

## El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje

Federico Laich

Unidad de Microbiología Aplicada. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias.

Ctra. El Boquerón, S/N – Valle Guerra. 38270. Santa Cruz de Tenerife. Email. flaich@icia.es

### Resumen

Durante el proceso de compostaje se lleva a cabo una compleja sucesión de poblaciones de microorganismos. El compost, es el producto final de la descomposición biológica de sustratos orgánicos bajo condiciones de alta temperatura. Una amplia diversidad de microorganismos mesófilos y termófilos conforman las poblaciones mixtas que degradan la materia orgánica, siendo las más importantes las bacterias, *Actinomyces* y hongos filamentosos. El tipo de sustrato utilizado, la población de la microbiota inicial y la evolución de la temperatura, son los factores principales que condicionan la sucesión de microorganismos a través del proceso de compostaje. Los efectos beneficiosos en la utilización de un compost son diversos: aporta nutrientes y microorganismos beneficiosos al suelo, estimula el desarrollo radicular e incrementa la microbiota rizosférica con efecto biocontrolador.

**Palabras claves:** Microbiota, Microorganismos del compost, Compostaje.

El compostaje es un proceso biooxidativo que da lugar a un producto orgánico altamente estable. Se puede definir como la mineralización y humificación parcial de las sustancias orgánicas mediante reacciones microbianas. Estas reacciones se realizan bajo condiciones óptimas durante un periodo determinado y relativamente corto. La transformación microbiana de la fracción orgánica es una oxidación aerobia, de forma que la relación superficie/volumen de las partículas y la relación aire/agua en el espacio entre partículas, tiene una influencia directa en el proceso. Los procesos modernos de compostaje se realizan a intervalos de temperatura mesofílicos y termofílicos. Aunque se considera que los microorganismos mesófilos son más eficaces para la descomposición de la materia orgánica, las temperaturas más altas favorecen la eliminación de potenciales patógenos vegetales y animales, y la muerte de semillas de malas hierbas que podrían ser perjudiciales en el uso posterior del producto final.

La adición de compost al suelo introduce una alta variedad de microorganismos implicados en el ciclo de diferentes nutrientes y en procesos de biocontrol de fitopatógenos. Asimismo, cabe destacar el rol que cumple el agregado de compost en la recuperación de suelos, cuya microbiota ha sido afectada por la adición repetitiva de determinados compuestos fitosanitarios. En este caso el compost contribuye a la “reinoculación” de microorganismos implicados en el ciclo de los nutrientes.

Durante el proceso de compostaje, se lleva a cabo una **compleja sucesión de poblaciones de microorganismos** capaces de degradar o descomponer una materia orgánica compleja. La descripción de los microorganismos que intervienen en el proceso de compostaje

es complicada, debido a que las poblaciones y las comunidades varían continuamente en función de la evolución de la temperatura, disponibilidad de nutrientes, concentración de oxígeno, contenido de agua, pH, acumulación de compuestos antibióticos, etc. La temperatura es un indicador de la actividad microbiana anterior y, asimismo, un indicador de la tasa de actividad actual. El ecosistema del compostaje se limita a sí mismo cuando la acumulación de calor es excesiva. A medida que se va elevando la temperatura, las poblaciones microbianas son reemplazadas por otras mejor adaptadas, y cada una de ellas posee una duración limitada. En el caso de realizarse una correcta y continua aireación, la fase termófila continúa hasta que la producción de calor es inferior a la disipación del mismo, debido al agotamiento de los compuestos fácilmente metabolizables.

Una amplia diversidad de microorganismos conforman las poblaciones mixtas del proceso de compostaje. Las más importantes son bacterias, *Actinomyces* y hongos filamentosos.

