



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

**MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Dimensionado de una planta de compostaje para la valorización de los  
residuos hortofrutícolas generados en la provincia de Valladolid**

Autor: D. Miriam Getino de la Riva  
Tutor: D. Mónica Coca Sanz  
Marina Fernández Delgado

Valladolid, julio, 2022



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

**MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Dimensionado de una planta de compostaje para la valorización de los  
residuos hortofrutícolas generados en la provincia de Valladolid**

Autor: D. Miriam Getino de la Riva  
Tutor: D. Mónica Coca Sanz  
Marina Fernández Delgado

Valladolid, julio, 2022



## Resumen Español

En este Trabajo de Fin de Máster se ha diseñado una planta de compostaje para la valorización del 30% de los residuos hortofrutícolas de Valladolid formados, fundamentalmente, por destrío de patata y zanahoria. Para ello, se ha partido de un estudio bibliográfico de las alternativas de valorización de estos residuos mediante compostaje y digestión anaerobia. Se selecciona el compostaje mediante compostadores rotativos como el mejor sistema ya que se adapta a todas las características de la ubicación establecida para la planta (Laguna de Duero). A partir de la selección de alternativas, se realiza el dimensionado de la planta con una capacidad de 11,67 t/día y una superficie estimada de 5.260,6 m<sup>2</sup>. Se realiza una evaluación económica para analizar la viabilidad de la planta de compostaje y una evaluación ambiental para identificar los principales impactos durante su construcción y funcionamiento. Ambas evaluaciones son favorables ya que la inversión puede recuperarse a los 3 años gracias a los beneficios de la venta del fertilizante y los impactos producidos pueden prevenirse, corregirse o compensarse.

**Palabras clave:** Co-compostaje, Digestión anaerobia, Valorización, Paja de cereal, Compost vegetal.

## Abstract

In this Master's Thesis, a composting plant has been designed for the recovery of 30% of the fruit and vegetable waste in Valladolid, formed, fundamentally, by potato and carrot destruction. To do this, a bibliographical study of the alternatives for the recovery of this waste through composting and anaerobic digestion has been used. Composting using rotary composters is selected as the best system since it adapts to all the characteristics of the location established for the plant (Laguna de Duero). Based on the selection of alternatives, the dimensioning of the plant with a capacity of 11.67 t/day and an estimated area of 5,260.6 m<sup>2</sup> is carried out. An economic evaluation is carried out to analyze the feasibility of the composting plant and an environmental evaluation to identify the main impacts during its construction and operation. Both evaluations are favorable since the investment can be recovered after 3 years thanks to the benefits of the sale of the fertilizer and the impacts produced can be prevented, corrected or compensated.

**Key words:** Co-composting, Anaerobic digestion, Recovery, Cereal straw, vegetable compost.



## ÍNDICE

1.	Introducción .....	8
1.1	Industria agroalimentaria .....	8
1.1.1	Importancia en Castilla y León: .....	9
1.2	Producción de residuos agroalimentarios en Castilla y León .....	12
1.3	Alternativas para la gestión de residuos agroalimentarios .....	13
1.3.1	Residuos generados en los cultivos .....	15
	.....	15
1.3.2	Residuos generados en la transformación .....	16
1.4	Valorización de residuos hortofrutícolas mediante compostaje .....	16
1.4.1	Proceso de compostaje .....	16
1.4.2	Parámetros de operación del proceso de compostaje .....	18
1.4.3	Sistemas de compostaje a pequeña escala .....	20
1.5	Valorización de residuos hortofrutícolas mediante digestión anaerobia: sistemas a pequeña escala .....	27
1.5.1	Condiciones de operación .....	28
1.5.2	Alternativas de digestión anaerobia .....	28
2.	Objetivos .....	35
3.	Selección de alternativas .....	36
3.1	Compostaje .....	36
3.2	Digestión anaerobia .....	36
4.	Parámetros de diseño del compostaje.....	37
4.1	Ubicación de la planta de compostaje .....	37
4.2	Producción y características de los residuos.....	39
4.3	Sustratos usados para el compostaje.....	40
4.4	Capacidad de tratamiento de la planta.....	42
5.	Dimensionado de la planta de compostaje .....	45
5.1	Zona de almacenamiento de residuos .....	46
5.2	Zona de mezcla.....	46
5.3	Zona de compostaje .....	47
5.5	Zona de recogida y almacenamiento de lixiviados.....	49
5.6	Zona de almacenamiento y mantenimiento de la maquinaria .....	50
5.7	Zona de Afino de compost.....	52
5.8	Aseos .....	53
5.9	Oficinas.....	53



5.10	Estación meteorológica.....	53
5.11	Esquema de distribución de la planta de compostaje .....	53
6.	Evaluación económica planta de compostaje .....	55
6.1	Costes inmovilizados (CAPEX) .....	55
6.2	Costes de operación (OPEX).....	57
6.3	Estudio viabilidad.....	58
7.	Evaluación ambiental .....	60
7.1	Inventario ambiental .....	60
7.1.1	Medio socioeconómico .....	61
7.1.2	Clima.....	61
7.1.3	Flora .....	62
7.1.4	Fauna .....	63
7.1.5	Hidrogeología.....	63
7.2	Impactos y factores ambientales afectados.....	63
7.3	Valoración de los impactos.....	64
7.4	Medidas preventivas y compensatorias .....	67
8.	Conclusiones .....	69
9.	Bibliografía.....	70
10.	Anexos.....	78
10.1	Anexo 1: Especificaciones técnicas báscula de vehículos SPEED 60-10T (Adaptado de [74]).....	78
10.2	Anexo 2 Especificaciones técnicas compostador de Vaso Ison 21 modelo 24.075 (Adaptado de [77]).....	79
10.3	Anexo 3: Especificaciones técnicas tractor John Deere modelo 5.115M (Adaptado de [80])	80
10.4	Anexo 4: Especificaciones técnicas pala cargadora (Adaptado de [80]).....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Distribución de los subsectores dentro de la industria alimentaria en el año 2020 en España [2].....	8
Figura 2.	Distribución de la industria de transformación de frutas y hortalizas en las diferentes comunidades autónomas [5].....	10
Figura 3.	Representación de los posibles destinos de los residuos de la industria agroalimentaria (Adaptado de:[11]).....	14
Figura 4.	Esquema valorización energética y bioquímica de residuos agrícolas (Adaptado de [8]).....	14
Figura 5.	Productos derivados del compostaje (Fuente: elaboración propia). .....	17
Figura 6.	Diagrama de temperaturas en las fases de descomposición y maduración del compostaje [15].....	18
Figura 7.	Evolución del pH a lo largo del proceso de compostaje en pila [20]. .....	19
Figura 8.	Compostador industrial de la empresa Togo [21].....	21



Figura 9. Compostador de vaso [23].	21
Figura 10. Esquema de temperaturas en el interior del compostador [24].	22
Figura 11. Compostera electromecánica [24].	22
Figura 12. Hot Rot System [25].	23
Figura 13. Ejemplo del sistema Earth flow [25].	23
Figura 14. Contenedores de compostaje de aireación pasiva [26].	24
Figura 15. Hileras de compostaje [26].	25
Figura 16. Hileras trapezoidales y triangulares [23].	25
Figura 17. Pilas estáticas aireadas [27].	26
Figura 18. Esquema de las fases de la digestión anaerobia (Adaptado de [31]).	28
Figura 19. Ejemplo de digestor de microescala [34].	29
Figura 20. Digestor tipo Arkometha [35].	30
Figura 21. Esquema de la clasificación de los tipos de digestores a pequeña escala (adaptado de [36]).	30
Figura 22. Reactor de mezcla completa [33].	31
Figura 23. Digestor de flujo pistón [33].	31
Figura 24. Digestor de película fina [33].	32
Figura 25. Digestor de medio suspendido [33].	32
Figura 26. Digestor tipo ITD [38].	33
Figura 27. Digestor tipo garaje [33].	34
Figura 28. Cultivos de Laguna de Duero [41].	38
Figura 29. Ubicación de la parcela seleccionada [42].	38
Figura 30. Esquema de distribución compostadores (Fuente: elaboración propia)	48
Figura 31. Esquema área de compostaje (Fuente: elaboración propia).	49
Figura 32. Ejemplo de cinta transportadora de planchas metálicas [81].	51
Figura 33. Estación de cribado móvil de Compost system modelo KA 4018-3.5 [82].	52
Figura 34. Esquema de distribución de la planta de compostaje (Fuente: elaboración propia)	54
Figura 35. Flujo de caja acumulado (Fuente: elaboración propia).	59
Figura 36. Mapa de Red Natura 2000 (ZEPA Y LIC) de Castilla y León ([99]).	60
Figura 37. Climograma de Laguna de Duero [101].	62
Figura 38. Mapa hidrogeológico de España, escala 1: 200.000 [104].	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Índice de producción de la industria alimentaria en 2019 y 2020 [2].	9
Tabla 2. Superficie usada para cultivo por los países europeos[5].	9
Tabla 3. Datos de PIB, PIB per cápita, exportaciones e importaciones de Castilla y León (Fuente: elaboración propia).	10
Tabla 4. Datos de producción de hortalizas (ha) [2].	11
Tabla 5. Tipos de hortalizas cultivadas en Castilla y León (Fuente: elaboración propia).	11
Tabla 6. Producción en toneladas de hortalizas y tubérculos en Valladolid (Fuente: elaboración propia).	12
Tabla 7. Coeficiente directo, ST, SV, toneladas producidas y toneladas de residuos de zanahoria y patata (adaptado de [7]).	13
Tabla 8. Principales alternativas de gestión de los restos generados durante la cosecha [9].	15
Tabla 9. Aireación en m <sup>3</sup> /h por m <sup>3</sup> de pila [26].	26
Tabla 10. Composición del biogás producido [30].	27
Tabla 11. Características de las bacterias que intervienen en la digestión anaerobia [32].	28
Tabla 12. Características de los sistemas de compostaje (Fuente: elaboración propia).	36
Tabla 13. Características de los sistemas de digestión anaerobia (Elaboración: propia)	37



Tabla 14. Estimación de la producción de residuos de patata y zanahoria en Valladolid (Adaptado de [7]) .....	39
Tabla 15. Cantidad de residuos a tratar en la planta de compostaje (Fuente: elaboración propia). .....	39
Tabla 16. Características de los restos de patata y zanahoria (Fuente: elaboración propia). ...	40
Tabla 17. Ejemplos de co-compostaje de residuos vegetales (Fuente: elaboración propia). ...	40
Tabla 18. Número de animales en Valladolid y en Castilla y León en 2020 (Adaptado de [54]) .....	41
Tabla 19. Cantidad de cereales producida en t/año de paja en Valladolid en 2020 (Adaptado de [2]). .....	41
Tabla 20. Características de los residuos que pueden utilizarse para el co-compostaje (Fuente: elaboración propia). .....	42
Tabla 21. Ejemplos de plantas de compostaje en Castilla y León (Fuente: elaboración propia). .....	42
Tabla 22. Cantidad de residuos y sustrato para el compostaje (Fuente: elaboración propia). .	44
Tabla 23. Características del compost vegetal para ser usado como sustrato de cultivo (Adaptado de [69]). .....	45
Tabla 24. Ficha técnica trituradora Coparm modelo Trituradora serie TR100 (Adaptado de [75]). .....	47
Tabla 25. Ficha técnica cinta transportadora de Coparm, modelo TM 125_12 [81]. .....	51
Tabla 26. Ficha técnica estación de cribado móvil de compost system modelo KA 4018-3.5 [82]. .....	52
Tabla 27. Costes inmovilizados (Fuente: elaboración propia) .....	56
Tabla 28. Costes energéticos (Fuente: elaboración propia) .....	57
Tabla 29. Coste de personal (Fuente: elaboración propia) .....	57
Tabla 30. Costes de operación (Fuente: elaboración propia) .....	58
Tabla 31. Cálculos flujo de caja acumulado (Fuente: elaboración propia) .....	59
Tabla 32. Valores de VAN, TIR y PR (Fuente: elaboración propia). .....	60
Tabla 33. Distribución de la población por edad y sexo [100]. .....	61
Tabla 34. Flora de Laguna de Duero [102] . .....	62
Tabla 35. Criterios de caracterización de los impactos (Fuente: elaboración propia). .....	64
Tabla 36. Caracterización de los impactos (Fuente: elaboración propia) .....	65
Tabla 37. Matriz de identificación de impactos (Fuente: elaboración propia) .....	66
Tabla 38. Matriz de importancia (Fuente: elaboración propia) .....	66
Tabla 39. Medidas preventivas y compensatorias (Fuente: elaboración propia). .....	68

## 1. Introducción

La industria de la alimentación es el sector industrial más importante en España representando un 23,3% dentro de la industria. Cuenta con 30.000 empresas dentro de todo el territorio (15,7% del sector industrial) y corresponde con el 2,5 % del PIB Español [1].

Dentro de la industria de la alimentación se encuentran el procesado y conservación de carne, pescado y frutas y hortalizas, la fabricación de aceites, grasas vegetales y animales, leche, productos de molinería, panadería y productos para alimentación animal (*Figura 1*). El subsector más representativo es el de productos de panadería y pastas alimenticias con un 53% de las empresas. En el caso del procesado y conservación de frutas y hortalizas solo abarca el 7% de la industria.

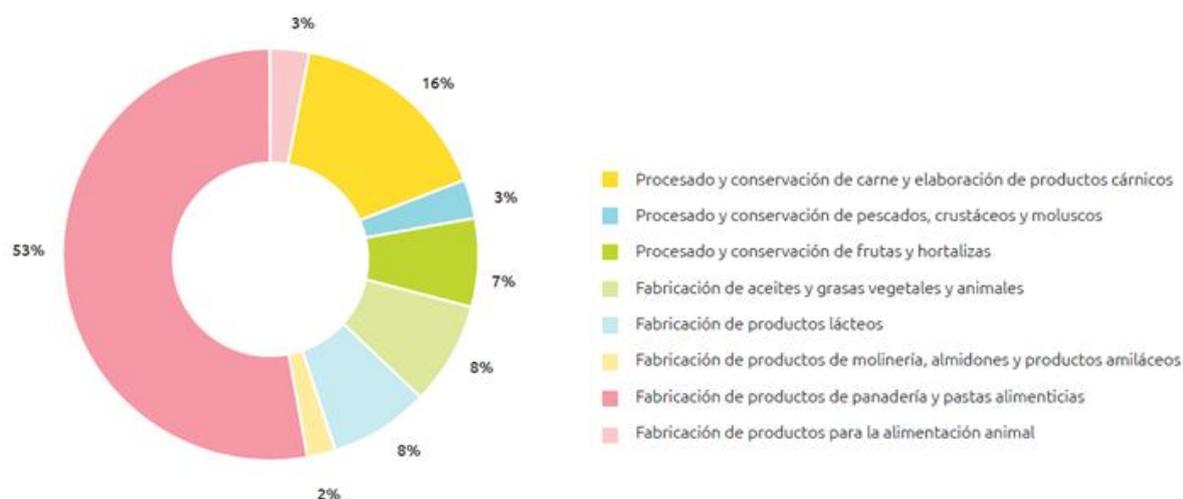


Figura 1. Distribución de los subsectores dentro de la industria alimentaria en el año 2020 en España [2].

### 1.1 Industria agroalimentaria

La industria agroalimentaria es fundamental en España ya que es primer sector dentro de la industria manufacturera [3]. A nivel mundial se sitúa como la décima potencia y a nivel europeo como la cuarta debido a que el índice de producción de la industria (IPI) que determina la evolución en cuanto a calidad y cantidad de la actividad en sus diferentes ramas se mantiene más o menos estable en el tiempo, proporcionando productos de calidad y aumentando su prestigio [4]. La *tabla 1* muestra la evolución del IPI en los años 2019 y 2020. En el procesado y conservación de frutas y hortalizas apenas ha habido cambios en la cantidad y calidad de los productos.

Tabla 1. Índice de producción de la industria alimentaria en 2019 y 2020 [2].

División, grupos y clases	2019			2020		
	1º Sem.	2º Sem.	Media	1º Sem.	2º Sem.	Media
10.1. Procesado y conservación de carne y elaboración de productos cárnicos	104,0	104,2	104,1	97,8	102,5	100,1
10.2. Procesado y conservación de pescados, crustáceos y moluscos	98,0	103,5	100,7	95,6	102,4	99,0
10.3. Procesado y conservación de frutas y hortalizas	96,4	115,3	105,8	94,2	108,5	101,3
10.4. Fabricación de aceites y grasas vegetales y animales	138,2	94,0	116,1	97,7	95,1	96,4
10.5. Fabricación de productos lácteos	103,4	96,9	100,1	101,4	94,9	98,2
10.6. Fabricación de productos de molinería, almidones y productos amiláceos	108,0	105,7	106,8	106,2	101,9	104,1
10.7. Fabricación de productos de panadería y pastas alimenticias	103,9	104,8	104,3	90,9	94,4	92,6
10.8. Fabricación de otros productos alimenticios	102,6	108,7	105,7	100,5	108,7	104,6
10.9. Fabricación de productos para la alimentación animal	107,7	111,5	109,6	108,0	114,3	111,2
<b>10. INDUSTRIA DE LA ALIMENTACIÓN</b>	<b>104,7</b>	<b>105,4</b>	<b>105,0</b>	<b>97,8</b>	<b>102,3</b>	<b>100,1</b>
<b>11. FABRICACIÓN DE BEBIDAS</b>	<b>97,5</b>	<b>106,1</b>	<b>101,8</b>	<b>84,7</b>	<b>101,6</b>	<b>93,1</b>
<b>ÍNDICE GENERAL (IPI)</b>	<b>107,7</b>	<b>104,2</b>	<b>105,9</b>	<b>91,7</b>	<b>100,8</b>	<b>96,2</b>

A nivel europeo, España se encuentra entre los países con mayor superficie de cultivo. De las 50.599 M ha disponibles 29.667 M ha son de cultivo, es decir un 58,6% de la superficie del país se utiliza como superficie de cultivo (Tabla 2). Por lo tanto, la industria agroalimentaria está presente de forma significativa en la mayor parte del país.

Tabla 2. Superficie usada para cultivo por los países europeos[5].

Países	Utilización de la tierra				Regadío
	Superficie total	Tierras de cultivo	Cultivos permanentes	Tierras de labranza	
MUNDO	13.425.432	4.974.251	133.127	1.364.238	271.689
<b>PAISES DE EUROPA</b>					
Unión Europea	324.269	140.627	11.122	73.499	12.479
Alemania	35.703	17.068	216	11.804	485
Austria	8.386	3.390	71	1.399	4
Bélgica-Luxemburgo	3.312	1.522	22	815	35
Dinamarca	4.309	2.647	8	2.281	447
España	50.599	29.667	4.900	13.317	3.655
Finlandia	33.815	2.212	4	2.187	64
Francia	55.150	29.706	1.142	18.440	2.200
Grecia	13.196	8.529	1.113	2.741	1.451
Holanda	4.153	1.956	35	909	565
Irlanda	7.027	4.403	3	1.050	-
Italia	30.134	15.271	2.841	7.984	2.700
Portugal	9.198	4.142	715	1.990	650
Reino Unido	24.291	16.961	52	5.876	108
Suecia	44.996	3.153	-	2.706	115

### 1.1.1 Importancia en Castilla y León:

Esta comunidad autónoma tiene gran peso en el sector agroalimentario constituyendo el 10% de la industria y situándose como la tercera potencia a nivel nacional. En general, la

mayor parte se dedica a la producción de carne, lácteos y alimentación para animales. Sin embargo, destaca la presencia de 65 sellos de calidad formados por productos de denominación de origen. Dentro de la comunidad presenta un PIB de 64.225 M€, siendo el valor per cápita de 26.658 €. Al comparar las exportaciones con las importaciones se ve que las exportaciones superan en 3200 M€ a las importaciones (Tabla 3)[3].

Tabla 3. Datos de PIB, PIB per cápita, exportaciones e importaciones de Castilla y León (Fuente: elaboración propia).

PIB	PIB per cápita
64.225 M€	26.658 €
Exportaciones	Importaciones
16.385 M€	13.185 M€

La figura 2 muestra la distribución de las diferentes empresas de transformación de frutas y hortalizas en España. En el caso de Castilla y León solo representa el 5% del total.

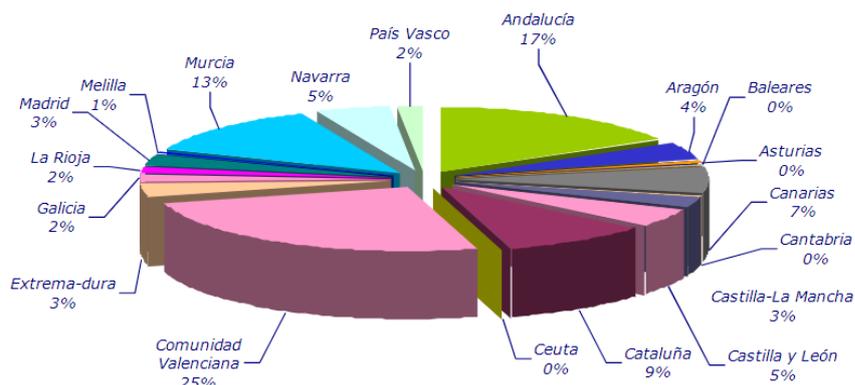


Figura 2. Distribución de la industria de transformación de frutas y hortalizas en las diferentes comunidades autónomas [5].

Los datos de producción de hortalizas en Castilla y León (Tabla 4) muestran que la provincia con mayor número de hectáreas dedicadas a su producción es Valladolid, con un total de 6251 ha [2]. Las hortalizas consideradas (Tabla 5) son de hoja o tallo (berza, col, etc.), de fruto (sandía, melón, etc.), de flor (alcachofa, brócoli, etc.), raíces y bulbos (ajo, cebolla, etc.), leguminosas (judías verdes, habas verdes, etc.) y otras hortalizas (champiñón, setas, etc.).

Tabla 4. Datos de producción de hortalizas (ha) [2].

Provincias y Comunidades Autónomas	Hortalizas de hoja o tallo	Hortalizas de fruto	Hortalizas de flor	Raíces y bulbos	Leguminosas	Varias (1)
Ávila	44	367		572	159	-
Burgos	71	30	28	215	215	-
León	43	84	37	119	-	1
Palencia	4	111	-	132	120	3
Salamanca	58	41	7	100	10	-
Segovia	106	239	4	2.372	20	151
Soria	381	26	54	139	2	1
Valladolid	590	1.248	6	2.927	1.470	10
Zamora	39	332	-	760	388	-
<b>CASTILLA Y LEÓN</b>	<b>1.336</b>	<b>2.478</b>	<b>136</b>	<b>7.336</b>	<b>2.384</b>	<b>166</b>

Tabla 5. Tipos de hortalizas cultivadas en Castilla y León (Fuente: elaboración propia).

Hortalizas de Hoja o Tallo	Hortalizas de fruto	Raíces y bulbos
Col	Sandía	Ajo
Berza	Melón	Cebolla
Espárragos	Calabaza	Cebolleta
Apio	Calabacín	Puerro
Lechuga	Pepino	Remolacha
Escarola	Pepinillo	Zanahoria
Espinaca	Berenjena	Rábano
Acelga	Tomate	Nabo
Cardo	Pimiento	<b>Leguminosas</b>
Grelo	Guindilla	Judías verdes
Canónigo	Maíz dulce	Guisantes verdes
Rúcula	Fresa y Fresón	Habas verdes
Achicoria verde	<b>Hortalizas de flor</b>	<b>Hortalizas varias</b>
Endivia	Alcachofa	Champiñón
Perejil	Brocoli	Setas
Borraja	Coliflor	Otras

La producción total de hortalizas en la provincia de Valladolid es de 166.670 t/año. Destaca la producción de ajo y zanahoria con 10.200 t/año y 94.425 t/año respectivamente (Tabla 6). Generándose en total entre estas dos hortalizas 104.625 t/año de productos. Sin embargo, la mayor producción de la zona no es una hortaliza si no que se trata de un tubérculo (patata) que genera 259.650 t/año de producto para consumo humano [2]. Por lo tanto, los tres productos más cosechados en la provincia son el ajo, la zanahoria y la patata.

Tabla 6. Producción en toneladas de hortalizas y tubérculos en Valladolid (Fuente: elaboración propia).

Hortalizas de Hoja o Tallo	Producción (t/año)	Hortalizas de fruto	Producción (t/año)
Col	810	Sandía	61
Berza	60	Melón	207
Espárragos	340	Calabaza	5850
Lechuga	540	Calabacín	23
Espinaca	6798	Tomate	238
Acelga	1325	Pimiento	140
Endivia	2750		
<b>Total</b>	<b>12623</b>	<b>Total</b>	<b>6519</b>
Raíces y bulbos	Producción (t/año)	Leguminosas	Producción (t/año)
Ajo	10200	Judías verdes	2040
Cebolla	25850	Guisantes verdes	9100
Cebolleta	702	<b>Total</b>	<b>11140</b>
Puerro	7200	Hortalizas de flor	Producción (t/año)
Remolacha	8960	Alcachofa	1
Zanahoria	94425	Coliflor	100
Nabo	90		
<b>Total</b>	<b>147427</b>	<b>Total</b>	<b>101</b>

## 1.2 Producción de residuos agroalimentarios en Castilla y León

Dentro de los restos vegetales de la industria agroalimentaria se encuentran los restos de hojas y tallos y los destríos o productos no aptos para la venta debido a su aspecto (manchas, tamaño, rajas o forma), inmadurez y patógenos [7].

Estos residuos vegetales pueden clasificarse en tres categorías en función de la razón de convertirse en residuo [7].

- **Excedentes:** Se eliminan parte de los productos para cumplir con la política agraria común.
- **No conformes:** Forman parte los destríos o productos en mal estado.
- **Subproductos de la transformación:** Restos generados en la industria debido a la transformación de los productos.

La cantidad de residuos producidos de zanahoria y patata producidas en Valladolid pueden estimarse a partir de los datos de producción obtenidos en el anuario de estadística del Ministerio de Agricultura y los coeficientes directos que establecen la relación entre las toneladas de residuos y las toneladas de producto [7]. A partir de esta relación se puede estimar la cantidad de residuos generados zanahoria y patata (Tabla 7) obteniéndose 7176 t/año de residuos de zanahoria y 3635 t/año de residuos de patata.

