

VARIACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DURANTE UN PROCESO DE COMPOSTAJE

Diana María Fariás Camero*, María Inés Ballesteros G.*, Myriam Bendeck.

Recibido: Septiembre 14/98 – Aprobado: Marzo 26/99

Keywords: composting, maturity compost, compost, earthworm humus.

RESUMEN

Se llevaron a cabo dos procesos de compostaje a partir de residuos lignocelulósicos de rosas durante 165 días aproximadamente. En uno de los procesos la descomposición del material fue realizada sólo por microorganismos (compostaje directo) y en el otro fuera de los microorganismos se adicionaron lombrices de tierra *Eisenia foetida* (compostaje indirecto). El compostaje directo fue realizado en un sistema de compostación denominado "camas" y el proceso indirecto se desarrolló en la etapa inicial en un sistema de "panelas" siendo trasladado posteriormente a una cama. Los dos procesos se manejaron con adiciones de cal, NH_4NO_3 (20%N) y microorganismos. Se tomaron muestras periódicas en diferentes lugares de las pilas y se midió semanalmente la temperatura. En cada una de las muestras se determinaron los siguientes parámetros fisicoquímicos: % humedad, color, pH en relaciones muestra:agua 1:5 y 1:10, cenizas, materia orgánica, CIC libre de cenizas, carbono, nitrógeno y relación C/N. En el extracto

acuoso se determinaron el contenido de carbono orgánico total y nitrógeno, la relación C/N y el porcentaje de hidrosolubles y se hizo un ensayo de germinación en el que se calculó el porcentaje de semillas de berro (*Lepidium sativum*) que germinaron en el extracto.

La variación de los parámetros en cada uno de los procesos permitió establecer que los mayores cambios en el material se llevan a cabo durante las etapas iniciales del proceso (fases termófila y mesófila), siendo la presencia de microorganismos el factor limitante de la dinámica del proceso; así mismo la adición de lombrices de tierra no aceleró la mineralización de la materia orgánica. A nivel metodológico se estableció que la determinación del color no es un parámetro efectivo para evaluar el estado de madurez del compost y que, medidas de la temperatura y el porcentaje de germinación pueden realizarse rutinariamente para determinar el avance del proceso. Para evaluar el estado de óptima madurez del material se recomienda la CIC, el porcentaje de cenizas y el contenido de hidrosolubles. Se recomienda efectuar algunos cambios en el manejo del proceso como reducir el tiempo de compostaje a 100 días como máximo y

* Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, A.A. 14490, Santa Fe de Bogotá, Colombia

llevar a cabo el compostaje en sistema de pannels preferencialmente.

ABSTRACT

Two composting processes were carried out; they lasted for about 165 days. In one of the processes the decomposition of the material was performed only by microorganisms only (direct composting) and in the other one, by microorganisms and earthworms *-Eisenia foetida-* (indirect composting). The first one was carried out in a composting system called "camas" and the indirect one was carried out in its initial phase in a system of "panelas", then the wastes were transferred to a "cama". The materials were treated in both processes with lime, ammonium nitrate and microorganisms. Periodical samples were taken from different places of the pile and a temperature control was made weekly. The following physicochemical parameters were analyzed in each sample: Humidity, color, pH soil:water in ratios of 1:5 and 1:10, ash, organic matter, CIC, contents of carbon and nitrogen and C/N ratio. In the aqueous extract, C/N ratio and percentage of hydrosolubles were analyzed. It was also made a germination assay taking measurements of the percentage of garden cress seeds (*Lepidium sativum*) that germinated in the aqueous extract.

The parameters variation in each process let us to establish that the greatest changes in the material happened in the initial phases of the process (thermophilic and mesophilic phases); the presence of microorganisms was the limiting factor in the dynamic of the process; on the other hand, the earthworm addition did not ac-

celerate the mineralization of organic matter.

The results let us to establish that the color determination is not an effective parameter in order to evaluate the degree of maturity of the compost. Other parameters such as temperature and germination percentage can be made as routine test to determine the process rate. Determination of CIC, ash and hydrosolubles content are recommended to evaluate the optimal maturity degree in the material. It is proposed changes such as to reduce the composting time to a maximum of 100 days and to make the composting in a system of "panelas".

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el manejo de residuos ha adquirido especial importancia, principalmente en la industria floricultora, donde los controles de tipo ambiental son una prioridad. Con el fin de tratar los "desperdicios" vegetales que a diario se generan, se ha implementado la instalación de plantas de compostaje.

