



Figura 7: Planta de Refino del Compost producido (Planta de Estepa).

2.5 Proceso de Compostaje

El compostaje es un proceso biológico, aerobio, dinámico y, por lo tanto, termófilo, que para llevarse a cabo se precisa: materia orgánica, microorganismos y unas condiciones ambientales óptimas para que este proceso de desarrolle con una elevada eficiencia. Las condiciones ambientales en las que se desarrolla el proceso están en constante cambio, como resultado de la acumulación de subproductos de la misma actividad.

Un proceso de compostaje bien controlado y aplicado a los materiales adecuados, permite reducir la humedad, el peso y el volumen de los residuos tratados. Además, produce compost, un producto estabilizado, almacenable y utilizable en suelos agrícolas para mejorar la infiltración y retención de agua, disminuir las diferencias de temperatura, reducir la erosión y aportar nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas.

El compostaje comienza con la entrada de residuos orgánicos, todos ellos colonizados por microorganismos que al tener las condiciones ambientales adecuadas se reproducen y favorecen la aparición de nuevas comunidades microbianas. A partir del incremento de la actividad biológica, aumenta la temperatura del material, provocando la higienización del compost final. La higienización cumple tres objetivos básicos: prevenir el crecimiento de patógenos durante el proceso, destruir los existentes, y evitar la recolonización por los mismos. Sin embargo, una excesiva temperatura podría limitar la actividad microbiana. Por eso, la aireación tiene la función, además de aportar oxígeno, de reducir la temperatura del material.

2.5.1 Compostaje de residuos cítricos

Los residuos de cítricos son residuos orgánicos susceptibles de biodegradarse en cualquier proceso de compostaje. Sin embargo, conviene que el pH de la materia prima sea lo más neutro posible puesto que los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica no toleran valores muy alejados del 7. Si esto se produce, el proceso se detendría o se ralentizaría notablemente.

Por lo general, los residuos de cítricos suelen aportar valores bajos de pH al ser ricos en ácidos orgánicos, de manera que se ponen en riesgo las condiciones óptimas de trabajo de los microorganismos que descomponen

los restos orgánicos. Por lo que para compensar esta acidez, tales residuos se suelen mezclar con residuos de pH complementario o se someten a un proceso de pretratamiento. No obstante, los ácidos orgánicos favorecen la lixiviación de metales pesados (Rosal, 2007), y son una excelente fuente de fósforo y potasio.

Por otra parte, la descomposición de la lignina en un ambiente ácido es un proceso complicado sólo realizado por microorganismos específicos del género *penicillium sp.* Estos microorganismos son capaces de degradar la lignina tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas, a la vez que van consumiendo gran parte de los ácidos orgánicos neutralizando levemente el pH. Sin embargo, la mayoría de estas especies producen una sustancia antibiótica durante el proceso de colonización, por lo que es recomendable iniciar el proceso de compostaje en lugar apartado y luego mezclarlos con el resto de los residuos.

2.5.2 Microbiología y bioquímica en el compostaje

El material a compostar constituye un ecosistema donde las diversas poblaciones microbianas formadas por bacterias, hongos y actinomicetos, degradan la materia orgánica en presencia de oxígeno generando un compost estable e higienizado junto con gases, agua y calor como subproductos de metabolismo celular.

El tipo de microorganismo existente en la pila de compostaje variará en función del estado en el que se encuentre el proceso, es decir, dependerá de las condiciones nutricionales y ambientales generadas a partir de sus propias actividades (Figura 8).

