.717	313.975	291.574	324.998	376.205
TOTAL RESIDUOS	2.209.773	2.187.379	2.166.596	2.141.608	2.148.962	2.221.793	2.304.815

En la generación de residuos hay que tener en cuenta determinados factores (Guía Técnica sobre la gestión de residuos Municipales, 2014) ya que no todas las comunidades autónomas general las mismas cantidades y el mismo tipo de residuo. Los parámetros que afectan a este cambio y determinan la tipología del residuo generado son, entre otros, el tamaño de la población, la época del año y el nivel socioeconómico.

- **Influencia del tipo de la población:** El tamaño de la población, es decir, el número de habitantes determina tanto la cantidad como la tasa de residuos generados. Cuanta mayor es la población, mayor es el número de actividades comerciales, de servicio e industriales; eso genera más residuos de diferente tipología por habitante. En cambio, en poblaciones pequeñas y con escasa actividad industrial los residuos, en su gran mayoría, son domésticos y, a veces, de fácil reutilización y aprovechamiento energético.

También hay que tener en cuenta que en los grandes núcleos urbanos los hábitos de consumo, en su mayoría, son de usar y tirar, generando más residuos de envases que las pequeñas poblaciones.

La estacionalidad de la población es otra variable ya que no es lo mismo las cantidades de residuos generadas en zonas vacacionales, donde aumenta la población en determinadas épocas del año, que en grandes ciudades donde, al contrario, la población se reduce.

- Influencia de la época del año: Es un factor que influye en los alimentos consumidos, por tanto, en la composición del residuo generado.

Por ejemplo, en invierno se consumen principalmente alimentos envasados mientras que en verano son residuos compuestos por más materia biodegradable, como frutas y verduras, y mayor contenido en humedad.

- Nivel socioeconómico: El nivel de vida también afecta en la generación y tipo de residuos, ya que si hay una mayor actividad económica hay un incremento en la generación de residuos, pero no necesariamente crecen ambos factores al mismo tiempo. Una de las principales metas para los siguientes años en la gestión de residuos es romper esta tendencia entre mayor desarrollo socioeconómico y mayor cantidad de residuos producidos, rompiendo la relación actual entre nivel de vida con la filosofía de usar y tirar.

1.2. MARCO LEGAL DE RSU

En este apartado se va a comentar la legislación vigente en materia de residuos sólidos y en sobre el material bioestabilizado final obtenido. En ambos casos, se analizará en los tres niveles legislativos: ámbito de la Unión Europea, el que constituye a nivel estatal y, finalmente, la legislación autonómica de la Comunitat Valenciana.

1.2.1. Ámbito de la Unión Europea

La Directiva Marco 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se deroga la Directiva Marco de Residuos de la UE, se desarrolla en un contexto europeo con un gran crecimiento económico y social, en el que la producción de residuos sigue creciendo.

Aparece la necesidad de evaluar las definiciones de valorización y eliminación, así como el debate de la definición de residuo.

La citada Directiva 2008/98/CE, se enmarca en los principios básicos de protección de la salud de las personas y del medio ambiente dentro de los países de la Unión Europea. Se aspira a conseguir una *“sociedad de reciclado y contribuir así con la lucha del cambio climático”*.

Dicha Directiva 2008/98/CE establece expresamente *“llevar a cabo una evaluación sobre la gestión de los biorresiduos con vistas a realizar una propuesta legislativa si fuera apropiado”,* y analizar *“la oportunidad de establecer requerimientos mínimos para la gestión de los biorresiduos y criterios de calidad para el compost y el digestato”*.

1.2.2 Ámbito Estado Español

A nivel Estatal la transposición de la anterior Directiva Marco se lleva a cabo mediante la Ley 22/2011, de 28 de julio de Residuos y Suelos Contaminados que deroga la anterior Ley 10/1998 de 21 de abril, de Residuos. Los objetivos y obligaciones principales que persigue esta ley son, entre otros, intentar actualizar el régimen jurídico de la producción y gestión de residuos y fomentar medidas para reducir los impactos asociados a la producción y gestión; para ello, se redefinen conceptos tales como residuo, reutilización, reciclado, valorización, eliminación, suelo contaminado y compost.

Según la Ley 22/2011 se entiende por residuo *“Cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar”*. La nueva jerarquía de residuos establece un orden de prioridad para la gestión de los mismos en cinco niveles: prevención, preparación para la reutilización, reciclado, otro tipo de valorización y eliminación. Como se muestra en la figura 1.1, la idea principal para el 2030 es cambiar la disposición de la pirámide de gestión de los residuos (art 8, Ley 22/2011, de 28 de julio) dándole más hincapié a la prevención y a la educación ambiental, disminuyendo así el porcentaje final que vaya a rechazo.

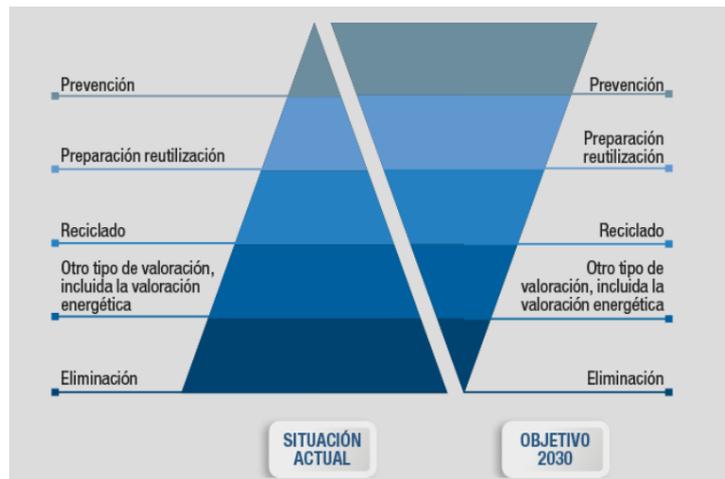


Figura 1.1 Jerarquía Europea en la gestión de residuos. Fuente: AENOR.

Tal y como se recogía en la Directiva 2008/98/CE, esta Ley 22/2011 dicta que antes del 2015 debía establecerse una recogida separada de biorresiduos para destinarlos al compostaje o digestión aerobia. Es conveniente definir conceptos clave como biorresiduo y compost:

Según la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, se define compost como *“enmienda orgánica obtenida a partir del tratamiento biológico aerobio de residuos biodegradables recogidos separadamente”* (art. 3). *Queda excluido de esta definición el material compostado de fracción orgánica de residuos procedente de recogida no selectiva, y separada mecánicamente, al que se denomina “bioestabilizado”*.

La fracción orgánica de los residuos municipales (FORM) se denomina legalmente “biorresiduo” (Directiva 2008/98/CE) y es definida como *“aquel residuo biodegradable de jardines y parques, residuos alimenticios y de cocina procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimientos de venta al por menor; así como, residuos comparables procedentes de plantas de procesado de alimentos”*.

La diferencia principal entre compost y material bioestabilizado es que el compost no se considera residuo, mientras que material bioestabilizado sí. La desventaja del material bioestabilizado frente al compost es que no puede ser comercializado como un fertilizante (PEMAR,2015) en su proceso de fermentación si no se realiza de manera correcta puede haber malos olores y contaminación, las aplicaciones del material bioestabilizado en los suelos es mucho más reducida y condicionante que el compost, como se detalla en el apartado 1.2.4 y el coste de comercialización es bastante inferior al del compost (3,00- 4,50 euros la tonelada).

Así mismo, su sección tercera hace referencia expresa a estos residuos, y aconseja que los planes y programas impulsados por las autoridades ambientales cumplan las siguientes medidas:

- a) La recogida separada de biorresiduos para destinarlos al compostaje o a la digestión anaerobia, en particular de la fracción vegetal, los biorresiduos de grandes generadores y los biorresiduos generados en los hogares.
- b) El compostaje doméstico y comunitario.
- c) El tratamiento de biorresiduos recogidos separadamente de forma que se logre un alto grado de protección del medio ambiente llevado a cabo en instalaciones específicas sin que se produzca la mezcla con residuos mezclados a lo largo del proceso.

En su caso, la autorización de este tipo de instalaciones deberá incluir las prescripciones técnicas para el correcto tratamiento de los biorresiduos y la calidad de los materiales obtenidos.

- d) El uso del compost producido a partir de biorresiduos y ambientalmente seguro en el sector agrícola, la jardinería o la regeneración de áreas degradadas, en sustitución de otras enmiendas orgánicas y fertilizantes minerales.

Por otro lado, (PEMAR,2015) establece que los residuos domésticos y comerciales destinados a la preparación para la reutilización y reciclado deberán alcanzar, en conjunto, como mínimo el 50% en peso antes del 2020.

1.2.3 Ámbito de la Comunitat Valenciana

La Constitución Española de 1978 en sus artículos 148.1.1 y 149.1.23 establece que el Estado tiene las competencias en legislación sobre la protección del Medio Ambiente. Las Comunidades Autónomas tienen la capacidad de establecer normas adicionales de control, al igual que el desarrollo legislativo a nivel de reglamento y ley.

En cuanto a legislación propia de la Comunitat Valenciana en materia de residuos se encuentra el Decreto 55/2019 de 5 de abril, del Consell, por el que se aprueba la revisión del Plan integral de residuos de la Comunitat Valenciana (PIRCV). La modificación reciente del plan que se ha tramitado como nuevo decreto, buscando una transición hacia un modelo en la línea con la directiva marco en cuanto a fomentar la prevención en la generación, la preparación para la reutilización y el reciclado eficiente.

Tiene como base los principios de la economía circular orientados al “residuo cero”, en el cual se impulsa una recogida selectiva de biorresiduos con el objetivo de no superar el máximo del 10% llevados al vertedero. Otras de las novedades propuestas por el plan (PIRCV) son:

- Se pretende fomentar el uso de materiales obtenidos a partir de biorresiduos como técnica de valorización.
- Impulsa sistemas de pago por generación a través de sistemas de recogida como puede ser el de puerta a puerta.
- A partir de 1 de julio de 2020 queda prohibida la venta de platos, cubiertos, tazones, tazas y bandejas alimentarias de un solo uso hechos de plástico que no entren dentro del ámbito de aplicación de la Directiva 94/62/CE.
- El artículo 14 promueve la implantación de un educador ambiental por cada 5.000 habitantes.

Otra ley que debemos de tener en cuenta es la Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de residuos de la Comunitat Valenciana cuyo objetivo principal es *“establecer el régimen jurídico de la producción y gestión de los residuos, así como la regulación de los suelos contaminados, con el fin de proteger la salud humana y el medio ambiente”* (DOGV)

El material bioestabilizado para fines en la agricultura debe cumplir los estándares de calidad que se exijan en la normativa básica estatal en materia de afines y fertilizantes. La legislación en materia del plan Zonal 5, del Área de Gestión V4, zona en la que se encuentra ubicada la instalación objeto del presente estudio, queda aprobada mediante la Orden de 29 de octubre de 2004, del conseller de Territorio y Vivienda. En dicha orden se establece que la planta de tratamiento debe formar parte de las instalaciones con las que dar respuesta a las necesidades de tratamiento que precisa el Plan Zonal X, XI y XII.

1.3 FORMAS DE APROVECHAMIENTO

1.2.1 Proceso de compostaje

En la actualidad, se encuentran diferentes configuraciones de proceso en la gestión de los residuos sólidos urbanos, que incluyen el compostaje y la digestión anaerobia. Los principales sistemas de compostaje se pueden clasificar en dos grupos: sistemas abiertos y sistemas cerrados (MAPAMA,2018).

Dentro de los sistemas abiertos se encuentra el denominado por pilas y es el método más generalizado por razones económicas. En este caso, los materiales a compostar se han de apilar de manera alargada sin comprimirlos excesivamente, para así permitir una aireación. El tamaño de la pila viene determinado por la cantidad de material a compostar y el área disponible para realizar el proceso, el tamaño medio oscila entre 1,5 -2 metros de alto para facilitar las tareas de volteo, y de un ancho de entre 1,5 -3 metros (FAO,2013).

En una pila, el aire caliente, generado por la actividad biológica de descomposición, se mueve por convección hacia la parte superior, permitiendo la entrada de aire frío. En este tipo de configuración, el centro de la pila presenta la temperatura más elevada. La aireación de las pilas puede ser natural o forzada. Las pilas pueden ser también aireadas por volteo. La frecuencia de los volteos dependerá del tipo de material a compostar, de la temperatura y de humedad.