El compostaje es un proceso de descomposición biológica oxidativa de los constituyentes orgánicos de los materiales de desecho, que se lleva a cabo bajo condiciones controladas sobre sustratos sólidos orgánicos heterogéneos, originando un producto que representa grandes beneficios cuando es adicionado al suelo⁽¹⁾. El compostaje intenta recrear las condiciones que podrían ocurrir en un sistema no perturbado, donde la materia orgánica se acumula sobre la superficie del suelo. Dependiendo de las variaciones en la temperatura del sistema el proceso puede ser dividido en cuatro etapas:

mesofílica, termofílica, enfriamiento y madurez⁽¹⁾. Ya que el compostaje es un proceso exclusivamente biológico, puede afirmarse que resulta afectado por todos los factores que influyen directa o indirectamente en el metabolismo microbiano; así los aspectos más importantes que deben ser considerados para llevar a cabo un buen compostaje son: El sustrato, la aireación, la temperatura, la humedad, el pH y la relación C/N.

En la búsqueda de tecnologías para mejorar el proceso se introdujo la lombricultura, con la que se elimina la presencia de olores desagradables y moscas, obteniéndose un producto de máxima calidad como fertilizante orgánico - humus de lombriz, vermicompost o lombricompost - y generando por otra parte grandes cantidades de proteína⁽²⁾.

En el ámbito nacional se han realizado estudios para evaluar el contenido proteico de *Andiodrilus bogotensis*, *Eisenia foetida* y *Glossoscolex* sp. Se han transformado desechos como estiércol de bovino, cereza de café y residuos de frutas y cocina de una finca cafetera⁽³⁾. Se han hecho investigaciones para la extracción de sustancias húmicas de lombricompostos obtenidos a partir de bovinaza, desechos de cachaza, pulpa de café y grama trenza donde se evaluaron variables como pH y carbono orgánico⁽⁴⁾. También se ha estudiado la obtención de lombricompost a partir de cachaza, pulpa de café, bovinaza por la acción de la lombriz *E. foetida*. En el producto se evaluaron pH, tamaño de partícula, contenidos de fósforo, cobre, hierro, calcio, magnesio y manganeso; se realizó un conteo bacteriano y el fraccionamiento de la materia orgánica⁽⁵⁾. En la zona cafetera, la Federación Nacional de

Cafeteros a través de Cenicafé viene desarrollando investigaciones acerca del uso, manejo y protección de los suelos de la zona con tratamientos en los que se involucra la materia orgánica⁽⁶⁾. En la zona azucarera, Cenicaña ha realizado investigaciones en este campo; de otra parte, se ha determinado el efecto sobre el suelo y sobre el pasto kikuyo de la adición de porquinaza⁽⁷⁾; también se ha evaluado la aplicación de desechos orgánicos de origen animal como gallinaza y abono de establo en diferentes cultivos⁽⁸⁾.

A nivel internacional, se hizo en España el seguimiento de un compostaje de residuos forestales de roble, bajo condiciones controladas evaluando pérdidas de peso, índice de germinación con semillas de berro, contenidos de azúcares reductores y fenoles, relación E4/E6 y pH entre otros⁽⁹⁾. Así mismo en otro estudio se siguió la variación a través del tiempo de un proceso de compostaje a partir de desechos urbanos evaluándose la relación C/N en fase sólida y acuosa, el carbono total orgánico, el carbono oxidable, la CIC y diferentes parámetros de humificación⁽¹⁰⁾.

Así es que el presente trabajo se desarrolló con el fin de establecer parámetros adecuados en la determinación del estado de madurez del compost y se plantearon como objetivos específicos los siguientes: Determinar cuál o cuáles de los parámetros evaluados en la caracterización sirven para establecer el estado de óptima madurez del compost; precisar cuáles de las metodologías pueden ser aplicadas como pruebas de rutina para conocer el grado de madurez del compost; y comparar los resultados obtenidos en los dos procesos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los desechos orgánicos empleados en el proceso de compostaje fueron residuos agroindustriales de la post-cosecha y del cultivo de rosas de la Finca el Rosal (Agorrosas S.A).