Las **bacterias** son las más numerosas en el proceso de compostaje, y constituyen entre el 80% y el 90% de los microorganismos existente en el compost. Se trata de un grupo de gran diversidad metabólica, que utilizan un amplio rango de enzimas que degradan químicamente una gran variedad de compuestos orgánicos. La cuantificación de las bacterias aerobias totales representa, de alguna manera, un índice de actividad biológica. Dentro de este tipo de microorganismos, se puede destacar el grupo de las *Pseudomonas* fluorescentes, constituido por algunas especies de bacterias asociadas a procesos de biocontrol de patógenos de plantas y a procesos de estimulación del desarrollo radicular. La utilización de un compost maduro con una alta población de *Pseudomonas* fluorescentes, podría actuar como un “estimulador” del desarrollo de las raíces y un “protector” frente a diferentes fitopatógenos.

La participación de los **Actinomyces** durante el proceso de modificación de la materia orgánica del compost es relevante, debido a la capacidad enzimática para degradar compuestos orgánicos complejos (celulosa, lignina, etc.). Asimismo, muchas de las especies que participan en este proceso son tolerantes a las temperaturas que alcanza el compost durante el proceso de degradación aeróbica. Por tal motivo, es un grupo de microorganismos abundante en el compost, y es importante conocer su evolución y abundancia durante la utilización del mismo como sustrato de siembra. Asimismo, los *Actinomyces* poseen la capacidad de regular la microbiota rizosférica a través de la producción de antibióticos y otros compuestos.

Los **hongos filamentosos** constituyen un grupo muy amplio. Estos pueden estar implicados durante el proceso de compostaje, participando en la degradación aeróbica de la materia orgánica debido a su alta capacidad lignocelulolítica. Asimismo, se encuentran en el suelo como parte de la microbiota normal, implicados en procesos de degradación y solubilización de compuestos orgánicos complejos y compuestos inorgánicos. En contrapartida muchas especies son causantes de enfermedades de plantas. Por lo expuesto, es importante realizar una correcta caracterización de este grupo de microorganismos, durante la utilización del compost como sustrato.

Los microorganismos activos e inactivos que intervienen en un compost pueden constituir entre el 2% y el 20% de la masa total. En términos generales, las poblaciones de microorganismos que participan varían entre sí en; el rango de temperatura en el que actúan, los sustratos que utilizan, la tolerancia al pH y el oxígeno demandado. En esta sucesión de

microorganismos, cada población se adecúa al ambiente creado por la población anterior. En la **Tabla 1** se presentan los patrones típicos en los cambios de las poblaciones microbianas.

**Tabla 1.** Distribución de la microbiota durante las diferentes etapas del compostaje expresado en unidades formadoras de colonias por gramo (Haug, 1993).

Microorganismos	Etapas de compostaje			Nº especies
	Mesofílica 20°C-40°C	Termofílica 40-70°C	Mesofílica 70°C-20°C	
<b>Bacterias</b>				
mesófilas	10 <sup>8</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>11</sup>	6
termófilas	10 <sup>4</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>7</sup>	1
<b>Actinomycetes</b>				
termófilos	10 <sup>4</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>5</sup>	14
<b>Hongos</b>				
mesófilos	10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>	18
termófilos	10 <sup>3</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>	16

Numerosos estudios sobre la dinámica de la población de microorganismos se llevaron a cabo durante el siglo XX. A partir de la década de los '90 los métodos de biología molecular han permitido describir con más detalle los microorganismos. Ryckeboer et al. (2003) han realizado una recopilación de las especies descritas a través de técnicas dependientes de cultivo y han publicado una lista de los microorganismos aislados durante las diferentes fases del compostaje. La sucesión de estas poblaciones generalmente se asocia a la temperatura. De esta forma el proceso se ha descrito de la siguiente manera:

### 1.- Fase mesofílica (20-40°C)

Los hongos, en particular los *hongos filamentosos* o mohos, y las *bacterias mesófilas* acidificantes son las poblaciones dominantes en los residuos orgánicos frescos. Una amplia variedad de especies han sido descritas en esta fase del proceso (Amner et al., 1988; Beffa et al., 1996; De Bertoldi et al., 1983; Fergus, 1964; Finstein and Morris, 1975; Fujio and Kume, 1991; Nakasaki, et al., 1985a; Nakasaki, et al., 1985b; Riddech et al., 2002; Strom, 1985a; Strom, 1985b; Tiquia et al., 2002; Waksman, et al., 1993).