En cambio, los sistemas cerrados se basan en la utilización de un reactor o digestor. Los principales sistemas cerrados de compostaje son en túnel, en nave, en contenedor o en tambor. Estos sistemas requieren costes más elevados, presentan la ventaja de ser más rápidos y por tanto requieren mucho menos espacio para tratar el mismo volumen de residuos. Normalmente el compost que se produce dentro de los reactores no presenta un estado correcto de maduración y se le somete posteriormente a un proceso de compostaje en pilas de poca duración que se denomina proceso de maduración o curación.

1.2.2 Evolución de los sistemas de compostaje utilizados en la planta de Guadassuar

La planta ha pasado por diferentes métodos de compostaje, mejorando sus técnicas hasta el día de hoy. En 1987 se inicia la actividad de la planta. Gracias a una cinta el material se apilaba y el operario de la pala cargadora transportaba la fracción inicial a la era de fermentación para la creación de las líneas. Estaba dividida en cinco parques y cada parque en cinco líneas. Las líneas primarias, tenían un peso comprendido entre 450 y 800 toneladas (datos internos de la planta de Guadassuar). El volteo se realizaba de forma mecánica gracias a una maquina volteadora y el tiempo de fermentación en las eras duraba aproximadamente 55 días.

Una vez finalizado el proceso de fermentación, el compost pasaba al parque de secado donde, mediante aireación forzada, se reducía la humedad de este para poder afinar el producto. La fermentación era controlada solamente mediante la medición de la temperatura y el contenido de CO₂. Por último, el proceso de afino consistía en hacer pasar el compost por un trómel de cribado y, posteriormente, por una mesa densimétrica separando los vidrios y componentes duros de pequeño tamaño, quedando un compost limpio y libre de impurezas (anexo 9.1).

Este sistema en hileras, al realizarse en un entorno abierto sin ningún tipo de infraestructura que protegiera las pilas, a menudo podía ocasionar problemas en el control de la temperatura, en la emisión de olores y compuestos orgánicos volátiles. En la figura 1.2a puede apreciarse el complejo de Guadassuar en sus inicios.



Figura 1.2 a) Vista de la planta de Guadassuar sin cubierta (fermentación)1989 b) Zona de fermentación con cubierta (2002). Fuente: Domingo Añó, personal de la planta.

A partir del 2002 la planta de Guadassuar sufrió unas modificaciones en cuanto al mecanismo de aireación; las líneas primarias tenían un sistema de aireación forzado en continuo cuyo objetivo era eliminar los malos olores, mejorar el proceso y conseguir una correcta oxigenación del producto. El número de parques y el de líneas se seguía manteniendo como en los anteriores años. En cambio, el peso comprendido en las líneas primarias había aumentado entre 640 y 890 toneladas, dependiendo de la cantidad de entrada de RSU. La novedad principal era la instalación de unas sondas conectadas a un sistema informático sobre las líneas primarias que realizaban mediciones de oxígeno y temperatura al igual que la construcción de una cubierta (figura 1.2b) La fermentación del resto de las líneas era controlada mediante la medición de la temperatura y el contenido de CO₂.

En 2007 se construye el reactor de fermentación Biomax-G de 1764 m² (datos internos de la planta de Guadassuar) de superficie (84 x 21 metros) como se muestra en la figura 1.3.

Este reactor estaba construido con paredes de acero inoxidable y estaba dotado de suelo técnico donde se alojaba el sistema de aireación forzada del residuo. Este tipo de reactor es muy parecido al que hay hoy en día y que será comentado, más detalladamente, en apartados posteriores. La única diferencia principal que cabe recalcar con el sistema actual es que el control de la ventilación se realizaba de una manera más global, ya que no se podía separar, como en este nuevo caso, en diferentes zonas y realizar un control más detallado para cada una de ellas.



Figura 1.3 Instalación reactor y cierre perimetral 2007. Fuente Domingo Añó, personal de la planta

1.2.3 Calidad del material bioestabilizado

Para los productos fertilizantes según el RD 506/ 2013, de 28 de junio sobre los productos fertilizantes se deben cumplir una serie de criterios:

- El contenido máximo de humedad permitido será del 30-40%.
- El 98% del producto fertilizante deberá pasar por una malla de 25 mm.
- Deberá de haber un límite máximo de microorganismos; Salmonella ausente en 25 g de producto; *Escherichia coli* < 1000 NMP por gramo de producto.

El material fertilizante en cuanto a cantidad de metales pesados se diferencia en tres clases: A, B Y C según se recoge en el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio se especifica en la figura 1.4.

Metal pesado	Límites de concentración		
	Sólidos: mg/kg de materia seca		
	Líquidos: mg/kg		
	Clase A	Clase B	Clase C
Cadmio	0,7	2	3
Cobre	70	300	400
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1.000
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Cromo (total)	70	250	300
Cromo (VI) *	No detectable según método oficial	No detectable según método oficial	No detectable según método oficial

Figura 1.4. Límite de concentración de metales pesados. Fuente: Anexo V del Real Decreto 506/2013, de 28 de junio.

Los criterios anteriores no pueden ser aplicados para el producto obtenido en la planta de Guadassuar al no estar inscrita en el Registro de productos fertilizantes y afines ya anteriormente no se cumplían con los requisitos exigidos de granulometría. La utilización del material bioestabilizado en el suelo tiene la consideración de (operación de valorización) R10 del Anexo II de la Ley 22/2011 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). Para la obtención de tal consideración de valorización R10 tiene que haber una autorización por parte del gestor y comunicación del material bioestabilizado a la Comunidad Autónoma donde vaya a realizarse la correspondiente aplicación.

Para la utilización del material bioestabilizado y del compost no inscrito en el Registro de productos fertilizantes, bajo la consideración de operación R10, se exigen una serie de requisitos al material final bioestabilizado para su aplicación en los suelos, que se recogen en la figura 1.5.

Parámetros agronómicos	Valor	Unidades
Materia orgánica total	≥ 25	%
Humedad	20 - 40	%
Corgánico/Norgánico	<20	---
Partículas que pasan por la malla de 25 mm	≥90	%
Impurezas	Valor	Unidades
Las piedras y gravas eventualmente presentes, de diámetro superior a 5 mm	≤5%	%
Las impurezas (metales, vidrios y plásticos) eventualmente presentes de diámetro superior a 2 mm	≤3%	%
Madurez		Unidades
RotteGrade	Mínimo III	---
Higienización	Valor	Unidades
Salmonella	Ausente en 25 g de material bioestabilizado	---
Escherichia coli	< 1000	NMP/g
Metales Pesados	Valor	Unidades
Cadmio	< 3	mg/kg de materia seca
Cobre	< 400	
Níquel	< 100	
Plomo	< 200	
Zinc	< 1.000	
Mercurio	< 2,5	
Cromo (total)	< 300	

Figura 1.5 Características exigibles al material bioestabilizado. Fuente: Anexo II de la Ley 22/2011 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

En las aplicaciones de material bioestabilizado en los suelos agrícolas, se deberá disponer de un análisis del suelo receptor con las características químico-físicas que se muestran en la figura 1.6.

PARAMÉTROS A ANALIZAR EN EL SUELO RECEPTOR

Parámetros agronómicos	UNIDADES
pH	-----
C/N	-----
Materia orgánica oxidable	% sms
Nitrógeno	% sms
Fósforo	mg/kg sms
Potasio	mg/kg sms
Calcio	mg/kg sms
Magnesio	mg/kg sms
Hierro	mg/kg sms
Metales pesados	mg/kg sms
Cadmio	mg/kg sms
Cobre	
Níquel	
Plomo	
Zinc	
Mercurio	
Cromo	

Figura 1.6 Análisis de los suelos receptores. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

El material bioestabilizado no podrá aplicarse en suelos agrícolas en el caso en que la concentración en metales pesados en el suelo sea igual o superior a los valores que se muestran en la figura 1.7.

VALORES LÍMITES DE METALES PESADOS EN LOS SUELOS

Metales pesados	Valores límite (mg/kg sms)	
	Suelos con pH<7	Suelos con pH>7
Cadmio	1	3
Cobre	50	210
Niquel	30	112
Plomo	50	300
Zinc	150	450
Mercurio	1	1,5
Cromo	100	150

Figura 1.7 Valores límite de metales pesados en suelos agrícolas. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

1.2.4 Aplicaciones del material bioestabilizado

Aquellas plantas que tenían registrado el material obtenido como compost antes de la entrada en vigor de la Ley 22/2011 y que se elabore con residuos biodegradables recogidos de forma separada o no, el producto obtenido se sigue gestionando como compost. Por el contrario, como es el caso de la planta de Guadassuar, las plantas que no tenían registrado, a la entrada en vigor de la citada ley, el material como compost, tienen las siguientes posibilidades (CONAMA, 2016)

- Acopio en planta a la espera de que se regule y pueda ser comercializarlo. La duración del almacenamiento temporal del material bioestabilizado, destinado a la aplicación al suelo, no puede superar los dos años, tal y como lo dicta la Ley 22/2011.
- Uso principal para la restauración de canteras, taludes, minas, carreteras. También es utilizada para coberturas intermedias en depósitos en activo, coberturas finales en depósitos clausurados o como sustrato y regenerador de zonas incendiadas.
- Solicitar la autorización específica para la gestión del bioestabilizado mediante el tratamiento de valorización R10.

La dosis para aplicar en los suelos agrícolas deberá establecerse para cada caso, considerando el análisis obtenido de la caracterización del material bioestabilizado, del suelo receptor y del cultivo, garantizando en todo momento la protección del medio ambiente. La dosis de aplicación sobre suelos agrícolas no puede ser superior a 5 toneladas de materia seca por hectárea y año. Sólo podrá superarse esa cantidad en un año cuando se justifique agrónomica y ambientalmente en el plan de fertilización, y siempre que el valor medio anual de 5 años no supere las 5 toneladas de materia seca por hectárea y año. Para la revegetación de taludes, restauración de canteras y cobertura de vertederos clausurados no podrán superar las 50 toneladas de materia seca por hectáreas y año (de una sola vez)

Por último, si no se reúnen las condiciones adecuadas para cumplir con los anteriores puntos habrá que gestionarlo a través de una operación de eliminación, con destino a vertedero. En el caso de Guadassuar al no tener la R10 en vigor (se espera obtenerla a finales de 2019) la gran parte de material bioestabilizado obtenido, acaba siendo depositado en el vertedero de Murcia.

2. OBJETIVO DEL ESTUDIO

Una correcta gestión de la fracción biodegradable de los residuos urbanos es necesaria e importante, dado que suponen, aproximadamente, un poco menos de la mitad del total de residuos sólidos urbanos generados. Además, la posibilidad de su aprovechamiento material, como enmienda orgánica para mejorar la idoneidad del suelo, es una de las alternativas más interesantes para su correcta gestión. A su vez, la legislación en materia de gestión de residuos obliga a su recogida selectiva y su posterior tratamiento de forma diferenciada.

En base a lo anterior, se hace necesaria la puesta en marcha de sistemas que permitan un adecuado tratamiento de este tipo de fracciones, teniendo en consideración las exigencias legales, maximizando la recuperación y reciclaje frente al rechazo y adaptándolos a los actuales estándares medioambientales. Cabe señalar que, en la actualidad, únicamente, existen diez (PIRCV) como esta en la Comunitat Valenciana y que sólo es posible evaluar la evolución durante el periodo de puesta en marcha con anterioridad a que el sistema se encuentre totalmente operativo.

El objetivo del presente proyecto es realizar un estudio sobre la puesta en marcha de un nuevo reactor de fermentación aerobio en la planta de tratamiento de residuos sólidos de Guadassuar, con el objetivo de mejorar el proceso existente y poder adaptarse a las demandas futuras. Esta puesta en marcha del nuevo reactor de tratamiento biológico aerobio requiere de continuos controles del proceso de fermentación de la materia orgánica, mediante la toma y análisis de diferentes parámetros de vital importancia para el mismo, tales como temperatura, humedad, aportación de oxígeno, malos olores, etc.

Por tanto, se pretende hacer un seguimiento, a lo largo del periodo de puesta en marcha y estabilización, de estos parámetros básicos de control, así como de la materia prima de entrada y material final bioestabilizado. Mediante este estudio se pretende conseguir, entre otros, una relación riego/aireación óptima reduciendo los gastos asociados a los mismos y conseguir, a su vez, un material bioestabilizado de calidad cumpliendo con los requisitos para su comercialización y aplicación en suelo agrícola.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA BAJO ESTUDIO

3.1 ANTECEDENTES

La planta de tratamiento de residuos fue construida en el año 1989 por la Diputación de Valencia en el polígono de la Garrofera de Guadassuar, para dar servicio a la Ribera y la Costera. A partir de esa fecha la instalación ha sufrido varias reformas para adaptarse a los nuevos estándares en el tratamiento de residuos urbanos. El 6 de octubre de 2006 se constituyó el Consorcio Ribera i Valldigna y en 2007 la planta ya pasó a ser gestionada por este Consorcio.