Se llevaron a cabo dos procesos de compostaje, en uno la descomposición se llevo cabo sólo por acción microbial (compostaje directo) en un sistema de compostación en el que el sustrato se colocó en camas –contenedores de plástico de 20,0 x 1,10 x 0,60 m–, en el otro se adicionaron lombrices al sistema el día 68 (compostaje indirecto) y fue realizado en un sistema de compostación de paneles –contenedores de madera de 3,10 x 1,10 x 1,60 m– durante los primeros 64 días y posteriormente en un sistema de camas –contenedores de plástico– donde el desecho se mantuvo hasta el final del proceso. El manejo de cada uno de los procesos se muestra en la Tabla 1.

El muestreo se llevo a cabo tomando siete porciones de aproximadamente 150 g de cada cama o panela en distintos sitios y profundidades; éstas fueron mezcladas para obtener así la muestra representativa correspondiente, con un peso aproximado de 1 kg. El muestreo se realizó para la compostación directa durante los días 1, 8, 15, 22, 29, 36, 43, 57, 71, 85, 99, 113, 127, 141 y 162; y para la indirecta los días 1, 6, 13, 20, 27, 34, 41, 55, 69, 83, 97, 111, 125, 139 y 160.

Los parámetros fisicoquímicos estudiados fueron: medición semanal de temperatura, siendo cada lectura el promedio de siete medidas hechas en lugares diferentes de la pila. El pH se midió con po-

tenciómetro, en relaciones muestra agua de 1:5 y 1:10. El color se determinó por comparación con la tabla Munsell. La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) por el método de Harada (11). El contenido de cenizas se cuantificó por pérdida de peso, después de calcinación a 600°C, durante 12 horas⁽¹²⁾. El porcentaje de Materia Orgánica se determinó como la diferencia entre el 100% y el porcentaje de cenizas. Se separó la fracción acuosa agitando mecánicamente 10,0 g de cada muestra con 100 mL de agua por 24 horas, este extracto se filtró y se almacenó en nevera. El nitrógeno se evaluó en la muestra sólida y en el extracto acuoso; en la muestra sólida se determinó por el método de micro-Kjeldahl, con 0,0500 g de muestra, 3 ml de H₂SO₄ concentrado y 0,1 g de mezcla catalizadora (K₂SO₄, CuSO₄.5H₂O y Selenio). En el extracto acuoso se cuantificó también por micro-Kjeldahl secando 20 ml del extracto a baja temperatura (aproximadamente 40°C) y haciendo la digestión del residuo con 3 mL de H₂SO₄ concentrado y 0,1 g de mezcla catalizadora (K₂SO₄, CuSO₄.5H₂O y Selenio)⁽¹³⁾. El contenido carbono orgánico total se determinó por el método de Walkley – Black tanto en la muestra sólida como en el extracto acuoso; en el primer caso se oxidó 0,0100g de muestra con 5,0 mL de K₂Cr₂O₇ 1N y 10,0 mL de H₂SO₄ concentrado y se tituló con sulfato ferroso amónico 0,5N usando difenilamina como indicador; para el extracto acuoso se tomó una alícuota de 5 mL que fue secada y oxidada con 5,0 mL de K₂Cr₂O₇ 1N y 10,0 mL de H₂SO₄ concentrado, se tituló con sulfato ferroso amónico 0,5N⁽¹³⁾. El porcentaje de hidrosolubles se evaluó cuantificando el peso del residuo al secar 5 mL del extracto

Tabla 1. Diferentes adiciones en el manejo de los procesos de compostaje.

Producto	Compostaje Directo*		Compostaje Indirecto*	
	Día	Cantidad	Día	Cantidad
NH ₄ NO ₃ (20% P/V N)	1	20 litros	1	20 litros
			33	10 litros
			86	10 litros
Ca(OH) ₂	1	4 Kg	1	4 Kg
Caldo microbiano comercial.	1 - 155	24 litros cada semana	1 - 55	20 litros cada semana
			61 - 153	24 litros cada semana
Lombriz de tierra			68	80 Kg
			90	60 Kg
Melaza			68	1 litro

* Las cantidades indicadas se adicionaron a 14 y 12m³ de material en el proceso directo e indirecto respectivamente.

acuoso a 60°C durante 24 horas. Finalmente se llevó a cabo una prueba de germinación con semillas de berro (*Lepidium sativum*), colocándolas sobre algodón en cajas de Petri con 10 mL del extracto acuoso e incubando a 27°C durante 12 días.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para el compostaje directo aparecen en la tabla 2 y para el indirecto en la tabla 3. La humedad fue mantenida constante en los dos procesos adicionando agua o destapando los sistemas de compostación, con el fin de establecer una variación sólo en el rango de 70-80%. Este intervalo es cercano al óptimo recomendado por Cegarra de 50-70%₍₁₄₎. Cuando el pa-

rámetro dejó de controlarse el contenido de humedad disminuyó aproximadamente un 10% en una semana.