En este estadio la población de bacterias puede llegar a 100 millones de células por gramo de material. Las bacterias descritas en esta fase pertenecen a diferentes familias; *Alcaligenaceae*, *Alteromonadaceae*, *Bacillaceae*, *Burkholderiaceae*, *Bradyrhizobiaceae*, *Caryophanaceae*, *Caulobacteraceae*, *Cellulomonadaceae*, *Clostridiaceae*, *Comamonadaceae*, *Corynebacteriaceae*, *Enterobacteriaceae*, *Flavobacteriaceae*, *Flexibacteraceae*, *Hyphomicrobiaceae*, *Intrasporangiaceae*, *Methylobacteriaceae*, *Microbacteriaceae*,

*Micrococcaceae*, *Moraxellaceae*, *Neisseriaceae*, *Nitrosomonadaceae*, *Nocardiopsaceae*, *Paenibacillaceae*, *Phyllobacteriaceae*, *Propionibacteriaceae*, *Pseudomonadaceae*, *Pseudonocardiaceae*, *Rhodobacteraceae*, *Sphingobacteriaceae*, *Staphylococcaceae*, and *Xanthomonadaceae*.

Uno de los géneros bacterianos predominantes en este estadio es *Bacillus*. La diversidad de especies de este género es alta a temperaturas de hasta 50°C, sin embargo, a medida que se incrementa la temperatura disminuyen su actividad.

Con respecto a los hongos filamentosos, una alta diversidad de especies participan en este rango de temperatura (Hansgate et al., 2005). Predominando los géneros *Aspergillus* y *Penicillium*, seguidos de *Trichoderma*, *Mucor*, *Rhizopus*, *Cladosporium*, *Backusella*, *Ulocladium*, *Acremonium*, *Fusarium*, *Scopulariopsis*, *Geotrichum*, etc.

Los *Actinomyces* (bacterias filamentosas) se desarrollan a tasas de crecimiento inferiores a la mayoría de las bacterias y hongos, y por tanto compiten ineficientemente cuando el nivel de nutrientes es alto. En esta fase predominan géneros de la familia *Nocardiaceae*.

## **2.- Fase termofílica (40-60°C)**

Los microorganismos mesófilos comienzan a disminuir su actividad rápidamente, una vez que se inicia la fase termófila. El incremento de la temperatura provoca una rápida transición de una microbiota mesófila a una termófila. Los microorganismos mesófilos son parcialmente eliminados a estas temperaturas y las bacterias, hongos y *Actinomyces* termófilos o termotolerantes incrementan su población (De Bertoldi et al., 1983; Finstein and Morris, 1975; Waksman, et al., 1993).

Las bacterias, en especial las especies mesófilas del género *Bacillus*, sobreviven en estas condiciones a través de la formación de endosporas. Otros géneros bacterianos son capaces de engrosar la pared celular o formar una capsula exterior, protegiéndose de las condiciones adversas y permitiendo su “reactivación” cuando las condiciones sean favorables.

En esta fase, los microorganismos termófilos o termotolerantes incrementan su población a valores del orden de los 100-1000 millones de células por gramo.

La temperatura óptima para los hongos termófilos es de 40-50°C. Los *Actinomyces* son generalmente más tolerantes que los hongos a temperaturas termófilas moderadas, y su número y diversidad se incrementa significativamente a 50-60°C (Amner et al., 1988; Fergus, 1964; Finstein and Morris, 1975; Waksman, et al., 1993; Xiao et al., 2011). Diferentes especies de la familia *Streptomyces*, son los *Actinomyces* más comúnmente aislados.