El 1 de noviembre 2016 comenzó a funcionar la nueva Planta de Guadassuar (Instalación 2E), zona de pretratamiento y recuperación de materiales, donde los residuos se convierten en nuevos recursos. En 2018 se procedió a la construcción de la nueva planta de compostaje y no es hasta el pasado 2 de junio de 2019 que no se inicia la actividad del primer reactor.

3.2 LOCALIZACIÓN

Las instalaciones del complejo de Valorización de Residuos Domésticos de Guadassuar, del Consorci Ribera i Valldigna, se encuentran en el término municipal de Guadassuar, comarca de La Ribera Alta, en el interior de la provincia de Valencia, ubicada en Camino Assagador, s/n, Polígono 7, parcelas 13, 45, 47, 48, 49, 50, 71, 75, 85 y 86, con coordenadas UTM(ETRS89, uso 30): X 713.618 m, Y 4.338.604 m, Z 35 m), tal y como se muestra en la figura 3.1. El término municipal de Guadassuar limita con las localidades de Alzira, L'Alcudia, Algemesí, Alginet, Benimodo, Carlet, Masalavés y Tous. El término municipal de Guadassuar cuenta con una extensión de 35,3 km² y 5.914 habitantes (ARGOS, 2018). El centro de la ciudad se sitúa a una altitud de 25 metros sobre el nivel del mar.



Figura 3.1 Término municipal Guadassuar, localización Complejo Valorización Residuos Domésticos de Guadassuar. Fuente: elaboración propia.

3.2.1 Área de gestión

En el ámbito autonómico, los dos tipos de planes de obligado cumplimiento por las administraciones públicas y particulares son el Plan Integral de Residuos y los planes zonales. Estos garantizan una correcta gestión de los residuos sólidos en toda la Comunitat Valenciana.

La instalación se encuentra dentro del plan Zonal de las Zonas X, XI y XII, Área de Gestión 1 que queda aprobada mediante la Orden de 29 de octubre de 2004, del Conseller de Territorio y Vivienda.

En 2013, con la aprobación del nuevo Plan Integral de Residuos de la Comunitat Valenciana, el territorio queda dividido en 11 Planes Zonales que, a su vez se, agrupan en 13 áreas de gestión, tal y como se muestra en la figura 3.2. En el ámbito territorial la zona de estudio de nuestro proyecto pasa a denominarse Plan zonal 5, con el Área de gestión V4.

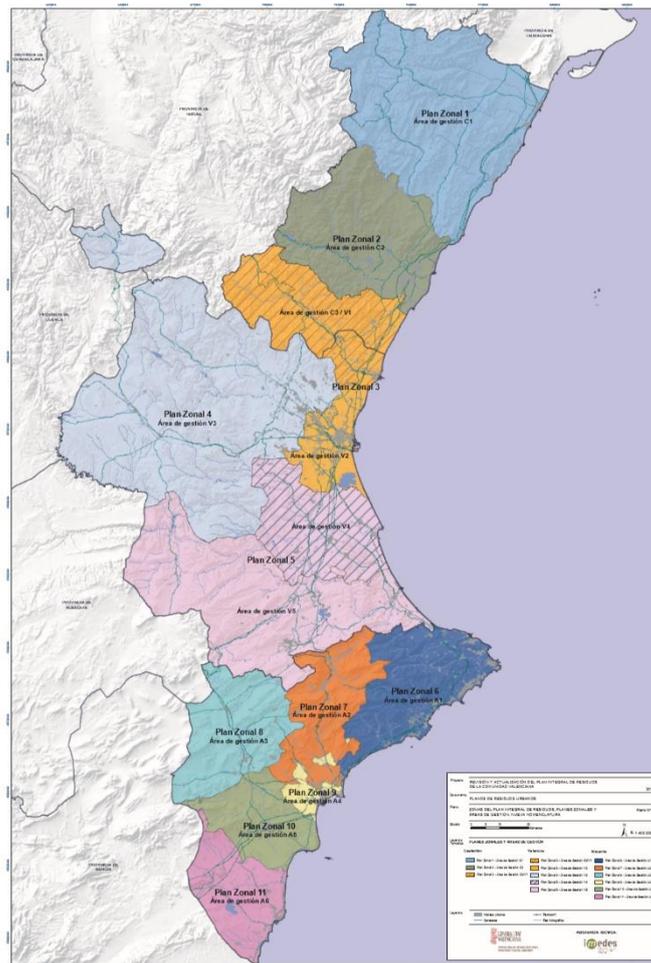


Figura 3.2 Zonificación para la gestión de residuos domésticos.

Fuente PIRCV (Generalitat Valenciana)

El *Consorcio Ribera i Valldigna* (CRiV) es uno de los 13 consorcios de la Comunitat Valenciana que da servicio a las comarcas de la Ribera Baixa, Ribera Alta y la Valldigna, cubriendo las necesidades de unos 325.000 habitantes, repartidos en 51 municipios consorciados y abarcando una superficie aproximada de 1.400.000 m². Los municipios que componen el CRiV de las tres comarcas se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Municipios del CRi Plan zonal 5, con el Área de gestión V4.

Fuente: Sede Electrónica de Ribera i Valldigna.

COMARCA DE LA RIBERA ALTA				COMARCA DE LA RIBERA BAIXA		SUBCOMARCA DE LA VALLDIGNA
Beneixida	Montserrat	Alberic	Catadau	Albalat de la Ribera	Sueca	Tavernes de la Valldigna
Benifaió	Montroi	Alcàntera de Xúquer	Cotes	Almussafes	El Perello	Benifairó de la Valldigna
Benimuslem	Rafelguaraf	Alfarp	Gavarda	Cullera	Fortaleny	Barx
Carcaixent	Real	Algemesí	Guadassuar	Favara	-----	-----
Càrcer	Sant Joanet	Alginet	Llombai	Corbera	-----	-----
Carlet	Sellent	Alzira	Manuel	Polinya del Xúquer	-----	-----
Sumacàrcer	Senyera	la Barraca d'Aigües Vives	Massalavés	Riola	-----	-----
Turis	Villanueva de Castellón	Beneixida	Montserrat	Sollana	-----	-----

3.3. DESCRIPCIÓN DE LA NUEVA INSTALACIÓN

El complejo de Valorización de Residuos Domésticos de Guadassuar se encarga de gestionar los residuos generados dentro del ámbito territorial del CRiV. Estos residuos son los domésticos mezclados, residuos de demolición y construcción, voluminosos y los gestionados por los ecoparques. La planta está capacitada para tratar 155.000 toneladas anuales de residuos domésticos mixtos. El complejo dispone de aproximadamente 22.000 m² (CRiV,2019) y se divide en dos instalaciones (instalación 1 e instalación 2E). La instalación 2E dispone de unos 5.500 m² de superficie, mientras que la instalación 1 cuenta con un total de 15.000 m² (anexo 9.2).

3.3.1 Instalación 2E

Esta zona está dotada de una línea de recepción, otra de separación de la fracción seca de la húmeda, preselección, clasificación y recuperación de subproductos. Además, en esta instalación se incluye el tratamiento de los residuos voluminosos, así como el de los residuos de construcción demolición y poda.

3.3.1.1 Funcionamiento de la Instalación 2E

a) Recepción

La primera etapa que existe es la de recepción de residuos de los productores o municipios que están autorizados por el Consorcio. Los residuos que, en virtud de lo requerido en el plan zonal y atendiendo a su origen, pueden ingresar en las instalaciones son de diferente procedencia.

De las recogidas domiciliarias (municipios):

- Fracción orgánica selectiva (FORS): corresponde a lo recogido mediante el contenedor marrón (Código LER 200108).
- Materia orgánica resto (MOR): corresponde a la fracción de los residuos de origen doméstico mezclado (Código LER 191212).

Hay residuos que no van al foso y tienen otro tipo de recepción. Estos residuos son poda, madera y residuos de construcción y demolición (RCD), que entran a la planta de valorización desde los ecoparques y los cuales tienen cada una playa de descarga definida dentro de la planta.

El residuo que entra en la instalación se cuantifica por doble pesada. Estos datos se registran en una base informática y se recoge la cantidad, naturaleza, origen, destino y método de tratamiento del residuo, el medio de transporte y la frecuencia de recogida. Por cada entrada se creará un registro, en el que se asignará su código LER, la cantidad y el origen. La doble pesada se realiza de la siguiente manera; al entrar un vehículo en la instalación sube a la báscula de entrada, donde una vez registrado el peso, mediante un avisador luminoso se le da aprobación a la descarga, indicando a su vez la puerta a la que dirigirse. Una vez depositada su carga en la puerta oportuna del foso, el vehículo se dirige a la báscula de salida, donde tras volverse a pesar, por diferencia de pesadas se calcula y registra el peso neto del residuo depositado.

El foso (1.300 m²) se encuentra en una nave de forma rectangular en el cual los camiones depositan el material en la playa de acopio. En el centro de la playa, como se puede ser en la figura 3.3, se encuentra un pulpo fijo de brazo electrohidráulico, que es manejado por un operario (pulpista) que se encarga de la parte de manipulación y carga de los residuos en la línea de pretratamiento, al igual que de la extracción del material voluminoso (telas, plásticos films grandes...) para así evitar obstrucciones en la maquinaria. El pulpista deposita el material en el abre bolsas.

Este dispone de unos ejes rotativos con elementos de corte y tiene la finalidad de conservar el tamaño de los residuos y de no triturarlos para así favorecer la separación en las siguientes fases. Con la ayuda del alimentador se entrega al interior de la nave de pretratamiento (2.500 m) el caudal de trabajo medio de, aproximadamente, 35 toneladas por hora.



Figura 3.3: Descarga de residuos mezclados en el foso. Fuente: elaboración propia

b) Tratamiento y valorización de la fracción seca.

A continuación, se ubica una cabina de selección manual de voluminosos en la cual se extraen materiales con tamaño superior a 350 mm, se seleccionan los reciclables y se depositan en contenedores colocados bajo la cabina, mientras que los no reciclables son retornados a través de unas tolvas a la nave de recepción.

Los residuos pasan por un trómel, en este caso el primario. Las fracciones separadas por este sistema de cribado están constituidas por una fracción húmeda (<90 mm) y una seca (>90 mm).

La fracción seca (rebose de trómel) después del trómel primario pasa por un separador neumático donde por aspiración se separan los elementos ligeros (principalmente envases y otras fracciones recuperables) de los elementos pesados (como por ejemplo pequeños aparatos eléctricos y electrónicos, utensilios de cocina, madera, pañales...), también denominada fracción pesada. La fracción ligera de la fracción seca se envía a la línea de valorización material que está dotada de un sistema de aspiración de plástico film y una selección manual de cartón en cabina de selección.

A la salida de la cabina de selección hay un triturador primario cuya función es reducir y homogenizar el tamaño de las fracciones.

A continuación, los materiales pasan por un trómel secundario de 70 mm de criba donde los elementos biodegradables, hunden como en el trómel primario y son destinados a la instalación 1. El rebose del trómel secundario (> 70 mm) pasa por otro sistema de aspiración de plástico film. El flujo ligero aspirado es conducido hacia un triturador final con el fin de producir CSR (combustible secundario de residuos) con un tamaño de 25 mm aproximadamente, donde esté es introducido a granel en un semirremolque para su posterior transporte a una cementera. Otra alternativa es que ese film sea recogido y conducido a la prensa de reciclables, para convertirlas en balas que, actualmente y por motivos ajenos a la planta, son destinadas a eliminación en vertedero.

La fracción restante del rebose del trómel secundario, después de la aspiración, es sometida a un conjunto de separadores magnéticos y de aluminio (separador de Foucault). La fracción férrica y no férrica recuperados se conducen, a una prensa de metales, cuyo objetivo es lograr optimizar las operaciones de almacenamiento y se irán formando las correspondientes balas para su posterior venta y transporte.

La fracción restante después de la retirada de los férricos y no férricos en el rebose de trómel secundario, está compuesta principalmente por residuos de envases de polietileno de alta densidad (PEAD), tereftalato de polietileno (PET), plástico mezclado (PMIX) y BRIK (cartón para bebidas). Los envases restantes compuestos por BRIK, PMIX, PET, PEAD son conducidos a un separador óptico de rayos infrarrojos de doble pista, que separa en la pista principal estos cuatro tipos de materiales mediante unas lámparas de luz infrarroja que permiten identificar, por reflexión de la luz sobre los materiales, los diferentes tipos de envases.

