

Indicadores de calidad bioquímica y estabilidad de la materia orgánica durante el proceso de compostaje de residuos orgánicos

Yudith Acosta, Maziad El Zauahre, Lesdybeth Rodríguez,
Nicolás Reyes y Dickon Rojas

Laboratorio de Investigaciones y Servicios Ambientales (LISA). Universidad del Zulia.

Núcleo Punto Fijo.

yukitaluz@gmail.com

Resumen

Una mezcla de lodo residual municipal, estiércol caprino y residuo del procesamiento industrial de la sábila (*Aloe vera*) fue compostada aeróbicamente durante 210 días y durante el proceso se evaluaron los cambios ocurridos en la actividad de las enzimas *B*-glucosidasa (ABG), ureasa (AU), fosfatasa (AF) y arilsulfatasa (AAS), involucradas en los ciclos del C, N, P y S; los cuales son nutrientes muy importantes para las plantas y Deshidrogenasa (ADH) indicadora de la actividad de los organismos vivos. De igual forma se evaluaron las variaciones en las diferentes fracciones de la materia orgánica (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y sustancias no húmicas) lo que permitió calcular, durante el proceso de biodegradación de la mezcla de los residuos orgánicos, diferentes parámetros de humificación tales como índice (IH), grado (GH), tasa (TH) y relación de humificación (RH), entre otros. Los resultados indicaron que la ADH, AU y AF se incrementaron durante el proceso, siendo este cambio significativo ($p < 0,05$) para la ADH y AU; obteniéndose para estas últimas los siguientes valores a los 0 y 210 días, respectivamente: ADH (1267 ± 489 y $3213 \pm 313 \mu\text{gTPFg}^{-1}24\text{h}^{-1}$); AU (167 ± 21 y $827 \pm 60 \mu\text{gN-NH}_4\text{g}^{-1}2\text{h}^{-1}$). Por el contrario la ABG y la AAS disminuyeron en forma significativa. En referencia a los parámetros de humificación, el IH resultó ser 0,73 (< 1) y el GH 58% ($> 50\%$), indicando la madurez y estabilidad de la materia orgánica en el producto obtenido. Las variaciones registradas en la actividad enzimática, así como los resultados obtenidos en los parámetros de humificación sugieren la posibilidad de usar estos parámetros como indicadores de calidad bioquímica y estabilidad de la materia orgánica en este tipo de compost.

Palabras clave: residuos orgánicos, compostaje, parámetros bioquímicos, indicadores de calidad.

* Ponencia Institucional, arbitrada y presentada en la Expo-CONDES (2012)

Biochemical Quality and Stability Indicators for Organic Matter in the Process of Composting Organic Residues

Abstract

A mixture of sewage sludge, goat manure and residue from the industrial processing of aloe (*Aloe vera*) was composted in aerobic form for 210 days and during the process, changes were evaluated in the enzyme activity for *B*-glucosidase (BGA), urease (UA), phosphatase (PA) and arilsulfatase (ASA) involved in the C, N, P and S cycles, which are very important nutrients for plants and dehydrogenase (DHA), an indicator for live organism activity. Likewise, variations in the different fractions of organic matter (humic acids, fulvic acids and non-humic substances) were evaluated, which made it possible, during the biodegradation process of the organic residue mixture, to calculate different humification parameters such as index (HI), grade (HG), rate (HR) and ratio, among others. Results indicated that the DHA, UA and PA increased during the process with a significant change ($p < 0,05$) for the DHA and UA; the following values were obtained at 0 and 210 days, respectively: DHA (1267 ± 489 and $3213 \pm 313 \mu\text{gTPF g}^{-1}24\text{h}^{-1}$); UA (167 ± 21 and $827 \pm 60 \mu\text{gN-NH}_4 \text{g}^{-1}2\text{h}^{-1}$). On the contrary, BGA and ASA diminished in a significant manner. Regarding the humification parameters, the Humification Index turned out to be 0.73 (< 1) and the Humification Grade 58% ($> 50\%$), indicating the maturity and stability of the organic matter in the obtained product. The variations in enzymatic activity as well as the results obtained in humification parameters suggest the possibility of using these parameters as indicators for the biochemical quality and stability of organic matter in this type of compost.

Keywords: organic residues, composting process, biochemical parameters, quality indicators.

Introducción

En la actualidad, se ha incrementado el uso de los residuos orgánicos y sus composts sobre el suelo, debido también al incremento de los costos de energía y al reconocimiento cada vez más convincente entre los agrónomos del valor de estos residuos como complemento de los fertilizantes inorgánicos; por lo que de no aprovecharse estos recursos se perderían [13]. Esto apoya la motivación ecológica de reciclar en los suelos agrícolas la materia orgánica y los elementos fertilizantes contenidos en los residuos orgánicos [1].