## **3.- Fase termofílica extrema (60-80°C)**

Las altas temperaturas generalmente se asocian con una dramática reducción de las diversas funciones microbianas. La fase termófila, con temperaturas que exceden los 60°C, son habitualmente consideradas como un “suicidio microbiano”. Por lo tanto, generalmente se asume que no se deben superar los 55-60°C para lograr una rápida y eficiente descomposición. Sin embargo, la presencia y la actividad de bacterias termófilas extremas es esencial para la biodegradación y mineralización de los residuos biológicos a altas temperaturas (60-80°C). A estas temperaturas las bacterias termófilas son las únicas que se encuentran activas. La

diversidad de especies disminuye pero su concentración es alta (100 a 1000 millones de células por gramo) (Dees and Ghiorse, 2001; Finstein and Morris, 1975; Finstein and Morris, 1975; Nakasaki, et al., 1985a; Sharp et al., 1991; Strom, 1985).

Una alta diversidad de bacterias heterotróficas se aislaron a partir de compost a una temperatura de 50-60°C (Fujio and Kume, 1991; Strom, 1985a; Strom, 1985b). Sin embargo, la diversidad de especies disminuye a temperaturas superiores a los 60°C. Entre los 65 y 69°C se han detectado algunas cepas de *Bacillus stearothermophilus* (Strom, 1985a; Strom, 1985b), *B. schlegelii*, *Thermus thermophilus*, *T. aquaticus* e *Hydrogenobacter* spp.

La identificación de bacterias termófilas extremas pertenecientes al género *Thermus*, capaces de crecer sobre compuestos orgánicos a temperaturas de 50-80°C, con un óptimo de crecimiento a 65-75°C, corroboran este punto. Por lo tanto, las especies del género *Thermus* (*T. thermophilus*, *T. aquaticus*, etc.), descritas inicialmente en sitios geotermales, están probablemente adaptadas a las altas temperaturas del compost y juegan un papel importante en la biodegradación de los residuos durante la fase termófila (Beffa et al., 1996). Asimismo, las especies del género *Hydrogenobacter* han sido aisladas en estas condiciones. Estas bacterias son autotróficas, no forman esporas y crecen a 60-80°C (óptimo 70-75°C). Obtienen su energía a través de la oxidación del azufre o del hidrógeno y sintetizan sus estructuras carbonadas a partir del CO<sub>2</sub> (Beffa et al., 1996).

La detección de bacterias termófilas durante la fase de alta temperatura, demuestra la posibilidad de realizar el compostaje a 65-75°C por un periodo largo de tiempo, sin exceder de 80°C. Las bacterias termófilas, así como las mesófilas, actúan sobre la hemicelulosa, descomponen una variedad importante de compuestos orgánicos (carbohidratos, ácidos orgánicos, polisacáridos, proteínas, lípidos, alcoholes) y reducen el azufre inorgánico (H<sub>2</sub>S, S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>3</sub><sup>-</sup>, etc).

En esta etapa, los hongos están totalmente inactivos y su subsistencia se mantiene en estructuras de resistencia y esporas. Los *Actinomycetes* están a baja concentración y no juegan un papel importante en la degradación y mineralización de la materia orgánica.

#### **4.- Fase de enfriamiento y maduración (50-20°C)**

El grado de maduración de un compost afecta significativamente su utilización en la agricultura. La adición de un compost inmaduro al suelo provoca una deficiencia de oxígeno, la inmovilización del nitrógeno e incrementa los problemas fitopatogénicos radiculares (Inbar et al., 1990; Zucconi et al., 1981). Sin embargo, la adición de un compost maduro beneficia la fertilidad de un suelo, su estructura, e incrementa los efectos de control biológico (Allievi et al., 1993; Dick and McCoy, 1993; Hoitink and Grebus, 1994).