Tabla 7. Coeficiente directo, ST, SV, toneladas producidas y toneladas de residuos de zanahoria y patata (adaptado de [7]).

Categoría	Tipo de residuo	Coeficiente directo (t residuo /t producida)	ST (%)	SV (%ST)	t/año producidas	t/año residuos
Zanahoria	Excedentes	0,05	(9,5 - 14)	88,3	94425	4721
	No conformes	0,01				944
	Subproductos de la transformación	0,016				1511
Patata	No conformes	0,01	(14 - 21)	95	259650	2597
	Subproductos de la transformación	0,004	(3,5 -36)	91		1039

### 1.3 Alternativas para la gestión de residuos agroalimentarios

Los componentes que forman parte de los residuos agrícolas dependen del tipo de cultivo, la zona donde se ha cultivado y el método de cultivo. En general los residuos están formados por celulosa, lignina y hemicelulosa. La celulosa suele ser el componente mayoritario llegando a representar entre un 30 y 50% del peso. Este componente puede valorizarse fácilmente a través de diversas tecnologías y obtenerse un recurso energético mediante digestión anaerobia [8].

Las alternativas de gestión de residuos a tener en cuenta dependen de donde se generen los restos, es decir los residuos generados en el campo de cultivo y los destríos pueden gestionarse de forma diferente en función del tipo de cultivo, la distancia a las zonas de valorización o reutilización, las tradiciones existentes, la mecanización de los cultivos y el espacio disponible [9]. La *figura 3* muestra las posibles alternativas de valorización de los residuos en función de dónde se generan. En el caso de la precosecha los restos podrán destinarse sobre todo a la alimentación del ganado como establece la Orden de 26 de marzo de 1986 por la que se modifican los anejos I y II de la Orden de 23 de junio de 1976 sobre autorización y registro de las sustancias y productos que intervienen en la alimentación de los animales, dónde los residuos hortofrutícolas pueden utilizarse como alimento para el ganado [10].

El resto de los residuos producidos en la cosecha, procesado, distribución y consumo de alimentos pueden valorizarse o considerarse como residuos alimentarios según la ORDEN FYM/162/2012, de 9 de marzo, por la que publica la relación de residuos susceptibles de valorización (orden FYM).

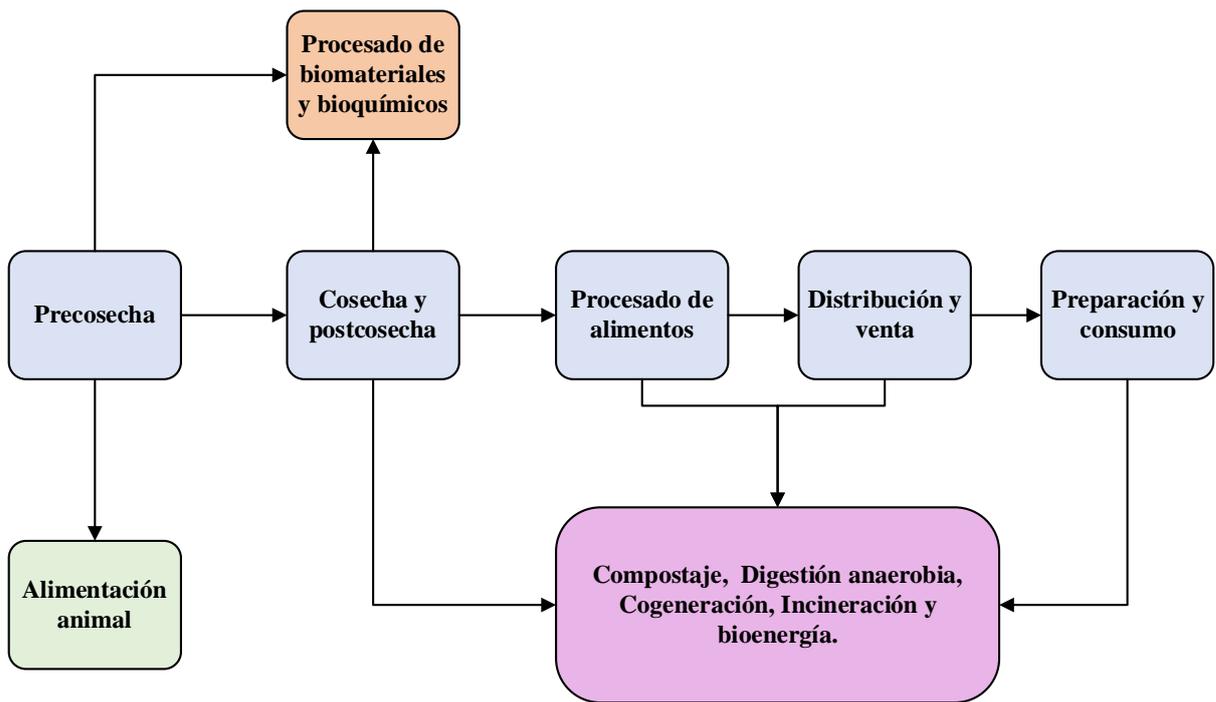


Figura 3. Representación de los posibles destinos de los residuos de la industria agroalimentaria (Adaptado de:[11]).

Entre las opciones de valorización pueden encontrarse la generación de biogás o de productos químicos que pueden ser utilizados en otros procesos posteriormente. La *Figura 4* muestra los principales productos que pueden derivarse de los residuos agrícolas. Después de un pretratamiento los restos pueden hidrolizarse para generar glucosa y bioetanol mediante fermentación o pueden llevarse a un proceso de digestión anaerobia donde se producirá biogás y biometano. A partir de estos 3 productos se pueden obtener otros como ácido acético, etileno, metanol, etc [8].

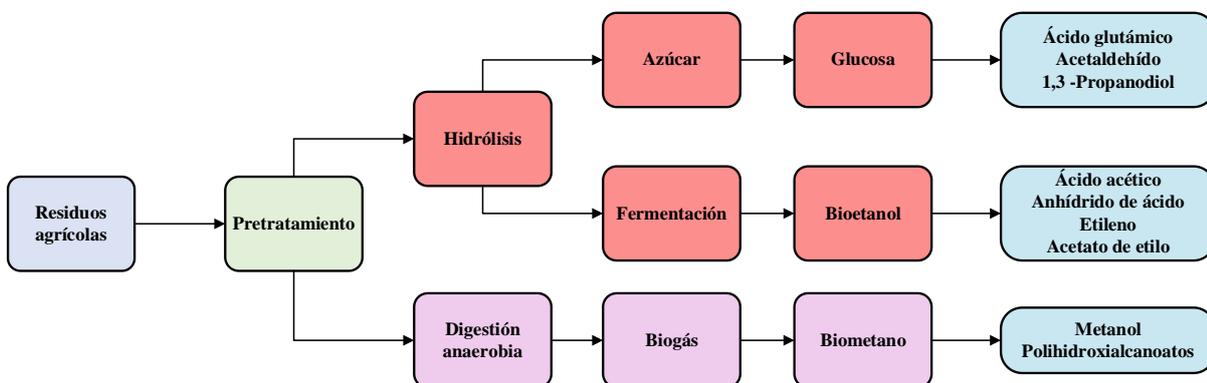


Figura 4. Esquema valorización energética y bioquímica de residuos agrícolas (Adaptado de [8]).

### 1.3.1 Residuos generados en los cultivos

La Directiva 2018/851 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos, obliga a la recogida de los residuos procedentes de la industria agroalimentaria y la reutilización de estos [12]. Por lo tanto, es cada vez más habitual encontrar nuevas técnicas de reutilización o valorización de los residuos [13]. La *tabla 8* muestra las principales alternativas de gestión de los residuos de las cosechas. Dentro de las alternativas consideradas para los cultivos de patata, zanahoria y ajo se encuentran:

- **Reincorporación al suelo:** Tras la cosecha los restos pueden incorporarse al suelo enterrándolos para evitar que constituyan un riesgo fitosanitario. Esto aporta materia orgánica evitando la necesidad de aplicación de abonos posteriormente [14].
- **Alimentación para ganado:** Este tipo de aprovechamiento no requiere ninguna transformación [14].
- **Compostaje:** mediante la descomposición de la materia orgánica presente en los restos vegetales a partir de microorganismos se obtiene una enmienda que puede utilizarse en cultivos posteriores [15].
- **Vermicompostaje:** La descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo mediante lombrices [16].
- **Producción de biogás:** La producción de biogás es una de las técnicas de valorización más adecuada ya que sirve para todo tipo de residuos procedentes de la industria agroalimentaria. Este tipo de aprovechamiento resulta rentable por lo que es bastante usado por los países de europeos [13].
- **Eliminación en vertedero:** Consiste en depositar los restos en un vertedero controlado. Este tipo de alternativa de gestión se intenta reducir mediante reutilización y valorización de los residuos [14]. La Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos, restringe la cantidad de residuos orgánicos que pueden depositarse en vertedero siempre que se puedan valorizar o reciclar [17].
- **Abandono:** Técnica que no debería usarse ya que conlleva riesgo de aparición de plagas [14].

Tabla 8. Principales alternativas de gestión de los restos generados durante la cosecha [9].

Destino	Observaciones
Reincorporación al suelo	Aporta materia orgánica al suelo
Alimentación para el ganado	Práctica tradicional donde se utilizan los restos sin tratar previamente
Compostaje	Puede usarse junto con otro tipo de residuos orgánicos
Vermicompostaje	Digestión de la materia orgánica mediante lombrices
Producción de biogás	Generación de biogás que puede aprovecharse
Eliminación en vertedero	Tendencia a disminuirse por la aplicación de las nuevas normativas
Abandono	Propagación de plagas, enfermedades, insectos y roedores

### 1.3.2 Residuos generados en la transformación

Los residuos no conformes formados por destríos constituyen el 10% de la producción de residuos de la industria. Su gestión es más sencilla ya que se generan en las zonas de empaquetado de productos y no en el campo como los restos vegetales procedentes de la cosecha. Sin embargo, su mayor contenido en humedad da pie a la generación de olores y lixiviados que dificultan la gestión de estos residuos y generan un importante impacto ambiental.

Las alternativas de gestión son similares a las utilizadas para los restos vegetales en campo, exceptuando la quema y la producción de papel y cartón. El uso de una alternativa u otra depende de las mismas variables que en el caso anterior, pero las opciones más comunes son utilizar los residuos para la alimentación del ganado y eliminación en vertedero [10]. La eliminación a vertedero tiene numerosos inconvenientes como la generación de olores, de lixiviados que es necesario recoger para su tratamiento, de gases de efecto invernadero, la ocupación de grandes extensiones de terreno y la proliferación de plagas, por lo tanto, se debe disminuir el uso de esta práctica fomentando otras que no tengan tantas desventajas y puedan obtenerse subproductos que puedan aprovecharse.

## 1.4 Valorización de residuos hortofrutícolas mediante compostaje

Se define el compostaje como una técnica de aprovechamiento de los restos orgánicos por parte de los microorganismos descomponedores para obtener un abono que aporta los siguientes beneficios [15]:

- Mejora la estructura del suelo al facilitar la formación de agregados que mejoran la aireación y evitan la evaporación del agua.
- Abono rico en macro y micronutrientes.
- Proceso sencillo.
- Producto natural sin presencia de compuestos químicos.

El objetivo del compostaje a pequeña escala es conseguir la descomposición de la materia orgánica de forma rápida, mediante la actividad de los microorganismos manteniendo unas condiciones adecuadas de nutrientes, humedad y oxígeno. Este proceso genera gran cantidad de calor alcanzándose temperaturas de entre 50 y 65 °C que favorecen la destrucción de los patógenos presentes en los restos [18].

### 1.4.1 Proceso de compostaje

Esta técnica se lleva a cabo en dos fases con una duración de entre 5 y 6 meses. De estas fases se obtiene principalmente el compost o abono. Sin embargo, también se genera CO<sub>2</sub>, agua, sulfato y amoníaco (*Figura 5*) [15].

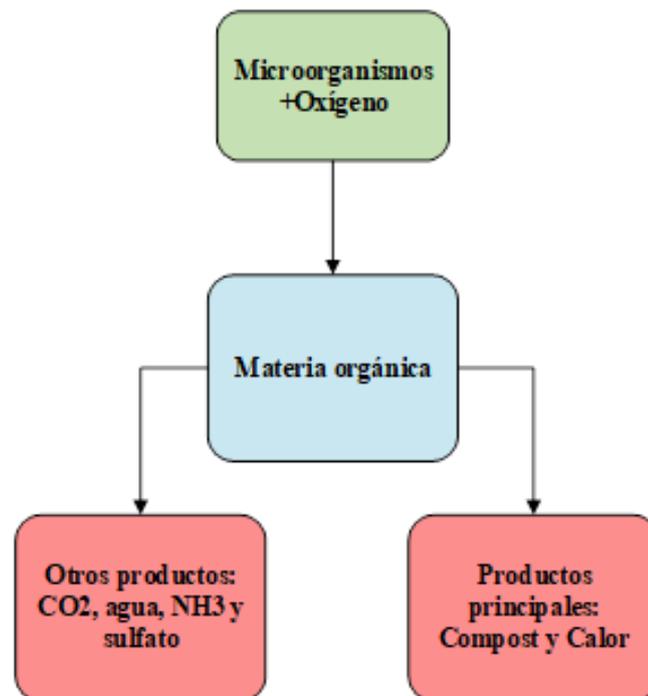


Figura 5. Productos derivados del compostaje (Fuente: elaboración propia).

La fase de descomposición se divide en:

- **Fase de crecimiento (2 – 4 días):** Durante este periodo los microorganismos se aclimatan a la temperatura, los nutrientes y el oxígeno disponibles. Destaca sobre todo la presencia de hongos filamentosos como *Trichoderma* y de bacterias mesófilas acidificantes como *Bacillus* ya que las temperaturas aun no son tan elevadas (20 - 40 °C) [19].
- **Fase termófila (1 Semana – meses):** Aparecen los microorganismos termófilos al alcanzarse temperaturas mayores a los 50 °C. Proliferan sobre todo *Actinomyces* y algunas de las bacterias del género *Bacillus* de la etapa anterior que logren resistir a las temperaturas. La materia orgánica se comienza a degradar y empieza a formarse los productos que se muestran en la figura 5 [19].
- **Fase termófila extrema:** Se produce cuando la temperatura de la fase termófila supera los 60°C eliminando la mayor parte de las bacterias presentes. Algunos estudios han logrado aislar bacterias del género *Bacillus*, *Thermus* y *Hydrogenobacter* y hongos pertenecientes a los *Actinomyces*. Durante esta fase se lleva a cabo la degradación y mineralización de parte de la materia orgánica que necesita mayores temperaturas [19].

La fase de maduración tiene una duración de 3 meses. En ella se produce una disminución de la temperatura (50 – 20 °C) y de la materia orgánica más difícil de degradar que empieza a desaparecer lentamente [15]. Esta fase es importante ya que la madurez del compost mejora la fertilidad y la estructura del suelo. Los microorganismos que intervienen en esta son mayoritariamente bacterias (80% del total), sin embargo, la presencia de hongos *Actinomyces* y hongos filamentosos se ve incrementada debido a su capacidad de

degradación de polímeros. También pueden encontrarse ejemplares de microorganismos sulfatos reductores, desnitrificantes y fijadores de nitrógeno como *Azotobacter* [19].

#### 1.4.2 Parámetros de operación del proceso de compostaje

Durante el proceso de compostaje es importante controlar la temperatura, cantidad de oxígeno y humedad de la materia orgánica para favorecer el crecimiento de los microorganismos que intervienen en cada una de las fases del compostaje.

- **Temperatura:** Es necesario mantener los rangos de temperatura que requieren los microorganismos de cada fase. La *figura 6* muestra los rangos de temperatura de la fase de descomposición y de la fase de maduración. En el caso de la fase de crecimiento las temperaturas varían entre 15 y 45 ° C mientras que en la fase de termófila las temperaturas están entre los 45 y 70 °C. En la fase de maduración la temperatura disminuye hasta situarse por debajo de los 40°C [15].

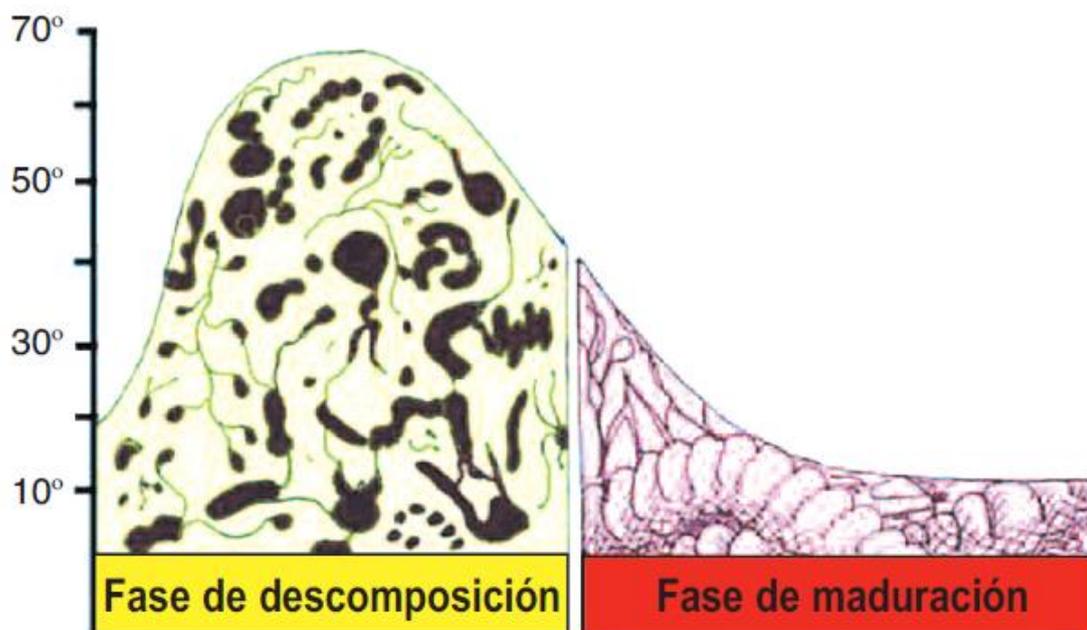


Figura 6. Diagrama de temperaturas en las fases de descomposición y maduración del compostaje [15]

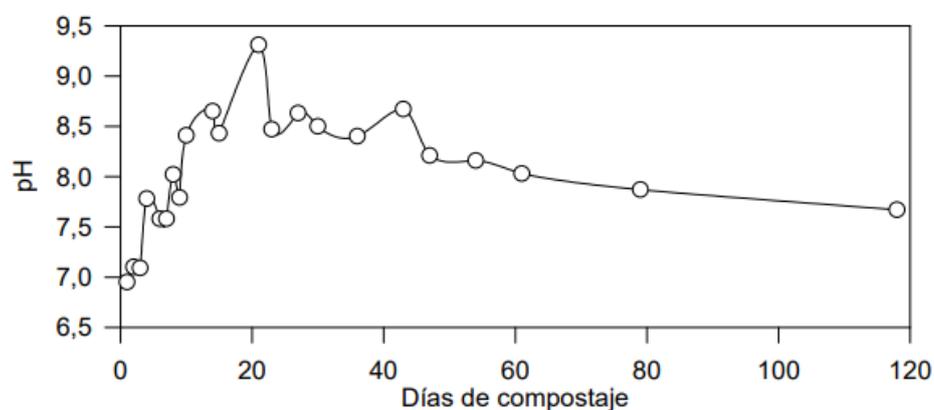
- **Aireación:** Para evitar las condiciones anaerobias se debe mantener un porcentaje de oxígeno en el proceso de compostaje suficiente para favorecer la proliferación de organismos aerobios. En el caso de pilas de compostaje la zona superior en contacto con la atmósfera suele tener valores de oxígeno de entre un 18 y 20 %, sin embargo, en el interior el oxígeno disminuye con la profundidad llegando a tener valores de entre 0,5 y 2%. Estos valores de oxígeno aumentan el riesgo de generación de sulfuro de hidrógeno lo que fomenta la aparición de malos olores y la disminución en la tasa de descomposición de la materia orgánica. Si ocurre el caso contrario y hay un exceso de

oxígeno, disminuiría la temperatura y por lo tanto la actividad microbiana descendería. Para evitar estos problemas se debe mantener un porcentaje de oxígeno del 10 % [20].

- **Humedad:** El agua presente en el material compostable determina la cantidad de nutrientes que reciben los microorganismos. La humedad está directamente relacionada con la cantidad de oxígeno presente ya que una humedad muy elevada favorece la anaerobiosis. Por lo tanto, se debe mantener una humedad de entre 40-60% para favorecer la actividad microbiana y evitar la proliferación de microorganismos anaerobios [15].

- **pH:** Este parámetro puede ser indicativo del nivel de aireación necesario en las pilas de compostaje ya que al disminuir la cantidad de oxígeno disponible los microorganismos anaeróbicos liberan compuestos ácidos que disminuyen el pH.

El pH no es constante durante todo el proceso de compostaje como muestra la *Figura 7*. Durante la fase de crecimiento se produce una acidificación debido a la liberación de ácidos orgánicos, en la fase termófila se produce un aumento del pH debido al consumo de los ácidos orgánicos liberados en la etapa anterior y a la formación de amoníaco y en la fase de maduración se neutraliza el pH indicando la madurez del compost [20].



*Figura 7. Evolución del pH a lo largo del proceso de compostaje en pila [20].*

- **Porosidad:** El espacio disponible para la circulación del agua y del aire es fundamental para garantizar la presencia de microorganismos aerobios al obtener nutrientes y oxígeno. La porosidad se ve influenciada por el tamaño de partícula ya que cuanto más pequeña es la partícula menor espacio hay para la circulación del agua y los gases. Por lo tanto, influye la densidad aparente de los residuos presentes que disminuye o aumenta en función de la cantidad de humedad presente [20].
- **Nutrientes:** La capacidad de compostaje de un residuo se determina en función de los componentes elementales que forman parte de él. Los elementos necesarios para el desarrollo microbiano son el C, N y P. El carbono debe ser mayoritario ya que interviene en la síntesis de lípidos, carbohidratos y grasas. El nitrógeno interviene en la reproducción de los microorganismos y determina la capacidad del compost de actuar como fertilizante y el fósforo es necesario para la síntesis de energía [20]. La relación

C/N influye en la velocidad de degradación de la materia orgánica ya que un exceso de carbono disminuye la velocidad al no disponer de suficiente N para el proceso biológico. Sin embargo, una relación baja aumenta la velocidad, pero genera gran cantidad de amoníaco que no puede aprovecharse posteriormente por las plantas y genera gases de efecto invernadero. Como por ejemplo la oxidación de  $\text{NH}_3$  que genera  $\text{N}_2\text{O}$ . La relación C/N más adecuada para el compostaje es de 20 - 30. En cuanto a la relación C/P se debe establecer entre 75 y 150 mientras que el N/P entre el 5 y el 20 para mejorar la descomposición de los residuos [20].

- **Tamaño de partícula:** El tamaño de la partícula está influenciado por la porosidad e influye de forma directa en la velocidad de descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto, cuanto más pequeña es la partícula más accesible se encuentra para los microorganismos al tener mayor superficie disponible. El tamaño más adecuado no está fijado al haber discrepancias entre diferentes autores, por lo que puede variar entre 1 y 5 cm [20].
- **Materia orgánica:** La cantidad de materia orgánica presente determina la calidad del compost final ya que durante el proceso la cantidad de materia orgánica disminuye notablemente. Este consumo de materia orgánica se debe a la transformación de las moléculas complejas en otras más simples, que pueden agruparse y formar compuestos húmicos [20].
- **Conductividad eléctrica:** Se debe a la cantidad de sales presentes y a los iones de amonio y nitrato que se generan en el compostaje. La mineralización de la materia orgánica produce un aumento de la conductividad al aumentar la cantidad de nutrientes presentes. Por el contrario, si aumenta la lixiviación y la humedad del compost se produce una disminución de la conductividad eléctrica [20].

#### 1.4.3 Sistemas de compostaje a pequeña escala

El tipo de compostaje a llevar a cabo depende del espacio del que se disponga, en este caso se tendrán en cuenta las opciones que ocupen menor espacio al buscar alternativas para una planta de pequeño tamaño. Se puede llevar a cabo mediante sistemas cerrados (compostadores) o sistemas abiertos (pilas de compostaje y trincheras).

1.4.3.1 Sistemas cerrados: Se realiza mediante el uso de un contenedor que puede ser de diversa naturaleza. Es importante que el tipo de contenedor seleccionado se pueda cerrar para controlar la temperatura, la entrada de agua y que a la vez permita la entrada de oxígeno. Además, permite un mayor control de los olores producidos evitando que salgan al exterior [17]. Las alternativas que se utilizan a nivel industrial son:

- **Compostador comercial:** Son los más adecuados para la industria ya que pueden elegirse en función de la cantidad de residuos que se aporta al día [21]. El compostador de la empresa Togo que se muestra en la *Figura 8* se trata de un compostador industrial con una capacidad de 1800 t/año de residuos. Puede utilizarse tanto en instalaciones de compostaje como en centros de procesamiento de alimentos. Las dimensiones estándar son de  $5800 \times 1850 \times 2330$  mm de ancho, largo y alto respectivamente. El tiempo de residencia necesario para compostar residuos orgánicos es de 24 horas, siendo necesaria una etapa posterior de maduración [22].



Figura 8. Compostador industrial de la empresa Togo [21].

- **Compostaje rotativo:** Está formado por un tambor rotativo de 1-3 m de diámetro y de 3-42 m de longitud (Figura 9). En su interior se mezclan y trituran los restos a compostar y mediante el control de la temperatura, humedad y cantidad de aire se obtienen un compost en 3 días. Tras este proceso se debe llevar a cabo una fase de maduración del compost para poder utilizarlo. Puede utilizarse para todo tipo de residuos orgánicos, por lo que puede servir para residuos agrícolas. Existen diferentes tamaños en función de la capacidad, pudiendo llegar a tratar hasta 100.000 kg de residuos [23].