El valor fertilizante de los residuos orgánicos, especialmente de los composts de lodos residuales, ha sido bien estudiado y se han obtenido resultados satisfactorios cuando estos han sido aplicados como enmiendas al suelo y también en muchos ensayos comparativos de su efectividad con relación a los fertilizantes químicos [3, 4, 8, 31]. Asimismo, la aplicación de estiércoles y residuos vegetales

como abono a los suelos ha sido una práctica frecuente, tradicional y muy antigua; la cual se sigue efectuando en la actualidad en vista de los beneficios que aporta para mejorar la productividad de los suelos [14].

El incremento de la productividad agronómica y el mejoramiento de la calidad ambiental son las metas más importantes planteadas para el siglo XXI, e incluye no solamente alcanzar la seguridad en la provisión de los alimentos y poner fin a la degradación de los suelos, sino también restaurar los suelos degradados y mejorar la calidad del ambiente [23], por lo que cobra relevante importancia el estudio de los residuos orgánicos, a fin de promover su uso para este propósito.

Se ha determinado que en el manejo de suelos con residuos orgánicos, contribuye a incrementar la materia orgánica en los mismos, así como la biomasa microbiana y su actividad; si se compara con suelos fertilizados inorgánicamente o sin enmiendas orgánicas [17]. La actividad microbiana comprende un amplio espectro de actividades muy

dinámicas y ésta puede ser evaluada determinando, además de parámetros generales como la respiración y la biomasa microbiana, otros más específicos como la actividad de las enzimas [26]. Igualmente se ha demostrado que la aplicación de residuos orgánicos al suelo produce cambios en la actividad de las enzimas [19, 28, 30].

La actividad bioquímica total del suelo está constituida por una serie de reacciones catalizadas por enzimas. Las enzimas son proteínas solubles, de naturaleza orgánica y estado coloidal, elaboradas por las células vivas, que actúan independientemente de éstas, tienen poder catalítico específico y se destruyen por el calor húmedo a 100 °C. Por lo complejo y variable de los sustratos que sirven como fuente de energía para los microorganismos, el suelo contiene un amplio grupo de enzimas, cuyas principales categorías son las oxidoreductasas (deshidrogenasa, catalasa, peroxidasa, fenol-oxidasa y gluco-oxidasa), las hidrolasas (celulasas, proteasas, ureasas, xilanasas, nucleasas y fosfatasa), las transferasas y las liasas [34]. Asimismo, procesos como la mineralización y humificación de la materia orgánica se rigen en gran medida por reacciones de oxidación, reducción e hidrólisis; de ahí la importancia del conocimiento de las oxidoreductasas y especialmente de las hidrolasas [27].

El presente estudio se desarrolló a fin de evaluar, a través de la determinación de algunos parámetros bioquímicos, la calidad de una mezcla de residuos orgánicos durante el proceso de su compostaje. A este efecto, se determinó la dinámica de la actividad de las enzimas deshidrogenasa (una de las oxidoreductasas más importantes) y algunas hidrolasas, relacionadas con algunos de los ciclos de los elementos principales tales como fosfatasa (P), ureasa (N), β -glucosidasa (C) y arilsulfatasa (S); y se calculó el índice, grado, tasa y relación de humificación, entre otros parámetros considerados como indicadores del estatus de humificación y estabilidad de la materia orgánica [6, 15, 24, 25].

Los resultados obtenidos de la evaluación de estos parámetros, adquieren significado al complementar información sobre la calidad de la materia orgánica del compost y los beneficios de su aplicación como bioabono al suelo.

Materiales y métodos

Para el proceso de compostaje se empleó una mezcla compuesta por tres tipos de residuos orgánicos de procedencia local: 1. Lodos Residuales Provenientes del tratamiento de aguas servidas, recolectados directamente de

los lechos de secado de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas del Centro de Refinación Paraguaná de PDVSA, ubicada en Amuay, Península de Paraguaná (87 kg). 2. Estiércol de caprino, recolectado en los criaderos de la localidad (85 kg), y 3. Residuo del procesamiento industrial de la sábila (*Aloe vera*), recolectado en una planta procesadora (25 kg). Estos residuos son de fácil obtención, ya que actualmente están siendo generados en cantidades apreciables dentro de la región (Estado Falcón).