En el monitoreo de temperatura se observó que la etapa mesófila tuvo una duración de sólo dos días en los dos procesos variando desde 17°C hasta una temperatura máxima de 62°C (Figura 1). En la segunda etapa –fase termófila– se registraron temperaturas que descendieron

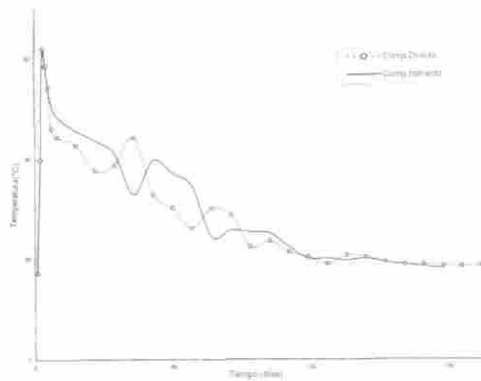


Figura 1. Variación de la temperatura.

desde los 62°C hasta los 45°C. Esta fase se mantuvo por más tiempo en el proceso indirecto, diferencia que se puede atribuir al sistema de contenedores empleado ya que el sustrato de compostación utilizado fue el mismo; en el sistema de panelas se favorece el mantenimiento de altas temperaturas en el centro de la misma, por el contrario en el sistema de camas el material queda más disperso y hay menos posibilidad de un foco de calentamiento. Iglesias⁽¹⁰⁾ en un compostaje de residuos urbanos encontró que la fase termófila se mantenía por mucho más tiempo. La fase de enfriamiento involucra temperaturas entre 45°C y 20°C⁽¹⁵⁾, en esta etapa se introdujeron las lombrices en el proceso indirecto ya que sobreviven sólo entre 18°C y 25°C. Finalmente la fase de madurez (con temperaturas menores a 20°C), fue muy similar en los dos procesos. Se considera que en esta etapa la actividad microbiana se reduce.

La variación del color fue similar en los dos procesos, con una ligera diferencia entre el color del material inicial (oliva grisáceo) y el de los productos de compostación (oliva pardo). En la muestra seca, difícilmente se logra diferenciar una muestra de otra por su color y mucho menos establecer si el compost está maduro. La ausencia de variación significativa en el color ha hecho que sea descartado como índice de madurez por algunos investigadores⁽¹⁵⁾.

El pH fue medido en relaciones muestra:agua 1:5 y 1:10. En la relación 1:10 se presentan valores ligeramente más altos debido al factor de dilución, ésta es la más empleada por varios investigadores por lo que se tomó para la discusión. Existe en ambos procesos una amplia diferencia en-

tre el pH del sustrato y el del material después de la primera semana de compostación, debido a la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ efectuada en el día del cargue del desecho en los contenedores. El pH continúa en aumento hasta un valor máximo cercano a 7,7 producido por la liberación de amoníaco por la ruptura de proteínas y luego desciende hasta el final del proceso. En el proceso directo se alcanzan valores inferiores a 7,0, debido probablemente al sistema de compostación en el que no se favorecen focos de alta temperatura que aceleren los procesos de descomposición del material.

El porcentaje de materia orgánica disminuye en los dos procesos a medida que transcurre el tiempo de compostaje, disminución que es más pronunciada en las primeras ocho semanas, no obstante, la tasa de disminución es mayor en el proceso directo ya que ha recibido una mayor adición de microorganismos que son los encargados de consumir la materia orgánica. Los resultados muestran comparativamente que la acción de la lombriz de tierra no es evidente en la descomposición de la materia orgánica; en consecuencia los microorganismos son los que desempeñan un papel importante en dichos procesos de degradación. Un comportamiento exponencial en la variación del contenido de materia orgánica, similar al presentado aquí fue encontrado por Martínez-Iñigo y Almendros⁽⁹⁾, en un compostaje directo de residuos forestales de roble y por Iglesias y Pérez⁽¹⁰⁾ en otro de residuos urbanos.

De otro lado, en ambos procesos el porcentaje de cenizas aumenta a medida que se desarrolla el compostaje, producido por el avance del proceso de minerali-

Tabla 2. Variación de parámetros fisicoquímicos estudiados en el compostaje directo. Cada valor es el producto de tres determinaciones.