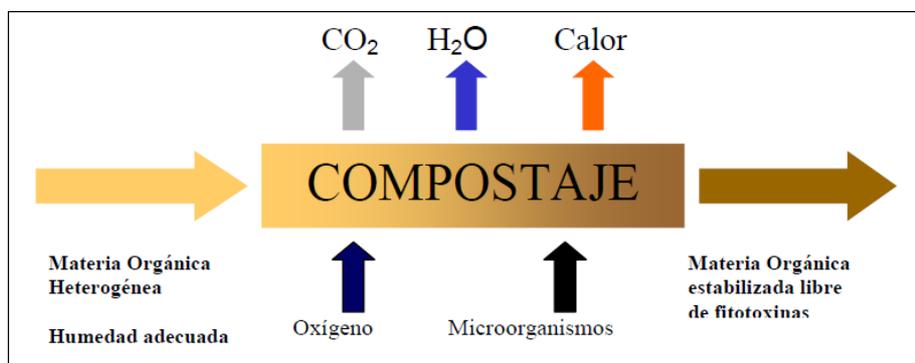


Figura 8: Esquema de un proceso de compostaje (Mohedo, 2002).

- Microorganismos beneficiosos durante el compostaje

Durante la producción de compost, los microorganismos quimioheterótrofos utilizan la materia orgánica como fuente de carbono y energía en presencia de oxígeno, a través de rutas metabólicas, para generar grandes cantidades de poder reductor y energía en forma de ATP. Parte de esta energía generada se disipa en forma de calor, por lo que es importante que el material tenga una estructura apilada y una cantidad mínima de sustrato. En las Figuras 9 y 10 se observa las distintas etapas de la respiración aeróbica llevada a cabo por los microorganismos y la evolución de la materia orgánica a lo largo del compostaje.