El proceso de compostaje de la mezcla de residuos orgánicos se realizó usando el método Indore (aeróbico) de apilamiento por volteos [20], durante 210 días. El contenido de humedad se mantuvo cercana al 60% y la temperatura máxima alcanzada en el proceso fue de 58°C. La determinación en el laboratorio de la Actividad Enzimática y el Fraccionamiento de la Materia Orgánica se efectuó cada 15 días, para lo cual se tomaron muestras de la mezcla por quintuplicado.

Los métodos y técnicas empleados en la determinación de la actividad enzimática se muestran en la Tabla 1.

La composición del humus en la mezcla se determinó de acuerdo al procedimiento recomendado por Sequi *et al.* [33], efectuando el fraccionamiento de la materia orgánica en las muestras de la mezcla de los residuos orgánicos. La extracción se realizó con soluciones de hidróxido de sodio (Na OH 0,1 M) y pirofosfato de sodio ($\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 0,1 M); obteniendo el COT mediante el método de Walkley Black [18] en las fracciones de ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y sustancias no húmicas (NH). Con los valores obtenidos del COT en las fracciones se realizó el cálculo de los diferentes parámetros de humificación, empleando las fórmulas indicadas en la Tabla 2.

El análisis estadístico se realizó con el programa STATISTICA 6.0. Se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) y una prueba de comparación de medias para estudiar las diferencias entre los tiempos de muestreo durante el proceso de compostaje.

Resultados y discusión

La Tabla 3 muestra la caracterización fisicoquímica general de la mezcla de estos residuos orgánicos al inicio (0 días) y al final (210 días) del proceso de compostaje, la cual fue realizada por Acosta *et al.* [2] en un estudio previo.

De este análisis los autores indicaron que las propiedades fisicoquímicas generales registraron cambios significativos ($p < 0,05$) durante el proceso de compostaje, tal como se observa en la Tabla 3; indicando también que

Tabla 1. Métodos y técnicas empleados en la determinación de la Actividad Enzimática en la mezcla orgánica durante el proceso de compostaje.

Enzima	Método	Ref.
Fosfatasa ($gP - NF g^{-1} PS h^{-1}$)	Determinación colorimétrica del p -nitrofenol (p -NF) liberado de una muestra incubada con una solución tamponada de n -nitrofenilfosfato a pH 11 por 1 hora a 37°C. $\lambda = 400$ nm.	[38]
Ureasa ($\mu gN-NH_4 g^{-1} PS 2h^{-1}$)	Determinación colorimétrica del amonio (NH_4^+) liberado de una muestra incubada con una solución de urea por dos horas a 37°C. $\lambda = 690$ nm.	[22]
Arilsulfatasa ($\mu g p-NF g^{-1} PS h^{-1}$)	Determinación colorimétrica del p -nitrofenol (p -NF) liberado de una muestra incubada con p -nitrofenilsulfato por 1 hora a 37°C. $\lambda = 400$ nm.	[38]
β -glucosidasa ($\mu g p-NF g^{-1} PS h^{-1}$)	Determinación colorimétrica del p -nitrofenol (p -NF) liberado de una muestra incubada con una muestra tamponada de p -nitrofenil- β -D-glucopiranosido a pH 12 por 1 hora a 37°C. $\lambda = 400$ nm	[39]
Deshidrogenasa ($g TFF g^{-1} PS 24 h^{-1}$)	Extracción con metanol y determinación colorimétrica del trifenilformazan (TFF) en la muestra incubada con cloruro de trifeniltetrazolio (TTC) a 37°C por 24 horas. $\lambda = 485$ nm.	[9]

Tabla 2. Fórmulas empleadas para calcular los parámetros de humificación en la mezcla orgánica durante el proceso de compostaje.

Parámetro	Fórmula
Índice de Humificación	$IH = NH / (AF + AH)$
Grado de Humificación (%)	$GH = (AF + AH / CE) \times 100$
Tasa de Humificación (%)	$TH = (AF + AH / COT) \times 100$
Relación AF/AH	AF / AH
Grado de polimerización	$GP = AH / AF$
Relación de Humificación (%)	$RH = (CE / COT) \times 100$

CE: carbono extraíble (AH + AF + NH); COT: Carbono Orgánico Total. AH: ácidos húmicos; AF: ácidos fúlvicos; NH: sustancias no húmicas

los resultados obtenidos en las propiedades químicas del producto final dependen de la naturaleza de los residuos orgánicos empleados en la mezcla; tal como ha sido reportado para un gran número de composts derivados de materiales orgánicos de diferente procedencia [21]. Asimismo,

concluyeron que el compost obtenido es un material orgánico rico en nutrientes, libre de sustancias fitotóxicas, que puede ser usado en el suelo para mejorar sus propiedades fisicoquímicas y consecuentemente su fertilidad y productividad.