Día	Humedad	pH 1:10	Color	% Cenizas	% M.O.	CIC meq/100g	% C org total	% N Total	C/N	% C org total acucoso	% N total acucoso	C/N acucoso	% Hidro-solubles	% Germinación
1	35,48	5,66	7,5 Y 5/3	8,55	91,45	59,24	38,18	1,60	23,86	2,88	0,075	38,40	2,95	5,6
8	69,88	7,37	7,5 Y 3/2	13,98	86,02	82,77	35,59	2,41	14,77	1,09	0,039	27,95	3,06	11,1
15	75,62	7,09	7,5 Y 4/3	15,69	84,31	112,24	34,93	2,32	15,06	0,98	0,038	25,79	3,18	16,7
22	77,32	7,55	5 Y 5/4	18,88	81,12	129,73	33,15	2,30	14,41	0,71	0,031	22,90	3,40	22,2
29	80,12	7,71	5 Y 5/4	21,04	78,96	138,30	32,28	2,21	14,61	0,68	0,030	22,67	3,62	33,3
36	81,24	7,60	5 Y 4/3	23,50	76,50	153,82	31,23	2,08	15,01	0,46	0,029	15,86	4,03	27,8
43	76,13	6,60	5 Y 4/3	26,11	73,89	165,42	30,02	3,86	7,78	0,35	0,046	7,61	4,22	27,8
57	77,68	7,04	5 Y 3,5/3	29,85	70,15	174,81	29,87	3,65	8,18	0,28	0,041	6,83	4,53	44,4
71	75,46	6,80	2,5 Y 5/4	31,14	68,86	183,00	29,53	3,25	9,09	0,31	0,038	8,16	4,98	55,6
85	80,77	6,78	2,5 Y 4/3	32,69	67,31	189,10	29,69	3,06	9,70	0,29	0,036	8,06	5,61	50,0
99	78,86	6,63	2,5 Y 2,5/3	33,82	66,18	190,41	28,80	3,28	8,78	0,20	0,038	5,26	6,03	55,6
113	75,36	5,86	2,5 Y 4,4	34,97	65,03	190,83	27,46	2,95	9,31	0,17	0,027	6,30	6,96	61,6
127	79,59	5,43	2,5 Y 3/3	35,69	64,31	188,73	27,36	2,87	9,53	0,15	0,026	5,77	7,86	55,6
141	78,79	5,76	2,5 Y 3,5/3	35,80	64,20	190,24	27,42	2,75	9,97	0,15	0,024	6,25	9,15	61,6
162	69,34	5,70	2,5 Y 4/3	35,91	64,09	190,68	27,29	2,68	10,18	0,14	0,025	5,60	11,83	61,6

Tabla 3. Variación de parámetros fisicoquímicos estudiados en el compostaje indirecto. Cada valor es el producto de tres determinaciones.

Día	Humedad	pH	Color	% Cenizas	% M.O.	CIC meq/100g	% C org total	% N Total	C/N	% C org total acucoso	% N total acucoso	C/N acucoso	% Hidro-solubles	% Germinación
1	35,48	5,66	7,5 Y 5/3	8,55	91,45	59,24	38,18	1,60	23,86	2,88	0,075	38,40	2,95	5,6
6	74,36	6,53	7,5 Y 4/3	12,05	87,95	78,51	36,53	2,61	14,00	1,28	0,055	23,27	3,03	11,1
13	71,22	6,99	7,5 Y 3/2	14,58	85,42	97,14	34,14	2,41	14,17	1,14	0,044	25,91	3,32	27,8
20	77,14	7,41	5 Y 4/3	17,37	82,63	114,12	33,98	2,22	15,31	1,02	0,043	23,72	3,57	22,2
27	79,01	7,82	2,5 Y 4/3	23,11	76,89	126,28	33,07	1,78	18,58	0,88	0,038	23,16	3,84	33,3
34	79,93	7,78	2,5 Y 3/2	25,08	74,92	139,04	33,11	2,90	11,42	0,63	0,043	14,65	4,16	33,3
41	76,39	7,01	2,5 Y 3/3	27,19	72,81	156,32	32,99	2,36	13,98	0,53	0,020	26,50	4,38	36,1
55	83,05	7,55	2,5 Y 4/4	28,53	71,47	168,89	32,75	2,87	11,41	0,38	0,042	9,05	4,75	27,8
69	82,98	7,59	2,5 Y 3/2	29,91	70,09	175,15	32,01	2,60	12,31	0,34	0,040	8,50	5,52	44,4
83	81,12	7,68	2,5 Y 4/3	31,21	68,79	170,23	29,56	2,59	11,41	0,29	0,038	7,63	5,84	44,4
97	80,23	7,55	2,5 Y 3/2	31,68	68,32	173,55	28,86	3,17	9,10	0,27	0,043	6,28	6,32	50,0
111	80,22	7,8	2,5 Y 3/3	31,82	68,18	172,52	29,26	3,07	9,53	0,19	0,034	5,59	7,04	55,6
125	78,54	7,56	2,5 Y 4/2	32,03	67,97	172,87	28,78	3,30	8,72	0,19	0,035	5,43	9,14	55,6
139	80,69	7,46	2,5 Y 4/3	32,11	67,89	172,67	28,53	3,02	9,45	0,16	0,032	5,00	10,36	61,6
160	73,29	7,42	2,5 Y 4,4	32,19	67,81	174,37	28,21	2,64	10,69	0,14	0,029	4,83	12,42	61,6