Durante la fase de maduración la diversidad y el número de *Actinomycetes* mesófilos/termotolerantes y de hongos filamentosos capaces de degradar polímeros naturales complejos (lignina, hemicelulosa, celulosa), se incrementa significativamente (De Bertoldi et al., 1983; Finstein and Morris, 1975; Waksman, et al., 1993). La población de bacterias termófilas disminuye 1 o 2 órdenes logarítmicos en comparación con la población presente durante la fase termogénica (10<sup>8</sup>-10<sup>10</sup> ufc/g), sin embargo, la diversidad taxonómica y metabólica se incrementa.

En esta fase las bacterias representan el 80% del recuento total de microorganismos (10<sup>9</sup>-10<sup>11</sup> ufc/g) y una pequeña proporción corresponde a bacterias esporuladas. Los

*Actinomycetes* y los hongos poseen una población de  $10^7$ - $10^8$  ufc/g (Beffa et al., 1996). Estos microorganismos son importantes en la degradación de la celulosa, hemicelulosa, quitina y proteínas. La lignina es degradada principalmente por hongos filamentosos.

La mayoría de los microorganismos presentes en esta fase e implicados en el ciclo del carbono, poseen actividad proteolítica, amonificante, amilolítica y celulolítica. Asimismo, se han descrito especies fijadoras libres de nitrógeno (*Azotobacter*,  $10^3$ - $10^5$  ufc/g), denitrificadoras, y sulfato reductoras. Esta diversidad microbiana juega un papel fundamental en la estabilidad del compost (Beffa et al., 1996).

Las bacterias mesófilas que permanecieron inactivas durante la fase anterior y que resistieron las altas temperaturas, vuelven a estar metabolíticamente activas y son capaces de recolonizar el sustrato. La diversidad y cantidad de bacterias capaces de "reactivarse", depende del número de especies existentes con capacidad de formar endosporas o cápsulas. El tamaño de la población, el número de especies y la actividad metabólica de las bacterias mesófilas se incrementa. Esta respuesta favorece; la descomposición de los compuestos orgánicos, la oxidación y mineralización del nitrógeno inorgánico y los compuestos azufrados (producción de nitratos y sulfatos, respectivamente), la formación de compuestos del humus (exopolisacáridos) a través de la polimerización de compuestos orgánicos simples, la fijación del nitrógeno atmosférico, la supresión de fitopatógenos, la mineralización del hierro, manganeso y fósforo, la capacidad de intercambio catiónico y la formación de agregados minerales. Asimismo, contribuye a la degradación de compuestos orgánicos tóxicos (pesticidas) y a la disminución de la cantidad de metales pesados a través de la formación de sales insolubles.

## Bibliografía

- Amner, W., McCarthy, A.J., and Edwards C. (1988). Quantitative assessment of factors affecting the recovery of indigenous and release thermophilic bacteria from compost. *Appl. Environ. Microbiol.* 54: 3107-3112.
- Beffa, T., Blanc, M., Marilley, L., Fischer, J., Lyon, P. and Aragno, M. (1996). Taxonomic and metabolic microbial diversity during composting. In: *The science of composting* (Ed. Bertoldi, M., Sequi, P., Lemmes, B. and Papi, T.), Blackie Academic & Professional., Glasgow, UK. pp. 149-161.
- De Bertoldi, M., Vallini, G., and Pera, A. (1983). *The Biology of Composting: A Review*. Waste Management and Research. 1: 167-176.
- Dees, P. M. and Ghiorse, W. C. (2001). Microbial diversity in hot synthetic compost as revealed by PCR-amplified rRNA sequences from cultivated isolates and extracted DNA. *FEMS Microbiol. Ecol.* 35: 207-216.
- Dick, W. A., and McCoy, E.L. (1993). Enhancing soil fertility by addition of cornpost. In: *Science and Engineering of Composting; design, environmental, microbiological and utilization aspects* (Eds Hoitink, H.A.J., and Keener, H.M.), Renaissance Publications, Worthington, Ohio U.S.A., pp. 622-644.
- Fergus, C.L. (1964). Thermophilic and thermotolerant molds and *actinomycetes* of mushroom compost during peak heating. *Mycologia.* 56: 267-284.
- Finstein, M.S., and Morris, M.L. (1975) Microbiology of municipal solid waste composting. *Adv. Appl. Microbiol.* 19: 113-151.
- Fujio, Y. and Kume, S. J. (1991). Isolation and identification of thermophilic bacteria from sewage sludge compost. *J. Ferment. Bioeng.* 72: 334-337.