Figura 9. Compostador de vaso [23].

- **Compostera electromecánica:** Este sistema está formado por tambor de acero inoxidable que gira a bajas revoluciones. El material para compostar pasa por las tres fases de temperatura que se muestran en la Figura 10 a medida que los residuos avanzan hacia delante en el tambor. El tiempo necesario para obtener un compost higienizado se necesitan entre 30 y 35 días ya que el sistema de control de la temperatura acelera el proceso de compostaje y maduración [24].

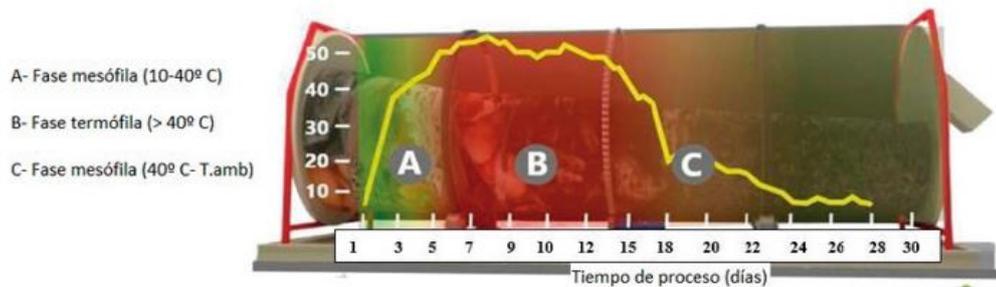


Figura 10. Esquema de temperaturas en el interior del compostador [24].

El llenado del tambor se debe realizar de forma manual diaria o semanalmente en función de los residuos a tratar. Las capacidades del tambor varían entre 5 y 1.000 t/año. La Figura 11 muestra un ejemplo de compostera electromecánica [24].



Figura 11. Compostera electromecánica [24].

- **Hot Rot System:** Consiste en un sistema cerrado, continuo, con agitación y ventilación, que se puede utilizar para todo tipo de residuos. La Figura 12 muestra un ejemplo de este sistema, que está formado por un recipiente que en su interior presenta un eje giratorio con dientes que favorecen la mezcla de los restos. Estos dientes además empujan el compost hacia la zona de descarga. Este compost se airea en puntos clave mediante sistemas de ventilación que no solo aportan aire, también favorece la entrada de aire fresco. Dependiendo del tipo de material a compostar y de la programación del eje de giro, el tiempo establecido de retención se encuentra entre 10 y 20 días, siendo necesaria una etapa de maduración en el exterior del compostador. Este tipo de equipos pueden construirse en hormigón o en acero inoxidable y los tamaños establecidos dependen de las toneladas de residuos que se generen en la industria. Si la cantidad de residuos aumenta, el sistema se puede modificar añadiendo una unidad más y aumentando así su longitud y capacidad. En general, para una generación de residuos de

entre 1,7 y 2,5 t/día las dimensiones establecidas son de 2,2 m de ancho, 2,3 m de alto y 12,8 m de largo [25].



Figura 12. Hot Rot System [25].

- **Earth Flow:** Consiste en un equipo denominado bahía formado por paredes de acero inoxidable cuya profundidad se encuentra entre 1,2 y 1,5 m. Mediante un tornillo sin fin vertical se mezclan los restos a compostar situados en el fondo moviéndose a lo largo de todo el recipiente (Figura 13). En este caso, el tiempo de compostaje varía entre 14 y 21 días en función del funcionamiento del tornillo sin fin, la longitud de la bahía y el tipo de material a compostar. En general, suelen taparse para evitar los efectos del clima sobre el compost formando invernaderos. Estas construcciones suelen tener entre 6 y 12 m de largo y 2,5 m de ancho con una capacidad máxima de 34 m<sup>3</sup>. Tras acabar la etapa termófila, el compost debe madurar fuera del Earth Flow [25].



Figura 13. Ejemplo del sistema Earth flow [25].

1.4.3.2 Sistemas abiertos: En este caso se sitúan los restos a compostar en pilas o hileras en el suelo. Dependiendo del espacio o de la maquinaria disponible hay diferentes alternativas:

- **Pila estática con aireación pasiva:** Consiste en formar una pila del material compostable y dejar que se descomponga y se airee por convección térmica de forma natural. El aumento de la temperatura debido a la descomposición genera gases calientes que ascienden y salen de la masa haciendo que el aire frío de fuera penetre en la pila. Para favorecer esta convección hay que mantener una porosidad suficiente y facilitar el aumento de la temperatura. Este método suele utilizarse para residuos agrícolas que tardan más tiempo en degradarse, con un tiempo de residencia de entre 6 meses y un año dependiendo los residuos a compostar. El tamaño de estas pilas puede variar siendo generalmente de entre 2 y 5 m de altura, con un ancho inferior al doble de la altura establecida. Estas pilas pueden hacerse mucho más grandes llegando a tener una altura de hasta 10 m, sin embargo, este tipo de pilas no son recomendables al aumentar el riesgo de incendio. En general, la altura se establece en función de la maquinaria disponible para su construcción y volteo.

Estas pilas pueden disponerse en contenedores más pequeños adyacentes para mezclar el contenido y facilitar la mezcla y la aireación (*Figura 14*). El volteo mediante retroexcavadoras se realiza cada mes o varias veces al año dependiendo de la velocidad de descomposición que se necesite. Aun así, se generan olores que suelen quedar retenidos en la capa superior de la pila de compostaje. Puede establecerse una biocubierta para favorecer la disminución de los olores con un grosor de hasta 30 cm formada por compost maduro o una cubierta de tela permeable a los gases cuyo objetivo es impedir la entrada de agua en la pila [26].



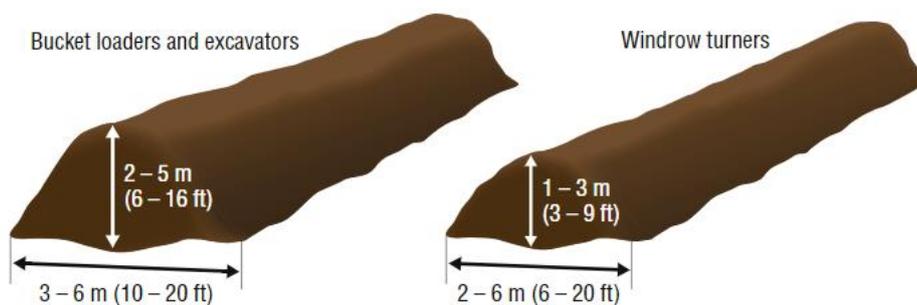
Figura 14. Contenedores de compostaje de aireación pasiva [26].

- **Compostaje en hileras:** Consiste en establecer hileras de material compostable que se voltean cada cierto tiempo y se sitúan paralelas a la dirección predominante del viento en la zona y paralelas a la pendiente. En este caso el proceso de compostaje dura 8 semanas si el material es fácilmente degradable o 16 semanas si tarda más en degradarse. La aireación se produce por convección como en el caso anterior. Sin

embargo, en este caso se realiza el volteo de forma más frecuente llegando a voltearse hasta 3 veces por semana mediante máquinas de volteo (*Figura 15*). El tamaño de estas hileras varía en función del espacio disponible y el tipo de material a compostar. Una pila demasiado grande aumenta las zonas anaeróbicas y los olores. Por el contrario, si son demasiado pequeñas no se alcanzan las temperaturas necesarias para evaporar el agua y eliminar los patógenos presentes. Por lo tanto, la altura varía de 1 a 4 m, mientras que la anchura varía entre 3 y 8 m de longitud. Estas hileras pueden construirse de forma triangular que suelen ser el doble de anchas que largas o trapezoidales cuyo tamaño depende de la maquinaria utilizada para el volteo (*Figura 16*) [26].



*Figura 15. Hileras de compostaje [26].*



*Figura 16. Hileras trapezoidales y triangulares [23].*

- **Pilas estáticas aireadas:** Este método de compostaje puede utilizarse tanto a pequeña escala como a escala mucho mayor. Es un sistema simple que se puede implementar en cualquier tipo de empresa debido a su versatilidad. Sin embargo, puede presentar problemas de control de la temperatura y la cantidad de oxígeno. Para favorecer la ventilación y disminuir la temperatura se utilizan ventiladores que eliminan parte de la humedad, el amoníaco y el CO<sub>2</sub>. Se aumenta la cantidad de aire suministrado cuando se generan mayores temperaturas y aumenta el consumo de oxígeno, pero se vuelve a disminuir cuando el consumo de oxígeno disminuye.

La *Figura 17* muestra el sistema de aireación utilizado para las pilas. Este sistema requiere la instalación de un ventilador, tuberías que suministran aire, sistema de distribución del aire para conectar tuberías con ventiladores, el “plenum” que se

utiliza para cubrir los laterales de las tuberías, controladores de la aireación y una capa exterior que cubre el compost [27].

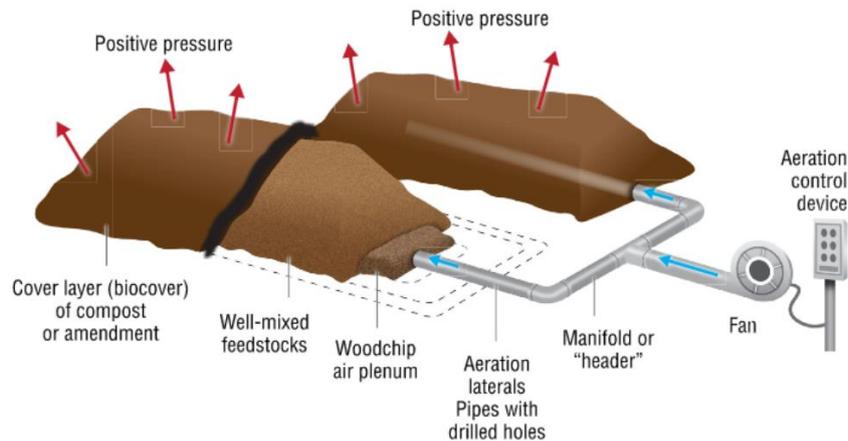


Figura 17. Pilas estáticas aireadas [27].

Las pilas pueden ser triangulares o trapezoidales con una pendiente de 45°. Dependiendo de cómo sea la sección transversal se establecerá una anchura de la pila, en el caso de los triangulares la anchura será el doble de la altura. En este caso si existe una longitud máxima debido al sistema de aireación, por lo que las pilas suelen ser de entre 20 y 25 m de largo. La altura habitual suele situarse entre 2 y 4 m (sin incluirse la cubierta) ya que a mayor altura se favorece la compactación y es más difícil canalizar el aire. En el caso de la anchura se establece en función del volumen de restos [27].

Este tipo de pilas pueden darse de forma extendida, es decir, se sitúan varias pilas o celdas seguidas constituyendo un único lecho continuo. Cada celda está formada por material que se rellena diferente pudiendo albergar restos de toda una semana. Las celdas más antiguas se separan de las que acaban de rellenarse mediante celdas vacías que se han vaciado después de que el compost alcanzase la madurez adecuada. Este tipo de zonas vacías evitan la mezcla de compost con diferente estado de maduración, evitando así el paso de patógenos a zonas desinfectadas. Las dimensiones se determinan de la misma forma que la pila individual y la aireación se establece en función del volumen de la pila y la fase de maduración del compostaje (Tabla 9) [27].

Tabla 9. Aireación en m<sup>3</sup>/h por m<sup>3</sup> de pila [26].

First 10 days (peak)	6.5 to 22 m <sup>3</sup> /h per cubic meter of pile volume (3 to 10 ft <sup>3</sup> /min per cubic yard)
10 to 20 days	3 to 6.5 m <sup>3</sup> /h per cubic meter of pile volume (1.5 to 3 ft <sup>3</sup> /min per cubic yard)
After 20 days	1 to 3 m <sup>3</sup> /h per cubic meter of pile volume (0.5 to 1.5 ft <sup>3</sup> /min per cubic yard)

### 1.5 Valorización de residuos hortofrutícolas mediante digestión anaerobia: sistemas a pequeña escala

La necesidad de obtener combustibles renovables, baratos y que no generen impactos ambientales obliga al aprovechamiento de los recursos disponibles para la obtención de energía. La digestión anaerobia destaca por generar biogás en ausencia de oxígeno y con presencia de humedad y materia orgánica, que puede aprovecharse [28]. Además, requiere menor cantidad de nutrientes para su funcionamiento que los procesos aerobios [29].

El biogás formado puede utilizarse como fuente de calor o de energía eléctrica si se utiliza un proceso de cogeneración, ya que está formado por entre un 54 y 70% v/v de metano, entre un 27 y 45% v/v de CO<sub>2</sub> y poca cantidad de compuestos de nitrógeno y sulfuro (*Tabla 10*) [30]. Puede utilizarse para la producción de biometano disminuyendo en un 80% las emisiones de gases de efecto invernadero [8].

*Tabla 10. Composición del biogás producido [30].*

Gas	Contenido (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	54 - 70
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	27 - 45
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0,5 - 3
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	1 - 10
Monóxido de carbono (CO)	0,10
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0,10
Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	0,15

El proceso se divide en cuatro fases (*Figura 18*) perfectamente diferenciadas donde en primer lugar, la materia orgánica formada por carbohidratos, lípidos y proteínas se transforma en moléculas más pequeñas como azúcares, ácidos grasos y aminoácidos mediante un proceso de hidrólisis llevado a cabo por bacterias que usan enzimas extracelulares para romper las moléculas. Esta fase se ve influenciada por la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, el residuo utilizado, el tamaño de partícula, la concentración de amoníaco y el pH [30]. A continuación, una etapa de acidogénesis convierte los monómeros en ácidos grasos volátiles, entre los que se encuentran los ácidos butírico y valérico. Las bacterias de tipo *Lactobacillus* son las encargadas de realizar la acidogénesis. Durante la acetogénesis los ácidos grasos volátiles producidos pueden aprovecharse para formar CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y acetato, además este CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> puede ser usado por las bacterias homoacetogénicas para formar más acetato. En la última etapa o metanogénesis existen dos tipos de bacterias, por un lado, se encuentran las bacterias acetoclásticas que convierten el acetato en metano y por otro lado los organismos hidrogenotróficos transforman el H<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> para obtener un pH neutro [29]. Las diferencias entre las bacterias que forman parte del proceso de digestión anaerobia se deben tener en cuenta para establecer los diferentes parámetros de operación y se muestran en la *Tabla 11*.

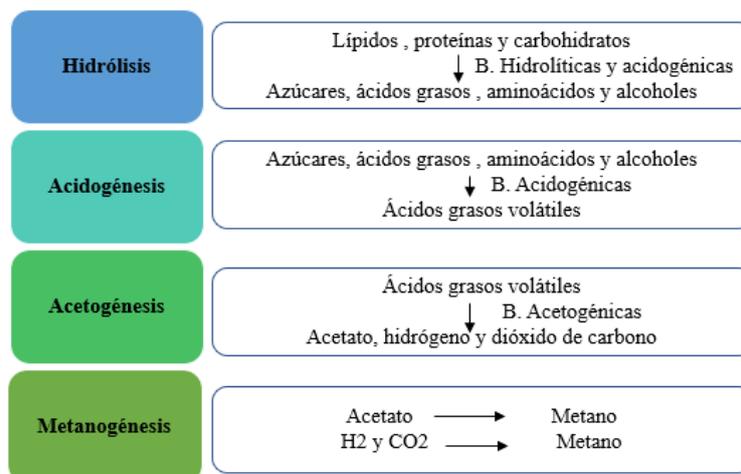


Figura 18. Esquema de las fases de la digestión anaerobia (Adaptado de [31]).

Tabla 11. Características de las bacterias que intervienen en la digestión anaerobia [32].

Fase acidogénica	Fase metanogénica
Bacterias facultativas	Bacterias anaeróbicas estrictas
Reproducción muy rápida	Reproducción lenta
Poco sensibles a los cambios de acidez y temperatura	Muy sensibles a los cambios de acidez y temperatura
Principales productos finales: metabolitos, ácidos orgánicos	Principales productos finales: metano y dióxido de carbono

### 1.5.1 Condiciones de operación

Para llevar a cabo la digestión anaerobia es necesario mantener unas condiciones óptimas que permitan la coexistencia de todas las bacterias implicadas en el proceso. Los principales parámetros para controlar influirán en el rendimiento de producción de metano significativamente. Por lo tanto, el pH del reactor debe encontrarse entre 6,5 y 7,5 para que todas las bacterias puedan desarrollarse, la temperatura adecuada se encuentra entre 20 y 45 ° C siendo el óptimo de operación entre 33 y 40 ° C y la relación C/N debe situarse entre 20:1 y 25:1.

En cuanto la cantidad de alimento suministrado o carga orgánica debe ser suficiente para mantener la actividad microbiana. Para favorecer el contacto del alimento con las bacterias se debe mantener una agitación que mejore la mezcla [29].

### 1.5.2 Alternativas de digestión anaerobia

La clasificación de las plantas de digestión anaerobia suele determinarse a partir del tipo de material de entrada, la cantidad de biogás producido o la cantidad de electricidad y calor generado [33]. La mayor parte de los sistemas de digestión anaerobia operan con porcentajes de sólidos totales menores al 10% y con porcentajes de sólidos volátiles mayores a 60%.

Los tipos de digestión anaerobia a utilizar en una pequeña planta son los siguientes:

1.5.2.1 Digestión anaerobia a microescala: Suele utilizarse cuando la cantidad de residuos a valorizar es pequeña. La producción de energía eléctrica suele ser menor de 15 kW y el calor suele aprovecharse para calentar otras instalaciones [33]. Este tipo de sistemas se utilizan cuando solo se aporta un tipo determinado de biomasa. A continuación, se describen los digestores anaerobios a microescala que pueden utilizarse para una empresa de pequeño tamaño.

- **Microdigestor:** Consiste en separar las diferentes fases de la digestión anaerobia para disminuir el tiempo de retención y el espacio. Por ejemplo, una compañía de producción de achicoria utiliza un microdigestor para tratar 10 t/día de residuos formados por hojas y raíces, previamente a la entrada en el digestor la materia orgánica se tritura para favorecer la digestión anaerobia. Este equipo que funciona de forma continua (*Figura 19*) está formado por un tanque de 400 m<sup>3</sup> que opera con un pH de 6 donde se generan los ácidos grasos necesarios durante la digestión anaerobia. A continuación, se sitúa un reactor HYFAD (High Yield Flushing Anaerobic Digester) donde se realiza la metanización y se convierten los ácidos grasos en biogás a pH igual a 7. El HYFAD está formado por dos reactores con una capacidad de 20 m<sup>3</sup> cada uno que funcionan a alta presión para mejorar la producción de biogás, donde los microorganismos se encuentran en un soporte formando una biopelícula. Por último, se sitúa un tanque de 400 m<sup>3</sup> donde se recoge el biogás generado a partir del digestato. Los tiempos de retención hidráulicos son de 10 días para el primer tanque, 18 horas para el HYFAD y 20 días para el último tanque. Mediante este proceso se generan 500 MWh/año de electricidad, donde 145 MWh/año se consumen en el propio funcionamiento del equipo [34].

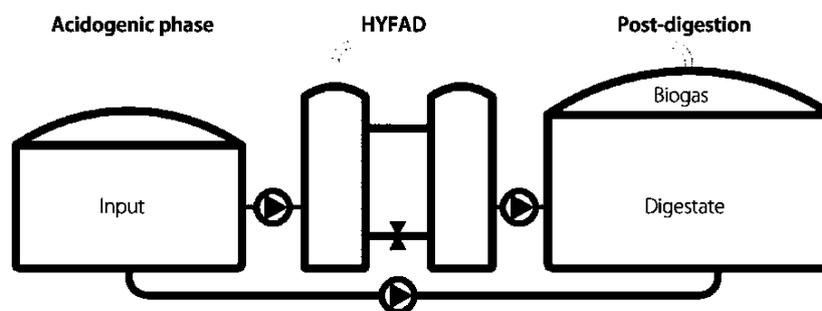


Figura 19. Ejemplo de digestor de microescala [34].

- **Arkometha:** Consiste en un conjunto de biorreactores situados en serie y que funcionan de forma continua que convierten en biogás residuos con alto contenido en sólidos orgánicos ( $ST > 10\%$ ). Es necesario añadir agua para conseguir un porcentaje de sólidos totales inicial de 12% (*Figura 20*). El diseño se basa en la separación de la etapa hidrolítica en dos reactores y de la etapa metanogénica en dos o en tres reactores de 1 L cada uno. Las temperaturas de los reactores hidrolíticos son de 67°C, mientras que en el resto las temperaturas se encuentran entre 37 y 55 °C [35]. El tiempo de retención total es de 19 días, pudiendo variar en función de la capacidad de los tanques. La fase hidrolítica puede tener una duración de 2 días, mientras que la metanogénica puede variar entre 5 y 10 días. Este sistema se ha utilizado con estiércol y ensilaje de hierba por lo que pueden usarse para restos vegetales. En cuanto a la formación de metano se estima una producción de 160 mL/ kg d [35].

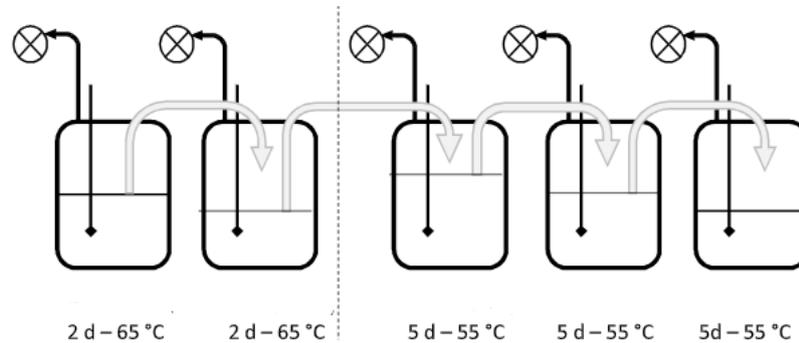


Figura 20. Digestor tipo Arkometha [35].

1.5.2.2 Digestión anaerobia a pequeña escala: Este tipo de digestores suele usarse en entornos agrícolas con mayor cantidad de residuos disponibles. En este caso para una superficie de cultivo de maíz de 16 ha se producirán entre 50 y 70 kW. Esta potencia varía en función de la cantidad de residuos y el tipo de cultivo. Los digestores anaerobios varían en función del tipo de residuo a valorizar y el objetivo de la valorización, como puede ser la producción de energía eléctrica, reducción del contenido en materia orgánica o reducción del contenido bacteriano [27]. Los sistemas disponibles a pequeña escala, que pueden utilizarse para residuos agrícolas, se pueden clasificar en sistemas continuos y discontinuos (Figura 21)

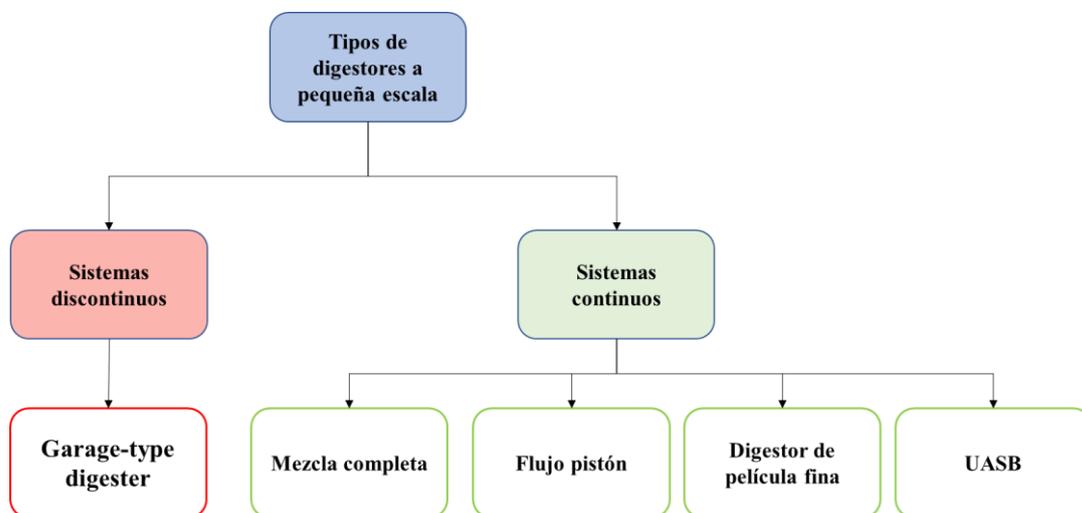


Figura 21. Esquema de la clasificación de los tipos de digestores a pequeña escala (adaptado de [36]).

1.5.2.3 Sistemas continuos: En este caso para maximizar la producción de biogás se utiliza un digestor anaerobio con un tiempo de residencia comprendido entre 10 y 30 días. Pueden operar con temperaturas de entre 25 y 40°C o entre 50 y 60°C lo que implica el aporte de calor de forma externa para mantener las temperaturas a lo largo del proceso [33]. Los digestores continuos son los siguientes:

- **Digestor de mezcla completa:** Denominado reactor de tanque de agitación continua (CSRT). Consiste en un tanque de sección circular de hormigón o acero que se alimenta de forma continua (*Figura 22*). Este sistema puede aceptar cualquier tipo de residuo para convertirlo en biogás con concentraciones de sólidos totales entre 6 y 10 % [37]. Sin embargo, es necesario aportar gran cantidad de energía para mantener la temperatura necesaria durante el proceso. El tiempo de retención necesario es de 20 – 30 días [33].

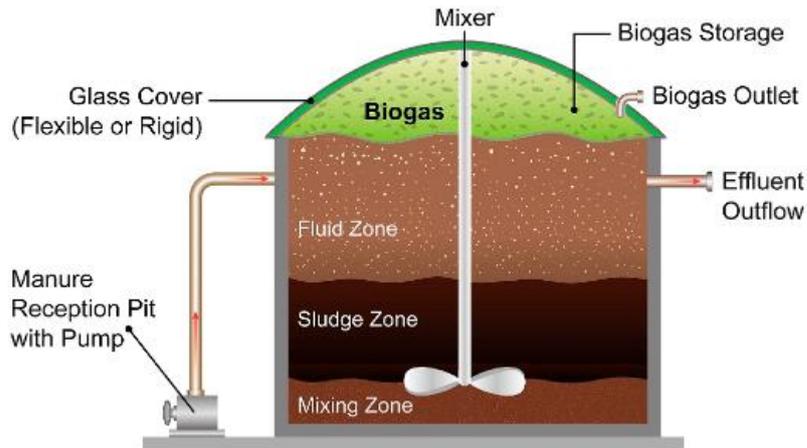


Figura 22. Reactor de mezcla completa [33].