zación de elementos como nitrógeno y fósforo; resultados similares han sido encontrados por Petrusi y colaboradores⁽¹⁶⁾, Baca y colaboradores⁽¹⁷⁾, Forster, Zech y Wurdinger⁽¹⁸⁾, entre otros. A partir del día 71 en el proceso indirecto el aumento en el porcentaje de cenizas es más leve, coincidiendo con la aplicación de las lombrices (día 65), quienes consumen parte de los minerales formados como fuente de nutrientes, ocasionando que la tasa de incremento en el contenido de cenizas disminuya, lo cual conduce a valores semejantes en los dos procesos. Los resultados del porcentaje de cenizas son comparables con el obtenido por Iglesias⁽¹⁰⁾ en un compostaje de residuos urbanos y en un compostaje de residuos urbanos estudiado por García y colaboradores⁽¹⁵⁾.

Los valores de la CIC están expresados en base seca, libre de cenizas, de acuerdo con la recomendación de Harada e Inoko⁽¹¹⁾, quienes consideran que la sílice de las cenizas aporta una cantidad de cargas negativas que no pueden ser despreciables. Se aprecia en ambos procesos un aumento a través del tiempo de compostaje, siendo más rápido en la primera semana, mostrando finalmente una tendencia a estabilizarse. El incremento en el valor de la CIC se explica por la presencia de grupos fenólicos, y por procesos oxidativos, en los que los grupos metílicos liberados de la celulosa, entre otros, son convertidos enzimáticamente a grupos carboxilo⁽⁹⁾. Como se había notado para otras variables, la adición de lombrices tampoco tuvo una incidencia significativa. Para compost de residuos urbanos, Harada e Inoko⁽¹¹⁾ proponen como índice de madurez, un valor mínimo de 60meq/100g, aunque aclaran que es ex-

clusivo para este tipo de materiales; Iglesias⁽¹⁰⁾ sugiere como óptimo un valor de CIC mayor a 67meq/100g en compost de residuos urbanos. Los resultados de la CIC no son comparables a los anteriores debido a que los sustratos son distintos.

El porcentaje de carbono orgánico total fue determinado a las muestras tanto en fase sólida como en el extracto acuoso. El comportamiento observado es similar al mostrado por la materia orgánica. La velocidad de decrecimiento del porcentaje de carbono orgánico es mayor en el proceso directo, a pesar de ser más larga la fase termófila del proceso indirecto, se esperaba que sucediera lo contrario, ya que en una fase termófila más prolongada la actividad de los microorganismos es mayor. La adición de lombrices no ocasionó variaciones considerables en la velocidad de decrecimiento del porcentaje de carbono orgánico, es decir, aparentemente no aceleró el proceso de degradación del material. Iglesias⁽¹⁰⁾ en un compostaje directo de residuos urbanos también encontró inicialmente una disminución marcada del porcentaje de carbono total, con una posterior estabilización. El comportamiento de la variación de carbono orgánico a través del proceso se puede atribuir a que el consumo de las fuentes carbonadas es mayor en las primeras semanas, cuando los microorganismos utilizan los azúcares y otras sustancias fácilmente degradables, luego el decrecimiento es menor ya que se empiezan a consumir celulosa y hemicelulosa. La variación del porcentaje de carbono orgánico total en el extracto acuoso es similar al del material sólido. García y colaboradores⁽¹⁵⁾ encontraron en un compostaje directo de lodos residuales, decrecimiento en el porcentaje de

carbono orgánico en el extracto acuoso desde un 2,76% en el sustrato hasta un 0,33% en el producto final, luego de 210 días de compostaje.