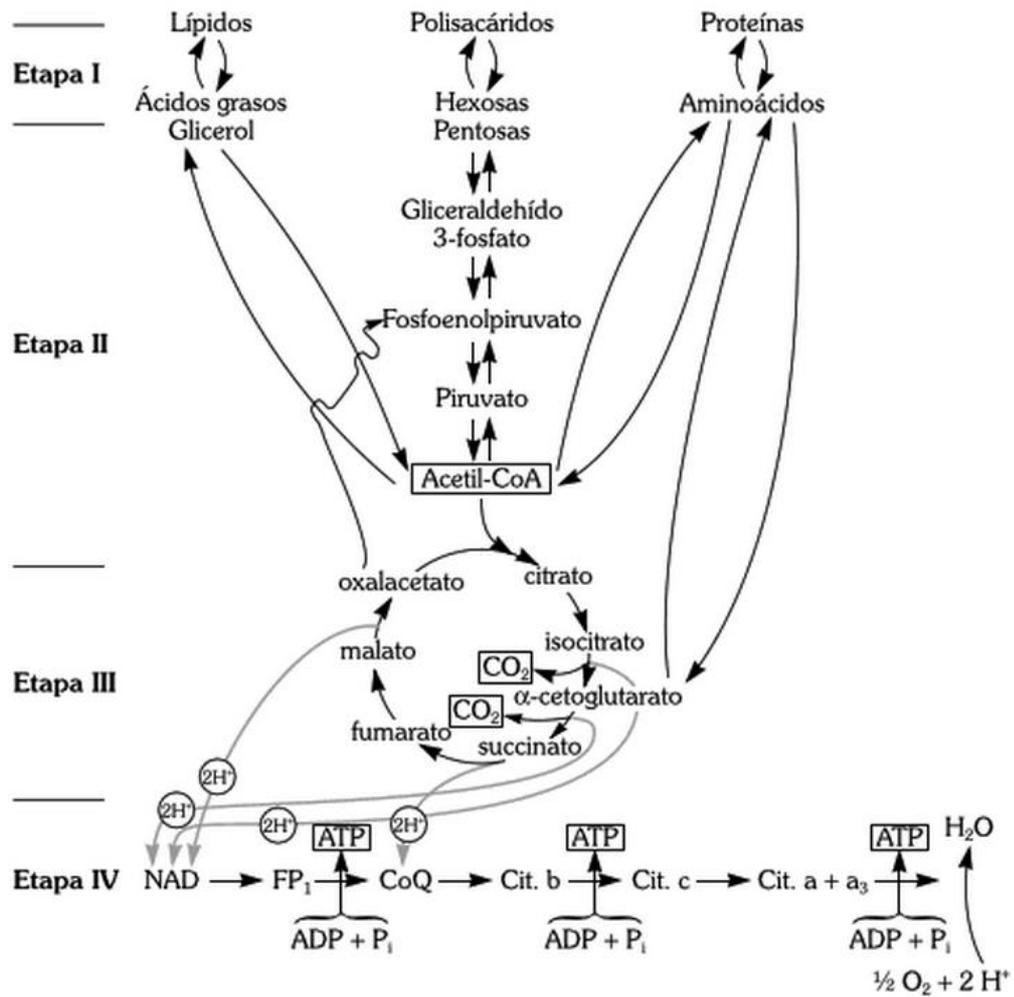


Figura 9: Etapas de catabolismo y anabolismo en la oxidación de la materia orgánica (Teijón y Garrido, 2009).

La reacción global se muestra en la ecuación 1.