- **Digestor con flujo pistón:** Tanque horizontal donde el sustrato no se mezcla y avanza hacia la zona de descarga convertido en digestato. La *figura 23* muestra un ejemplo de reactor de flujo pistón. El biogás se recupera por la parte superior mediante un colector y la temperatura se mantiene mediante el calentamiento de las paredes del reactor [33]. Este tipo de digestor trabaja con residuos con un porcentaje de sólidos totales mayor al 10% y tiempos de residencia de entre 25 y 30 días [37].

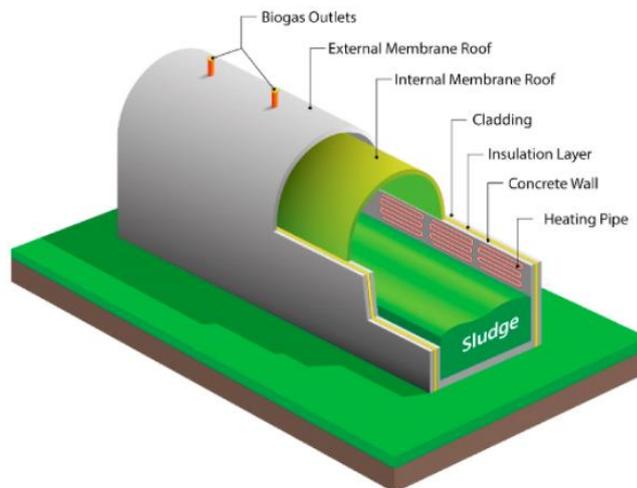
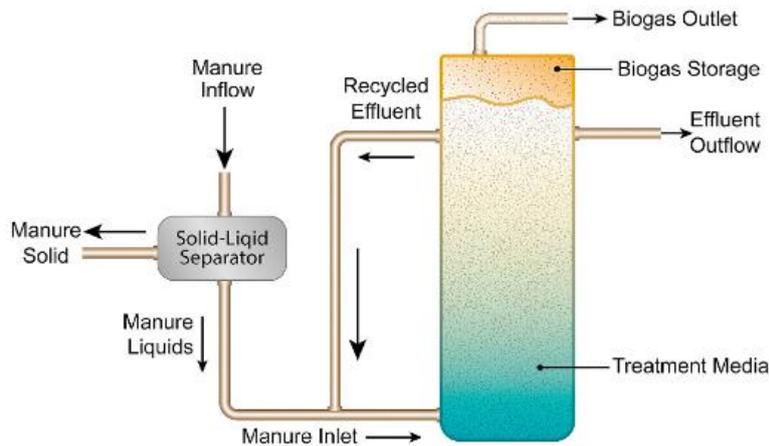


Figura 23. Digestor de flujo pistón [33].

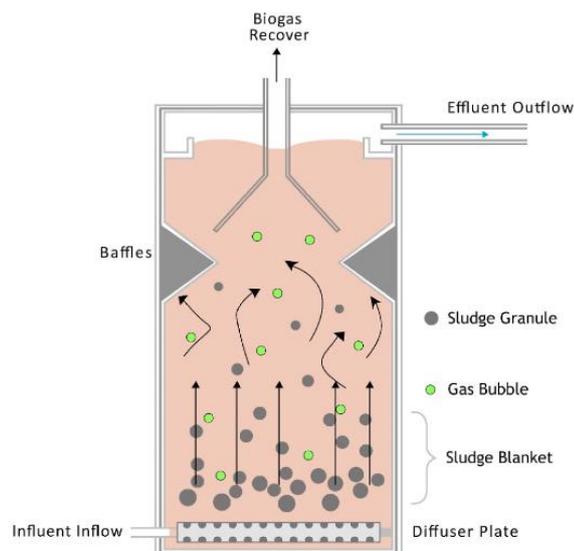
- **Digestor de película fina:** En este tipo de digestor se mantiene a los microorganismos inmovilizados en el interior del reactor sobre una biopelícula. Esto disminuye el tiempo

de retención hidráulico (2 a 6 días) y mantiene el rendimiento de producción de biogás. Este tipo de reactor requiere eliminar gran parte de los sólidos presentes previamente a su introducción en el sistema para obtener un influente con un porcentaje de sólido de entre 1- 5 % [33]. La *Figura 24* muestra la configuración típica de un reactor de película fina.



*Figura 24. Digestor de película fina [33].*

- **Digestor UASB:** Este tipo de digestor presenta un flujo constante y ascendente de líquido para mantener los microorganismos en suspensión. Este método favorece la eliminación de partículas de pequeño tamaño y la retención de partículas más grandes. Los microorganismos se agregan alrededor de estas partículas formando biopelículas. Este tipo de reactor opera con residuos con menos del 3% en sólidos totales [33]. La *Figura 25* muestra un esquema típico de un reactor UASB, donde el influente se alimenta por la zona inferior y el efluente se recoge por la zona superior. Las burbujas de biogás ascienden y se recogen en la zona superior.



*Figura 25. Digestor de medio suspendido [33].*

- **Digestor tubular inclinado (ITD):** Consiste en un digestor tubular de 1000 mm de largo, 100 mm de diámetro interno y una inclinación de  $20^\circ$  (Figura 26). Este digestor se utiliza para la codigestión de restos de vegetales y de lodos activos procedentes de la digestión anaerobia. El tiempo de retención hidráulico es de 13 días, teniendo la fase acidogénica una duración de 3 días y la metanogénica una duración de 10 días. Genera una producción de biogás de  $0,37 \text{ m}^3/\text{kg SV}$  y la tasa de carga es de  $5,7 \text{ kg SV}/\text{m}^3 \text{ día}$  [38].

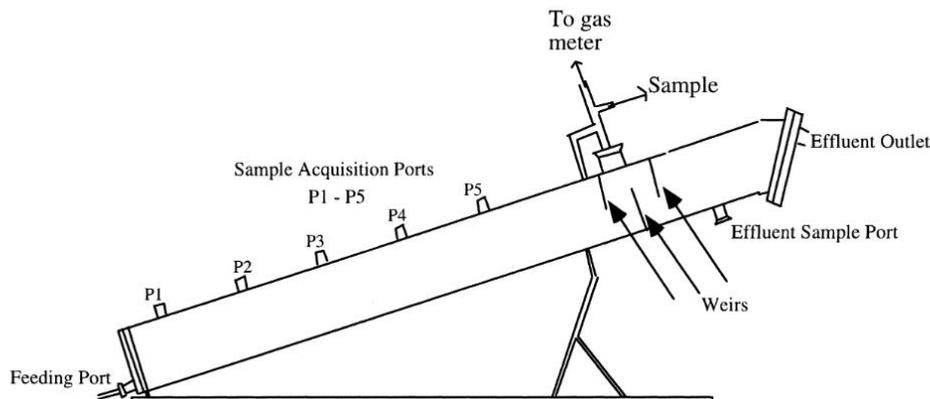


Figura 26. Digestor tipo ITD [38].

1.5.2.4 Sistemas discontinuos: Presentan mayor flexibilidad en las operaciones, puede utilizarse para cualquier tipo de sustrato, se produce la sedimentación en el propio reactor y presentan un tiempo de retención mayor. Los ejemplos de digestores discontinuo se muestran a continuación:

- **Digestor tipo garaje:** Es un digestor que opera en discontinuo donde se lleva a cabo una fermentación seca, es decir, sin aporte de agua. La Figura 27 muestra un ejemplo de este tipo de digestor. Como puede observarse consiste en un tanque con un sistema de percolación continuo que aporta un líquido formado por restos de microorganismos y productos de la digestión anaerobia cuyo objetivo es reducir la puesta en marcha del digestor. Este sistema permite agregar y sacar materia orgánica por tandas que junto con el sistema de percolación disminuye el tiempo de residencia. La fermentación dura entre 4 y 5 semanas donde se mantiene una temperatura mesófila o termófila mediante un sistema que calienta la parte inferior y superior del digestor. Suele utilizarse para residuos con altas cargas de sólidos totales con  $ST > 15\%$  y es adecuado para residuos con gran cantidad de impurezas [33].

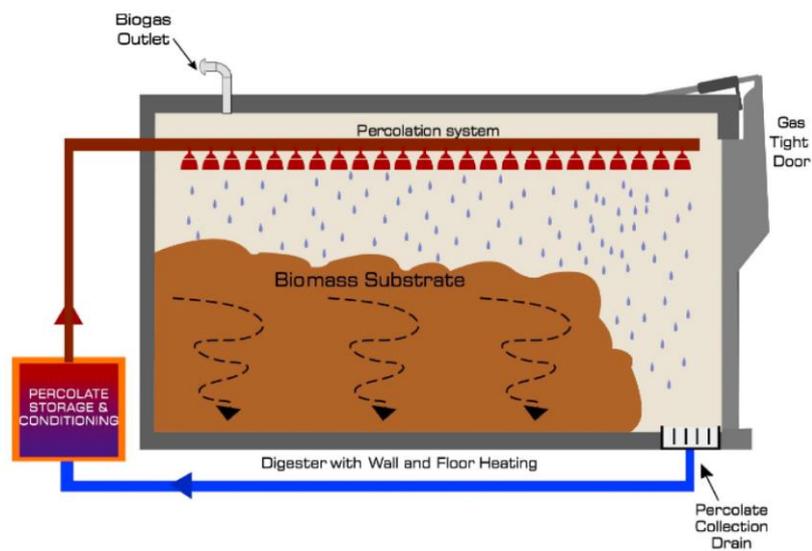


Figura 27. Digestor tipo garaje [33].

## 2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es establecer una solución viable para la valorización de los residuos hortofrutícolas generados en Valladolid. Para alcanzar el objetivo mencionado se establecen los siguientes objetivos parciales:

- Identificar y analizar las alternativas de compostaje y digestión anaerobia que pueden aplicarse en la valorización de residuos hortofrutícolas, teniendo en cuenta los subproductos que se pueden obtener de ambos métodos, como son los fertilizantes y el biogás y las tecnologías aplicadas.
- Seleccionar la alternativa de valorización que se adapte mejor a las condiciones de la zona.
- Diseñar una planta de tratamiento, seleccionando su ubicación y los equipos necesarios para su correcto funcionamiento.
- Realizar una evaluación económica y ambiental de la planta para determinar su viabilidad económica y para prevenir los posibles impactos ambientales de la instalación.

### 3. Selección de alternativas

Para poder seleccionar la mejor alternativa de valorización de residuos vegetales para una planta de pequeño tamaño se comparan entre sí los métodos establecidos de compostaje y de digestión anaerobia. Se tienen en cuenta las ventajas, desventajas y aplicaciones de cada método, con el fin de escoger la mejor opción en función de las características de los residuos generados en la industria.

#### 3.1 Compostaje

La *tabla 12* muestra las diferencias entre los métodos de compostaje que pueden utilizarse. En este caso al poder aplicarse todas las alternativas a cualquier tipo de residuo orgánico, la selección de la mejor alternativa se realiza en función del espacio disponible, los costes asociados a su implementación y el tiempo de compostaje. En el caso de los sistemas cerrados descritos la mejor opción es el compostador rotativo al ocupar poco espacio y tener un tiempo de compostaje muy inferior al resto de equipos. Sin embargo, si se requiere una opción más económica podría optarse por utilizar un sistema abierto en hileras ya que se trata del sistema más sencillo, aunque genera malos olores y ocupa mayor espacio.

Por lo tanto, la opción seleccionada es el compostador rotativo horizontal ya que no solo consume menor energía, sino que no genera olores y su tiempo de compostaje es bajo, combinado con una maduración del compostaje en pila.

*Tabla 12. Características de los sistemas de compostaje (Fuente: elaboración propia).*

Tipos		Tiempo de compostaje	Espacio que ocupa	Producción de olores	Capacidad	Otras características
Sistemas cerrados	Compostador industrial	24 h + etapa de maduración	5800 × 1850 × 2330 mm de ancho, largo y alto	No	1.800 t/año	No necesita aporte de agua
	Compostador rotativo	3 días	3 m diámetro x 18 m longitud	No	45.805	Requiere maduración externa
	Compostadora electromecánica	30 - 35 días	En función de la capacidad	No	5 - 1.000 t/año	No requiere maduración externa
	Hot Rot Systems	10 - 20 días + etapa de maduración	2,2 x 12,8 x 2,3 m de ancho, largo y alto	No	1,7 - 2,5 t/día	Puede ampliarse añadiendo un nuevo módulo
	Earth Flow	14 -21 días + etapa de maduración	2,5 x 6 - 12 x 1,2 - 1,5 m de ancho, largo y alto	Sí	34 m <sup>3</sup>	Todo tipo de residuos
Sistemas abiertos	Pilas estáticas con aireación pasiva	6 meses - 1 año	2 - 5 m alto y ancho inferior al doble de la altura	Sí	En función del tamaño establecido	Necesidad de maquinaria para construcción y volteo
	Hileras	8 - 16 semanas	1- 4 m de alto y 3 - 8 m de ancho	Sí	En función del tamaño establecido	Necesidad de maquinaria para construcción y volteo
	Pilas estáticas aireadas	Más de 20 días	2 - 4 m de alto, anchura el doble de la altura y 20 - 25 m de largo	Sí	En función del tamaño establecido	Sistema de aireación

#### 3.2 Digestión anaerobia

En la digestión anaerobia la elección del sistema se determina en función de los costes, la producción de biogás y el espacio disponible. La *tabla 13* muestra las diferencias en las opciones consideradas para una planta de pequeño tamaño. La mejor opción en cuanto espacio sería el digestor a microescala de tipo Arkomentha ya que es fácil de implementar y puede adaptarse a la producción de residuos. Sin embargo, también se podría optar por un sistema continuo con un único reactor como es el caso del digestor de mezcla completa. Podría considerarse el sistema discontinuo como el digestor tipo garaje, si la generación de residuos

no es muy elevada y se puede utilizar la fermentación lenta sin riesgo a que se acumulen grandes cantidades de residuos sin tratar.

Por lo tanto, el sistema de digestión anaerobia que parece más adecuado para una planta de pequeño tamaño es un digestor que funcione en continuo y que pueda utilizarse para los residuos generados en la zona como el digestor de mezcla completa.

Tabla 13. Características de los sistemas de digestión anaerobia (Elaboración: propia)

Tipos de digestores		Tiempo de residencia	Capacidad	Producción de metano/ Producción electricidad	Concentración de sólidos totales	Aplicaciones	
Digstores a microescala	Microdigestores	31 días	Dos reactores de 400 m <sup>3</sup> y dos reactores de 20 m <sup>3</sup>	500 MWh/año	>10 %	Puede utilizarse en residuos agrícolas	
	Arkometha	19 días	1 L de capacidad por reactor	160 mL/ kg d	12%	Residuos agrícolas	
Digstores a pequeña escala	Sistemas continuos	Digestor de mezcla completa	20 - 30 días	En función de la alimentación	Varía en función del tamaño y la alimentación	3 - 10 %	Puede utilizarse para restos de alimentos
		Digestor con flujo pistón	25 - 30 días	En función de la alimentación	Varía en función del tamaño y la alimentación	11 - 14 %	Todo tipo de reiduos
		Digestor de película fina	2 - 6 días	En función de la alimentación	Varía en función del tamaño y la alimentación	2 - 4 %	Necesario realizar una codigestión con purines
		UASB	3 - 5 días	En función de la alimentación	Varía en función del tamaño y la alimentación	< 3 %	Se debe utilizar una codigestión con purines
		ITD	13 días	5 m <sup>3</sup> para la fase acidogénica y 12,7 m <sup>3</sup> para la metanogénica	0,37 m <sup>3</sup> /kg SV	10%	Codigestión de restos vegetales y lodos activos
	Sistemas discontinuos	Garage-type digester	< 14 días	En función de la alimentación	Varía en función del tamaño y la alimentación	15 -50 %	Puede utilizarse con cualquier tipo de residuo

Tras analizar las alternativas presentadas de compostaje y digestión anaerobia se opta por seleccionar el método de compostaje ya que es más sencillo, el co-sustrato que puede utilizarse para el co-compostaje se puede obtener con facilidad y no es necesario aportar un gran volumen de agua.

## 4. Parámetros de diseño del compostaje

### 4.1 Ubicación de la planta de compostaje

Los principales proveedores de patatas y zanahoria se encuentran en Valladolid, Laguna de Duero, Boecillo, Barcial de la Loma y Medina del Campo [39]. La zona elegida para situar la planta de tratamiento es Laguna de Duero ya que esta zona se caracteriza por presentar gran cantidad de cultivos de regadío y por cultivar tanto patata como zanahoria [40].

La *Figura 28* muestra los cultivos presentes en la zona de Laguna de Duero. Como puede verse la mayoría son cultivos de regadío donde se incluirían las patatas y la zanahoria y los cultivos de secano formado por cereales [41].



*Figura 28. Cultivos de Laguna de Duero [41].*

La planta de compostaje se situará en el polígono 9 en la parcela 114 cuya superficie total según la sede del catastro es de 17.512 m<sup>2</sup> [42]. Se selecciona esta parcela porque está situada cerca de los cultivos que generarán los residuos de patatas y zanahoria y de los cultivos de cereal. Además, presenta un camino de acceso que recorre la parcela por la parte norte lo que mejorará la recogida de lixiviados y compost final (*Figura 29*).



*Figura 29. Ubicación de la parcela seleccionada [42].*

## 4.2 Producción y características de los residuos

La producción estimada de zanahoria y patata en Valladolid es de 354.075 t/año. La *Tabla 14* muestra la cantidad de residuos de patata y zanahoria derivados de la producción. En total se generan 10.811 t/año de residuos en la provincia de Valladolid.

*Tabla 14. Estimación de la producción de residuos de patata y zanahoria en Valladolid (Adaptado de [7])*

Categoría	Tipo de residuo	Coefficiente directo (t residuo /t producida)	t/año producidas	t/año producidas total	t/año residuos	t/año residuos	t/año residuos total
Zanahoria	Excedentes	0,05	94425	354075	4721	7176	10811
	No conformes	0,01			944		
	Subproductos de la transformación	0,016			1511		
Patata	No conformes	0,01	259650		2597	3635	
	Subproductos de la transformación	0,004			1038,6		

La temporada de producción de zanahoria en España abarca todo el año, pero en el caso de la patata la temporada es de abril a octubre, lo que obliga a los principales proveedores de patata a importar productos[43][44]. La planta de tratamiento debe funcionar durante todo el año, por lo que, si se trabaja durante 8.000 horas/año, el flujo de residuos será de 32,4 t/día, siendo 21,5 t/día de zanahoria y 10,9 t/día de patata [43].

Para garantizar que hay suficiente material para compostar se selecciona una planta que trate menos de 5.000 t/año de residuos y que se encuentre en una zona cercana a la principal fuente de dichos desechos. Por lo tanto, en la planta se tratarán 30 % de los residuos totales generados, obteniéndose una entrada de residuos de 3.243 t/año (*Tabla 15*).

*Tabla 15. Cantidad de residuos a tratar en la planta de compostaje (Fuente: elaboración propia).*

Residuo	cantidad (t/año)	cantidad (t/día)
Zanahoria	2.153	6,45
Patata	1.091	3,27
<b>Total</b>	<b>3.243</b>	<b>9,72</b>

Muchos de los residuos para compostar no cumplen habitualmente con las características necesarias para realizar un proceso de compostaje correcto, por lo que es necesario mezclar sustratos para obtener una porosidad, relación C/N, humedad y densidad aparente correctas [40]. En el caso de los restos de patata y zanahoria es necesario mejorar las condiciones de humedad y C/N de los residuos a tratar mediante un co-compostaje para obtener una relación C/N adecuada de 25/1 y un porcentaje de humedad de entre 40 y 60%. La relación C/N y el porcentaje de humedad de los restos de patata y zanahoria se muestran en la *Tabla 16*.

Tabla 16. Características de los restos de patata y zanahoria (Fuente: elaboración propia).

Restos	Humedad (%)	C/N	Nitrógeno MS (%)	Referencias
Zanahoria	75	13/1	1,5 - 2,5	[45][46]
Patata	75,5	15/1	0,4	[47][48]

### 4.3 Sustratos usados para el compostaje

El co-compostaje es un proceso aerobio que mejora las características del fertilizante final ya que aprovecha el carbono presente en los residuos que se añaden [49].

El Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes recoge en su Anexo IV la lista de residuos orgánicos biodegradables que pueden utilizarse como estructurante para el compostaje. Entre ellos se encuentran los residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca, tejidos animales y deyecciones de animales y estiércol [50]. Las alternativas de co-compostaje para restos de cultivos suelen ser con estiércol, purines y lodos de depuradora, pero también puede utilizarse restos vegetales de todo tipo (Tabla 17).

Tabla 17. Ejemplos de co-compostaje de residuos vegetales (Fuente: elaboración propia).

Residuos a compostar	Co-sustrato	Referencia
Restos vegetales	Digerido anaerobio ganadero	[51]
Restos de poda	Estiércol vacuno	[51]
Restos agrícolas	Lodos de depuradora	[52]
Restos de hortalizas	Restos de podas	[53]

Para elegir el co-sustrato adecuado para el compostaje de los residuos de patata y zanahoria es necesario saber qué sustratos hay disponibles en la zona. En el caso de optar por un sustrato de origen animal se considerará aquellos que puedan garantizar el aporte de la cantidad necesaria. La Tabla 18 muestra el número de cabezas de ganado presentes en Castilla y León y en Valladolid en el año 2020. La opción de utilizar estiércol o purines es adecuada ya que las cabezas de ganado producirán sustrato suficiente para el compostaje. El más abundante en la zona de Valladolid es el ganado porcino y el ovino, pudiendo también optar por estiércol de vacuno [54].

Tabla 18. Número de animales en Valladolid y en Castilla y León en 2020 (Adaptado de [54])

Especie	Número de animales	
	Valladolid	Castilla y León
Bovino	58.229	1.475.316
Ovino	280.879	2.501.976
Caprino	5.182	148.901
Porcino	413.607	4.400.542

Si el sustrato es de tipo vegetal pueden utilizarse paja de cereal y los restos de la cosecha presentes en la zona. Para utilizar este sustrato es necesario saber que los cereales pueden ser de invierno o de primavera. Los cereales de invierno se cosechan en verano, como es el caso de la cebada, avena, centeno, trigo y triticale. Sin embargo, los cereales de primavera suelen cosecharse a finales de verano [55].

La *Tabla 19* muestra la cantidad de paja que se generó en Valladolid en 2020. La mayoría de la producción es de cebada, trigo y maíz, por lo que podría utilizarse la paja de estos tres cereales al generar cantidad suficiente de maíz para el compostaje.

Tabla 19. Cantidad de cereales producida en t/año de paja en Valladolid en 2020 (Adaptado de [2]).

Tipo de cereal		Paja producida (t/año)
Cereales de invierno	Cebada	357.698
	Avena	3.103
	Centeno	6.500
	Trigo	157.919
	Triticale	4.490
	<b>Total</b>	529.710
Cereales de primavera	Maíz	66.032
	Sorgo	272
	Mijo	464
	<b>Total</b>	66.768

La caracterización de los sustratos considerados para el ajuste de la relación C/N y porcentaje de humedad se muestran en la *Tabla 20*. Para el compostaje se elige el residuo que pueda obtenerse más fácilmente en la zona, como es caso de la paja de cereal al haber cultivos de secano en las mismas zonas de producción de zanahoria y patata. Además, la paja de cereal es la que presenta menor porcentaje de humedad, no genera olores y su almacenamiento es mucho más sencillo.

Tabla 20. Características de los residuos que pueden utilizarse para el co-compostaje (Fuente: elaboración propia).

Residuo	Humedad (%)	C/N	Nitrógeno MS (%)	Referencias
Estiércol ovino	38,5	14,3	0,83	[45][56]
Estiércol vacuno	68	25/1	0,34	[45][57][48]
Paja de cereales	8,3	127/1	0,5 - 1	[58][59][60]
Purines	92,1	8,9	4,28	[61]

#### 4.4 Capacidad de tratamiento de la planta

La capacidad de una planta de compostaje puede variar mucho en función del tipo de residuo y la producción en la zona, por lo que pueden encontrarse plantas de menos de 5.000 t/año y plantas de hasta 80.000 t/año. La *Tabla 21* muestra los residuos y capacidades de diferentes plantas de compostaje en Castilla y León cuyos datos han sido obtenidos de sus respectivas declaraciones de impacto ambiental.

Tabla 21. Ejemplos de plantas de compostaje en Castilla y León (Fuente: elaboración propia).

Ubicación	Tipo de residuo	Capacidad	Referencia
Dueñas (Palencia)	Residuos orgánicos no peligrosos	12.000 t/año residuos orgánicos + 5.890 t/año estructurante	[62]
Herrera de Pisuerga (Palencia)	Restos de poda forestal y jardinería	2.500 t durante 6 meses	[63]
La Parrilla (Valladolid)	Estiércol y otras materias orgánicas	7.150 t/año de residuos	[64]
Santas Martas (León)	Residuos agrícolas, ganaderos y urbanos	82.000 t/año de residuos	[65]

Para determinar la capacidad de tratamiento total de la planta de compostaje es necesario calcular la cantidad de paja de cereal a añadir a la mezcla de residuos vegetales en

base húmeda. El cálculo de la cantidad de paja de cereal por cada kg de restos vegetales se realiza mediante balances de nitrógeno y de carbono para la zanahoria, la patata y la paja de cereal con el fin de obtener una relación C/N de 25/1. Para obtener esta relación se establece una base de cálculo de 1kg para la zanahoria y para la patata en base seca, ya que se compostarán los residuos por separado para facilitar la mezcla de co-sustrato con los residuos.