En los dos procesos se presentó un incremento en el contenido de nitrógeno en la primera semana, debido a la adición de NH_4NO_3 en el día del cargue del material, luego este parámetro está condicionado por su adición durante el proceso. La cantidad de nitrógeno en el extracto acuoso es mucho menor que la presente en el material sólido, esto se debe a que el nitrógeno del extracto proviene en su mayoría de aminoácidos solubles que se liberan tras la ruptura de las cadenas peptídicas, los que estarían en menor cantidad en las primeras semanas del proceso⁽¹⁹⁾.

La relación C/N se calculó en fase sólida y en el extracto acuoso. La relación inicial en fase sólida es cercana a 24, lo que asegura un buen balance de energía y nutrientes para los microorganismos. El valor ideal para la relación C/N al comienzo de cualquier proceso según Cegarra⁽¹⁴⁾ debe estar entre 25 y 30. En los dos procesos se aprecia que la relación C/N disminuye bruscamente al cabo de la primera semana, esto se debe a que se ha incorporado una fuente adicional de nitrógeno al sistema. El valor de la relación C/N en los dos productos finales de compostación está cercano al mínimo de 12,0 establecido como óptimo por Iglesias⁽¹⁰⁾ para compost de residuos urbanos. El comportamiento de la relación en fase acuosa es muy similar al de la fase sólida para los dos procesos, aunque la relación C/N acuosa inicial es más alta. Esto indica que las formas solubilizadas en el sustrato no son precisamente del tipo proteico, sino predominantemente azúca-

res, razón por la cual hay una aparente escasez de nitrógeno comparado con el carbono soluble en agua. La relación en fase acuosa disminuye durante el proceso apreciándose una aparente estabilización, en valores cercanos a 6,0 en el proceso directo y 5,0 en el proceso indirecto, debido al descenso del carbono y el nitrógeno a expensas de la actividad de los microorganismos.

En cuanto al porcentaje de hidrosolubles, en ambos procesos se observa una disminución a medida que avanza el compostaje. En la primera semana se registra el mayor decrecimiento en el contenido de hidrosolubles, de tal forma que en el día 22 del proceso directo y el día 20 del indirecto han desaparecido alrededor del 50% de las sustancias solubles en agua. El decrecimiento es más acelerado en el proceso directo, a raíz de la población microbiana más alta. Contrario al comportamiento observado en el carbono orgánico y en la materia orgánica, no se presenta una estabilización en las últimas semanas (fase de madurez), ya que los microorganismos necesitan seguir consumiendo estas sustancias que constituyen su fuente de energía más fácilmente disponible. En la bibliografía consultada este parámetro no ha sido determinado.

El ensayo de germinación con semillas de berro no se realizó de la misma forma que corresponde al test de Zucconi⁽¹²⁾, se calculó solamente el porcentaje de semillas germinadas a 27°C durante 12 días en un soporte de algodón, condiciones con las que se obtuvieron los mejores resultados. Se encontró que el porcentaje de semillas germinadas aumenta conforme avanza el proceso de compostaje hasta valores cercanos al 62% en el producto final

de ambos procesos. Dicho incremento señala que las sustancias fitotóxicas desaparecen progresivamente con el tiempo de compostaje coincidiendo con los resultados de Martínez-Iñigo y Almendros⁽⁹⁾. El porcentaje de germinación en el extracto acuoso proveniente del sustrato inicial es bastante bajo, lo que sugiere que su aplicación directa al suelo resultaría muy poco benéfica para las plantas.

CONCLUSIONES

Las transformaciones más profundas en el material se llevaron a cabo principalmente en las fases termófila y mesófila del proceso, corroborándose con el hecho de que una fase termófila más prolongada, como la del proceso indirecto, origina cambios más notables en el material, marcando este hecho la verdadera diferencia entre uno y otro compostaje.

Se observó el efecto benéfico de los microorganismos en la variación de los contenidos de cenizas y en la relación C/N. Por el contrario la incorporación de la lombriz de tierra en el sistema no mejora el proceso de mineralización.