A continuación, los introduce a la pista de reenvío que separa el PMIX, dejando pasar el resto (PET, PEAD, BRIK) que son introducidos en la cabina de selección manual. Estos materiales seleccionados son prensados, embalados y almacenados en un almacén exterior al aire libre a la espera de su entrega a gestor autorizado. El material restante no seleccionado en la cabina de selección manual es conducido al triturador final con el fin de convertirlo en CSR.

c) Tratamiento y valorización de la fracción húmeda.

La fracción hundido del trómel <90 mm se subdivide en dos granulometrías; una de 0-60 mm y otra de 60-90 mm. Los materiales de 60-90mm pasan por unos separadores férricos y de aluminio. Posteriormente, esta corriente se vuelve a unir con la corriente 0-60 mm, en un flujo nuevamente de 0-90mm de granulometría que pasa, de nuevo, por otro separador magnético. (Plan de gestión del complejo de tratamiento de residuos urbanos de Guadassuar,2014). El aluminio y el acero recogidos en este punto se conducen, junto a los seleccionados en la fracción seca, a una prensa de metales, para su posterior venta. El rechazo producido en la zona del pretratamiento es del 17%. En cambio, la recuperación de los materiales es de un 7,5%, según los datos del Consorcio. La instalación 2 prevé recuperar hasta un 9% de los residuos ingresados como fracción RU + FOS.

3.3.2 Instalación 1

Actualmente se encuentra en construcción y es la instalación de aprovechamiento biológico de la materia orgánica que sustituye a la antigua planta de compostaje. Esta instalación está compuesta por las naves de fermentación y maduración de la fracción orgánica biodegradable, el afino y el almacenamiento del material bioestabilizado al igual que la ubicación de los biofiltros. La nueva planta de compostaje permite el tratamiento de los dos posibles formatos de recogida en acera: selectiva (FOS) o junto al residuo mixto (MOR), que previamente ha sido recibida y preseleccionada en la Instalación 2E. Además, en esta zona se incluye el tratamiento de poda, para así poder obtener un compost de mejor calidad, al igual que poder mezclarla con el resto de la fracción orgánica con función estructurante.

3.3.2.1 Puesta en marcha de la Instalación 1

El inicio de la actividad de la Instalación 1 se da el día 2 de junio de este año. Esta instalación está compuesta por un reactor 1 (fermentación) de unos 5.700 m² y por un reactor 2 (maduración) de unas dimensiones de 4.200 m², una zona de afino de 1.400 m² y por dos biofiltros de 750 m² cada uno. En el reactor 1 la tecnología seleccionada es la de la casa comercial "Sorain Cecchini" y los puentes de la empresa denominados "Biomax". En este reactor se trata el compostaje de forma dinámica y continua, con volteos sucesivos y aireación forzada de aspiración.

El reactor 1 mide 135 m de largo y 26 m de ancho (datos proporcionados por el fabricante del reactor Sorain Cecchini). El suelo técnico de esta instalación está compuesto por una capa de grava ya que es un material no compacto y deja pasar la aireación como se puede observar en la figura 3.4a. Debajo de la gravilla hay una capa de material arcilloso con fin de evitar la contaminación del suelo y, por tanto, de las aguas subterráneas. La superficie tiene una pendiente para dirigir los lixiviados hacia uno de los lados del reactor, en dirección transversal. Además, en el lecho de gravas se instalan tubos perforados de PVC, en longitudes diferentes, siendo la zona A la más corta, de tal forma que permiten controlar la extracción del aire (el sistema de oxigenación se detallará más en el apartado 4.2.1).

El puente Biomax está formado por dos pares de sinfines. En cada par hay uno que es más largo que otro. Esos sinfines están cogidos a lo que denominamos “carro”. Los sinfines van rotando y van moviendo el material de un renglón al otro con el propósito de hacer hueco en la zona de carga y el puente se va moviendo a lo largo del reactor, para mover bien todo el material. El puente volteador además dispone de un sistema de riego que se utiliza cuando se detecta una bajada de humedad en la biomasa. El agua utilizada puede provenir tanto de la balsa de almacenamiento de aguas de lixiviado como de la balsa de condensado. En la zona de descarga se encuentra la fresa, que va empujando el material hacia una cinta transportadora y la lleva al proceso de afino intermedio.

En las Figuras 3.4 y 3.5 se observa la evolución del llenado del reactor. El tiempo de residencia de la materia orgánica biodegradable desde que entra por la zona de carga hasta que sale al afino intermedio es de media unas 3 semanas con una carga de 1,3 toneladas por metro. Durante la puesta en marcha, el tiempo de residencia duró una semana más, ya que la cantidad por metro era mucho mayor, con lo que cada ciclo de trabajo duraba más y a la fresa le costaba recoger la línea de descarga.



a) *reactor fermentación en la semana 0 (sin cargar).* b) *reactor fermentación en la semana 1 (carga primer renglón).* Fuente: elaboración propia.



a) *Figura 3.5 a: reactor fermentación en la semana 2 (más de un cuarto de reactor cargado) b: reactor fermentación en la semana 4 (carga completa del reactor) Fuente: elaboración propia.*

Para la toma de datos y la de muestras se dividió el reactor en cuatro zonas, figura 3.6 (A, B, C, D). Los sinfines del carro 1 engloban la zona A y B, mientras que el carro 2 la C y D. El reactor se divide en 18 renglones. Uno de ellos corresponde al de carga y el último a la descarga, como se muestra en la figura 3.6. Los 16 renglones restantes se subdividen en las cuatro zonas anteriores (cuatro renglones por zona). Hablamos de ciclo cuando los carros hayan realizado el volteo de sus nueve renglones correspondientes.

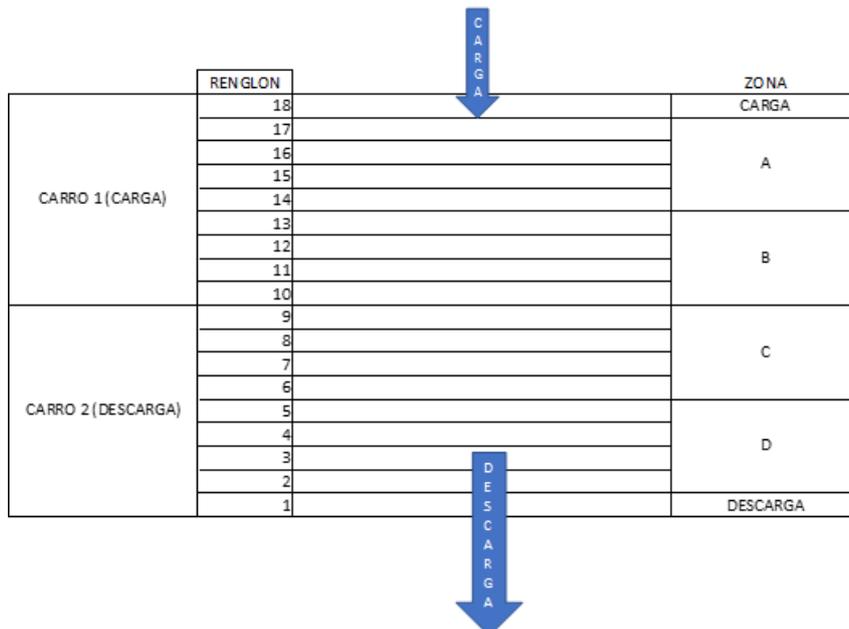


Figura 3.6 Esquema de la distribución del reactor. Fuente: elaboración propia.

3.3.2.2 Tratamiento y valorización de la fracción húmeda

El proceso de compostaje es automático y continuo, con aireación forzada en aspiración. El proceso de compostaje mezcla dos fases biológicas de forma complementaria (fermentación y maduración) con dos fases mecánicas (afino intermedio y el afino final) siguiendo un orden secuencial de fermentación- afino intermedio- maduración- afino final.

A) Fermentación

El reactor es cargado mediante una cinta "tripper" que se desplaza longitudinalmente al mismo, depositando la fracción húmeda descrita en el apartado anterior en un primer renglón del reactor.

El material es volteado mediante el Biomax de manera que, desde la primera línea o carga, se desplaza transversalmente hasta la última línea o descarga. Durante toda su permanencia en el reactor, toda la materia es aireada de forma constante, favoreciendo su fermentación. Una vez el material se encuentra en la última posición o descarga, el material es descargado mediante la fresa del Biomax para conducirlo al afino intermedio.

B) Afino intermedio

Transcurridos 15-20 días en la fase de fermentación, la materia orgánica es extraída del reactor y es conducida, mediante cintas, al afino intermedio. El afino intermedio es un proceso por el cual se realiza un cribado mediante trómel, con paso de 40 mm. La fracción <40 mm es conducida a maduración, material mostrado en la figura 3.8, siendo esta la fracción que contiene la materia orgánica fermentada.

La fracción >40 mm es transportada hasta la zona de acopio de rechazos, como se muestra en la figura 3.7, ya que se considera que las partículas de ese tamaño que continúan el proceso posterior ya no van a fermentar y, como consecuencia, es mejor extraerlas.

Antes de llegar a la zona de acopio de rechazos, se pasa el material por electroimán y separador de Foucault para recuperar el hierro o aluminio presente en esa fracción. Uno de los propósitos futuros será volver a reintroducir al foso toda la parte del rechazo > 40 mm formado por plásticos y hacer recircular el material por la fase de pretratamiento, recuperándolo lo máximo posible y reduciendo las cantidades que vayan al vertido final.



Figura 3.7 Rebose del trómel. Fuente: elaboración propia



Figura 3.8 Muestra hundido del Flip Flop. Fuente: elaboración propia

C) Maduración

Esta fase, como se ha dicho anteriormente, está en construcción ya que forma parte del reactor 2, pero el objetivo será que la fracción <40 mm procedente del hundido del trómel del afino intermedio del proceso de fermentación sea conducido por una cinta triper al reactor de maduración, donde la materia orgánica pasará otros 15-20 días.

Este proceso es muy similar al de fermentación, sólo que esta vez el material de entrada habrá cambiado por otro que ya estará en un avanzado estado de fermentación.

El material se aireará y volteará mediante el Biomax, aumentando así el tiempo de residencia de la fracción biodegradable y favoreciendo que su degradación sea mayor. Una vez el material haya recorrido todo el reactor de maduración y haya llegado a la línea de descarga, se conducirá al proceso de afino final.

D) Afino final

Al igual que la fase de maduración, esta se encuentra en construcción. El afino final será la última etapa en el tratamiento de la materia orgánica ya fermentada y madurada y convertida en compost o material biestabilizado, según la normativa española, dependiendo si procede de la FORS o de la MOR. Este último proceso consistirá en transportar el material procedente del reactor de maduración hasta un trómel donde se realizará la selección de gruesos, en el cual el material hundido ya será material bioestabilizado o compost y el material de rebose se conducirá a una separación densimétrica.

De la separación densimétrica del rebose de la criba obtendremos dos fracciones, una pesada y otra ligera. La ligera, o bien se conducirá a rechazo o será reintroducida al reactor de maduración para poder degradar la materia orgánica presente pero que no ha sido posible cribar. La fracción pesada se considerará rechazo final de planta.

Todo el material del hundido se recogerá en cintas transportadoras y se almacenará en una nave de forma separada tanto el compost como el material bioestabilizado. Cabe destacar que, tanto en la fase de pretratamiento como en la del afino intermedio y el afino final, en el proceso de selección toda fracción recuperada pasa por la prensa y se almacena en el exterior en forma de balas en el almacén de subproductos, a la espera de la entrega a un gestor autorizado, tales como ECOEMBES O ECOVIDRIO.

E) Sistema de eliminación de olores

En la planta de Guadassuar el sistema de tratamiento de olores del aire de la ventilación de la planta consiste en dos biofiltros de 750 m² de superficie cada uno para cada reactor (en estos momentos solo hay uno operativo).

Este filtro biológico está compuesto, como se observa en la figura 3.9, por corteza de pino y permite conseguir una elevada retención de material contaminante y la eliminación de los olores que se pudieran generar.



Figura 3.9 Llenado del biofiltro. Fuente: elaboración propia.

Para que el biofiltro sea eficiente hay que controlar la humedad de la corteza. Se necesita regular el riego del biofiltro de manera que tenga una humedad uniforme en todos los puntos y alrededor de 55-70%. Tampoco es aconsejable que la humedad sea demasiado alta (>70%) ya que puede incrementar la presión de entrada al biofiltro y, como consecuencia, reducir el caudal aspirado por los 4 ventiladores del tratamiento de aire.