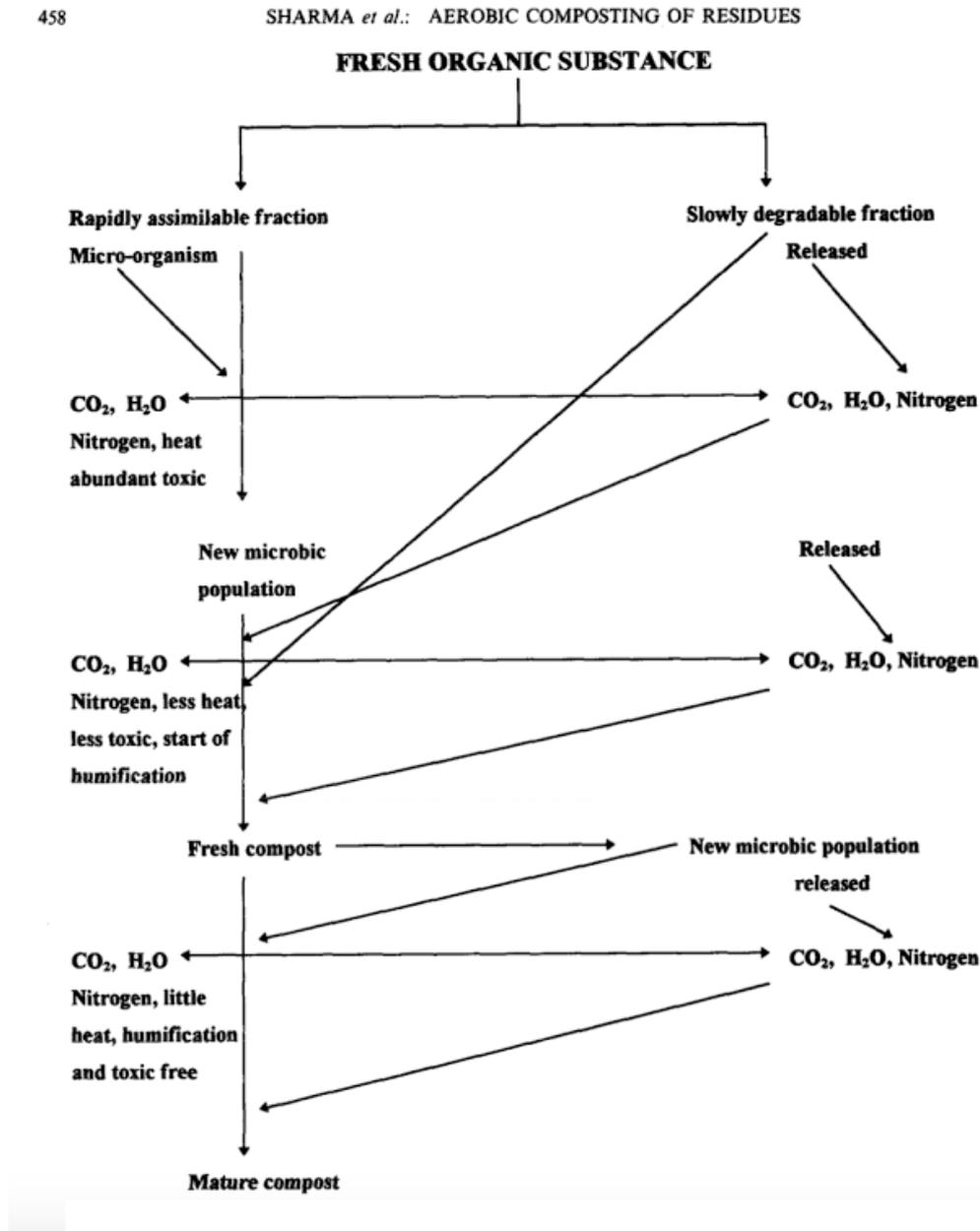


Figura 10: Representación de la evolución de la materia orgánica durante el compostaje (Sharma *et al.*, 2006).

A consecuencia de estas condiciones, parte del calor queda retenido por el material y se produce un efecto de retroalimentación, es decir, la temperatura va incrementándose dentro de ciertos niveles que aceleran las actividades metabólicas de los microorganismos, favoreciendo la producción de más calor. La temperatura seguirá aumentando hasta alcanzar niveles térmicos perjudiciales para la viabilidad de la mayoría microorganismos, lo cual ocurre a una temperatura aproximada de 60 °C.

En esta temperatura sólo sobreviven algunos microorganismos cuya actividad biológica no puede sustentar los niveles de temperatura y, por lo tanto, comienza la fase de enfriamiento (Moreno y Moral, 2008).

La alta variación de la temperatura durante el compostaje favorecen la sucesión de las poblaciones

microbianas, permiten eliminar microorganismos patógenos, y modifican las propiedades fisicoquímicas del sustrato. En relación a estos cambios de temperatura y las actividades metabólicas predominantes, en el proceso de compostaje se pueden observar cuatro fases: fase mesófila (10-42 °C), fase termófila (45-70 °C), fase de enfriamiento y fase de maduración. En la Figura 11 se puede observar las distintas poblaciones microbianas a lo largo de las cuatro fases que componen el proceso de compostaje.