### Balances de Carbono:

$$\text{Zanahoria: } 1 \text{ kg zanahoria} * \frac{2 \text{ kg N}}{100 \text{ kg masa seca}} * \frac{13 \text{ kg Carbono}}{1 \text{ kg de nitrógeno}} = 0,26 \frac{\text{kg carbono}}{\text{kg zanahoria}}$$

$$\text{Patata: } 1 \text{ kg patata} * \frac{0,4 \text{ kg N}}{100 \text{ kg masa seca}} * \frac{15 \text{ kg carbono}}{1 \text{ kg nitrógeno}} = 0,06 \frac{\text{kg carbono}}{\text{kg patata}}$$

$$\text{Paja de cereal: } X \text{ kg paja de cereal} * \frac{0,75 \text{ kg Nitrógeno}}{100 \text{ kg masa seca}} * \frac{127 \text{ kg Carbono}}{1 \text{ kg Nitrógeno}} = 0,95 X \frac{\text{kg carbono}}{\text{kg paja}}$$

$$\text{Carbono total para zanahoria: } 0,26 + 0,95 X$$

$$\text{Carbono total para patata: } 0,06 + 0,95 X$$

### Balances de nitrógeno:

$$\text{Zanahoria: } 1 \text{ kg zanahoria} * \frac{2 \text{ kg N}}{100 \text{ kg masa seca}} = 0,02 \frac{\text{kg nitrógeno}}{\text{kg zanahoria}}$$

$$\text{Patata: } 1 \text{ kg patata} * \frac{0,4 \text{ kg N}}{100 \text{ kg masa seca}} = 4 * 10^{-3} \frac{\text{kg nitrógeno}}{\text{kg patata}}$$

$$\text{Paja de cereal: } X \text{ kg paja de cereal} * \frac{0,75 \text{ kg Nitrógeno}}{100 \text{ kg masa seca}} = 7,5 * 10^{-3} X \frac{\text{kg nitrógeno}}{\text{kg paja}}$$

$$\text{Nitrógeno total para zanahoria: } 0,02 + 7,5 * 10^{-3} X$$

$$\text{Nitrógeno total para patata: } 4 * 10^{-3} + 7,5 * 10^{-3} X$$

$$\frac{C}{N} \text{ zanahoria} = 30 = \frac{0,26 + 0,95 X}{0,02 + 7,5 * 10^{-3} X} \rightarrow X = 0,47 \text{ kg paja / kg de zanahoria.}$$

$$\frac{C}{N} \text{ patata} = 30 = \frac{0,06 + 0,95 X}{4 * 10^{-3} + 7,5 * 10^{-3} X} \rightarrow X = 0,08 \text{ kg paja / kg de zanahoria.}$$

Tras calcular la cantidad de paja por cada kg de zanahoria y de patata se obtiene la cantidad de paja en base seca a alimentar por día:

$$6.450 \text{ kg/día de zanahoria BH} * \frac{25 \text{ kg masa seca}}{100 \text{ kg de zanahoria}} * \frac{0,47 \text{ kg paja}}{1 \text{ kg zanahoria}} = 757,8 \text{ kg paja /día.}$$

$$3.270 \text{ kg/día de patata BH} * \frac{24,5 \text{ kg masa seca}}{100 \text{ kg patata}} * \frac{0,08 \text{ kg paja}}{1 \text{ kg patata}} = 64,09 \text{ kg paja/día.}$$

**Paja de cereal seca total:** 821,9 kg paja de cereal/día en base seca.

Paja de cereal total:  $821,9 \frac{\text{kg paja MS}}{\text{día}} * \frac{100 \text{ kg paja MT}}{91,7 \text{ kg paja MS}} = 896,29 \text{ kg paja/día en base húmeda.}$

Para saber la cantidad de pacas de paja al día necesarias se seleccionan pacas rectangulares gigantes de 90 x 100 x 210 cm con un peso de 200 kg [66]. Las pacas necesarias son 5 pacas/día.

$$896,29 \frac{\text{kg paja}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ paca}}{200 \text{ kg paja}} = 4,48 \approx 5 \text{ pacas/día}$$

Los datos de entrada a la planta de compostaje se muestran en la *Tabla 22*. En total la planta de compostaje tratará 10.616 kg/día de residuos hortofrutícolas y paja de cereal.

*Tabla 22. Cantidad de residuos y sustrato para el compostaje (Fuente: elaboración propia).*

Residuo	Base seca (kg/día)	Base húmeda (kg/día)
Zanahoria	1.612,50	6.450
Patata	801,15	3.270
Paja de cereal	821,9	896
<b>Total</b>	<b>3.235,55</b>	<b>10.616</b>

Si se realiza un sobredimensionado del 10% para que la planta pueda adaptarse a días con mayor cantidad de residuos, se obtiene una capacidad de la planta de compostaje de 11.677,6 kg/día y 3.892,5 t/año en base húmeda. La capacidad volumétrica de la planta si se tiene en cuenta una densidad de 275 kg/m<sup>3</sup> es de 42,46 m<sup>3</sup>/día [46].

El porcentaje de humedad también es uno de los factores más importantes durante el proceso de compostaje. Si los residuos de entrada no tienen la humedad necesaria se debe añadir agua o eliminar parte de la humedad hasta obtener un porcentaje adecuado. Para calcular la cantidad de humedad de los residuos de entrada se utiliza la siguiente expresión [58]:

$$\text{Porcentaje de humedad} = \frac{\text{Peso de agua residuo 1} + \text{Peso de agua residuo 2}}{\text{Peso total de los residuos}}$$

El residuo 1 está formado por paja de cereal cuyo porcentaje de humedad es de 8,3% [67]. Al añadir la cantidad de agua los 896 kg/día de paja de cereal se obtiene un valor de 74,39 kg de agua/día.

$$896 \text{ kg/día paja} * \frac{8,3 \text{ kg de agua}}{100 \text{ kg paja}} = 74,39 \text{ kg /día agua}$$

El residuo 2 está formado por restos de patata cuya humedad es del 75,5% [59] y por restos de zanahoria cuya humedad es de 75% [68]. La cantidad de agua derivada de la patata

es 2.468,85 kg/día y la cantidad de agua derivada de la zanahoria es de 4.837 kg/día, obteniéndose un valor de 7.306 kg/día agua para el residuo 2.

$$\text{Patata: } 3.270 \text{ kg/día} * \frac{75,5 \text{ kg agua}}{100 \text{ kg patata}} = 2.468,85 \text{ kg/día agua.}$$

$$\text{Zanahoria: } 6.450 \text{ kg/día} * \frac{75 \text{ kg agua}}{100 \text{ kg zanahoria}} = 4.837 \text{ kg/día}$$

El peso total de los residuos es de 10.616 kg/día incluyendo la cantidad de agua. El porcentaje de agua de entrada para la mezcla de ambos residuos es de 69,5 %. Como el porcentaje es mayor del 60% se deben secar los residuos en la zona de almacenamiento al aire para reducir el porcentaje de humedad un 10%.

$$\text{Porcentaje de humedad} = \frac{74,39 + 7.306}{10.616} * 100 = 69,5\%$$

El compost obtenido a partir de estos dos componentes vegetales tiene que cumplir las características de compost vegetal establecidas en el Anexo I del Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo [69]. La *Tabla 23* muestra la descripción, especificaciones y las características a declarar de un compost vegetal.

*Tabla 23. Características del compost vegetal para ser usado como sustrato de cultivo (Adaptado de [69]).*

Tipo de compost	Descripción	Especificaciones	Declaraciones obligatorias	Declaraciones opcionales
Compost vegetal	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), exclusivamente de restos de poda, hojas, hierba cortada y restos vegetales, bajo condiciones controladas.	Materia orgánica sobre materia seca >40% (m/m).	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Componentes principales (&gt;10% vol.), ordenados en orden descendiente de porcentaje.</li> <li>▪ Materia orgánica sobre materia seca.</li> <li>▪ Conductividad eléctrica, CE.                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH.</li> </ul> </li> <li>▪ Cantidad en volumen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Densidad aparente seca.</li> <li>▪ Volumen de aire.</li> <li>▪ Volumen de agua a 1, 5 y 10 Kpa.</li> <li>▪ Materia seca.</li> <li>▪ Espacio poroso total.</li> <li>▪ Granulometría.</li> </ul>

## 5. Dimensionado de la planta de compostaje

La planta de compostaje tendrá el tamaño establecido en función de la cantidad de residuos generados de patata, zanahoria y paja establecidos anteriormente. Por lo tanto, se tratarán 3.892,5 t/año de residuos. Al tratarse de una planta de residuos no peligrosos y que no supera las 5.000 t/año de residuos tratados no es necesario la realización de una evaluación de impacto ambiental [70]. Sin embargo, sí es necesaria la comunicación ambiental de la planta de compostaje según el Decreto Legislativo 1/2015, de 12 de noviembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Prevención Ambiental de Castilla y León [71].

La planta de compostaje debe cumplir una serie de requisitos según la Consejería de Fomento y Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León. Por lo tanto, serán necesarias las siguientes instalaciones [72]:

- **Zona de almacenamiento de residuos**
- **Zona de mezcla**
- **Zona de compostaje**
- **Era de maduración**
- **Zona de recogida y almacenamiento de lixiviados:**
- **Oficina**
- **Aseos**
- **Zona de almacenamiento y mantenimiento de la maquinaria**
- **Zona de afino de compost**
- **Estación meteorológica**

### **5.1 Zona de almacenamiento de residuos**

No se deben almacenar los residuos vegetales durante un tiempo prolongado para evitar la descomposición de estos antes de que entren al proceso de compostaje. Por lo tanto, los residuos de patata y zanahoria no deben permanecer en la zona de almacenamiento más de 2 días [73].

En el caso de la paja que se puede almacenar durante mucho tiempo, se guardarán las pacas necesarias para 15 días con el fin de reducir los gastos de transporte.

Como se necesitan 5 pacas/día, las pacas necesarias para 15 días serán 75 pacas. La superficie ocupada por cada paca es de  $2,10 \text{ m}^2$  ya que sus dimensiones son 1 m ancho y 2,10 m de largo. La superficie que ocupan las 75 pacas será de  $157,5 \text{ m}^2$ , si se apilan de 2 en 2 para reducir la superficie ocupada y facilitar las labores del tractor con horquilla. La superficie necesaria para el almacenamiento de la paja es de  $79 \text{ m}^2$ .

La zona de almacenaje debe ser cerrada para evitar que las condiciones meteorológicas estropeen el sustrato y aumenten la cantidad de lixiviados de los residuos de patata y zanahoria. Por lo tanto, es necesario que la zona de almacenamiento cuente con suelo de hormigón, techo, paredes y sistema de recogida de lixiviados.

La superficie total estimada para la zona de almacenaje que cuenta con 75 pacas y 2 pilas de residuos de patata y zanahoria es de  $396 \text{ m}^2$ , teniendo en cuenta las zonas de paso de maquinaria y un sobredimensionado del 10% para garantizar que haya espacio suficiente.

### **5.2 Zona de mezcla**

Zona cuyo fin es realizar la mezcla de los residuos de patata, zanahoria y paja de cereal. Para realizar correctamente la mezcla se necesita una báscula de camiones para poder pesar los residuos correctamente y mezclarlos en las proporciones adecuadas. La báscula seleccionada es la Gram K2 Speed modelo SPEED 60-10T cuyas especificaciones técnicas están en el *Anexo I* [74]. Para homogeneizar la mezcla de residuos para los compostadores se incluirá una trituradora de residuos de la marca Coparm modelo Trituradora serie TR100 cuya ficha técnica se muestra en la *Tabla 24* [75].

Tabla 24. Ficha técnica trituradora Coparm modelo Trituradora serie TR100 (Adaptado de [75]).

Ficha técnica	Trituradora de Coparm serie TR100
Tamaño cámara de trituración	1110 x 1500 mm
Número de ejes	2
Tolva de alimentación	4 mc
Velocidad de rotación de ejes	18 - 12 rpm
Espesor de cuchillas	75 mm
Potencia	110 kW

Los lixiviados que se derivan de la descomposición de los residuos de patata y zanahoria y del lavado de la maquinaria de transporte y del agua de lluvia debe recogerse y almacenarse para su posterior tratamiento. Por lo tanto, el suelo de la zona de mezcla debe ser impermeabilizado mediante una lámina de polietileno y con una ligera pendiente para garantizar la protección del suelo y el agua y la evacuación de los lixiviados hacia la zona de almacenamiento. Los residuos que no puedan utilizarse ese día para introducirse en el compostador deben almacenarse en una zona adecuada.

Esta zona abarcará el 20% de la superficie destinada a compostaje y maduración y no será necesario la presencia de una estructura que cubra la zona [76] .

### 5.3 Zona de compostaje

El sistema de compostaje seleccionado es el compostador rotativo de la empresa Ison 21, modelo 1660 formado por los elementos que se muestran a continuación:

- Tambor donde se lleva a cabo el proceso de fermentación
- Cuadro eléctrico
- Motor
- Tolva de alimentación con trituradora y tornillo sin fin.
- Ventilador para favorecer la aireación
- Medidor de temperatura

Si se utiliza para trabajar en continuo se añadirán los residuos al compostador a través de una cinta transportadora. Si se necesita una capacidad de 70.065,6 kg y se quiere disminuir la superficie ocupada por el compostador se opta por los compostadores Ison21 modelo 30.012 de 3 m de diámetro y 12 m de longitud, cuyo tiempo de residencia es de 6 días y cuya capacidad máxima de llenado es de 30.536 kg (50,89 m<sup>3</sup>), con un factor de reducción del 33% [77]. Teniendo en cuenta la capacidad máxima del compostador elegido, el número de compostadores necesario será de 5 compostadores. La hoja de especificaciones se muestra en el *Anexo 2*.

$$\text{N}^{\circ} \text{ de compostadores} = 42,46 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * \frac{1 \text{ compostador}}{50,89 \text{ m}^3 \text{ residuos}} * 6 \text{ días} = 5 \text{ compostadores.}$$

El volumen de residuos compostados por los 5 compostadores en los 6 días será de  $272 \text{ m}^3$ . Si el volumen de los residuos disminuye 33% al convertirse en compost el volumen total del compost generado será de [76]:

$$\text{Volumen total compost generado} = 42,46 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * \frac{33 \text{ m}^3 \text{ de compostaje}}{100 \text{ m}^3 \text{ residuos}} * 6 \text{ días} = 84,07 \text{ m}^3.$$

La zona destinada a los compostadores debe ser adecuada para evitar los daños de los equipos. Por lo tanto, debe construirse una nave cerrada que contenga dichos compostadores.

La superficie de la nave debe ser suficiente para los 5 compostadores, la entrada de la maquinaria que transporta los residuos y para facilitar las labores de los trabajadores (*Figura 30*). Se estima una superficie de la nave de  $644 \text{ m}^2$  con una altura de 4 m para facilitar la entrada de la maquinaria.

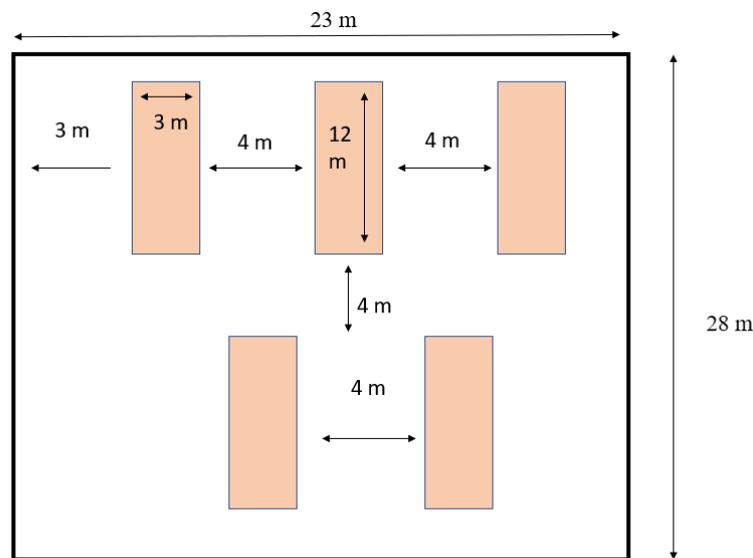


Figura 30. Esquema de distribución compostadores (Fuente: elaboración propia)

#### 5.4 Era de Maduración

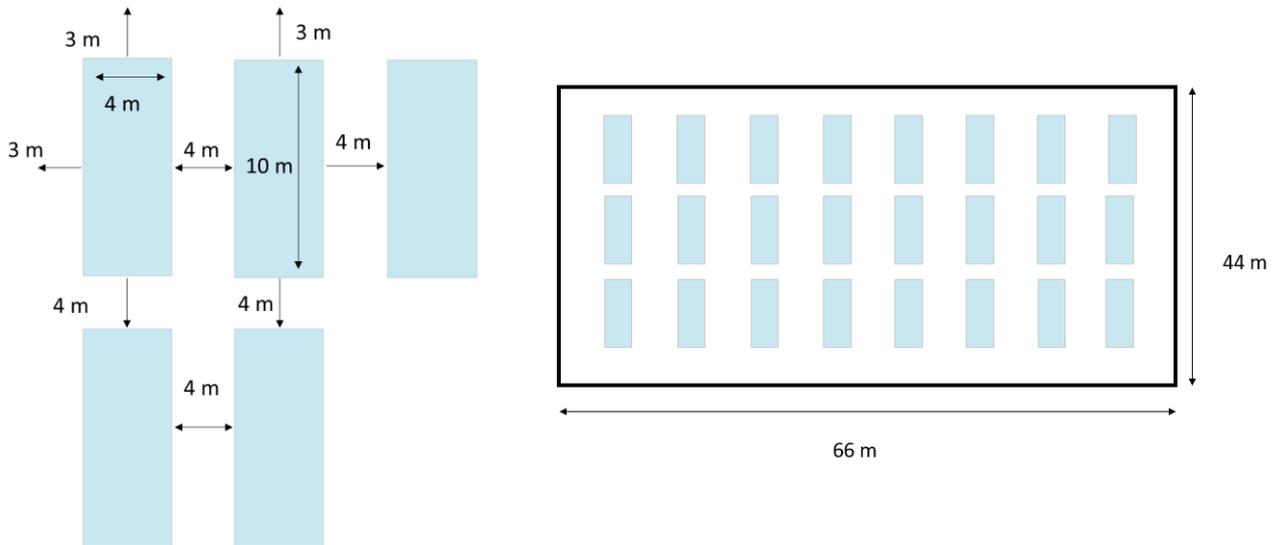
Los valores habituales de altura y anchura de las pilas oscilan entre 1,5 – 3 m y 2,5 – 4 m respectivamente [72]. Para la maduración del compost se utilizará una pila de aireación pasiva rectangular de 2 m de alto, 4 m de ancho y 10 m de largo dónde se acumularán los restos compostados durante 90 días (3 meses) para garantizar que se completa la maduración [15]. Para determinar la cantidad de pilas necesarias se establece el volumen que van a tener. Como la producción de compost es de  $14 \text{ m}^3/\text{día}$ , el volumen de la pila teniendo en cuenta un factor de carga de  $2/3$  será [76]:

$$\text{Volumen para madurar} = 14 \text{ m}^3/\text{día} * 90 \text{ días} = 1.261 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de la pila} = \frac{2}{3} * 2 * 4 * 10 = 53,33 \text{ m}^3$$

$$\text{Número de pilas} = \frac{1.261}{53,33} = 23,64 \text{ pilas} \approx 24 \text{ pilas}$$

Si se plantea una organización de las pilas como muestra la *Figura 31* con una separación entre pilas de 4 m y un espacio de 3 m de espacio exterior, la superficie total a ocupar será de 2.904 m<sup>2</sup>.



*Figura 31. Esquema área de compostaje (Fuente: elaboración propia).*

En esta zona no es necesario la construcción de ninguna infraestructura ya que resulta suficiente utilizar un suelo de zahorra para el paso de la maquinaria. Las pilas se tapan con plásticos protectores para evitar la infiltración del agua de lluvia en las pilas y se voltearán una vez al mes con el tractor y la pala cargadora.

### 5.5 Zona de recogida y almacenamiento de lixiviados

Los lixiviados o productos de la descomposición y fermentación de la materia orgánica, aumentan por la infiltración del agua de lluvia en la masa de residuos. Este líquido se caracteriza por contener gran cantidad de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y sustancias contaminantes peligrosas para el suelo y el agua, por lo que es importante recogerlos y almacenarlos correctamente hasta que se realice el tratamiento [78]. En el caso de la planta de compostaje, todos los lixiviados procedentes de la zona de mezcla, zona de compostaje y zona de almacenamiento de residuos que se recojan se almacenarán en una balsa de lixiviados hasta que puedan ser recogidos por un gestor autorizado para su posterior tratamiento.

En las zonas descubiertas como la zona de mezcla se debe tener en cuenta el agua de precipitación ya que influirá directamente en la formación de los lixiviados. La precipitación máxima diaria registrada en Laguna de Duero es de 64 l/m<sup>2</sup> [79]. El caudal de lluvia que se dará en la zona de mezcla será de 45,41 m<sup>3</sup>, pero por seguridad este valor se multiplicará por 3 para evitar problemas en caso de que se produzca un aumento del caudal.

$$\text{Superficie de zona de mezcla} = (20\% \text{ superficie compostaje}) = 0,2 * (3.548) = 709,6 \text{ m}^2$$

$$\text{Caudal de lluvia} = \text{Superficie} * \text{Precipitación máxima} = 709,6 * 64 = 45.414 = 45,41 \text{ m}^3$$

$$\text{Caudal lluvia máximo} = 3 * 45,41 = 136,24 \text{ m}^3/\text{día}$$

Se estima que la generación de lixiviados puede llegar a ser de entre el 25 - 40% de las precipitaciones si se trata de residuos poco compactados [78]. En las zonas cubiertas al no depender de las precipitaciones la generación de lixiviados será muy baja y en torno al 5%.

En la zona de almacenamiento, los lixiviados generados por la pila de residuos, teniendo en cuenta el factor de carga será de  $2,6 \text{ m}^3$ . Si se sobredimensiona un 50 % para evitar problemas de almacenamiento se obtiene un volumen de lixiviados de  $3,9 \text{ m}^3/\text{día}$ .

$$\text{Volumen lixiviados Almacenamiento} = \text{Volumen pila} * 0,05 = 80 \text{ m}^3 * \frac{2}{3} * 0,05 = 2,6 \text{ m}^3/\text{día}$$

En la zona de compostaje se recogerá los lixiviados del compostador rotativo procedentes del proceso de compostaje. En este caso también se estima una producción de lixiviados del 5 %. El volumen de lixiviados generados será de  $2,12 \text{ m}^3$ , si se sobredimensiona un 50% se obtiene un valor de  $3,18 \text{ m}^3/\text{día}$ .

$$\text{Volumen lixiviados Compostador} = 11.677,6 \text{ kg mezcla/día} * \frac{1 \text{ m}^3}{275 \text{ kg mezcla}} * 0,05 = 2,12 \text{ m}^3/\text{día}$$

El volumen total de lixiviados generados será la suma del caudal obtenido en la zona de mezcla y el volumen de lixiviados de la zona de almacenamiento y el volumen de lixiviados de la zona de compostaje.

$$\text{Volumen total máximo de lixiviados} = 136,24 + 3,9 + 3,18 = 143,32 \text{ m}^3/\text{día}$$

La balsa de lixiviados tendrá las dimensiones necesarias para albergar el volumen total de lixiviados, por lo tanto, se plantea una balsa con una altura de 3 m, una anchura de 7 m y una longitud de 8 m. El volumen de la balsa con sobredimensionado será de  $158 \text{ m}^3$  y la superficie que ocupa la balsa será de  $56 \text{ m}^2$ .

Se destinará una superficie de  $240 \text{ m}^2$  para la zona de almacenamiento de lixiviados.

## 5.6 Zona de almacenamiento y mantenimiento de la maquinaria

Para el correcto funcionamiento de la planta de compostaje es necesario contar con una cinta transportadora que introduzca los residuos en los compostadores y maquinaria de transporte, formación de las pilas y volteo de estas, como es el caso de los tractores con pala cargadora. Esta zona dispondrá de una superficie de  $100 \text{ m}^2$  para tener espacio suficiente para el estacionamiento de la maquinaria y las labores de mantenimiento.

- **Tractor:** Será necesario un tractor para descargar, almacenar, transportar, formar las pilas y voltearlas. El tractor seleccionado debe contar con la potencia necesaria para poder trabajar en toda la planta de compostaje, por lo tanto, se selecciona un tractor John Deere PowerTech modelo 5.115M cuyas especificaciones técnicas están en el *Anexo 2* [80].
- **Pala cargadora:** Se selecciona la pala cargadora adecuada para el modelo de tractor seleccionado. El *Anexo 3* muestra las especificaciones técnicas de la pala cargadora de John Deere modelos 603 M [80].

- **Cinta transportadora:** Se deben colocar 5 sistemas mecánicos para alimentar los compostadores con ayuda de la pala cargadora desde la zona de mezcla. Se selecciona una cinta transportadora de planchas metálicas de Coparm modelo TM 125\_12 para facilitar el transporte de la mezcla de residuos (*Figura 32*) [81]. La *Tabla 25* muestra la ficha técnica de la cinta transportadora seleccionada.



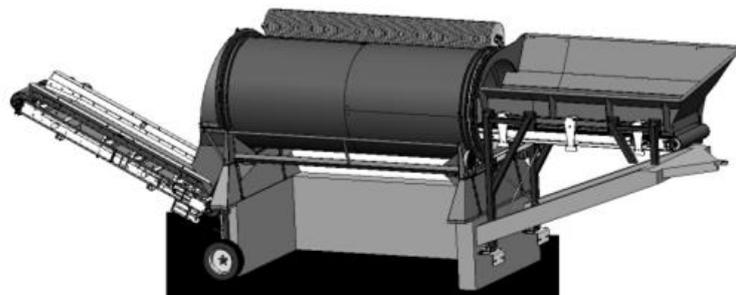
*Figura 32. Ejemplo de cinta transportadora de planchas metálicas [81].*

*Tabla 25. Ficha técnica cinta transportadora de Coparm, modelo TM 125\_12 [81].*

Ficha técnica	Cinta transportadora
<b>Modelo</b>	TM 125_12
<b>Tipo de cinta</b>	Planchas metálicas
<b>Distancia entre ejes</b>	Variable
<b>Ancho total</b>	1.560 mm
<b>Ancho útil</b>	1.180 mm
<b>Inclinación</b>	Variable
<b>Altura de las orillas</b>	500 - 1.000 mm
<b>Vía de la cadena de arrastre</b>	125 mm
<b>Diámetro de rodillos</b>	56 / 60 mm
<b>Carga máxima de las cadenas</b>	80.000 N
<b>Velocidad de desplazamiento</b>	0 - 10 ml/min

### 5.7 Zona de Afino de compost

El Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes en su Anexo V sobre los criterios de los fertilizantes que se generan a partir de residuos establece que se debe pasar el 90% del fertilizante por una malla de 10 mm [50]. Por lo tanto, se selecciona una estación de cribado móvil de la empresa compost systems (*Figura 33*)[82].