4. CONTROL DEL PROCESO

4.1 Proceso de bioestabilización

El proceso de bioestabilización de la materia orgánica biodegradable contenida en los residuos se compone de tres fases principales (Epstein, 1996; Gotaas, 1956; Moreno y Moral, 2008; Tchobanglous et al., 1994; Wagner y Illmer, 2004)

- Fase mesófila
- Fase termófila
- Fase de maduración

En la primera fase destaca la formación de ácidos orgánicos de cadena corta efectuada por las bacterias mesófilas y las actinobacterias.

La temperatura que se alcanza en esta fase es de 40-45 °C. La etapa mesófila se encuentra en la zona de tratamiento cercana a la pared de carga del reactor.

Después de esta fase, la temperatura aumenta y empiezan a desarrollarse las bacterias termófilas, que se ocupan de degradar las sustancias orgánicas más resistentes como son los ácidos grasos. Se caracteriza por un gran consumo de oxígeno. En esta zona la temperatura está alrededor de los 60-70°C y se encuentra localizada en el resto del reactor.

La tercera etapa, de maduración necesita un periodo de tiempo más extenso que las fases anteriores y tiene lugar a temperatura ambiente. En esta fase hay una desaparición de las bacterias termófilas al igual que se produce la desaparición de los gérmenes patógenos que todavía quedan.

4.2 PARÁMETROS PRINCIPALES

El proceso de bioestabilización es en proceso de oxidación por parte de las bacterias que se encuentran en el interior de la materia orgánica presentes en la basura. Los parámetros necesarios para asegurar unas buenas condiciones de crecimiento y vida de la biomasa, al igual que un correcto funcionamiento del reactor son los siguientes:

- Oxigenación del material
- Temperatura de la biomasa
- Temperatura, velocidad y presión en los sistemas de aspiración
- Humedad de la biomasa
- pH

4.2.1 Oxigenación del material

La cantidad de oxígeno necesaria para la biomasa está suministrada por medio del sistema de aspiración forzada, que funciona en continuo (figura 4.1 y 4.2 b). La aireación intermitente y los volteos diarios garantizar el contenido de oxígeno necesario para un correcto proceso de compostaje. La tecnología de aireación en aspiración, en vez de insuflación, permite mejorar el ambiente interno en las naves de fermentación, alargando la vida de las máquinas y del edificio, evitando fenómenos de condensación.

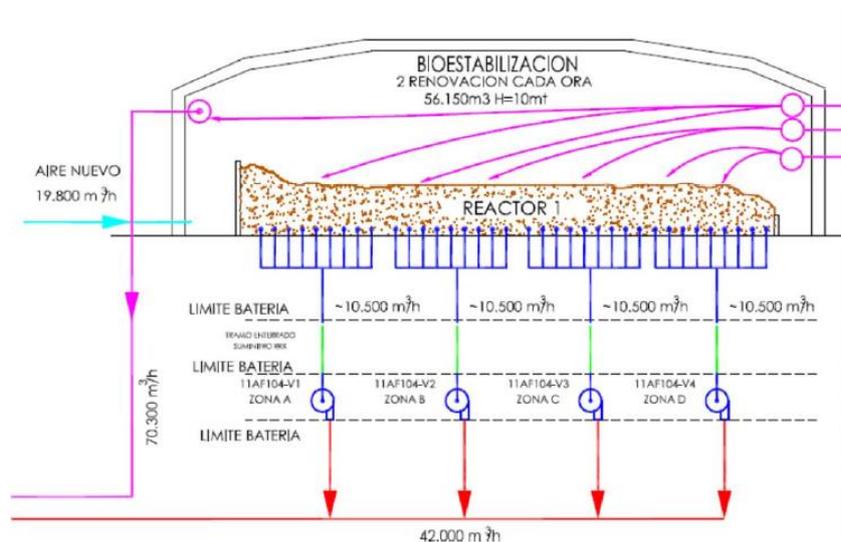


Figura 4.1 Control aireación de la biomasa Fuente: Sorain Cecchini.

Este sistema de aireación por presión negativa permite un régimen de temperatura diferentes por cada zona del reactor. El sistema de ventilación se realiza mediante 4 líneas de colectores de aireación individuales como se observa en la figura 4.2 a, que permiten un control diferenciado de 4 zonas de fermentación.

Todos los colectores están equipados con tuberías de colección de condensado, puntos de control y piezas especiales para la conexión de los correspondientes ventiladores de presión negativa



Figura 4.2 a: colectores del reactor b: disposición de las tuberías HDPE en el suelo.

Fuente: elaboración propia

El reactor está compuesto por 133 tubos en espiral, que conectan el colector principal a la tubería que se distribuye por dentro del reactor.

Al haber una depresión en estos, el aire asciende a su respectivo colector, mientras que el condensado desciende y es recogido por dos tuberías con una pendiente de 0,5 que atraviesan todo el largo del reactor. Cada barra está provista de un punto de interrupción adicional para conectar directamente el colector principal a la válvula de vaciado de condensado. La descarga del condensado se realiza en una arqueta situada en el centro del reactor, que se encuentra dividida en dos partes; la primera de ellas es la de recepción y, simplemente por rebose ya que no tiene ningún tipo de bomba, pasa a la segunda arqueta, que se encuentra también en el interior del reactor. De la segunda arqueta se pasaría a una tercera por gravedad, que pasaría, posteriormente, a un depósito de lixiviados. Cada colector principal de aire está conectado a un ventilador, como se muestra en la figura 4.3.

El flujo de aire de salida desde cada ventilador se conecta al flujo de ventilación general que procede de la zona de compostaje y es dirigido a una cámara de mezcla. El aire de esta cámara es aspirado gracias a dos ventiladores y es enviado al biofiltro.



Figura 4.3 Ventiladores eléctricos. Fuente: elaboración propia.

No se recomienda llevar el aire del reactor al biofiltro directamente y se intenta diluirlo previamente con el aire de alta carga, ya que presenta grandes cantidades de amoníaco, que pueden dañar a los microorganismos del biofiltro.

En función de esta distribución, un posible control simple que se podría hacer sería tocar los tubos en hélice y observar si están fríos o calientes. Si alguno de ellos se encuentra frío es que presenta un atasco y la aspiración es demasiado débil para el régimen en el que están trabajando los ventiladores. Habría que extraer la pieza de unión y limpiarla con agua a presión. En caso de un material en la entrada con una porosidad <30 %, según el fabricante, será necesario añadir material estructurante para favorecer el pasaje de aire al interior del material.

4.2.2 Temperatura

La temperatura es un factor importante en todo proceso de fermentación biológica ya que es útil para controlar la actividad de los microorganismos.

Las temperaturas elevadas permiten un desarrollo más rápido del proceso mientras que, a bajas temperaturas la velocidad de degradación es lenta y no se eliminan los agentes patógenos. En la fase activa del proceso, la temperatura del material tiene que estar dentro del rango de 50-65°C. Esto conlleva que el valor de la temperatura en el aire de aspiración forzada debe estar entre 45-55°C. La evolución de la temperatura será gradual empezando con valores de 45°C en la zona A, hasta valores de 60-65°C en la zona C y D (Sorain Cecchini).

La temperatura del aire en aspiración es útil para tener una evaluación de las condiciones del proceso (normalmente se tiene que considerar cerca de 8-10°C de diferencia entre la temperatura del material y la temperatura del aire).

Además, es necesario tener en cuenta los datos del control de temperatura medida directamente sobre el material para comprobar los datos de aspiración y verificar una correcta distribución de esta a lo largo de todo el reactor.

4.2.3 Humedad

El control de la humedad es otro de los factores importantes. Los microorganismos necesitan unas condiciones determinadas de humedad para realizar sus procesos metabólicos.

Teóricamente, una descomposición aerobia puede realizarse entre unos valores de humedad según lo marcado por Sorain Cecchini del 30% al 55% siempre que se pueda realizar una buena aireación, que dependerá tanto de la textura del residuo o de la estructura (fibrosa, granulosa...) como del método de aireación de la pila. La fracción orgánica de entrada al reactor tiene normalmente un contenido de agua del 45-50% (CONAMA, 2016). Por causa del aumento de temperatura y evaporación, este contenido de agua se reduce durante el proceso. Por tanto, es importante añadir agua durante el volteo para así poder mantener la correcta humedad. Se ha de evitar una humedad elevada, mayor al 60%, porque el agua podría ocupar gran cantidad de espacio entre las partículas del residuo, el material se puede apelmazar y hay peligro de que la pila se vuelva anaerobia. Por otra parte, si la humedad es baja disminuye la actividad de los microorganismos y el proceso de compostaje para o va muy lentamente.

4.2.4 pH

Durante el desarrollo del proceso el pH del material sigue una evolución en función de la degradación biológica efectuada por parte de la biomasa. Por lo tanto, el control del pH en las diferentes fases del proceso puede ser una indicación del correcto funcionamiento del mismo.

Los residuos a la entrada tienen normalmente valores de pH dentro de 5.5-6.0. La acidez del material depende tanto del tipo de residuo, así como de la frecuencia de recogida y el tipo de almacén antes de su recogida. En la primera fase mesófila la acidez puede aumentar por la formación de ácidos libres. Esta acidez puede aumentar mucho en el supuesto de que la fermentación vire hacia un proceso anaerobio.

Las variaciones fuertes de pH pueden llevar a cabo la pérdida de Nitrógeno en forma de amoníaco, lo cual disminuye el contenido en este nutriente en el producto final. Un nivel demasiado bajo de pH (<5.5) puede tener un efecto inhibitor sobre el proceso aeróbico. La biomasa responsable de la degradación aeróbica necesita valores de acidez superiores a 5.5 para poder crecer (CONAMA,2016). Durante un proceso de bioestabilización el valor de pH varía proporcionalmente desde 5.5-6.0 hasta 7.5-8.0.

5. MATERIAL Y MÉTODOS

5.1 MATERIAL E INSTRUMENTOS PARA MEDIDAS DE LABORATORIO

Las muestras que se recogieron y analizaron para este Trabajo de Fin de Grado corresponden tanto a la fracción de materia orgánica presente en el reactor de fermentación, como a la fracción de afino. La puesta en marcha del reactor se inició el día 2 de junio de 2019, pero el primer muestreo, renglones iniciales, no se realizó hasta el 7 de junio. Las muestras obtenidas con el reactor ya lleno se realizaron a partir del 26 de junio y a lo largo del mes de julio. De esta forma se pudo observar la evolución y los cambios producidos en la composición y en los diferentes parámetros analizados.

Los equipos y materiales necesarios utilizados para la elaboración de este proyecto se diferenciarán según los diferentes parámetros a determinar.

5.1.1 Temperatura de la biomasa

En cuanto a la medición de la temperatura de la biomasa se utilizaron los siguientes equipos:

- *Termómetro HANNA /HI935002/H0071882*. Se trata de un termómetro de dos canales, que ofrece una medida de lo más exacta de la temperatura. Los valores tanto máximos y mínimos alcanzados se muestran en la pantalla LCD.
- *Sondas térmicas HANNA/ HI766TR3/0537017N*

5.1.2 Velocidad y temperatura del aire

Para la determinación de la velocidad y la temperatura de aire de aspiración se utilizaron los siguientes equipos de medición:

- *Unidad de control TESTO 400/05634001/256933*. Es un instrumento de medición que muestra parámetros tales como la temperatura externa e interna, la velocidad y la presión.
- *Sonda velocidad aire TESTO/06359540/10375127*. Se utilizó para medir la velocidad del aire, el caudal volumétrico y la temperatura en los conductos de ventilación del reactor.

5.1.3 Presión

Para la medición de la presión se empleó:

- *Unidad de control TESTO 400/05634001/256933*: La misma que se empleó para la medición de la velocidad y temperatura del aire de aspiración.
- *Sonda portátil de presión diferencial TESTO 6638.1545*: Sonda de silicona que se utilizó para medir la presión.

5.1.4 pH

La instrumentación para la determinación del pH necesaria fue la siguiente:

- *pHmetro EDGE/ HI12300*
- *Agua destilada y solución de limpieza del electrodo*
- *Agitador magnético mutimix*
- *Varillas agitadoras*
- *Probeta graduada*
- *Vasos graduados*

5.1.5 Humedad

Por último, en cuanto a la determinación de la humedad se empleó:

- *Estufa digital de secado con aire forzado RAYPA/DAF-78*
- *Bandejas para horno:* Recipientes que soportan elevadas temperaturas, los que utilizamos en nuestro caso son de aluminio.
- *Balanza de 6,2 kg KERN / EW6200-2NM:* Con esta balanza se pesó tanto la muestra antes como después de pasar por la estufa.