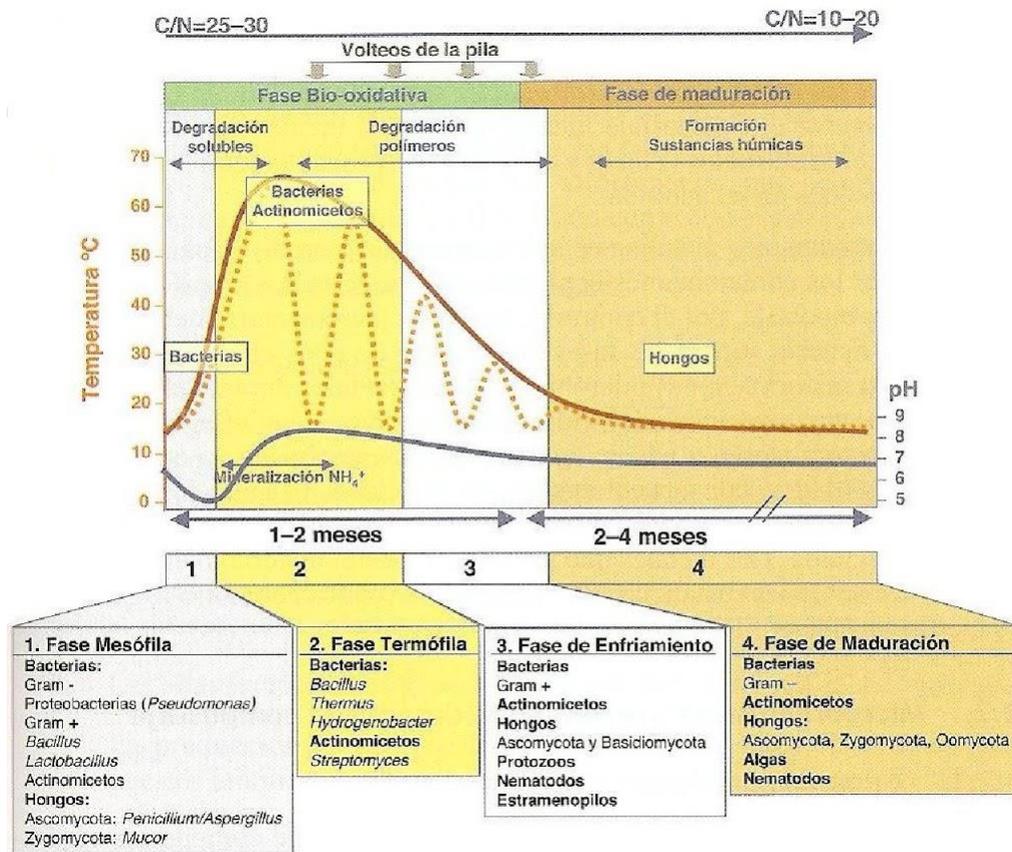


Figura 11: Sucesión microbiana en el proceso de compostaje (Moreno y Moral, 2008).

- Microorganismos perjudiciales durante el compostaje

Durante el compostaje los malos olores son producidos por la generación de compuestos orgánicos volátiles (COV) y amoniacales. Ambos son productos del metabolismo microbiano, y son indicadores de rutas biológicas microbianas no deseadas como consecuencia de fallos de operación o de preparación del sustrato (Tabla 1).

Tabla 1: Tiempo y temperatura de inactivación de patógenos y parásitos (Campos *et al.*, 2012).

Organismo	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Temp. (°C)	Tiempo (min)
<i>Salmonella typhi</i>	60	30	70	4
<i>Salmonella sp.</i>	55	60	60	15-20
<i>Shigella sp.</i>	55	60		
<i>Escherichia coli</i>	55-60	15-60	70	5
<i>Entamoeba histolytica</i>	50	5		
<i>Taenia saginata</i>	70-71	5		
<i>Trichinella spiralis (larva)</i>	62	60		
<i>Brucella abortus</i>	55	50	61	3
<i>Micrococcus pyogenes var. aureus</i>	70	20		
<i>Streptococcus pyogenes</i>	54	10		
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	66	15-20	67	20
<i>Mycobacterium diphtheriae</i>	50	45		
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	55	45	70	4
<i>Nacator americanus</i>	45	50	50	50
<i>Ascaris lumbricoides (huevos)</i>	50	60		

Los COV son productos procedentes de diferentes rutas metabólicas microbianas y pueden ser residuales o sustancias señal. Normalmente se producen en condiciones anaerobias durante las primeras fases del compostaje, donde el consumo de oxígeno es más alto. Las bacterias son las principales organismos que generan estos compuestos, en especial las bacterias productoras de ácido láctico (*Lactobacillus lactis* y *L. citreum*), aunque existen hongos que también pueden estar implicados.

La producción de amoníaco está más relacionada con un exceso de compuestos nitrogenados en el material de sustrato que a procesos anaerobios. Las transformaciones químicas que sufre el N durante el compostaje vienen dadas por reacciones de amonificación (2), nitrificación (3) y (4), y desnitrificación (5).



Una baja relación C/N favorece la emisión de amoníaco tanto en condiciones aerobias como anaerobias, principalmente durante la fase termófila. El amoníaco emitido en esta fase es producido mediante reacciones catabólicas de compuestos nitrogenados y a partir de la proteólisis llevada a cabo por bacterias *Bacillus circulans* (Moreno y Moral, 2008).