- Hansgate, A., Schloss, P., Hay, A. and Walker, L. (2005). Molecular characterization of fungal community dynamics in the initial stages of composting. *FEMS Microbiol. Ecol.* 51: 209-214.
- Haruta, S., Nakayama, T., Nakamura, K., Hemmi, H., Ishii, M., Igarashi, Y. and Nishin, T. (2005). Microbial diversity in biodegradation and reutilization processes of garbage . *J. BioSci. Bioeng.* 99(1): 1-11.
- Haug, T. (1993). *The practical handbook of compost engineering.* Lewis Publishers. Florida, U. S. A.
- Hoitink, H.A.J., and Grebus, M.E. (1994). Status of biological control of plant diseases with composts. *Compost Science & Utilization.* 2: 6-13.
- Inbar, Y., Chen, Y., Hadar, Y., and Hoitink, H.A. (1990). New approaches to compost maturity, *BioCycle.* 31: 64-69.
- Nakasaki, K., Sasaki, M., Shoda, M. and Kubota, H. (1985a). Change in microbial numbers during thermophilic composting sewage sludge with reference to CO<sub>2</sub> evolution rate. *Appl. Environ. Microbiol.* 49: 37-41.
- Nakasaki, K., Shoda, M. and Kubota, H. (1985b). Effect of temperature on composting of sewage sludge. *Appl. Environ. Microbiol.* 50: 1526-1530.
- Riddech, N., Klammer, S., and Insam, H. (2002). Characterization of microbial communities during composting of organic wastes. In: *Microbiology of composting* (Eds. Insam, H., Riddech, N., and Klarnmer, S.). Springer Verlag, Heidelberg. p. 43-52
- Ryckeboer, J., Mergaert, J., Coosemans, J., Deprins, K., and Swings, J. (2003). Microbiological aspects ofbiowaste during composting in a monitored compost bin. *J. Appl. Microbiol.* 94: 127-137.
- Sharp, R.J., Riley, P.W., and White, D. (1991). Heterotrophic thermophilic Bacilli. In: *Thermophilic Bacteria* (Ed. Kristjansson, J.K.), CRC Press Inc., Boca Raton U.S.A.,pp. 19-50
- Strom, P.F. (1985a). Effect of temperature on bacterial species diversity in thermophilic solid waste composting. *Appl. Environ. Microbiol.* 50: 899-905.
- Strom, P.F. (1985b). Identification of thermophilic bacteria in solid waste composting. *Appl. Environ. Microbiol.* 50: 906-913.
- Tiquia, S. M. and Michel, F. C., Jr. (2002). Bacterial diversity in livestock manure composts as characterized by terminal restriction fragment length polymorphisms (T-RFLP) of PCR amplified 16S rRNA gene sequences. In: *Microbiology of composting* (Eds. Insam, H., Riddech, N., and Klarnmer, S.). Springer Verlag, Heidelberg.. p. 65-82
- Waksmann, S.A., Cordon, T. and Hulpoi, N. (1939). Influence of temperature upon the microbiological population and decomposition processes in composts of stable manure. *Soil Sci.* 47: 83-114.
- Xiao, Y., Zeng, G., Yang, Z., Ma, Y., Huamg, C., Xu, Z., Huang, J. and Fan, C. (2011). Changes in the actinomycetal communities during continuous thermophilic composting as revealed by denaturing gradient gel electrophoresis and quantitative PCR. *Biores. Tech.* 102: 1383-1388.
- Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A. and de Bertoldi, M. (1981). Biological evaluation of compost maturity. *BioCycle.* 22: 54-57.