5.2 MÉTODO DE MUESTREO

Tanto la temperatura como las muestras de biomasa para la humedad y pH se recogieron siguiendo unos puntos indicados en el plano (figura 5.1). Todos los puntos están uniformemente distribuidos a lo largo del reactor. Tal y como se ha comentado anteriormente, el reactor está dividido en 4 zonas, denominadas A, B, C y D. Cada zona está dotada de 4 renglones, un total de 16 sin contar el renglón de carga y el de descarga, como se muestra en la figura 5.1 Por cada una de las zonas se escogió un renglón, y se trabajó siempre con el mismo, de esta manera se puede comprobar la evolución de las condiciones de la materia orgánica de forma estática y a lo largo del reactor. Este sistema nos permite añadir agua en los diferentes renglones y el control de la ventilación en función de las necesidades. Se debe tener la precaución de que la muestra en el punto en el que se ha recogido haya tenido por lo menos una hora de tiempo de reposo desde el último riego/volteo realizado por el Biomax. El esquema de medida correspondiente al reactor de fermentación sería el siguiente:

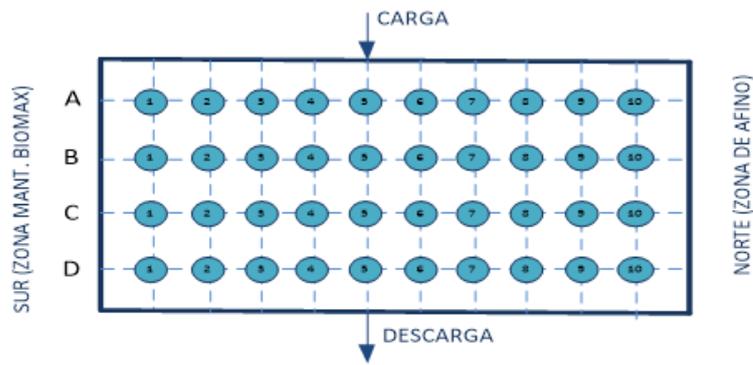


Figura 5.1 Puntos de toma. Fuente: elaboración propia.

5.3 MÉTODOS UTILIZADOS

5.3.1 Determinación de temperatura.

El valor de temperatura del material es un factor muy importante para el correcto desarrollo del proceso biológico y del crecimiento de las bacterias. La evolución de la temperatura será gradualmente ascendente desde la zona A hasta la zona C y D. Las temperaturas elevadas de las últimas dos zonas permiten un desarrollo más rápido del proceso, así como una higienización del material.

La medida de la temperatura se efectúa en todos los puntos del reactor indicados: 40 puntos en total, es decir, 10 por cada zona. Se realizó con un termómetro Hanna (figura 5.2 b) acoplado a una sonda de inmersión Termopar de tipo k a una profundidad de 150 cm, tal y como se muestra en la figura 5.2 a.



Figura 5.2 a: punto de toma de temperatura sonda térmica HANNA. b: sonda térmica HANNA a.

Fuente: elaboración propia.

5.3.2 Determinación de la humedad

Para evaluar la humedad fue necesario efectuar un muestreo de biomasa en los diferentes puntos del reactor. Las muestras fueron recogidas a una profundidad de 50-70 cm, y se introdujeron en bolsas zip (debidamente identificadas), como se observa en la figura 5.3.

A continuación, se descartaron todos los materiales pesados que podían comprometer la medida de la humedad, como piedras, vidrios, etc (se debe trabajar solo con la fracción orgánica). Se pesó la bandeja de aluminio vacía y se depositó el material hasta alcanzar una masa entre 150-200 g. Por último, las bandejas se colocaron en la estufa a 105 °C. Pasadas 24 h se pesaron las muestras secas y se calculó el porcentaje de humedad mediante la ecuación 5.1.

$$HUMEDAD (\%) = \frac{M2 - M3}{M2 - M1} \times 100 \quad (1)$$

donde:

M1, masa de la bandeja vacía (g).

M2, masa de la bandeja y muestra fresca inicial (g).

M3, masa de la bandeja y muestra seca (g).



Figura 5.3 Recogida muestra para la determinación de humedad y pH (punto C2).

Fuente: elaboración propia.

5.3.3 Determinación del pH

Este parámetro nos indica el grado de avance del proceso ya que este sigue una evolución en función de la degradación biológica. Por lo tanto, se considera como un indicador importante del correcto funcionamiento del proceso de fermentación.

La determinación de este parámetro se efectuó sobre un extracto acuoso en proporción 1:5 a partir de una muestra de biomasa y con la utilización de agua destilada. Para su determinación se tomó muestra a una profundidad de 50-70 cm y se guardó cada muestra en su correspondiente bolsa de plástico bien identificada. En el laboratorio de la planta, se realizó una separación previa de cada muestra, descartando vidrios, plásticos, piedras, etc. La proporción 1:5 significa que a 20 g de material separado se le añadían 100 mL de agua destilada. Por último, se agitó la mezcla con un agitador magnético multimix durante 10 min. Acabada esta fase se procedió a medir el pH mediante el pHmetro. La determinación del pH se puede observar en la figura 5.4.



Figura 5.4 Determinación del pH. Fuente: elaboración propia.

5.3.4 Control del sistema de aspiración forzada

Otro punto importante es el control del correcto funcionamiento del sistema de aspiración forzada. Se comprobó que la velocidad, la presión y la temperatura es la adecuada. La medida de la velocidad como de la temperatura se realizaron mediante un anemómetro de molinete de brazo telescópico y como unidad de control se utilizó el Testo 400.

Mientras que para la medida de la presión se realizó con la misma unidad de control Testo, y con una sonda Pitot como se observa en la figura 5.5.

Se efectuaron las medidas de los 4 colectores de las diferentes zonas que se encuentran en el interior del reactor. Para ello se necesitó saber el diámetro de las tuberías para poder introducir el anemómetro en el centro de la tubería.

En el primer caso se efectuó a una distancia de 35 cm, con lo que se halló la velocidad y la temperatura en el centro de dicha conducción. También se midió la presión de aspiración, en la que se colocó la sonda Pitot y se tapó con un paño las posibles aperturas para evitar pérdidas de aire. A continuación, se midió los mismos parámetros de velocidad y temperatura en las tuberías de acero inoxidable a la entrada del ventilador. En este caso el brazo telescópico del anemómetro tuvo que estar a una distancia de 28 cm. Se midió tanto la presión de entrada al ventilador como la presión a la salida de este. En particular los datos de presión en aspiración pueden indicar condiciones de reducción de porosidad del material.



Figura 5.5 Determinación del velocidad, presión y temperatura en el conducto exterior a la entrada del ventilador. Fuente: elaboración propia.

5.3.4. Caracterización del material bioestabilizado

Es una prueba que se realizó aparte, en la cual se llevó a cabo el tamizado de las cuatro muestras de afino intermedio (hundido del Flip Flop) a partir de una serie de tamices cuya luz de malla correspondía a 5, 8, 10 y 12,5 mm. Se tamizó durante unos minutos y se determinó el peso de muestra retenido en cada malla.

6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 RESULTADOS DEL PROCESO BIOMAX

Se han recogido datos semanales del proceso del Biomax a partir de la semana 5 hacia adelante porque es ahí cuando se han empezado a cambiar las condiciones del proceso, (riego, aireación) como se muestra en la tabla 6.1. Los valores obtenidos corresponden a las toneladas de huido introducidas en la Instalación1, las toneladas depositadas por metro, que se calcula a partir de la carga del huido que entra en el reactor entre el total de los ciclos realizados en esa semana y entre los metros que forman el reactor (135 m). Se muestran las horas de funcionamiento del puente del reactor, pudiendo así calcular las horas que tarda en hacer un ciclo y los m³ de agua de lixiviado en este caso, utilizados cada semana para el riego del material en descomposición, que nos servirá para conocer la evolución de la temperatura y la humedad.

Los demás datos nos pueden indicar aspectos físicos del sistema de tratamiento. Se puede observar que, si el número de ciclos por semana es mayor, por cada pila creada se utiliza una menor cantidad de materia orgánica.

Tabla 6.1 Datos principales del proceso del Biomax. Fuente: elaboración propia

SEMANA	Ciclos	Carga huido en el reactor (Toneladas)	Carga de la pila por metro (Toneladas/metro)	Caudal de riego(m3)	Funciona-miento del puente BIOMAX (horas)	Tiempo en realizar un ciclo (Horas/ciclo)
5	11	2.006	1,4	---	103	9,4
6	9	2.032	1,7	18,3	91	10,1
7	12	2.189	1,4	154,2	106	8,8
8	11	2.070	1,4	140,2	108	9,8
9	12	2.026	1,3	69,1	102	8,5

6.2 RESULTADOS DE LA BIOMASA

Como se ha mencionado anteriormente, los datos obtenidos se tomaron durante el periodo comprendido desde el día 5 de junio hasta el día 31 de julio, es decir, un total de 9 semanas. Por cada zona se han recogido diez muestras de cada parámetro y se ha realizado una media por semana como se observa en el anexo 9.3.

En primer lugar, se determinó la temperatura de la biomasa, en las cuatro zonas del reactor (A, B, C, D).

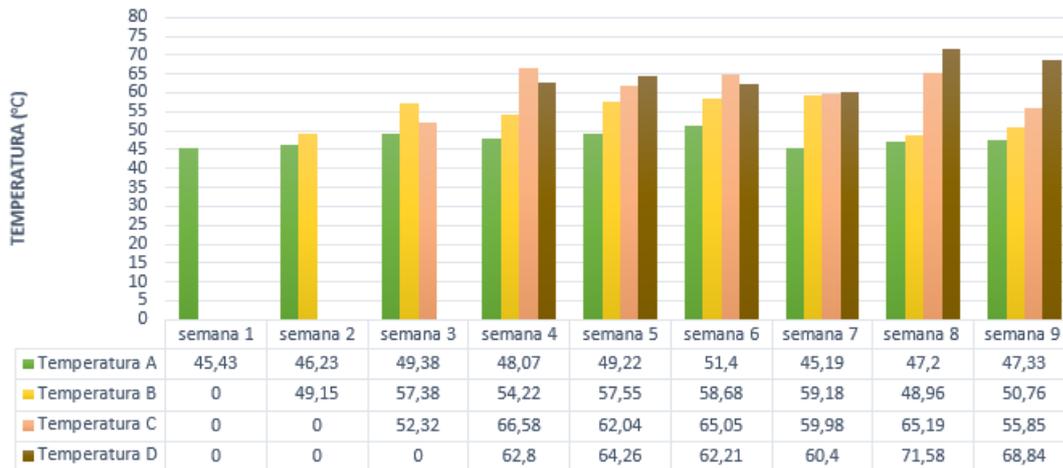


Figura 6.1 Temperatura presente en la biomasa del reactor, por zona y semana.

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 6.1, la temperatura de cada una de las cuatro zonas va aumentando, desde la carga de la primera semana de inicio hasta la última, hasta alcanzar un pseudo-estado estacionario. Además, conforme se llega a ese estado estacionario (semana 9) se puede observar cómo la temperatura de la biomasa de cada una de las zonas tiene un perfil ascendente, en línea con los distintos procesos biológicos que se desarrollan, mesofílico y termofílico, en función del tiempo de residencia del material en el reactor. Se puede observar cómo se produce una ligera bajada de temperatura entre la semana 6 y la 7. Este hecho es debido a que en la semana 6 se conectó, por primera vez, el riego del carro 1 y carro 2, correspondiente a las zonas B y C, respectivamente, con un volumen total de agua incorporado de 18,3 m³, como se muestra en la tabla 6.1. Es importante remarcar la sensibilidad que tiene la temperatura a cambios en el proceso y cómo esta es un parámetro de control de especial relevancia.

La disminución de la temperatura llevó a modificar, a finales de la semana 7, la velocidad de aspiración, pasando de un 50% a un 60% del máximo capaz de suministrar, manteniéndola así el resto del periodo de estudio. El aumento de la velocidad de aspiración provocó un aumento de las temperaturas, al tener mayor cantidad de oxígeno, en las cuatro zonas observable en la semana 8. La temperatura vuelve a bajar a partir de la semana 9 como consecuencia del exceso de riego durante las semanas 7 y 8.

En cuanto a las humedades, y teniendo en cuenta las indicaciones de Sorain Cechini (fabricantes) el rango en el que tiene que estar la humedad en cada zona seria la siguiente: zona A 45-50%, zona B 40-45%, zona C 40-45% y zona D cerca del 40%.