Si se producen condiciones anaerobias, la oxidación de la materia orgánica tiene lugar mediante otros compuestos inorgánicos que llevan a cabo el papel de aceptores de electrones tales como SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- y CO_2 .



Tabla 2: Posibles fermentaciones anaeróbicas de la glucosa (Haug, 1993).

End Products		ΔG_R° @ pH =7 (kcal/mol glucose)
Acetate	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 3\text{CH}_3\text{COO}^- + 3\text{H}^+$	-78.55
Propionate, acetate, H_2	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}^+ + \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-70.84
Butyric, H_2	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	-61.7
Ethanol	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + 2\text{CO}_2$	-51.14
Lactate	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COO}^- + 2\text{H}^+$	-49.5
Methanol	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{CH}_3\text{OH} + 2\text{CO}_2$	-21.42

Por otro lado, muchos materiales de partida utilizados para producir compost pueden presentar virus, bacterias y hongos patógenos como parte de la microbiota natural. La mayor parte de estos patógenos son eliminados a lo largo del proceso de compostaje, mediante complejas interacciones microbianas entre las que destacan:

- Las altas temperaturas alcanzadas durante la fase termófila.
- La producción de compuestos fenólicos durante la degradación de los materiales lignocelulósicos, y que actúan como compuestos antimicrobianos.
- La actividad lítica de determinadas enzimas producida por algunos microorganismos.
- La producción de antibióticos microbianos por determinados microorganismos.
- La competencia existente entre los patógenos y los microorganismos por los nutrientes del medio.

La materia orgánica contenida en el material de partida es transformada en condiciones aerobias, mediante reacciones catalizadas por enzimas microbianas, a moléculas orgánicas e inorgánicas más sencillas. La descomposición de la materia orgánica produce calor, CO_2 , H_2O y humus, compuesto formado por macromoléculas formadas a partir de la degradación de los compuestos orgánicos y cuya característica principal es su resistencia a la descomposición.

La humificación es un proceso básico para el desarrollo y producción de compost, y a medida que pasa el tiempo la concentración de sustancias húmicas aumenta, por lo que los parámetros asociados a la humificación son utilizados para determinar el grado de madurez y estabilidad.

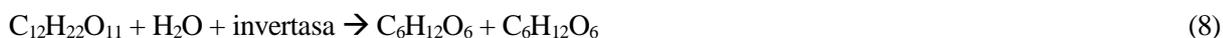
- Requerimientos nutricionales y biotransformación

A causa de la gran diversidad microbiana cualquier compuesto que exista en la naturaleza, puede ser utilizado como nutriente por algún microorganismo determinado, por lo que cualquier producto natural puede ser transformado durante el proceso de compostaje. En la Tabla 3 se pueden apreciar algunos compuestos orgánicos susceptibles de ser oxidados, junto con el calor de combustión y requerimiento de oxígeno para tal fin.

Tabla 3: Calor de combustión y requerimiento de oxígeno para algunos compuestos (Campos *et al.*, 2012).

Substrato	Fórmula	ΔH°_f (kJ/mol)	g DQO/mol	kJ/g substrato	kJ/g DQO
Glucosa (Carbohidrato)	$C_6H_{12}O_6$	-2.813	192	15,63	14,67
Ácido láctico (Carbohidrato)	$C_3H_6O_3$	-1.363	96	15,13	14,21
Ácido palmítico (Lípido)	$C_{16}H_{32}O_2$	-10.024	736	39,17	13,63
Tripalmitina (Lípido)	$C_{51}H_{98}O_6$	-31.392	2.320	38,79	13,54
Glicina (Aminoácido)	$C_2H_5O_2N$	-685	48	9,11	14,25
n-decano (Hidrocarburo)	$C_{10}H_{22}$	-6.730	496	47,40	13,58
Metano (Hidrocarburo)	CH_4	-881	64	55,09	13,75