*Figura 33. Estación de cribado móvil de Compost system modelo KA 4018-3.5 [82].*

Este sistema alimenta la criba cuya capacidad es de 3,5 m<sup>3</sup> mediante una cinta transportadora [82]. La *Tabla 26* muestra la ficha técnica de la estación de cribado seleccionada.

La zona de afino de compost necesitará una superficie de 192 m<sup>2</sup> para tener espacio suficiente para la entrada y salida de la maquinaria que alimenta la estación de cribado y para el almacenamiento del compost final.

*Tabla 26. Ficha técnica estación de cribado móvil de compost system modelo KA 4018-3.5 [82].*

Ficha técnica		Estación de cribado de Compost system modelo KA 4018-3.5
<b>Sistema de conducción</b>	Transportador de tolva	0,75 kW
	Tambor de cribado	11 kW
<b>Tambor tamizador</b>	Tipo	Sistema de acondicionamiento con cadena de transmisión sin fin
	Longitud tambor	410 cm
	Diámetro tambor	180 cm
	Superficie de pantalla	22 m <sup>2</sup>
<b>Tolva</b>	Ancho del transportador	80 cm
	Altura de llenado	320 cm
<b>Capacidad</b>		60 m <sup>3</sup> /h

### 5.8 Aseos

Los aseos y vestuarios se encontrarán al lado de las oficinas para favorecer los cambios de ropa antes de la entrada en la planta de compostaje. La superficie destinada será de 20 m<sup>2</sup>, para que haya espacio suficiente para dos zonas de aseos y dos zonas de vestuario para hombres y mujeres de forma separada.

### 5.9 Oficinas

En esta parte del edificio se encargarán de realizar el seguimiento de la entrada de residuos y la salida de compost, se controlarán los parámetros del compostaje y de la maduración del compost, se encargarán de la gestión de los lixiviados generados. Las oficinas contarán con una sala de reuniones, zona de descanso y zona de oficina. La superficie necesaria para ello será de 40 m<sup>2</sup>.

### 5.10 Estación meteorológica

Según la Consejería de Fomento y Medio Ambiente, las plantas de compostaje deben tener una estación meteorológica para medir la dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad y presión, con el fin de controlar las condiciones atmosféricas que deben soportar las pilas de compostaje [72]. La estación meteorológica contará con una superficie de 15 m<sup>2</sup>.

### 5.11 Esquema de distribución de la planta de compostaje

En total la planta de compostaje tendrá una superficie de 5.260,6 m<sup>2</sup> teniendo en cuenta todas las superficies mencionadas anteriormente. La *Figura 34* muestra el esquema de distribución de la planta de compostaje donde se incluyen todas las zonas necesarias y el terreno sobrante de la parcela que puede utilizarse para futuras ampliaciones.

Se ha diseñado la distribución de la planta de forma que la zona de compostaje, la zona de mezcla y la era de maduración estén cerca para evitar que el tractor tenga que recorrer largas distancias. La zona de almacenamiento de residuos y la de almacenamiento de la maquinaria se sitúan al lado y cerca de las instalaciones anteriores para facilitar el mantenimiento de la maquinaria y el transporte de los residuos y la paja.

En el caso de la zona de recogida y almacenamiento de lixiviados y la zona de afino de compost se sitúa cerca de la carretera para favorecer la recogida de los lixiviados por el gestor autorizado y la recogida del compost final.

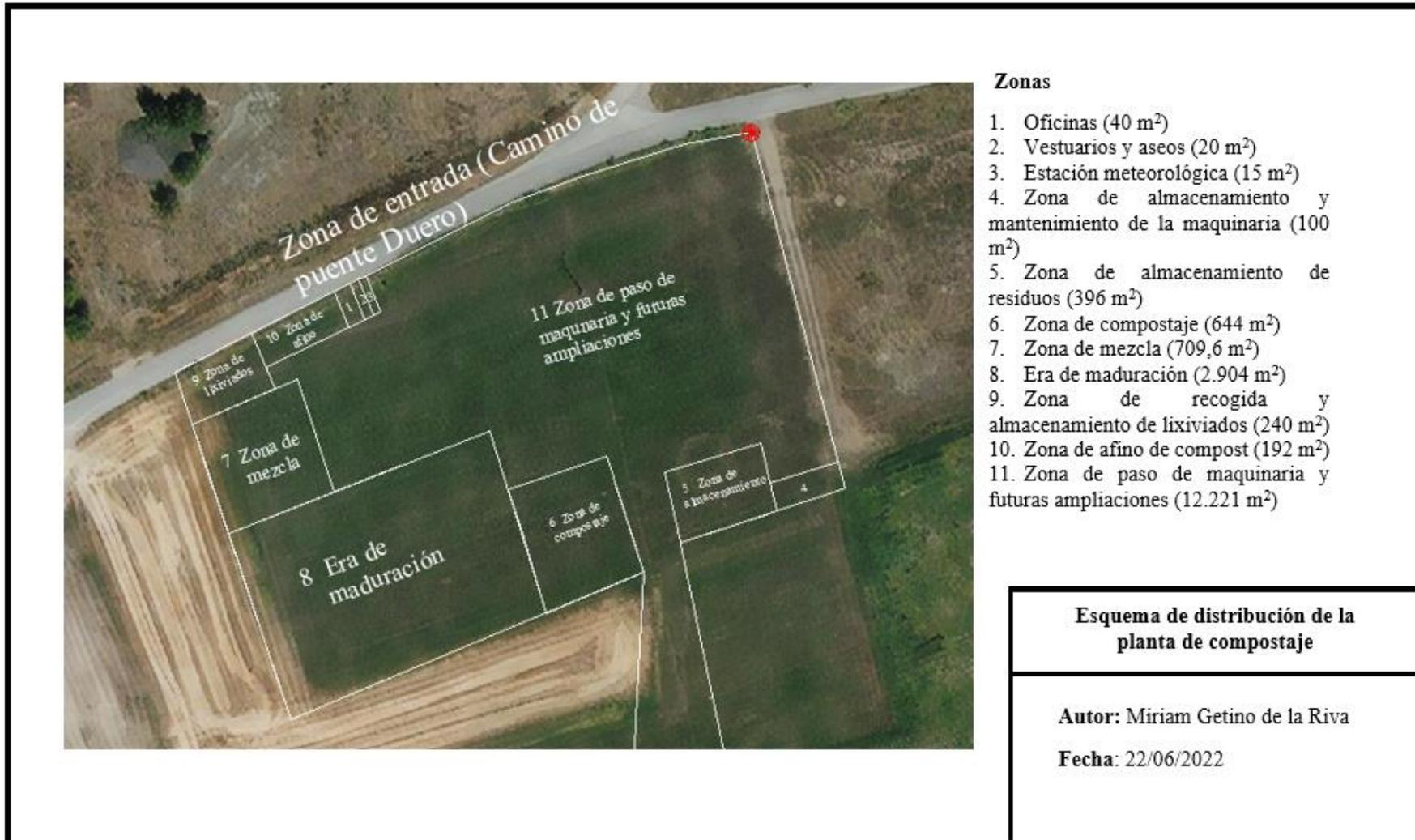


Figura 34. Esquema de distribución de la planta de compostaje (Fuente: elaboración propia)

## 6. Evaluación económica planta de compostaje

Con el fin de analizar la viabilidad económica de la planta de compostaje se calcularán los costes asociados a la construcción de la planta o costes inmovilizados (CAPEX) y los costes asociados al funcionamiento de la planta o costes de operación (OPEX).

### 6.1 Costes inmovilizados (CAPEX)

Dentro de los costes inmovilizados se contemplará tanto la adquisición del terreno, la obra civil y la adquisición de los equipos y la maquinaria necesaria. Se han estimado unos costes de 693.465 € (*Tabla 27*).

- **Terreno:** Se estima que el terreno seleccionado al tener 1,7 costará 15.000 € [42].
- **Instalaciones:** Dentro de las instalaciones se incluyen las oficinas, los aseos, los vestuarios, la construcción de los suelos impermeabilizados y las naves necesarias para las zonas de almacenamiento y la zona de compostaje.
  - **Solera de hormigón armado:** El coste estimado de la construcción de la solera de hormigón es de 17,31 €/m<sup>2</sup>[83]. Las zonas que necesita solera de hormigón son la zona de almacenamiento de residuos, la zona de compostaje y la zona de mezcla de residuo. La superficie estimada que necesita solera de hormigón es de 1.749,6 m<sup>2</sup>, por lo tanto, el coste será de 30.286 €.
  - **Cubiertas:** una cubierta de acero galvanizado tiene un precio de 16,35 €/m<sup>2</sup> [84]. La superficie con cubierta es de 1.572 m<sup>2</sup> correspondiente a todas las zonas de almacenamiento, la zona de compostaje y la zona de afino de compost. El coste asociado a las cubiertas es de 25.702 €.
  - **Impermeabilización del suelo:** Para impermeabilizar el suelo de las zonas de almacenamiento de residuos y la zona de mezcla se utiliza una lámina de drenaje de polietileno cuyo coste es de 49,51 €/m<sup>2</sup> [85]. El coste 54.738 €.
  - **Muros:** Los muros de contención de hormigón armado con puntera y talón tienen un precio de 145,21 €/m<sup>3</sup> [86]. Los muros pertenecientes a la zona de afino de compost, todas las zonas de almacenamiento y la zona de compostaje tiene una longitud de muro total de 250 m. Si se establecen muros de contención de 3 m de altura y 0,4 m de ancho, el volumen total de los muros será de 300 m<sup>3</sup>. El coste asociado a la construcción de estos muros es de 43.563 €.
  - **Suelo de zahorra:** Un relleno del suelo para mejorar la compactación del terreno tiene un coste de 26,18 €/m<sup>3</sup> [87]. Si la superficie de suelo de zahorra es la correspondiente con la era de maduración, la superficie de suelo de zahorra será de 2.904 m<sup>2</sup>. El coste estimado es de 76.027 €.
  - **Oficinas:** Se estima que el coste de construcción de un edificio es de 30.000 € [88].
  - **Aseos y vestuario:** Como la superficie de los aseos y vestuario es la mitad de la superficie de las oficinas se estima que el coste será de 15.000 €.
- **Instrumentación:** Se tendrán en cuenta los gastos asociados a la estación meteorológica, se estima que esta tiene un coste de 237 € [89].
- **Maquinaria:** La maquinaria necesaria es un tractor, una pala cargador y una báscula de vehículos. Un tractor John Deere de 120 CV tiene precio estimado de 80.000 €, la pala cargadora tiene un precio estimado de 5.000 € y la báscula para vehículos tiene un precio de 4.950 € [75][74][90].

- **Equipos:** Los equipos a tener en cuenta son 5 compostadores, una trituradora, una cinta transportadora y una estación de cribado móvil. Un compostador tiene un coste aproximado de 20.000 € por lo que generará un gasto de 100.000 €. La trituradora tienen un precio estimado de 2.500 €; una cinta transportadora tiene un coste aproximado de 3.800 €, al necesitar 5 se estima un coste de 19.000 € y la estación de cribado tendrá un coste de 10.000 € [91].
- **Seguridad y salud:** Se estima que la implementación de las diferentes medidas de seguridad para los trabajadores tendrá un coste aproximado de 1.500 € [92].
- **Sistema de recogida de lixiviados:** Un depósito de almacenamiento de polietileno de 1,5 m<sup>3</sup> tiene un coste aproximado de 1.718 € [93]. Si necesitamos una balsa de 158 m<sup>3</sup> el coste será de 180.963 €.

Tabla 27. Costes inmovilizados (Fuente: elaboración propia)

Costes inmovilizados		Precio	Importe (€)
<b>Terreno</b>		-	15.000
<b>Instalaciones</b>	Solera de hormigón	17,31 €/m <sup>2</sup>	30.286
	Impermeabilización	49,51 €/m <sup>2</sup>	54.738
	Cubierta inclinada de chapa de acero galvanizado	16,35 €/m <sup>2</sup>	25.702
	Muros de contención	145,21 €/m <sup>3</sup>	43.563
	Suelo de zahorra	26,18 €/m <sup>3</sup>	76.027
	Oficinas	30.000 €	30.000
<b>Instrumentación</b>	Aseos y vestuarios	15.000 €	15.000
<b>Maquinaria</b>	Estación meteorológica	237 €	237
	Tractor	80.000 €	80.000
	Pala cargadora	5.000 €	5.000
	Báscula de vehículos	4.950 €	4.950
<b>Equipos</b>	Compostadores	20.000 €	100.000
	Trituradora	2.500 €	2.500
	Cinta transportadora	3.800 €	19.000
	Estación de cribado	9.000 €	9.000
<b>Seguridad y salud</b>		1.500 €	1.500
<b>Sistema de recogida de lixiviados</b>		1.718 €	180.963
<b>TOTAL (€)</b>			<b>693.465</b>

## 6.2 Costes de operación (OPEX)

Los costes asociados a la operación de la planta de compostaje son el coste energético de la maquinaria, los salarios de los trabajadores de la planta, el coste de las materias primas necesarias para iniciar el proceso, la gestión de los residuos generados y el combustible empleado para el uso del tractor. El coste total será de 1.103.004 €/año, pero al generarse un ingreso vendiendo el fertilizante final la planta de compostaje ganaría 1.306.667 €/año como muestra la *Tabla 30*. Los costes de operación se distribuyen de la siguiente manera:

- **Coste energético:** Se tendrá en cuenta el gasto energético producido por los equipos contemplados anteriormente. El precio considerado de la luz es de 0,25 €/kWh al considerar una tarifa 3.0 TD. Si se trabaja durante 8.000 h el coste total en electricidad será de 493.500 €/año [94] (*Tabla 28*).

*Tabla 28. Costes energéticos (Fuente: elaboración propia)*

Costes de operación		Potencia (kW)	Precio electricidad (€/kWh)	Importe (€)
Coste energético	Compostador	25	0,25 €/kWh	250.000
	Estación de cribado	11,75		23.500
	Trituradora	110		220.000
TOTAL (€)				493.500

- **Personal:** Si se necesitan 3 trabajadores en la planta, un operario, un encargado y un jefe de planta. Los costes para la empresa asociados serán 90.000 €/año teniendo en cuenta los salarios brutos de la *Tabla 29*.

*Tabla 29. Coste de personal (Fuente: elaboración propia)*

Costes de operación		Sueldo (€/año)	Importe total (€/año)
Personal	Jefe de planta	40.000	90.000
	Encargado	30.000	
	Operario	20.000	

- **Materias primas:** Una paca de paja tiene un precio de 2,75 €, si se necesitan 1.666 pacas/año se obtiene un coste de 4.583 €/año [95].
- **Gestión de residuos:** El transporte y gestión de lixiviados tiene un precio de 31 €/t [96]. Teniendo en cuenta un caudal de lluvia normal se generan al día 45,41 m<sup>3</sup>/día. Si

la densidad de los lixiviados es de  $1000 \text{ kg/m}^3$  se generarán  $15.136 \text{ t/año}$  lo que supone un coste de  $469.216 \text{ €/año}$ .

- **Combustible:** El tractor tiene una capacidad de  $165 \text{ l}$ , si se llena cada dos días se producirá un consumo de combustible de  $27.500 \text{ l/año}$ . El precio del gasoil es de  $1,662 \text{ €/l}$  por lo que se producirá un coste de  $45.705 \text{ €/año}$  [97] .
- **Fertilizante:** Tras todo el proceso de compostaje se genera un fertilizante que tiene un precio de venta de  $0,3 \text{ €/l}$  [98]. Si se generan  $14 \text{ m}^3/\text{día}$  de compost, al año serán  $4.666,6 \text{ m}^3/\text{año}$ . Esto genera unos ingresos de  $1.399.980 \text{ €/año}$ .

Tabla 30. Costes de operación (Fuente: elaboración propia)

Costes de operación	Importe (€/año)
Coste energético	493.500
Personal	90.000
Materias primas	4.583
Gestión de lixiviados	469.216
Combustible	45.705
<b>TOTAL (€/año)</b>	1.103.004
Fertilizante	1.399.980

### 6.3 Estudio viabilidad

Para calcular la viabilidad es necesario calcular el valor actual neto (VAN), la tasa interna de rentabilidad (TIR) y el periodo de retorno (PR). Cuanto mayor sea el valor del VAN y el TIR y menor el PR más rentable será la instalación de la planta de compostaje. Mediante el cálculo del flujo de caja acumulado en el tiempo (Tabla 31) se obtiene la siguiente gráfica (Figura 35).

Tabla 31. Cálculos flujo de caja acumulado (Fuente: elaboración propia)

Tiempo (Años)	Coste de inversión (€)	Coste operación (€)	Coste total (€)	Ingresos (€)	Ganancias (€)	Beneficios (€)
0	693.465	0	693.465	0	-693.465	0
1	0	1.103.004	1.103.004	1.399.980	296.976	-396.489
2	0	1.103.004	1.103.004	1.399.980	296.976	-99.513
3	0	1.103.004	1.103.004	1.399.980	296.976	197.463
4	0	1.103.004	1.103.004	1.399.980	296.976	494.439
5	0	1.103.004	1.103.004	1.399.980	296.976	791.415
6	0	1.103.004	1.103.004	1.399.980	296.976	1.088.391
7	0	1.103.004	1.103.004	1.399.980	296.976	1.385.367
8	0	1.103.004	1.103.004	1.399.980	296.976	1.682.343

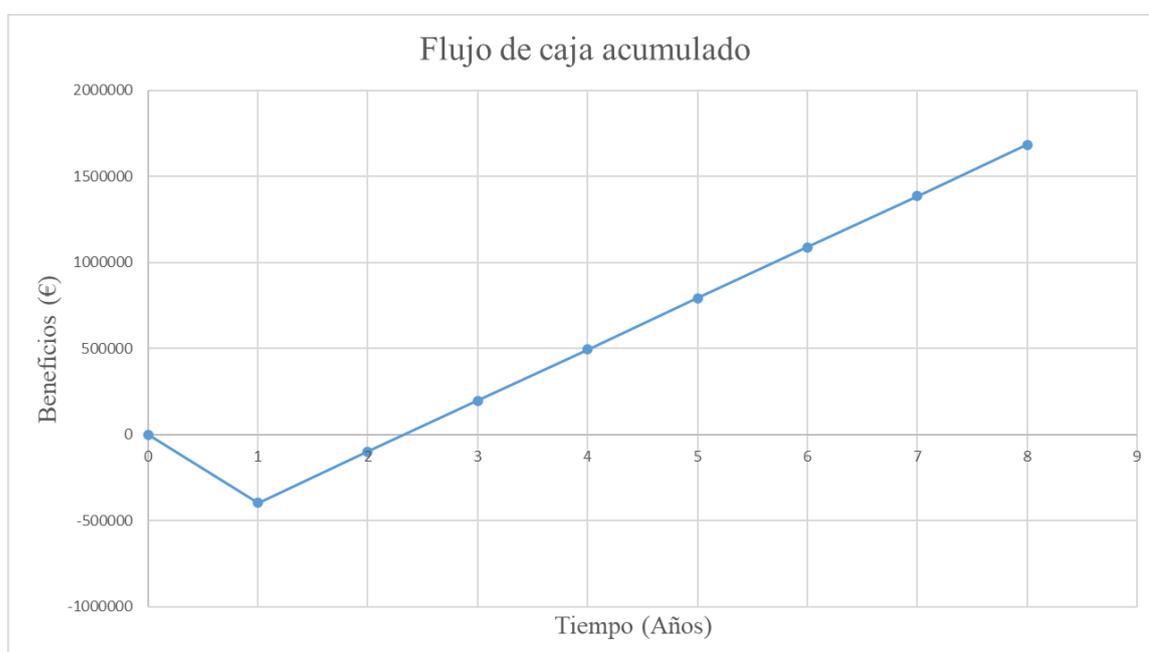


Figura 35. Flujo de caja acumulado (Fuente: elaboración propia)

El VAN se calculará con la siguiente fórmula, donde BNA es el sumatorio de las ganancias en 8 años (€) con una tasa de interés del 10% y lo es la inversión inicial (693.465 €). El valor obtenido para el VAN será de 890.880 €.

$$VAN = \text{Beneficio Neto Actualizado (BNA)} - \text{Inversión Inicial (I}_0\text{)}$$

Para calcular el TIR se iguala la ecuación del VAN a cero, el valor obtenido es de 40%.

El periodo de retorno se calcula de la siguiente manera:

$$PR = \frac{I_0}{FC} = \frac{693.465}{296.976} = 2,33 \approx 3 \text{ años}$$

Tras analizar los valores de VAN, TIR y PR se llega a la conclusión de que la planta de compostaje es rentable económicamente ya que el valor obtenido del VAN es mayor a 0, el TIR es mayor a la tasa de interés y el PR se recuperaría en 3 años.

Para asegurar la rentabilidad de la planta si varía el precio de venta del fertilizante se realiza el análisis de sensibilidad variando el precio. Si se aumenta el precio a 0,35 €/l o se disminuye a 0,28 €/l los valores obtenidos para el VAN, el TIR y el PR siguen siendo adecuados por lo que la planta seguiría siendo viable (Tabla 32). El precio al que el TIR se iguala a la tasa de interés es 0,265€/l por lo que este es el precio mínimo que puede establecerse para que la planta sea rentable.

Tabla 32. Valores de VAN, TIR y PR (Fuente: elaboración propia).

Precio (€/l)	0,28	0,3	0,35
VAN (€)	392.961	890.880	2.135.678
TIR (%)	24	40	76
PR (Años)	3	2	1

## 7. Evaluación ambiental

La presente evaluación ambiental tiene como objetivo la determinación de los impactos producidos durante la fase de operación o funcionamiento de la planta de compostaje, para establecer medidas correctoras o compensatorias en caso de que se produzcan impactos desfavorables.

### 7.1 Inventario ambiental

La zona de Laguna de Duero no pertenece a la red natura 2.000 como muestra la Figura 36, por lo tanto, no presenta lugares de interés comunitario (LIC) ni zonas de especial protección para las aves (ZEPA).

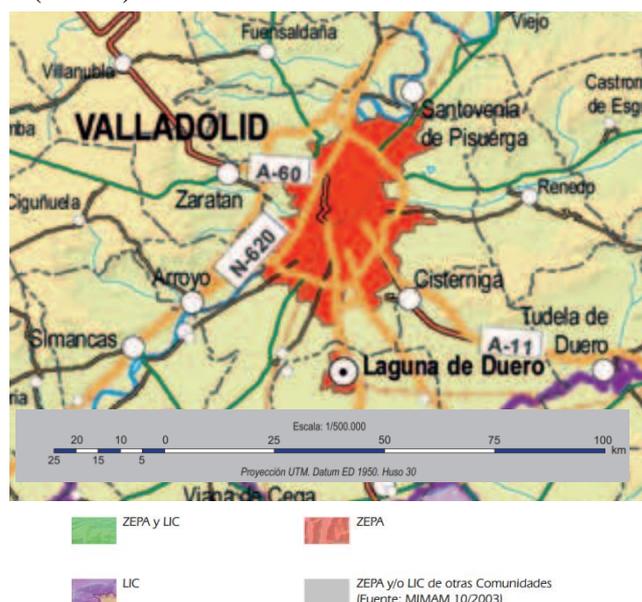


Figura 36. Mapa de Red Natura 2000 (ZEPA Y LIC) de Castilla y León ([99]).

### 7.1.1 Medio socioeconómico

La zona de Laguna de Duero registró en 2021 una población de 22.633 habitantes, la distribución de la población por sexo y edad se muestra en la *Tabla 33*.

*Tabla 33. Distribución de la población por edad y sexo [100].*

Población de Laguna de Duero por sexo y edad 2021 (grupos quinquenales)			
Edad	Hombres	Mujeres	Total
0-5	412	395	807
5-10	585	530	1.115
10-15	746	641	1.387
15-20	756	700	1.456
20-25	575	554	1.129
25-30	493	424	917
30-35	550	517	1.067
35-40	696	742	1.438
40-45	925	1.002	1.927
45-50	1.078	1.171	2.249
50-55	1.076	1.076	2.152
55-60	843	816	1.659
60-65	687	847	1.534
65-70	738	744	1.482
70-75	542	475	1.017
75-80	287	329	616
80-85	139	169	308
85-	132	241	373
<b>Total</b>	<b>11.260</b>	<b>11.373</b>	<b>22.633</b>

### 7.1.2 Clima

El clima en Laguna de Duero se caracteriza por presentar un invierno frío y un verano seco y caluroso típico de un clima mediterráneo. El climograma de la zona (*Figura 37*) muestra que los meses de mayor temperatura y menor precipitaciones corresponden con los meses de verano (junio, julio y agosto) y los meses de mayor precipitación y menor temperatura se corresponden con otoño, invierno y primavera. La altitud de la zona es de 70 m sobre el nivel del mar y presenta una temperatura media de 12,9 °C y una precipitación media de 510 mm [101].