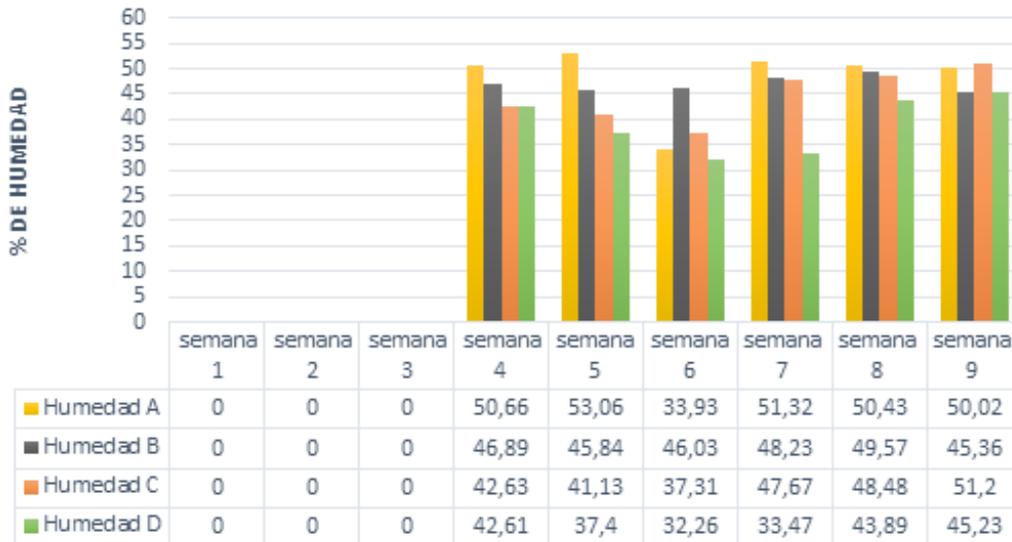


Figura 6.2 Contenido de humedad presente en la biomasa del reactor, por zona y semana.
Fuente: elaboración propia.

Se observa en la figura 6.2 que, más o menos, que las medidas se acercan a los valores recomendados. Se puede observar cómo la humedad va disminuyendo hasta alcanzar un valor muy bajo en la semana 6, debido a las altas temperaturas de descomposición, la aireación forzada y a los volteos. Se pone en marcha el riego dicha semana 6, tal y como se ha indicado anteriormente, recuperándose la humedad en las zonas A, B y C en la siguiente semana, pero no es hasta la semana 8 donde se observa la recuperación de la humedad en la zona D, necesitando aumentar el volumen de riego hasta 154 m³ la semana anterior.

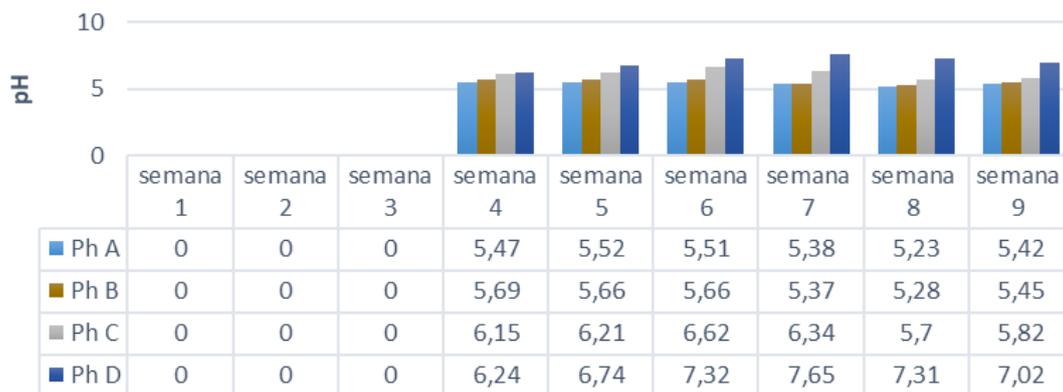


Figura 6.3 Contenido de pH presente en la biomasa del reactor, por zona y semana.

Fuente: elaboración propia.

Podemos observar en la figura 6.3 la evolución del pH, donde las primeras líneas de carga tienen un pH dentro del rango 5.0-5.5, esto es debido a la formación de ácidos orgánicos durante el proceso de degradación de la fracción orgánica. También hay que destacar el tipo de residuo en la entrada ya que en verano entra más materia orgánica fresca, esto hace que el pH disminuya. A medida que se avanza a la zona de descarga hay un aumento del pH a neutro, debido a la degradación de compuestos ácido y a la mineralización de compuestos nitrogenados actuando también el proceso de amonificación como un importante sumidero de protones y, por tanto, favoreciendo al aumento del pH. Hay que destacar que a temperaturas altas y valores de pH básicos favorece la liberación de amoníaco.

6.3 RESULTADOS DEL MATERIAL BIOESTABILIZADO

Como se observa en la figura 6.4, el pH del material bioestabilizado resultante del afino intermedio tiene una relación directa con el de la zona D del reactor, siendo prácticamente los mismos, tendiendo, conforme el proceso de fermentación alcanza el estado estacionario, hacia un pH neutro-básico.

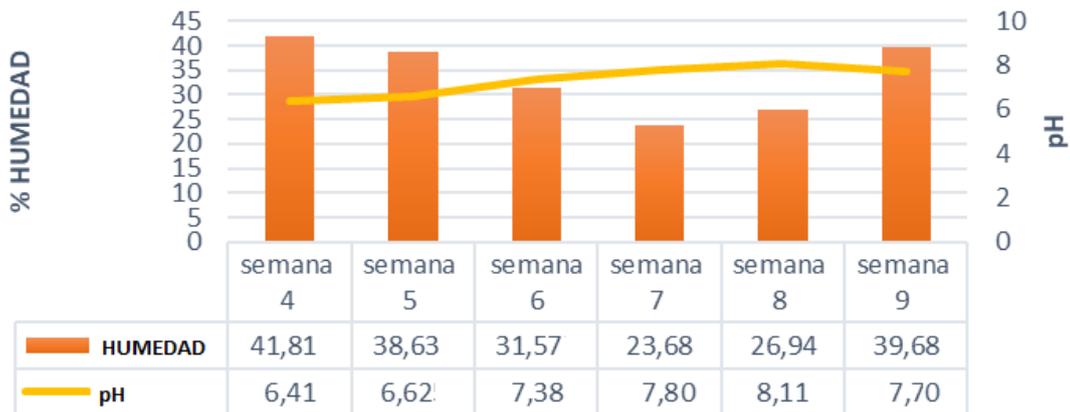


Figura 6.4 Contenido de pH y humedad presente en el material bioestabilizado tras el afino intermedio del reactor, por zona y semana. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura 6.4, el pH del material bioestabilizado resultante del afino intermedio tiene una relación directa con el de la zona D del reactor, siendo prácticamente los mismos, tendiendo, conforme el proceso de fermentación alcanza el estado estacionario, hacia un pH neutro-básico.

En cuanto a la humedad la más baja se encuentra en la semana 7 con un valor de 23,64% por tanto se deberá de solventar el problema, proporcionándole más agua al material. Como se observa en la tabla 6.2 en la zona D hay una disminución de humedad en las semanas 6 y 7 consecuencia del inicio del riego. Esta disminución repercute al porcentaje de humedad del material bioestabilizado.

6.4 RESULTADOS DEL CONTROL DE LA AIREACIÓN

Otra comprobación semanal es la comprobación de la aireación, en el que se comprueba la velocidad, presión y temperatura para cada zona (A, B, C y D) y cada conducto recogidas en las tablas 6.2 – 6.5. Este registro se realiza, sobre todo, para tener un histórico de datos que permita anticiparse a futuros problemas. Si hubiese un futuro problema de obstrucción en algún conducto, tanto la presión como la velocidad disminuirían.

Como se puede observar en las tablas anteriores, en función de las semanas y de la rampa de carga, el caudal va aumentando gradualmente intentando llegar al caudal medio estimado para cada ventilador a 10000 m³/h, según Sorain Cechini (fabricantes del Biomax y de reactor). Para el cálculo del caudal de aire se utilizó la ecuación 2.

$$Q = SxV \quad (2)$$

Siendo;

Q el caudal de aire a calcular (m³)

S la sección del conducto (m²)

V la velocidad del aire (m/s)

El caudal de aire que discurre por un conducto es proporcional a la sección de ese conducto y a la velocidad del aire que fluye a lo largo del mismo.

Tabla 6.2 Control de los parámetros de aireación (Temperatura, velocidad y presión) en los dos conductos de la zona A. Fuente: elaboración propia.

SEMANA	Conducto PVC D500 mm (dentro compostaje)					Conductos inox D500 mm y PVC (fuera de la nave de compostaje)				
	Variador (%)	Velocidad (m/s)	Caudal (m3/h)	Presión (mmca)	Temperatura (°C)	Velocidad (m/s)	Caudal (m3/h)	Presión entrada (mmca)	Presión salida (mmca)	Temperatura (°C)
4	50	15,1	10.673	-62	48,8	12,1	8.553	-109	-62	49,4
5	50	14,3	10.108	-66	52,1	15,4	10.885	-109	-58	52,4
6	50	14,6	10.320	-66	57,0	10,8	7.633	-103	-54	57,0
7	60	16,7	11.804	-88	48,8	12,8	9.048	-135	-53	49,3
8	60	16,1	11.380	-84	48,3	12,9	9.118	-135	-55	48,9
9	60	16,6	11.734	-86	49,1	13,3	9.401	-133	-46	47,2

En algunas semanas, como sucede en la zona A, es superior a ese valor recomendado, debido al tipo de materia prima de entrada, más fresca y, por lo tanto, con mayores necesidades de aire.

El caudal de aire se regula en función de la humedad residual del producto, con el objetivo que el contenido de humedad al final del proceso de maduración sea en torno al 30%.

Tabla 6.3 Control de los parámetros de aireación (Temperatura, velocidad y presión) en los dos conductos de la zona B. Fuente: elaboración propia.

SEMANA	Conducto PVC D500 mm (dentro compostaje)					Conductos inox D500 mm y PVC (fuera de la nave de compostaje)				
	Variador (%)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /h)	Presión (mmca)	Temperatura (°C)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /h)	Presión entrada (mmca)	Presión salida (mmca)	Temperatura (°C)
4	40	10,4	7.351	-66	52,0	10,6	7.492	-87	-65	51,4
5	50	12,5	8.835	-83	55,5	11,8	8.341	-108	-66	55,2
6	50	12,8	9.048	-87	53,7	11,6	8.199	-110	-64	53,8
7	60	14,5	10.249	-100	53,9	12,8	9.048	-134	-66	54,2
8	60	13,8	9.754	-111	51,0	12,8	9.048	-137	-66	53,2
9	60	15,1	10.673	-103	53,3	13,4	9.471	-135	-55	55,2

Tabla 6.4 Control de los parámetros de aireación (Temperatura, velocidad y presión) en los dos conductos de la zona C. Fuente: elaboración propia.

SEMANA	Conducto PVC D500 mm (dentro compostaje)					Conductos inox D500 mm y PVC (fuera de la nave de compostaje)				
	Variador (%)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /h)	Presión (mmca)	Temperatura (°C)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /h)	Presión entrada (mmca)	Presión salida (mmca)	Temperatura (°C)
4	40	13	9.189	-68	51,3	11	7.775	-83	-57	50,7
5	50	12,6	8.906	-80	51,0	12,1	8.553	-102	-58	51,0
6	50	14,7	10.391	-78	60,9	11,7	8.270	-105	-57	61,3
7	60	10,4	7.351	-107	55,5	13,3	9.401	-130	-53	55,5
8	60	13,2	9.330	-105	52,1	13,1	9.260	-133	-55	51,3
9	60	13,7	9.684	-107	47,1	12,2	8.623	-146	-50	51,4

Tabla 6.5 Control de los parámetros de aireación (Temperatura, velocidad y presión) en los dos conductos de la zona D. Fuente: elaboración propia.

SEMANA	Conducto PVC D500 mm (dentro compostaje)					Conductos inox D500 mm y PVC (fuera de la nave de compostaje)				
	Variador (%)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /h)	Presión (mmca)	Temperatura (°C)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /h)	Presión entrada (mmca)	Presión salida (mmca)	Temperatura (°C)
4	40	10,9	7.705	-63	51,1	11,8	8.341	-85	-61	50,9
5	50	15,4	10.885	-82	59,8	12,4	8.765	-104	-64	59,9
6	50	11,5	8.129	-83	56,4	13,1	9.260	-105	-66	56,9
7	60	16,2	11.451	-102	62,7	14,5	10.249	-130	-55	62,4
8	60	15,6	11.027	-104	59,2	13,8	9.754	-131	-61	58,1
9	60	16,7	11.804	-107	59,1	12,9	9.118	-137	-70	59,4

Como se observa para las cuatro zonas del reactor, los datos del conducto de dentro del recinto de compostaje como las que se encuentran el en exterior deben de aproximarse para asegurarnos un correcto funcionamiento.