La mayor parte de los microorganismos metabolizan una serie de micro y macronutrientes en formas químicas sencillas, para que puedan atravesar la membrana celular mediante algún mecanismo de transporte. Estos nutrientes esenciales para el crecimiento microbiano y la producción de energía son metabolizados por enzimas intracelulares presentes en un gran número de microorganismos. Sin embargo, cuando las fuentes de nutrientes provienen de polímeros de origen vegetal o animal, es necesaria su degradación a monómeros básicos mediante enzimas hidrolíticas extracelulares (Ecuaciones 8 y 9), que son producidas sólo por determinadas especies de microorganismos, para que así puedan ser utilizadas por las restantes comunidades microbianas.



La descomposición de la celulosa, uno de los polímeros más abundantes en la naturaleza, está catalizada por las celulasas, que catalizan diversas reacciones durante la hidrólisis del polímero. Las celulasas, que constituyen un sistema enzimático complejo, se pueden diferenciar en tres tipos: endoglucanasas, exoglucanasas y β -glucosidasas. Las primeras en actuar son las endoglucanasas, cortando internamente las cadenas de celulosa para producir oligosacáridos de diferentes tamaños. Las exoglucanasas producen glucosa o celobiosa a partir de la celulosa o de los oligosacáridos de mayor tamaño. Por último, las β -glucosidasas catalizan la degradación de la celobiosa y de los oligosacáridos de menor tamaño a glucosa.

Sin embargo, para que se produzca una correcta degradación de la celulosa y hemicelulosa, polímero estructuralmente diferente a la celulosa pero cuya degradación ocurre de manera similar, es necesaria la descomposición de la lignina. La degradación de la lignina es un proceso de oxidación complejo e indirecto, y en el caso de *Phanerochaete chrysosporum*, se generan agentes oxidantes para romper los enlaces de las diferentes unidades de fenilpropano constituyentes de la lignina. La despolimerización de la lignina produce un gran número de fenoles, ácidos y alcoholes aromáticos, algunos de los cuales se mineralizan y otros son el origen de los compuestos húmicos, como es el caso de los compuestos fenólicos. Otros polímeros vegetales como ceras o almidones son degradados más fácilmente por enzimas extracelulares.

Las proteínas son transformadas por proteasas y peptidasas que cortan los diferentes enlaces peptídicos produciendo aminoácidos, que pueden ser utilizados por los microorganismos junto con los nitratos y el amonio como fuente esencial de compuestos nitrogenados.

2.6 Materias primas

- Residuos agrícolas

La mayor parte de los residuos procedentes de estos cultivos corresponden a los restos de cosecha de los cereales mayoritarios (trigo, arroz y maíz), o en menor medida de los generados por el procesado de estos productos agrícolas.

Los residuos de cereales se usan con frecuencia en ganadería para la alimentación de los animales, así como también para la elaboración de la cama para el ganado. También se utiliza para la producción de compost mediante co-compostaje con otros residuos. A menudo, los residuos de cosecha son quemados en el campo e incorporados al suelo para aportar una cantidad materia orgánica, aunque su alta relación C/N puede provocar deficiencias de nitrógeno.

- Residuos ganaderos

El aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos ganaderos, tanto la materia orgánica como los nutrientes, necesita la elaboración de planes adecuados de fertilización, basados en los requerimientos nutricionales de los cultivos, evitando así la acumulación excesiva de estos materiales en el suelo con el correspondiente riesgo de contaminación de aguas y suelo.

Los residuos ganaderos, estiércoles y purines, presentan una relación C/N baja, de manera que es posible producir compost mediante co-compostaje de residuos agrícolas y ganaderos, aumentando así la biodegradabilidad de los residuos procedentes de los cultivos, y evitando la posible contaminación de estiércoles y purines.