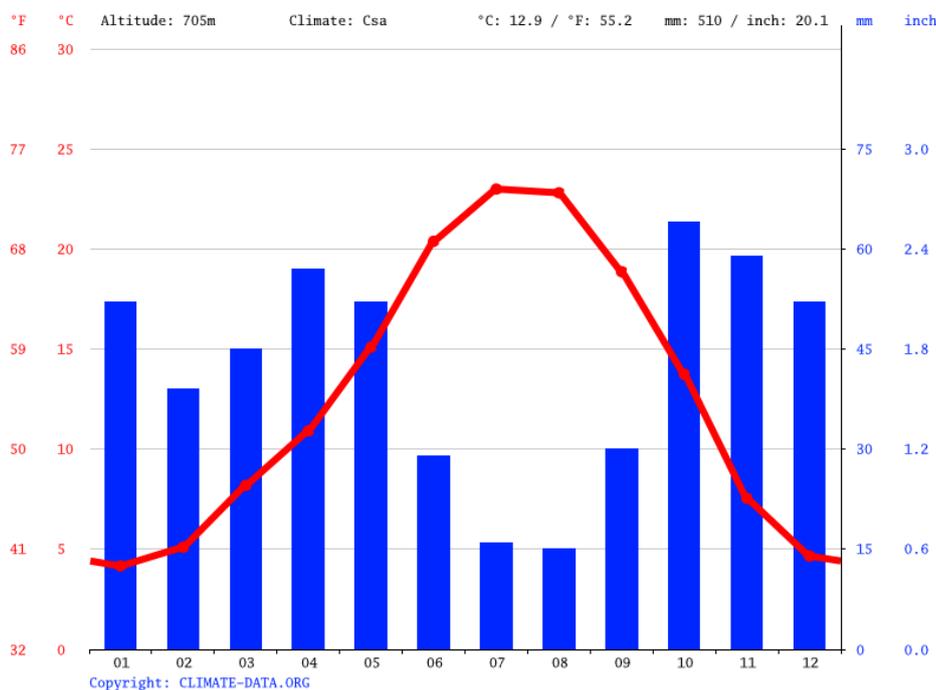


Figura 37. Climograma de Laguna de Duero [101].

### 7.1.3 Flora

Las especies vegetales más comunes en Laguna de Duero se muestran en la *Tabla 34* [102].

Tabla 34. Flora de Laguna de Duero [102].

Especie					
<i>Aegilops geniculata</i>	<i>Andryala integrifolia</i>	<i>Bolboschoenus maritimus</i>	<i>Conium maculatum</i>	<i>Cuscuta epithimum</i>	<i>Carex distans</i>
<i>Agrostemma githago</i>	<i>Andryala ragusina</i>	<i>Brachypodium retusum</i>	<i>Convolvulus arvensis</i>	<i>Cynanchum acutum</i>	<i>Carex divisa</i>
<i>Agrostis pourretii</i>	<i>Apium graveolens</i>	<i>Bromus racemosus</i>	<i>Convolvulus lineatus</i>	<i>Descurainia sophia</i>	<i>Carex leporina</i>
<i>Agrostis stolonifera</i>	<i>Arrhenatherum album</i>	<i>Chenopodium album</i>	<i>Coronilla minima</i>	<i>Dorycnium pentaphyllum</i>	<i>Carex muricata</i>
<i>Anacyclus clavatus</i>	<i>Arrhenatherum elatius</i>	<i>Chondrilla juncea</i>	<i>Coronilla scorpioides</i>	<i>Echium vulgare</i> subsp. <i>puberulum</i>	<i>Carlina corymbosa</i>
<i>Anagallis arvensis</i>	<i>Asperula aristata</i>	<i>Cirsium pyrenaicum</i>	<i>Corrigiola litoralis</i>	<i>Echium vulgare</i>	<i>Carthamus lanatus</i>
<i>Anarrhinum bellidifolium</i>	<i>Asteriscus aquaticus</i>	<i>Cirsium vulgare</i>	<i>Corrigiola telephifolia</i>	<i>Buglossoides arvensis</i>	<i>Catabrosa aquatica</i>
<i>Anchusa undulata</i>	<i>Astragalus hamosus</i>	<i>Coicya monensis</i> subsp. <i>orophila</i>	<i>Crepis capillaris</i>	<i>Carex acutiformis</i>	<i>Centaurea aspera</i>

#### 7.1.4 Fauna

Dentro de la fauna de Laguna de Duero destaca la presencia de mamíferos como los conejos y las liebres, reptiles como la lagartija ibérica, el lagarto ocelado y la culebra bastarda. En cuanto aves suelen encontrarse perdices y gorriones. Las especies en peligro de extinción presentes son los zorros y las águilas [103].

#### 7.1.5 Hidrogeología

La zona de Laguna de Duero se caracteriza por presentar acuíferos y zonas extensas de baja permeabilidad en las zonas adyacentes con posibilidad de presentar acuíferos en profundidad (*Figura 38*). En cuanto a la edad de los estratos, estos pertenecen al cuaternario y está formado por rañas, piedemontes, arenas y areniscas [104].

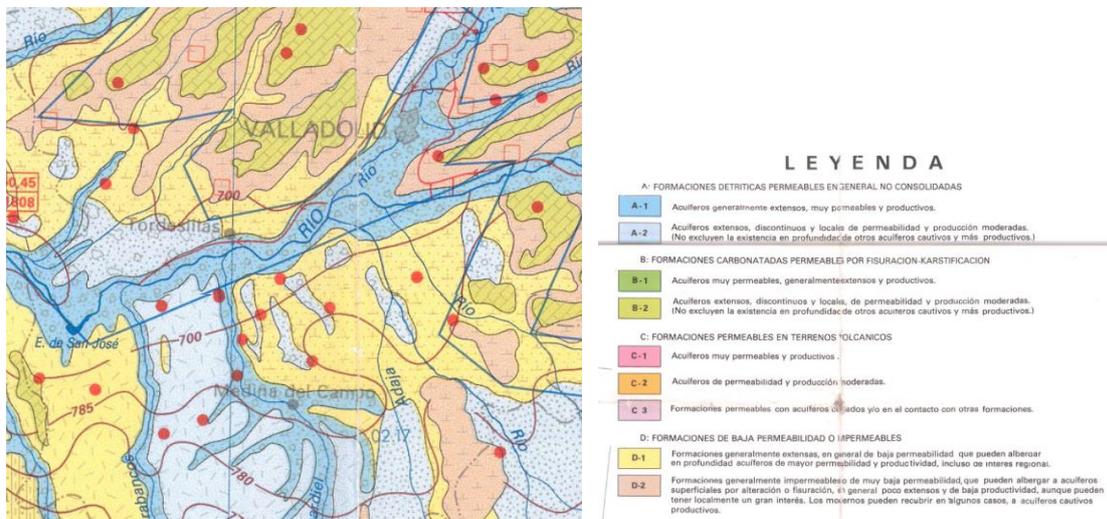


Figura 38. Mapa hidrogeológico de España, escala 1: 200.000 [104].

## 7.2 Impactos y factores ambientales afectados

Se tendrán en cuenta los impactos producidos durante la fase de construcción de la planta y durante la fase de funcionamiento de la misma. Las acciones durante la fase de construcción son:

- Construcción de muros y cubiertas
- Movimiento de tierras
- Desbroce de la vegetación
- Instalación de equipos

Las acciones que se van a llevar a cabo durante la fase de operación de la planta de compostaje son:

- Entrada de camiones con residuos y paja de cereal.
- Pesaje de los camiones de residuos
- Formación de pilas para el mezclado con el co-sustrato
- Llenado de los compostadores
- Recogida del compost y formación de pilas de maduración
- Afino del compost
- Recogida de lixiviados

Durante todas estas acciones los factores ambientales pueden verse afectados en mayor o menor medida. La matriz de identificación de impactos (*Tabla 37*) muestra los

impactos que producen todas las acciones mencionadas para las fases de construcción y funcionamiento.

En la fase de construcción se identifican 18 impactos, mientras que en la fase de funcionamiento se identifican 14 impactos.

### 7.3 Valoración de los impactos

Para calcular la importancia de cada impacto se eligen 4 tipificadores que aportan diferente información sobre los impactos. El valor más alto de importancia sumando los valores más altos de cada tipificador es de 14. Con cada tipificador se construye una matriz a partir de los que posteriormente se construirá la matriz de importancia [105]. Los tipificadores utilizados son los siguientes:

- **Signo:** Muestra si el impacto de las acciones sobre los factores ambientales es Positivo o Negativo (Impacto positivo: 1, impacto negativo: -1).
- **Intensidad:** Muestra el grado de impacto de las acciones sobre los factores ambientales. (Impacto bajo: 1, impacto medio: 4, impacto alto: 8).
- **Extensión:** Muestra el área afectada por las acciones de forma puntual, parcial o total. (Impacto puntual: 1, impacto parcial: 2, impacto total: 3).
- **Persistencia:** Muestra el tiempo que va a durar el impacto sobre el medio. (Impacto temporal: 1, impacto permanente: 3).

La matriz de importancia se construirá con la siguiente fórmula:

$$\text{Importancia: Signo} * (\text{Intensidad} + \text{Extensión} + \text{persistencia})$$

La *Tabla 38* muestra los resultados de la matriz de importancia. Para valorar los impactos se calculará el valor de relativo parcial que mide la importancia relativa del impacto dividiendo el subtotal absoluto o sumatorio de la importancia de los factores entre el subtotal o valor máximos de importancia por el número de impactos. Los resultados del relativo parcial servirán para la caracterización de los impactos según los criterios establecidos en la *Tabla 35*. Los impactos podrán ser:

- **Compatibles:** El medio se recupera después del impacto sin necesidad de ayuda.
- **Moderados:** El medio se recupera por sí solo con el tiempo, por lo que no es necesario aplicar medidas correctoras.
- **Severos:** El medio no se recupera solo por lo que se deben aplicar medidas correctoras.
- **Críticos:** El medio no se recupera, aunque se apliquen medidas correctoras.

*Tabla 35. Criterios de caracterización de los impactos (Fuente: elaboración propia).*

CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO					
			TIPO	COLOR	
Menor que	0	24,99	COMPATIBLE		Sin medidas correctoras
Entre	25	49,99	MODERADO		Sin medidas correctoras
Entre	50	74,99	SEVERO		Medidas correctoras
Mayor que	75		CRÍTICO		No debe llevarse a cabo

Tras el cálculo del relativo parcial se observa que la mayoría de los impactos son de tipo moderado y los impactos que afectan a la población son de tipo compatible ya que se

tratan de impactos positivos (*Tabla 36*). Por lo tanto, en la construcción y en la fase de funcionamiento de la planta de compostaje no es necesario establecer medidas correctoras ya que la mayoría de los impactos son de tipo moderado y el medio puede recuperarse por sí solo con el tiempo. Sin embargo, es recomendable establecer medidas preventivas o compensatorias para reducir los impactos.

*Tabla 36. Caracterización de los impactos (Fuente: elaboración propia)*

Factores ambientales	Número de impactos	Subtotal Absoluto	Subtotal Máximo	Relativo parcial	Tipo de impacto	Color
<b>Agua</b>	2	-9	28	32,143	Moderado	Blue
<b>Aire</b>	2	-12	28	42,857	Moderado	Blue
<b>Suelo</b>	4	-18	56	32,143	Moderado	Blue
<b>Ruido</b>	9	-40	126	31,746	Moderado	Blue
<b>Olores</b>	4	-17	56	30,357	Moderado	Blue
<b>Medio natural</b>	3	-17	42	40,476	Moderado	Blue
<b>Paisaje</b>	5	-29	70	41,429	Moderado	Blue
<b>Población</b>	2	12	28	42,857	Compatible	Green

Tabla 37. Matriz de identificación de impactos (Fuente: elaboración propia)

Factores ambientales	Acciones fase de construcción				Fase de funcionamiento						
	Construcción de muros y cubiertas	Movimiento de tierras	Desbroce de la vegetación	Instalación de equipos	Entrada de camiones	Pesaje de los camiones	Formación de pilas para mezclado	Llenado de los compostadores	Recogida del compost y formación de pilas de maduración	Afino del compost	Recogida de lixiviados
Agua	x				x						
Aire	x	x			x						
Suelo	x	x	x		x						
Ruido	x	x	x	x	x	x		x	x	x	
Olores							x		x	x	x
Medio natural	x	x	x								
Paisaje	x	x	x				x		x		
Población	x	x									

Tabla 38. Matriz de importancia (Fuente: elaboración propia)

Factores ambientales	Acciones fase de construcción				Fase de funcionamiento						
	Construcción de muros y cubiertas	Movimiento de tierras	Desbroce de la vegetación	Instalación de equipos	Entrada de camiones	Pesaje de los camiones	Formación de pilas para mezclado	Llenado de los compostadores	Recogida del compost y formación de pilas de maduración	Afino del compost	Recogida de lixiviados
Agua	-6				-3						
Aire		-6			-6						
Suelo	-4	-7	-3		-4						
Ruido	-3	-6	-3	-3	-7	-3		-4	-4	-7	
Olores							-4		-6	-3	-4
Medio natural	-5	-5	-7								
Paisaje	-8	-3	-9				-3		-6		
Población	6	6									

#### 7.4 Medidas preventivas y compensatorias

Tras realizar la valoración de los impactos se determinan las diferentes medidas preventivas o compensatorias para cada factor ambiental cuyo valor de importancia es negativo (*Tabla 39*), analizando los impactos que producen las acciones de la fase de construcción y de funcionamiento sobre los siguientes factores:

- Aire: El aire puede verse afectado por la maquinaria utilizada en la planta de compostaje durante la construcción de la planta mediante la emisión de gases contaminantes. Además, el movimiento de tierras que se produce durante la construcción aumenta en polvo en la atmósfera generando contaminación del aire por partículas de pequeño tamaño. En la fase de operación la maquinaria también puede fomentar la contaminación atmosférica, ya que la era de maduración y la balsa de lixiviados emiten gases que pueden contaminar la atmósfera. Por lo tanto, la producción de compost se incluye en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad de aire y protección de la atmósfera como actividad potencialmente contaminante del aire [106].
- Como medidas preventivas para garantizar la calidad del aire se evitará las labores de movimiento de tierras durante la fase de construcción en los días con mayor velocidad de viento para evitar levantar grandes cantidades de polvo. Para reducir la emisión de gases de efecto invernadero se utilizará un único vehículo de transporte en toda la planta de compostaje al tratarse de una planta de pequeño tamaño.
- Ruido: Los trabajos diarios durante la construcción y el funcionamiento de la planta de compostaje puede generar ruido en los alrededores por el uso de la maquinaria. Al elegirse una zona apartada de las zonas habitadas, el ruido no supondrá ningún problema ya que no causará problemas a la población. Sin embargo, deberá limitarse el ruido ocasionado según la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido donde se establece que no deben superarse los 95 dB en el exterior durante las actividades de la planta [107]. Como medida preventiva se establece la planta en un sitio alejado de la población y se limitará la emisión de ruido según la ley de ruido.
- Olores: La generación del compost puede provocar la proliferación de malos olores en la zona de compostaje y en la era de maduración. La medida preventiva consistirá en situar las pilas de maduración de forma que la dirección del viento predominante se lleve los olores a las zonas sin población.
- Suelo: El paso de la maquinaria durante la construcción y la fase de funcionamiento puede provocar la erosión y pérdida del suelo. Además, pueden derramarse lixiviados y líquidos procedentes de la maquinaria provocando la contaminación del suelo. Para evitar la contaminación del suelo se impermeabiliza el suelo en las zonas donde se van a producir lixiviados y se comprueba el estado de la maquinaria periódicamente para evitar vertidos al suelo.
- Agua: Durante la construcción de la planta el único riesgo de contaminación del agua se debe al vertido de líquidos contaminantes usados en la maquinaria por lo que se debe llevar un control del mantenimiento de la maquinaria. En el caso de la fase de funcionamiento no solo existe el riesgo mencionado anteriormente, si no que, los lixiviados pueden derramarse y llegar a las aguas subterráneas y contaminarlas. Las medidas preventivas establecidas en este caso son las mismas que las medidas establecidas para la protección del suelo.

- **Población:** Los impactos producidos sobre la población son en general positivos al aumentar los puestos de trabajo en la construcción y en la fase de funcionamiento. Además, la valorización de los residuos generará ingresos a los agricultores de cereal al tener que comprar paja de cereal para realizar el co-compostaje.
- **Medio natural:** Al tratarse de una parcela de cultivo que no se utiliza habrá que desbrozar toda la superficie para iniciar la construcción de la planta. Al tratarse de especies comunes y no amenazadas los impactos pueden compensarse mediante la implantación de algunas especies de árboles y arbustos en la planta de compostaje.
- **Paisaje:** El paisaje es uno de los factores más afectados ya que la construcción de la planta cambia totalmente la percepción del paisaje. Para minimizar este impacto se ha elegido una zona sin especial interés paisajístico para la población, alejado de los núcleos de población y con edificaciones de poco tamaño para que no destaquen demasiado.

Tabla 39. Medidas preventivas y compensatorias (Fuente: elaboración propia).

Factores ambientales	Medida preventiva	Medida compensatoria
<b>Agua</b>	Impermeabilización del suelo	
	Mantenimiento de la maquinaria	
<b>Aire</b>	Evitar movimiento de tierra con mucho viento	
	Un solo tractor	
<b>Suelo</b>	Impermeabilización del suelo	
	Mantenimiento de la maquinaria	
<b>Ruido</b>	Planta alejada de la población	
<b>Olores</b>	Orientación de las pilas de maduración hacia zonas despobladas	
<b>Medio natural</b>		Implantación de árboles y arbustos
<b>Paisaje</b>	Zona sin especial interés paisajístico	
	Alejado de los núcleos de población	
	Edificaciones de poco tamaño	

## 8. Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Máster se ha dimensionado una planta para la valorización de residuos hortofrutícolas generados en la provincia de Valladolid mediante un proceso de compostaje. Para ello se ha partido de una búsqueda bibliográfica sobre los métodos de valorización de los residuos hortofrutícolas mediante compostaje y digestión anaerobia. Tras analizar todas las ventajas, desventajas y características de los métodos planteados, se elige el método de compostaje como el más adecuado ya que es el más sencillo y el que mejor se adapta a las condiciones de la zona elegida para establecer la planta de tratamiento (Laguna de Duero).

La planta de compostaje contará con una superficie construida de 5.260,6 m<sup>2</sup> y se realizará un co-compostaje de los residuos de patata y zanahoria con paja de cereal con el fin de ajustar la relación C/N. El flujo de residuos total a tratar en la planta es de 11.677,6 kg/día. El volumen de tratamiento de la planta será por lo tanto de 42,46 m<sup>3</sup>/día. La paja de cereal necesaria será de 5 pacas/día lo que suponen 1.000 kg/día.

El proceso de compostaje se realizará mediante 5 compostadores rotativos cuyo tiempo de residencia es de 6 días y posteriormente se procederá a madurar el compost en pilas de 2 m de alto, 4 m de ancho y 10 m de largo durante 90 días. Para facilitar la aireación de las pilas de maduración se voltearán una vez al mes. Los lixiviados procedentes del proceso se deben recoger adecuadamente y almacenar para ser recogidos por un gestor de residuos. El volumen de compost final generado se estima en 14 m<sup>3</sup>/día. Este compost se cribará para cumplir las especificaciones necesarias para la venta del fertilizante.

El estudio de viabilidad económica realizado mediante el cálculo de los costes inmovilizados y los costes de operación establece una inversión inicial de 693.465 €. Los costes que genera la planta durante su funcionamiento son de 1.103.004 €. La venta del nuevo fertilizante a un precio de 0,30 €/l genera unos ingresos anuales de 1.399.980 €, por lo que la inversión se recuperará entre los 2 o 3 años. Mediante el análisis de sensibilidad donde se varía el precio del fertilizante se observa que el precio mínimo para que la planta sea rentable es de 0,265 €/l y que por encima de dicho precio la planta es rentable.

La evaluación ambiental realizada no muestra impactos significativos y la mayoría de los impactos que se producen pueden compensarse o prevenirse en mayor o menor medida. Por lo tanto, ambientalmente la construcción de la planta de compostaje es viable.

En general, se puede concluir que la construcción de la planta de compostaje sería beneficioso para la zona al dar solución a la generación de gran cantidad de residuos procedentes de la industria alimentaria y generar además un beneficio económico a partir de la venta del compost final. Además, esta planta podría ampliarse en el futuro para albergar mayor cantidad de residuos, pudiendo adaptarse a otro tipo de desechos ya que el método de compostaje elegido puede utilizarse para todo tipo de residuos orgánicos.

## 9. Bibliografía

- [1] “Informe anual de la industria alimentaria española periodo 2020-2021 ministerio de agricultura, pesca y alimentación dirección general de la industria alimentaria subdirección general de competitividad de la cadena alimentaria” [Consultado el 5 de marzo de 2022]. Disponible en: [https://public.tableau.com/views/CCAA\\_4/Dashboard1?:showVizHome=no&:embed=true](https://public.tableau.com/views/CCAA_4/Dashboard1?:showVizHome=no&:embed=true)
- [2] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. “Anuario de Estadística,” 2020. [Consultado el 3 de marzo de 2022] Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/default.aspx>
- [3] Invest in Spain, “Industria agroalimentaria.” [Consultado el 5 de marzo de 2022] Disponible en: <https://www.investinspain.org/es/sectores/industria-agroalimentaria>
- [4] Instituto nacional de estadística (INE), “Sección prensa / Índice de Producción Industrial (IPI),” 2022. [Consultado el 6 de marzo de 2022]. Disponible en: [https://www.ine.es/prensa/ipi\\_prensa.htm](https://www.ine.es/prensa/ipi_prensa.htm)
- [5] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, “Informe del sector frutas y hortalizas (Oferta, Distribución y Demanda),” 2004.
- [6] Mentta, “La fruta y verdura de destrío” 2017. [Consultado el 10 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.mentta.com/blog/que-es-la-fruta-y-verdura-de-destrio/>
- [7] Pse probiogas, “Cuantificación de materias primas de origen vegetal,” 2010. [Consultado el 10 de marzo de 2022]. Disponible en: [http://213.229.136.11/bases/ainia\\_probiogas.nsf/0/D06E61BC808DB150C125753F00572938/\\$FILE/Inf\\_cuantificacion\\_vegetal\\_11-03-2010.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/D06E61BC808DB150C125753F00572938/$FILE/Inf_cuantificacion_vegetal_11-03-2010.pdf)
- [8] H. P. Vu, L. N. Nguyen, J. Zdzarta, T. Jesionowski, y L. D. Nghiem, 2021. “Valorizing agricultural residues as biorefinery feedstocks: current advancements and challenges,” *Clean Energy and Resources Recovery*, pp. 25–48, doi: 10.1016/B978-0-323-85223-4.00021-X.
- [9] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente “Producción y consumo sostenible y residuos agrarios,” 2012. [Consultado el 15 de marzo de 2022]. Disponible en: <http://publicacionesoficiales.boe.es/>
- [10] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, “*ORDEN de 26 de marzo de 1986 por la que se modifican los anejos I y II de la Orden de Agricultura de 23 de junio de 1976 ((Boletín Oficial del Estado" de 6 de septiembre). sobre autorización y registro de las sustancias y productos que intervienen en la alimentación de los animales*”, 1986.: [Consultado el 30 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/1986/04/14/pdfs/A13095-13108.pdf>
- [11] M. Garmendia Belascoain, “Estimación de la generación de residuos y subproductos en la industria alimentaria en Navarra,” 2021. [Consultado el 30 de abril de 2022]. Disponible en: <https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/40350>
- [12] Diario oficial de la Unión Europea, “*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*”, 2018. [Consultado el 12 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2018/150/L00109-00140.pdf>
- [13] AINIA, “Aprovechamiento de residuos en la industria alimentaria: Biogás agroindustrial,” 2011. [Consultado el 8 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.ainia.es/ainia-news/aprovechamiento-de-residuos-en-la-industria-alimentaria-biogas-agroindustrial/>

- [14] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, “Producción y consumo sostenible y residuos agrarios,” 2012. [Consultado el 11 de marzo de 2022] [https://www.miteco.gob.es/images/es/Residuos%20agrarios\\_tcm30-193059.pdf](https://www.miteco.gob.es/images/es/Residuos%20agrarios_tcm30-193059.pdf)
- [15] Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, “Manual de compostaje.” [Consultado el 13 de marzo de 2022]. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/images/es/Manual%20de%20compostaje%202011%20PAGINAS%201-24\\_tcm30-185556.pdf](https://www.miteco.gob.es/images/es/Manual%20de%20compostaje%202011%20PAGINAS%201-24_tcm30-185556.pdf)
- [16] V. Ascolani, “¿Qué es vermicompostaje?”, 2020. [Consultado el 13 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://francamagazine.com/vermicompostaje/>
- [17] Diario Oficial de la Unión Europea, “Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos. Diario oficial de la Unión Europea”, 2018. [Consultado el 30 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2018/150/L00100-00108.pdf>
- [18] R. Docampo, “Guía del compostaje en pequeña escala,” 2014, vol. 38, pp. 46–49, Sep.
- [19] F. Laich, C. el Boquerón, S. Guerra, C. Santa, y T. De, “El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje,” 2011.
- [20] P. Bueno Márquez, M. Jesús, D. Blanco, y F. Cabrera Capitán, “Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje”.
- [21] TOGO, “Máquina de compostaje de residuos orgánicos.” [Consultado el 17 de marzo de 2022]. Disponible en: [https://togohb.com/es/food-waste-composting/?gclid=Cj0KCQjwuMuRBhCJARIsAHXdnqOfUtYalAEZNRgGY6kzRTgvQ90o v8JmnIEtF5FwkCiz6TiayTYQsgYaAlr7EALw\\_wcB](https://togohb.com/es/food-waste-composting/?gclid=Cj0KCQjwuMuRBhCJARIsAHXdnqOfUtYalAEZNRgGY6kzRTgvQ90o v8JmnIEtF5FwkCiz6TiayTYQsgYaAlr7EALw_wcB)
- [22] TOGO, “Máquina de fertilizante para compostaje de alimentos - Sistema de compostaje de residuos orgánicos.” [Consultado el 12 de abril de 2022]. Disponible en: <https://togohb.com/es/product/food-composting-fertilizer-machine/>
- [23] Solarsom, “Compostaje industrial por sistema de vaso.” [Consultado el 30 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.ison21.es/compostaje-industrial-en-vaso/>
- [24] Retema, “Ritorna presenta su compostera electromecánica: la solución definitiva para el compostaje de biorresiduos,” pp. 10–11, Apr. 2022. [Consultado el 24 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.retema.es/noticia/ritorna-presenta-su-compostera-electromecanica-la-solucion-definitiva-para-el-compost-uZZAT>
- [25] F. Michel, T. O'Neill, R. Rynk, M. Bryant-Brown, V. Calvez, J. Li y J. Paul, “Contained and in-vessel composting methods and methods summary,” 2022. The Composting Handbook, pp. 271–305, doi: 10.1016/B978-0-323-85602-7.00009-1.
- [26] F. Michel, T. O'Neill, R. Rynk, J. Gilbert, S. Wisbaum, y T. Halbach, “Passively aerated composting methods, including turned windrows,” 2022. The Composting Handbook, pp. 159–196, doi: 10.1016/B978-0-323-85602-7.00002-9.
- [27] F. Michel, T. O'Neill, R. Rynk, J. Gilbert, M. Smith, J. Aber y H. Keener, “Forced aeration composting, aerated static pile, and similar methods,” 2022. The Composting Handbook, pp. 197–269, doi: 10.1016/B978-0-323-85602-7.00007-8.
- [28] J. Mamani, F. Llumipanta, S. Ramos, J. Rea, J. Alucho, D. Saltos, F. Llanos y C. Jácome, “Sistemas de producción de biogás: fundamento, técnicas de mejora, ventajas y desventajas,” *Agroindustrial Science*, vol. 11, pp. 239–247, 2021.
- [29] D. Elalami y A. Barakat, “State of the art of energy production from agricultural residues using thermochemical and biological processes,” 2021. *Clean Energy and Resources Recovery*, pp. 1–24, doi: 10.1016/B978-0-323-85223-4.00008-7.