6.5 RESULTADOS CARACTERIZACIÓN

En cuanto a la caracterización del material bioestabilizado del afino intermedio, se han obtenido datos en un mismo día de cuatro muestras diferentes y se han pasado por cinco tamices de diferente malla, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.6.

Tabla 6.6 Distribución del tamaño de partícula de las muestras hundido del material bioestabilizado.

Fuente: elaboración propia.

TAMIZ (mm)	MUESTRAS HUNDIDO					SUMA (g)
	1 (g) (%)	2 (g) (%)	3 (g) (%)	4 (g) (%)	PROMEDIO (g) (%)	
>12,5	2,8 (0,57)	1,4 (0,28)	2 (0,46)	2,2 (0,42)	2,1 (0,43)	8,4
10-12,5	1,5 (0,30)	1,1 (0,22)	2,4 (0,56)	1,5 (0,29)	1,6 (0,34)	6,5
8-----10	23,1 (4,67)	22,2 (4,51)	58,4 (13,53)	27,4 (5,23)	32,7 (6,99)	131,1
5-----8	199,5 (40,36)	185,8 (37,76)	158,2 (36,65)	196,5 (37,50)	185 (38,07)	740
<5	267,4 (54,10)	281,5 (57,22)	210,7 (48,81)	296,4 (56,56)	264 (54,17)	1056
TOTAL	494,3 (100)	492 (100)	431,7 (100)	524 (100)	485,5 (100)	1942

En la tabla 6.6, después de pasar por el tamiz las cuatro muestras se observa que la mayor parte de las partículas se quedan retenidas en las mallas de <8 mm. Esto nos demuestra que el material bioestabilizado obtenido en el afino intermedio es homogéneo en cuanto a tamaño de partícula. Como se indica posteriormente en la tabla 6.7, la granulometría del material bioestabilizado debe de ser menor del 25 mm en un >90%.

6.6 ANÁLISIS MATERIAL BIOESTABILIZADO

A principios del mes de julio se realizó un análisis del material procedente de una fracción del afino intermedio, resultante del compostaje de los residuos sólidos urbanos recogidos de forma no selectiva. La analítica de este ensayo fue realizada por los laboratorios GAMASER, en Paterna, e indican tanto los parámetros microbiológicos como fisicoquímicos que posee la muestra obtenida en la planta con el nuevo reactor. Los resultados de la analítica se recogen en la tabla 6.7.

Tabla 6.7 Resultados analítica del material bioestabilizado y comparativa de los requisitos según la Ley 22/2011. Fuente: GAMASER, Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente

Parámetro analizado	Valor	Requisitos del material bioestabilizado.
Materia orgánica total (% s.m.f)	34,4	>25%
Humedad (%)	36,1	20-40%
Cadmio total (mg/kg Cd s.m.s)	< 1	<3mg/kg de materia seca
Cobre total (mg/kg Cu s.m.s)	156	<400 mg/kg de materia seca
Níquel total (mg/kg Ni s.m.s)	27	<100 mg/kg de materia seca
Plomo total (mg/kg Pb s.m.s)	49	<200 mg/kg de materia seca
Cinc total (mg/kg Zn s.m.s)	352	<1000 mg/kg de materia seca
Mercurio total (mg/kg Hg s.m.s)	0,08	<2,5 mg/kg de materia seca
Cromo total (III+VI) (mg/kg Cr s.m.s)	28	<300 mg/kg de materia seca
Cr(VI) (mg/kg Cr s.m.s))	<0,5	----
Granulometría < 25mm (%)	<99	>90%
Piedras y grava > 5mm (%)	<1	<5%
Meta, Vid, Plást > 2mm (%)	<1	<3%
Nitrógeno Total (% N s.m.f)	<1	----
Nitrógeno Orgánico (% N s.m.f)	0,65	----
Nitrógeno Amoniacal (% N s.m.f)	0,12	----
Nitrógeno Nítrico (% N s.m.s)	<0,05	----
Nitrógeno Uréico (% N s.m.s)	<0,07	----
Carbono Org. Oxi. (% s.m.f)	15,6	----
pH (u.pH)	8,3	----
Conductividad (mS/cm)	6,48	----
Relación C/N < 20	20,4	----
Fósforo (% P2O5 s.m.f)	0,85	----
Potasio (% K2O s.m.f)	0,46	----
Ácidos húmicos (% s.m.s)	10,3	----
Salmonella (Aus- pres/25 g)	Ausencia	Presencia/ausencia en 25 g de material bioestabilizado
Escheriachia coli (ufc/g)	<1	NMP/g

Haciendo una comparativa de los valores obtenidos con las características exigibles al material bioestabilizado para la aplicación en los suelos, tanto según la Ley 22/2011, de 28 de julio de 2011 de residuos y suelos contaminados como según los requisitos del Decálogo para la utilización del material bioestabilizado y del compost no inscrito en el registro de productos fertilizantes mediante la operación R10, 25 de junio de 2013, se puede observar que los valores obtenidos entrarían dentro del rango de los valores máximos exigidos y cumpliría con los requisitos para su aplicación en suelos agrícolas.

7. CONCLUSIONES

Se ha podido comprobar que los factores tales como la humedad, temperatura, pH y aireación, están íntimamente relacionados entre sí, y que la modificación de uno de ellos puede provocar un efecto mariposa en el resto, es decir, una pequeña modificación puede generar un efecto considerablemente grande a medio plazo en el resto de los parámetros y, por consiguiente, en el proceso global de fermentación. Se ha podido observar cómo, a partir de la semana 8-9, el sistema funciona dentro de la normalidad, en un estado parecido al estacionario de la planta.

En cuanto a las temperaturas, se aprecia cómo, conforme se alcanza un estado pseudo-estacionario, las temperaturas de las distintas zonas van incrementándose hasta alcanzar la temperatura máxima en las zonas de extracción. Las temperaturas alcanzadas en dichas zonas, típicas de procesos termofílicos, indican que el proceso de compostaje se está desarrollando de forma adecuada y se están alcanzando temperaturas elevadas que permiten la higienización del material. Las bajas temperaturas asociadas a la semana 7 pudieron darse por una falta de aireación, ya que en la semana 6 se comenzó a regar y, con el flujo de aire previamente establecido, se pudo producir un déficit en la evaporación del agua y un ambiente de anaerobiosis.

En cuanto al parámetro de humedad, estaríamos dentro de los rangos óptimos de funcionamiento, indicados por el tecnólogo. Un punto a controlar es la humedad de la zona de descarga (zona D), ya que debería tener un valor alrededor del 40%. Si estuviese por debajo de ese valor, como en algunas situaciones observadas, la materia orgánica podría adquirir condiciones hidrofóbicas y, al entrar en el reactor de maduración, por más que se regara, las moléculas en cuestión no serían capaces de absorber las moléculas de agua. Esto provocaría que la humedad de la materia madurada, antes de entrar a la etapa de afino final, estaría muy por debajo de la óptima (30 %) y se obtendría un material bioestabilizado de mala calidad.

El pH tiene una evolución correcta. En un inicio el pH se acidifica por el exceso de ácidos orgánicos mientras que, en la fase termófila debido, a la conversión del amonio en amoníaco, el pH aumenta y alcaliniza el medio.

En cuanto al tamaño de las partículas del material bioestabilizado resultante del afino intermedio, se puede decir que está en el rango ideal, ya que no supera los 25mm. Hay que destacar que este parámetro también es de suma importancia para el desarrollo del proceso; si el material tiene un gran tamaño de partícula, habrá mayores canales de aireación, mayor porosidad, y, por lo tanto, bajarían las temperaturas, mientras que la situación contraria conduciría a una compactación y posibles problemas de anaerobiosis.

Se ha podido observar cómo el tiempo de respuesta del sistema es de aproximadamente una semana; los cambios efectuados en las condiciones del reactor, regulación del riego y la regulación de la aireación, tienen un efecto no inmediato sobre la biomasa. Dado el largo tiempo de respuesta del sistema, se hace necesario un buen control del proceso, de forma predictiva, para evitar problemas a futuro.

Por último, a partir de la analítica realizada del material bioestabilizado obtenido, se puede observar cómo se cumplen con los requisitos necesarios para incluirlo dentro del grupo de fertilizantes de clase B y clase C, aunque al no estar inscritos en el Registro de fertilizantes y afines no lo podremos considerar. Uno de los objetivos próximos es, controlado ya el proceso de compostaje y el material final generado, obtener la R10 para su futura comercialización y así poder reducir las cantidades de rechazo que vayan destinadas a vertedero.

Trabajo a futuro sobre este reactor será la optimización tanto energética como de costes del propio proceso; por ejemplo, el control exacto de la aireación, recirculación del agua de los lixiviados para el propio riego, ahorrando así los costes de depuración, regular las toneladas de entrada en el reactor por línea, lo que afectará a la cantidad de materia orgánica por línea y los procesos que conlleva.

8. REFERENCIAS

ARGOS. Banco de datos municipales
http://www.argos.gva.es/bdmun/pls/argos_mun/DMEDB_MUNLISTADO.dibujaPagina?aNComuld=17&aVLetra=A&aVLengua=c (fecha de consulta 15 de julio 2019)

BOE. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Boletín Oficial del Estado, 29 de Julio 2011, <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-13046> (fecha de consulta 14 de junio 2019)

Borrador de anteproyecto de ley por la que se modifica la Ley 22/2011, de 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente
http://www.mapama.gob.es/images/es/borradoraplmodificacionleyderesiduos20180518_tcm_30-449600.pdf (fecha de consulta 15 de julio 2019)

BOE. Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de residuos de la Comunidad Valenciana, <https://www.boe.es/buscar/pdf/2001/BOE-A-2001-425-consolidado.pdf> (fecha de consulta 10 de junio 2019)

CRiV. Sede electrónica de Ribera i Valldigna
<https://riberaivalldigna.sedelectronica.es/transparency> (fecha de consulta 10 de julio 2019)

CONAMA. (2016) “GT-15 El desafío de la gestión de la materia orgánica” en La respuesta es verde. Madrid. Fundación CONAMA.

Decreto 55/2019, 5 de abril, del Consell, por el que se aprueba la revisión del Plan Integral de residuos de la Comunidad Valenciana, DOGV, 26.04.2019, núm 8536
https://www.dogv.gva.es/portal/ficha_disposicion_pc.jsp?sig=003888/2019&L=1 (fecha de consulta 10 de julio 2019)

Directiva (UE) 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. Diario Oficial de la Unión Europea, 22 de noviembre de 2008, núm. 312, pp. 3 a 35.

Decálogo para la utilización del material bioestabilizado y del compost no inscrito en el registro de productos fertilizantes mediante la operación R10. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 25 de junio de 2013.
http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasmun&lang=en (fecha de consulta 15 de agosto 2019)

Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos. Diario Oficial de la Unión Europea, 14 de junio de 2018, L. 150/109.

Eurostat (2017) (fecha de consulta 1 de agosto 2019)
https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Waste_statistics/es

Guía Técnica sobre la gestión de residuos Municipales.
http://femp.femp.es/files/3580-1356-fichero/Guia-Tecnica-Gestion-Residuos-Municipales_Web_Edicion2.pdf (fecha de consulta 20 de junio 2019)

Instituto Nacional de Estadística (INE). Estadística sobre recogida y tratamiento de residuos.
http://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176844&menu=resultados&idp=1254735976612 (fecha de consulta 12 de junio 2019)

Instituto Nacional de Estadística (INE). Cantidad de residuos urbanos recogidos clasificados por tipo de residuo.
<http://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t26/e068/p01/serie/I0/&file=02003.px&L=0> (fecha de consulta 12 de junio 2019)

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA). “Biorresiduos”
<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/biorresiduos/Default.aspx> (fecha de consulta 10 de junio 2019)

MAPAMA. “Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. “Economía circular”
<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/> (fecha de consulta 10 de junio 2019)

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA). “Introducción a los modelos de gestión de residuos”
https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/modelo_gestion/ (fecha de consulta 10 de junio 2019)

Moreno Casco, J. y Moral Herrero, R. (2011). Compostaje. Madrid: Mundi-Prensa

PEMAR, 2015 Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2016-2022
(Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente
https://www.aprr.eus/wp-content/uploads/2016/11/20151106PEMAR-2016_2022_apartado-13_pag96.pdf (fecha de consulta 13 de junio 2019)

Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. Boletín Oficial del Estado, 10 de julio de 2013, núm. 164
<https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-7540-consolidado.pdf> (fecha de consulta 10 de julio 2019)