La CIC, los porcentajes de materia orgánica, cenizas y carbono orgánico total, la relación C/N presentaron tendencias similares, grandes cambios en las primeras semanas y posterior estabilización.

En el sistema de compostación de pannels la fase termófila se mantuvo por más tiempo, por lo que este sistema resultó mejor que el de camas, al mostrar grandes ventajas que se reflejan en el avance del proceso de mineralización, así mismo el tiempo de compostación puede ser reducido de 160 a 100 días como máximo.

A nivel de las metodologías empleadas se corroboró que el color es el parámetro menos adecuado para la determinación del estado de madurez del compost y que por el contrario la variación de temperatura y la determinación del porcentaje de germinación pueden ser adoptadas como ensayos de rutina para controlar el proceso. Se recomiendan por su sencilla determinación analítica la CIC, los contenidos de cenizas e hidrosolubles para determinar el grado de madurez óptima del compost, sugiriendo valores óptimos de 180 meq/100g, 33% y 6% respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Lampkin, N. *Organic Farming*. Farming Press, Londres, 1994.
2. Hurtado, C.; Delgado, M. *La Lombricultura*. Incolta, Santiago de Chile, 1988.
3. Chamorro C. Avances en el conocimiento de las lombrices de tierra en Colombia. *Memorias VII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo: El componente biorgánico del suelo*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bucaramanga. 1994, 189-195.
4. Torrente, A.; Gómez, J. Metodología para la extracción de sustancias húmicas de lombricompostos y evaluación de sus rendimientos. *Suelos Ecuatoriales*. 1995, 25, 43-46.
5. Gómez, J.; Miranda, J.; Menjivar, J.; Cármen, M.; Torrente, A. De los residuos a los productos orgánicos. *Memorias Curso Master Internacional: Aprovechamiento de Residuos*

- orgánicos, Universidad Nacional de Colombia, Palmira. **1996**.
6. Suárez, S. La materia orgánica en la productividad y sostenibilidad de la zona cafetera. Memorias VII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo: El componente biorgánico del suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bucaramanga. **1994**, 16-21.
 7. Cadavid, L. Mejoramiento de la fertilidad del suelo en base a residuos de porquerizas. Suelos Ecuatoriales. **1983**, 13, (1), 82-92.
 8. Muñoz, R. Uso de residuos de origen animal en la producción de cultivos. Suelos Ecuatoriales. **1983**, 13 (1), 94-104.
 9. Martínez-Iñigo, M.J.; Almendros, G. Kinetic study of the composting of evergreen oak forestry waste. Waste management & Research. **1994**, 12, 305-314.
 10. Iglesias, E.; Pérez, V. Determination of maturity indices for city refuse compost. Agriculture, Ecosystems and Environment. **1992**, 38, 331-343.
 11. Harada, Y.; Inoko, A. Relationship between cation-exchange capacity and degree of maturity of city refuse compost. Soil Sci. Plant Nutr. **1980**, 26 (1), 127-134.
 12. Blanco, M.J.; Almendros, G. Evaluation of parameters related to chemical and agrobiological qualities of wheat-straw composts including different additives. Bioresource Technology. **1995**, 51, 125-134.
 13. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Cuarta edición. Bogota, D.E. **1990**.
 14. Cegarra, J. Compostaje de desechos orgánicos y criterios de calidad del compost. Memorias VII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo: El componente biorgánico del suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bucaramanga. **1994**, 22 - 35.
 15. García, C.; Hernández, T.; Costa, F.; Ayuso, M. Comparison of humic acids derived from city refuse with more developed humic acids. Commun. Soil Sci. Plant Anal. **1992**, 23 (13 y 14), 1501-1512.
 16. Petrusi, F.; De Nobili, M.; Viotto, M.; Sequi, P. Characterization of organic matter from animal manures after digestion by earthworms. Plant and Soil. **1988**, 105, 41-46.
 17. Baca, M.T. Changes in the gas phase of compost during solid-state fermentation of sugarcane bagasse. Biore-source Technology. **1993**, 44, 5-8.
 18. Forster, J.C.; Zech, W.; Würdinger, E. Comparison of chemical and microbiological methods for the characterization of the maturity of compost from contrasting sources. Biol. Fertil. Soils. **1993**, 16, 93-99.
 19. Burbano, H. El Suelo: Una visión sobre sus componentes biorgánicos. Universidad de Nariño, Pasto. **1989**.