- [30] E. A. Reyes Aguilera, “Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos,” 2017. [Consultado el 20 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.camjol.info/index.php/FAREM/article/view/5552/5248>
- [31] P. Estevan y C. Virginia “Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás”. [Consultado el 20 de abril de 2022]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68331/Palau%20-%20Digesti%C3%B3n%20anaerobia%20de%20residuos%20de%20biomasa%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s.%20Fundamentos..pdf?sequence=1#:~:text=La%20digesti%C3%B3n%20anaerobia%20produce%20biog%C3%A1s,como%20fertilizante%20en%20suelos%20agr%C3%ADcolas.>
- [32] FAO, “Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores.” [Consultado el 17 de mayo de 2022]. Disponible en: [http://www.probiomasa.gob.ar/\\_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf](http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf)
- [33] S. O’Connor, E. Ehimen, S. C. Pillai, A. Black, D. Tormey, y J. Bartlett, “Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms,” 2021. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 139, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110580.
- [34] Enerpedia, “Small-scale anaerobic digestion: case studies in Western Europe,” 2015. [Consultado el 30 de abril de 2022]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/286052741\\_Small-scale\\_anaerobic\\_digestion\\_case\\_studies\\_in\\_Western\\_Europe?channel=doi&linkId=5665ac8208ae4931cd624a31&showFulltext=true](https://www.researchgate.net/publication/286052741_Small-scale_anaerobic_digestion_case_studies_in_Western_Europe?channel=doi&linkId=5665ac8208ae4931cd624a31&showFulltext=true)
- [35] M. Doms, H. Benbelkacem, y P. Buffière, “High solid temperature phased anaerobic digestion from agricultural wastes: Putting several reactors in sequence,” 2018. *Biochemical Engineering Journal*, vol. 130, pp. 21–28, doi: 10.1016/J.BEJ.2017.11.011.
- [36] E. Martínez Tobía, “Producción de biogás y fertilizantes a partir de residuos vitivinícolas mediante digestión anaerobia,” 2019.
- [37] AINIA, “Valorización energética: producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales.” [Consultado el 20 de abril de 2022]. Disponible en: <https://docplayer.es/22188148-Valorizacion-energetica-produccion-de-biogas-mediante-co-digestion-anaerobia-de-residuos-subproductos-organicos-agroindustriales.html>
- [38] R. M. Dinsdale, G. C. Premier, F. R. Hawkes, y D. L. Hawkes, “Two-stage anaerobic co-digestion of waste activated sludge and fruit/vegetable waste using inclined tubular digesters,” 2000. *Bioresource Technology*, vol. 72, no. 2, pp. 159–168, doi: 10.1016/S0960-8524(99)00105-4.
- [39] Proveedores, “Proveedores de Verduras.” [Consultado el 2 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.proveedores.com/verduras/>
- [40] R. Rynk, M. Schwarz, T. L. Richard, M. Cotton, T. Halbach, y S. Siebert, “Compost feedstocks,” 2022. *The Composting Handbook*, pp. 103–157, doi: 10.1016/B978-0-323-85602-7.00005-4.
- [41] Ministerio de agricultura pesca y alimentación, “Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios.” [Consultado el 3 de junio de 2022] Disponible en: <https://sig.mapama.gob.es/siga/>
- [42] Sede Electrónica del Catastro, “Consulta y certificación de Bien Inmueble.” [Consultado el 22 de junio de 2022] Disponible en: <https://www1.sedecatastro.gob.es/CYCBienInmueble/OVCCConCiud.aspx?del=47&mun=77&>

[UrbRus=R&RefC=47077A009001140000UI&Apenom=&esBice=&RCBice1=&RCBice2=&DenoBice=&from=nuevoVisor&ZV=NO&anyoZV=](#)

[43] Comefruta, “Temporada de zanahorias en España” [Consultado el 3 de junio de 2022]. Disponible en: <https://comefruta.es/temporada-de-zanahorias>

[44] Patatas Hijo Lusa, “¿Cuándo es temporada de patata en España?”. [Consultado el 3 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.hijolusa.es/cuando-es-temporada-de-patata-en-espana>

[45] V. Lipinski, “Manual de producción de zanahoria,” 2012. [Consultado el 5 de junio de 2022]. Disponible en: <https://inta.gov.ar/documentos/manual-de-produccion-de-zanahoria/view>

[46] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, “Biorresiduos.” [Consultado el 17 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/biorresiduos/Biorresiduos-Que-caracteristicas-tienen.aspx#:~:text=Tiene%20una%20densidad%20bastante%20elevada,en%20general%20una%20baja%20compactabilidad>

[47] F. Garía, P. Gil, y A. Carrillo, “Caracterización y calidad de un abono orgánico fermentado aof preparado con residuos del proceso de industrialización de la papa (*Solanum tuberosum* L),” 2009. *Losgos ciencia y tecnología*, doi: <https://doi.org/10.22335/rlct.v1i1.35>.

[48] “Relación carbono nitrógeno (c/n) en los abonos orgánicos.” [Consultado el 15 de junio de 2022]. Disponible en: <https://urbanisme.paeria.es/sostenibilitat/fitxers/a21e/RelacioicalculCN.pdf>

[49] Sustainable sanitation and water management toolbox, “Co-compostaje.” [Consultado el 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/co-compostaje>

[50] Ministerio de la presidencia, “*Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes*”, 2013. Boletín oficial del estado. [Consultado el 14 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-7540-consolidado.pdf>

[51] Dialnet, “Co-compostaje de residuos ganaderos y vegetales: optimización del proceso y evolución de la materia orgánica en diferentes escenarios” [Consultado el 15 de junio de 2022]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=60920>

[52] Hidraqua, “Congreso nacional del agua,” 2019.

[53] FAO, “Manual de compostaje del agricultor,” 2013. [Consultado el 15 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i3388s/I3388S.pdf>

Flintec, “Básculas para vehículos.” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: <https://flintec.es/basculas-industriales/basculas-para-vehiculos.html>

[54] Junta de Castilla y León, “3. Estadísticas ganaderas”, 2020. [Consultado el 15 de junio de 2022]. Disponible en: <https://agriculturaganaderia.jcyl.es/web/es/estadisticas-ganaderas-2020.html>

[55] Nestlé, “Cereales de Invierno.” [Consultado el 15 de junio de 2022]. Disponible en: <https://nestlefamilyclub.es/articulo/cereales-de-invierno-y-de-verano-conoce-sus-diferencias>

[56] Agromática, “Estiércol de oveja. Composición y aplicación.” [Consultado el 6 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.agromatica.es/estiercol-de-oveja/>

[57] Compostando ciencia, “Materiales para compostar: estiércol de vaca” [Consultado el 6 de junio de 2022]. Disponible en: <http://www.compostandociencia.com/2019/08/materiales-para-compostar-estiercol-de-vaca/>

- [58] M. J. Negro, F. Villa, J. Aibar, R. Aracón, P. Ciria, M. V. Cristóbal, A. Benito, A. García Martín, G. García Muriedas, C. Labrador, C. Lacasta Dutoit, J. A. Lezaún, R. Meco, G. Pardo, M.L. Solano, C. Torner, y C. Zaragoza, “Producción y gestión del compost”.
- [59] Fedna, “Patata dulce o batata” [Consultado el 30 de mayo de 2022]. Disponible en: [http://www.fundacionfedna.org/ingredientes\\_para\\_piensos/patata-dulce-o-batata](http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/patata-dulce-o-batata)
- [60] R. Alvarez, “BALANCE DE NITRÓGENO EN CULTIVOS DE TRIGO”.
- [61] J.M. Mangado Urdániz, A. Sanz Olleta, y B. Soret Lafraya, “Producción de purines en Vacuno de leche,” 2006.
- [62] Consejería Fomento Y Medio Ambiente, “*Declaración de Impacto Ambiental sobre el proyecto de planta de valorización agroambiental de residuos no peligrosos, en el término municipal de Dueñas (Palencia), promovido por «Valorizaciones Orgánicas Agrícolas, S.L.»*”. 2018, pp. 8803–8819.
- [63] Consejería de fomento y medio ambiente, “Resolución de 11 de noviembre de 2020, de la Delegación Territorial de Palencia, por la que se hace público el informe de impacto ambiental del proyecto de una planta de reciclaje de restos de poda forestal, jardinería y demás restos de la producción en un vivero de plantas y flores, promovido por «Viveros Pisuerga, S.L.», en el término municipal de Herrera de Pisuerga (Palencia).”, 2020. *Boletín oficial de Castilla y León*.
- [64] Servicio Territorial de Medio Ambiente de Valladolid, “Resolución de 31 de julio de 2014, de la Delegación Territorial de Valladolid, por la que se formula la Declaración de Impacto Ambiental del Proyecto de centro de compostaje de estiércol y otras materias orgánicas, en el término municipal de La Parrilla (Valladolid).”, 2014. *Boletín oficial de Castilla y León*.
- [65] Consejería de fomento y medio ambiente, “Resolución de 14 de febrero de 2020, de la Dirección General de Calidad y Sostenibilidad Ambiental, por la que se dicta la declaración de impacto ambiental sobre el proyecto de planta de compostaje en el término municipal de Santas Martas (León), promovido por «Agro Gestión Integral, Sociedad Cooperativa””. 2020, pp. 9123–9144.
- [66] Maquituls, “Las alpacas de paja, ‘subproducto’ de la recolección del cereal.” [Consultado el 16 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.maquituls.es/noticias/alpacas-de-paja-pacas-de-paja/>
- [67] FEDNA, “Paja de cereales (trigo y cebada).” [Consultado el 25 de mayo de 2022]. Disponible en: [http://www.fundacionfedna.org/ingredientes\\_para\\_piensos/paja-de-cereales-trigo-y-cebada](http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/paja-de-cereales-trigo-y-cebada)
- [68] Infoagro, “Agricultura. El cultivo de la zanahoria.” [Consultado el 30 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.infoagro.com/hortalizas/zanahoria.htm>
- [69] Ministerio de la Presidencia, “Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo”, 2010. [Consultado el 15 de junio de 2022]. Disponible en <https://www.boe.es/buscar/pdf/2010/BOE-A-2010-11153-consolidado.pdf>
- [70] Jefatura del estado, “Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental”, 2013. [Consultado el 24 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-12913-consolidado.pdf>
- [71] Comunidad de Castilla y León, “Decreto legislativo 1/2015, de 12 de noviembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Prevención Ambiental de Castilla y León”. 2015. [Consultado el 13 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2015/BOCL-h-2015-90590-consolidado.pdf>

- [72] Consejería de fomento y medio ambiente, *Requisitos técnicos para instalaciones de compostaje de residuos*.
- [73] Flintec, “Básculas para vehículos.” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: <https://flintec.es/basculas-industriales/basculas-para-vehiculos.html>
- [74] Coparm, “Trituradora serie TR100, trituradoras industriales, trituradoras para reciclaje.” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: <http://coparm.es/trituradoras/trituradora-serie-tr100/>
- [75] Uva, “Diseño de una instalación de compostaje de residuos orgánicos para obtener fertilizantes de uso agrícola.” [Consultado el 27 de junio de 2022]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/46553/TFG-I-1814.pdf;jsessionid=2884043B4F2F0A59047FC2BB7696AA84?sequence=1>
- [76] Ison21, “Compostaje industrial por sistema de vaso.” [Consultado el 9 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.ison21.es/wp-content/uploads/2017/06/Catalogo-Volcomp-2016.pdf>
- [77] Sigre, “¿Cuánto tardan los residuos en descomponerse?” [Consultado el 18 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.blogsigre.es/2015/05/25/cuanto-tardan-residuos-descomponerse/>
- [78] M. Reyes Medina, “Lixiviados en plantas de residuos.” Universidad politécnica de Valencia. [Consultado el 19 de junio de 2022]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/56763/REYES%20-%20Lixiviados%20en%20plantas%20de%20residuos.%20Una%20contribuci%C3%B3n%20para%20la%20selecci%C3%B3n%20del%20proceso%20de%20trat...pdf?sequence=1>
- [79] Climate-Data, “Clima Laguna de Duero: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Laguna de Duero”. [Consultado el 19 de junio de 2022]. Disponible en: <https://es.climate-data.org/europe/espana/castilla-y-leon/laguna-de-duero-10750/>
- [80] John Deere “Tractores Utilitarios”. [Consultado el 19 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.deere.es/es/tractores-utilitarios/>
- [81] Coparm, “Cintas transportadoras de cadena, cintas transportadoras de residuos, cintas transportadoras para reciclaje.” [Consultado el 20 de junio de 2022]. Disponible en: <http://coparm.es/cintas-transportadoras/cintas-transportadoras-de-cadena/>
- [82] Compost systems, “Estación de cribado.” [Consultado el 20 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.compost-systems.com/es/products/machine-technology/estacion-de-cribado>
- [83] Generador de precios de la construcción, “Precio en España de m<sup>2</sup> de Solera de hormigón”. [Consultado el 23 de junio de 2022]. Disponible en: [http://www.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/calculaprecio.asp?Valor=2|0|1|ANS010|ans\\_010:5c8\\_0\\_4\\_3\\_3\\_0\\_1\\_1c3\\_0\\_1c6\\_0\\_4\\_1#gsc.tab=0](http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/calculaprecio.asp?Valor=2|0|1|ANS010|ans_010:5c8_0_4_3_3_0_1_1c3_0_1c6_0_4_1#gsc.tab=0)
- [84] Generador de precios de la construcción, “Precio en España de m<sup>2</sup> de Cubierta inclinada de chapa de acero”. [Consultado el 23 de junio de 2022]. Disponible en: [http://www.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/Cubiertas/Inclinadas/Chapas\\_de\\_acero/Cubierta\\_inclinada\\_de\\_chapa\\_de\\_acero\\_0\\_0\\_1\\_0\\_1\\_0.html#gsc.tab=0](http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Cubiertas/Inclinadas/Chapas_de_acero/Cubierta_inclinada_de_chapa_de_acero_0_0_1_0_1_0.html#gsc.tab=0)
- [85] Generador de precios de la construcción, “Precio en España de m<sup>2</sup> de Impermeabilización, drenaje, aireación y desolidarización bajo suelo cerámico o de piedra natural” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: [http://www.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/Aislamientos\\_e\\_impermeabilizaciones/Impermeabilizaciones/Suelos/NIN100\\_Impermeabilizacion\\_drenaje\\_aireac.html#gsc.tab=0](http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Aislamientos_e_impermeabilizaciones/Impermeabilizaciones/Suelos/NIN100_Impermeabilizacion_drenaje_aireac.html#gsc.tab=0)

- [86] Generador de precios de la construcción, “Precio en España de m<sup>3</sup> de Muro de contención de hormigón armado” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: [http://www.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/calculaprecio.asp?Valor=0|0|2|UNM020|unm\\_020: 0 0 2|unm\\_020\\_hormigon:c5 0 1 0 1 0 1 0 0 2 4 3 3 0 1c3 0 5|csv\\_cuan%20muro cont: 21000|acero%20muro cont: 0 0 0 0 0 0 2 0|hor separadores%20muro cont: 0 0 0 0 0 7 0#gsc.tab=0](http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/calculaprecio.asp?Valor=0|0|2|UNM020|unm_020: 0 0 2|unm_020_hormigon:c5 0 1 0 1 0 1 0 0 2 4 3 3 0 1c3 0 5|csv_cuan%20muro cont: 21000|acero%20muro cont: 0 0 0 0 0 0 2 0|hor separadores%20muro cont: 0 0 0 0 0 7 0#gsc.tab=0)
- [87] Generador de precios de la construcción, “Precio en España de m<sup>3</sup> de Relleno y compactación del terreno de apoyo de la cimentación” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: [http://www.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/Acondicionamiento\\_del\\_terreno/Mejoras\\_de\\_l\\_terreno/Compactaciones/AMC010\\_Relleno\\_y\\_compactacion\\_del\\_terreno\\_.html#gsc.tab=0](http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Acondicionamiento_del_terreno/Mejoras_de_l_terreno/Compactaciones/AMC010_Relleno_y_compactacion_del_terreno_.html#gsc.tab=0)
- [88] Habitissimo, “¿Cuánto cuesta construir un edificio?” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.habitissimo.es/presupuestos/construir-edificio>
- [89] Generador de precios de la construcción, “Precio en España de Ud de Sensores y estaciones meteorológicas. Generador de precios de la construcción. CYPE Ingenieros, S.A.” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: [http://www.generadordeprecios.info/espacios\\_urbanos/Instalaciones/Urbanas/Redes\\_de\\_riego/Sensores\\_y\\_estaciones\\_meteorologicas\\_0\\_0\\_0\\_1\\_0\\_0\\_0\\_0\\_0\\_0\\_0\\_0\\_0.html#gsc.tab=0](http://www.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/Instalaciones/Urbanas/Redes_de_riego/Sensores_y_estaciones_meteorologicas_0_0_0_1_0_0_0_0_0_0_0_0_0.html#gsc.tab=0)
- [90] Tractores y máquinas, “¿Cuánto cuesta un John Deere? Precios Nuevos y de Ocasión.” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en <https://www.tractoresymaquinas.com/precios-tractores-john-deere-nuevos-y-ocasion/>
- [91] Alibaba, “Compostadores industriales” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/g/industrial-composters.html>
- [92] Certicalia, “Precio Plan de seguridad y salud” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en <https://www.certicalia.com/precio/plan-de-seguridad-y-salud>
- [93] Generador de precios de la construcción “Precio en España de Ud de Depósito de almacenamiento de aguas residuales” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: [http://www.generadordeprecios.info/espacios\\_urbanos/Instalaciones/Urbanas/Tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales/IUE010\\_Deposito\\_de\\_almacenamiento\\_de\\_aguas.html#gsc.tab=0](http://www.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/Instalaciones/Urbanas/Tratamiento_de_aguas_residuales/IUE010_Deposito_de_almacenamiento_de_aguas.html#gsc.tab=0)
- [94] Tarifaluz, “Precio de la tarifa de luz” [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: <https://tarifasgasluz.com/pymes/tarifas-luz>
- [95] AgroAnuncios, “Pacas de paja. Paja y forraje. Venta de Paja y forraje.” [Consultado el 26 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.agroanuncios.es/anuncios/paja-y-forraje/pacas-de-paja.html>
- [96] Limusa, “Pliego de prescripciones técnicas para la contratación del servicio de retirada, transporte y tratamiento de lixiviados del centro de gestión de residuos de lorca (murcia), correspondiente al expediente de contratación núm. 6/2020”. [Consultado el 26 de junio de 2022]. Disponible en: <https://limusa.es/wp-content/uploads/2020/06/Expdte-06-2020-PPT.pdf>
- [97] Dieselogasolina, “Precio gasóleo B o agrícola.” [Consultado el 26 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.dieselogasolina.com/precio-del-gasoleo-b-o-agricola.html>
- [98] Gobierno del principado de Asturias, “Compostaje”, [Consultado el 3 de julio de 2022]. Disponible en: <https://www.cogersa.es/metaspaces/portal/14498/19176>
- [99] Nayade, “Red natura 2000 (zapa y lic) de castilla y león provincia n<sup>o</sup> superficie (ha) % de superficie provincial,” 2006. [Consultado el 5 de julio de 2022]. Disponible en: [www.nayade.es](http://www.nayade.es)

- [100] Foro-ciudad, “Habitantes Laguna de Duero 1900-2021.” [Consultado el 5 de julio de 2022]. Disponible en: <https://www.foro-ciudad.com/valladolid/laguna-de-duero/habitantes.html#EvolucionTabla>
- [101] Climate-Data, “Clima Laguna de Duero: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Laguna de Duero - Climate-Data.org.” [Consultado el 5 de julio de 2022]. Disponible en: <https://es.climate-data.org/europe/espana/castilla-y-leon/laguna-de-duero-10750/>
- [102] Anthos. “Sistema de información sobre las plantas de España”. [Consultado el 5 de julio de 2022]. Disponible en: <http://www.anthos.es/>
- [103] Ayuntamiento de Laguna de Duero. [Consultado el 5 de julio de 2022]. Disponible en: <https://www.lagunadeduero.org/descubre-laguna/>
- [104] Igme, “Mapa hidrogeológico de España”. [Consultado el 5 de julio de 2022]. Disponible en: [http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/tematicos/jpgs/Editado\\_Hidrogeologico1000\(2000\).jpg](http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/tematicos/jpgs/Editado_Hidrogeologico1000(2000).jpg)
- [105] A. Garmendia Salvador, A. Salvador Alcaide, C. Crespo Sánchez y L. Garmendia Salvador, 2005. “Evaluación de impacto ambiental”. Editorial Pearson-prentice hall. ISBN: 84-205-4398-5.
- [106] Jefatura del Estado, “Ley 34-2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera”, nº 275.
- [107] Jefatura del Estado, “Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido.”

## 10. Anexos

### 10.1 Anexo 1: Especificaciones técnicas báscula de vehículos SPEED 60-10T (Adaptado de [74])

Especificaciones técnicas báscula de vehículos	
Modelo	SPEED 60-10T
Capacidad (kg)	10.000
Resolución (g)	5.000
Estructura	Vigas ortotrópicas con superficie lagrimada tipo sandwich
Células de carga	4 x Zemic H8C C3
Caja suma	ABS IP-67
Grosor de chapa (mm)	6
Grosor de estructura (mm)	4
Altura mínima (mm)	160
Altura máxima (mm)	170
Dimensiones plataforma (mm)	6.000 x 2.450
Peso (kg)	1.550

### 10.2 Anexo 2 Especificaciones técnicas compostador de Vaso Ison 21 modelo 24.075 (Adaptado de [77])

Especificaciones técnicas compostador Ison 21		Esquema	
<b>Modelo</b>	30.012		
<b>Diámetro</b>	3 m		
<b>Longitud</b>	12 m	<b>Factor de reducción</b>	33%
<b>Potencia Motor eléctrico</b>	25.000 W	<b>Capacidad</b>	30.536 kg
<b>Aireación</b>	Forzada	<b>Producción</b>	16,96 m <sup>3</sup>
<b>Capacidad máxima</b>	50,89 m <sup>3</sup>	<b>Tiempo de compostaje</b>	3 - 6 días

### 10.3 Anexo 3: Especificaciones técnicas tractor John Deere modelo 5.115M (Adaptado de [80])

Marca	Modelo	Especificaciones							
Tractor Jhon Deere	5.115M	<b>Motor</b>	Cilindrada (cm <sup>3</sup> )	4.500	<b>Transmisión</b>	Embrague	Embrague de baño caliente		
			Capacidad de combustible (L)	165		Velocidad (Km/h)	40		
			Compatible con biodiésel			Freno	Disco en baño de aceite		
			Nivel de emisiones	Fase 5V	<b>TDF</b>	Estándar	540E		
			Intervalos de mantenimiento (Horas)	500		Tipo	Circuito abierto		
		<b>Rendimiento</b>	Potencia máxima (kW/CV)	88/120	<b>Sistema hidráulico</b>	Caudal bomba (l/min)	94		
			Potencia nominal (kW/CV)	85/115		Presión hidráulica (bar)	200		
			Régimen nominal (rpm)	2.200		Capacidad máxima elevación (kg)	4.441		
			Par máximo (Nm)	480		Capacidad máxima elevación a 610 mm detrás de enganches	3.062		
		<b>Dimensiones y pesos</b>							
		Simple tracción	Distancia entre ejes (mm)	2.350	Doble tracción	Distancia entre ejes (mm)	2.350		
			Radio de giro (m)	3,85		Radio de giro (m)	4,1		
			Anchura total mínima (mm)	1.725		Anchura total mínima (mm)	1.723		
			Despeje frontal (mm)	480		Despeje frontal (mm)	435		
			Altura total (mm)	2.590		Altura total (mm)	2.590		
			Peso máximo autorizado (kg)	6.000		Peso máximo autorizado (kg)	7.500		

### 10.4 Anexo 4: Especificaciones técnicas pala cargadora (Adaptado de [80])

Marca	Modelo	Especificaciones					
Pala cargadora Jhon Deere	603 M	Cazo	Peso (kg)	216	Tiempos de ciclo	Elevación de la pala (seg)	3,8
			Capacidad de carga a altura máxima (kg)	1.501		Descenso de pala cargadora (seg)	2,5
			Capacidad de carga a 1,5 m de altura (kg)	1.693		Vaciado del cazo (seg)	3,5
			Altura máxima de elevación (mm)	3.753		Retracción del cazo (seg)	4,2
			Alcance nivelado (mm)	3.490	Ángulos del cazo	Ángulo de descarga a altura máxima (grados)	-60
			Alcance descargado (mm)	2.722		Retracción en suelo (grados)	49
			Longitud total (mm)	5.070		ángulo de descarga en suelo (grados)	-98
			Profundidad de excavación (mm)	-235			