Tabla 3. Valores en los diferentes parámetros fisicoquímicos generales, (media desviación estándar, n=5) en la mezcla orgánica para el inicio (0 días) y el final (210 días) del proceso de compostaje. [2] (Adaptado parcialmente).

Parámetro	Días		(*) Rango de valores		
	0	210	Bajo	Medio	Alto
COT (%)	33,250 ± 3,628	23,737 ± 1,334	20-29	29-38	38-49
N (%)	2,09 ± 0,33	1,35 ± 0,30	0,5-1,5	1,5-3	3
C/N	28,28	17,58	13-16	16-19	19-40
pH	6,74 ± 0,25	7,97 ± 0,32	-	-	-
CE (mScm ⁻¹)	1,401 ± 0,060	2,873 ± 0,050	0-1	1-2	2

(*) Rango de valores aceptables considerados para compost [13].

1. Actividad enzimática

La Figura 1 muestra gráficamente la dinámica en el tiempo de la actividad de las enzimas hidrolasas: fosfatasa, ureasa, β -glucosidasa y arilsulfatasa, evaluadas durante el proceso de compostaje de los residuos orgánicos.

a. Fosfatasa

Las fosfatasas son importantes, ya que catalizan la hidrólisis del fósforo orgánico actuando sobre una gran variedad de sustratos. Así, hidroliza compuestos orgánicos fosforados, polifosfatos y metafosfatos orgánicos, convirtiendo estos compuestos en otros inorgánicos de fósforo asimilable por las plantas [36]. La Figura 1 (a) muestra los cambios ocurridos en la actividad de la fosfatasa durante el proceso de compostaje. Se observa que la actividad de esta enzima se incrementó aunque no significativamente. Se ha indicado que la fosfatasa es activada si el contenido de fósforo disponible es bajo, un alto contenido de fósforo disponible inhibirá la actividad de la enzima, razón por la cual la síntesis de la enzima puede ser suprimida. Para el suelo, se ha determinado que este efecto se produce, más sobre la síntesis enzimática que sobre la actividad de las enzimas pre-existentes [37].

a. Ureasa

La Figura 1 (b) muestra gráficamente la dinámica en el tiempo de la actividad de la enzima Ureasa durante el proceso de compostaje de los residuos orgánicos, donde se observa que ésta disminuyó en forma significativa ($p < 0,05$) a medida que transcurrió el proceso de compostaje de la mezcla orgánica. Con este resultado se cumplió, comparativamente, la hipótesis de Burn [7], quien indicó que la actividad ureasa del suelo reside en la fracción orgánica del mismo, por lo que las variaciones observadas en ésta se encuentran directamente relacionadas a los cam-

bios en los niveles de materia orgánica en la mezcla. Debido al proceso de biodegradación de la materia orgánica, ésta disminuyó en el tiempo y en la misma forma lo hizo la actividad de esta enzima.

a. β -glucosidasa

La actividad de la enzima β -glucosidasa aporta información acerca de la estabilidad de la materia orgánica constituyente del compost así como de los sustratos carbonados susceptibles a la biodegradación. Estudios realizados indican que esta enzima puede ser inhibida por el contenido de metales pesados o la presencia de componentes tóxicos, por lo tanto la determinación de la actividad de esta enzima no sólo es útil como referencia cualitativa del estado de descomposición en que se encuentra la materia orgánica, sino que puede servir como un bioindicador del estado de contaminación del suelo [16].

La Figura 1 (c) muestra la actividad de la β -glucosidasa durante el proceso de compostaje, donde se observa que las concentraciones de p -NF disminuyeron significativamente de acuerdo al tiempo en un rango de $400,30 \pm 19,468$ a $332,63 \pm 24,511 \mu\text{g } p\text{-NF g}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Esta tendencia refleja la evolución de la biodegradación de la materia orgánica en el experimento, por lo que la actividad de la β -glucosidasa podría ser un buen indicador de la actividad biológica en este proceso, tal como se ha indicado para suelos [27].

Bandick y Dick [5] demostraron que la actividad de esta enzima fue mayor en sistemas agrícolas con cobertura vegetal o tratados con residuos orgánicos, en comparación con los suelos no tratados. Al respecto sugirieron que la actividad de esta enzima refleja los efectos del manejo y tiene una significancia en la ecología microbiana debido a su papel en el ciclo del C y que la aplicación al suelo de residuos orgánicos puede contribuir a mejorar la actividad de esta enzima.

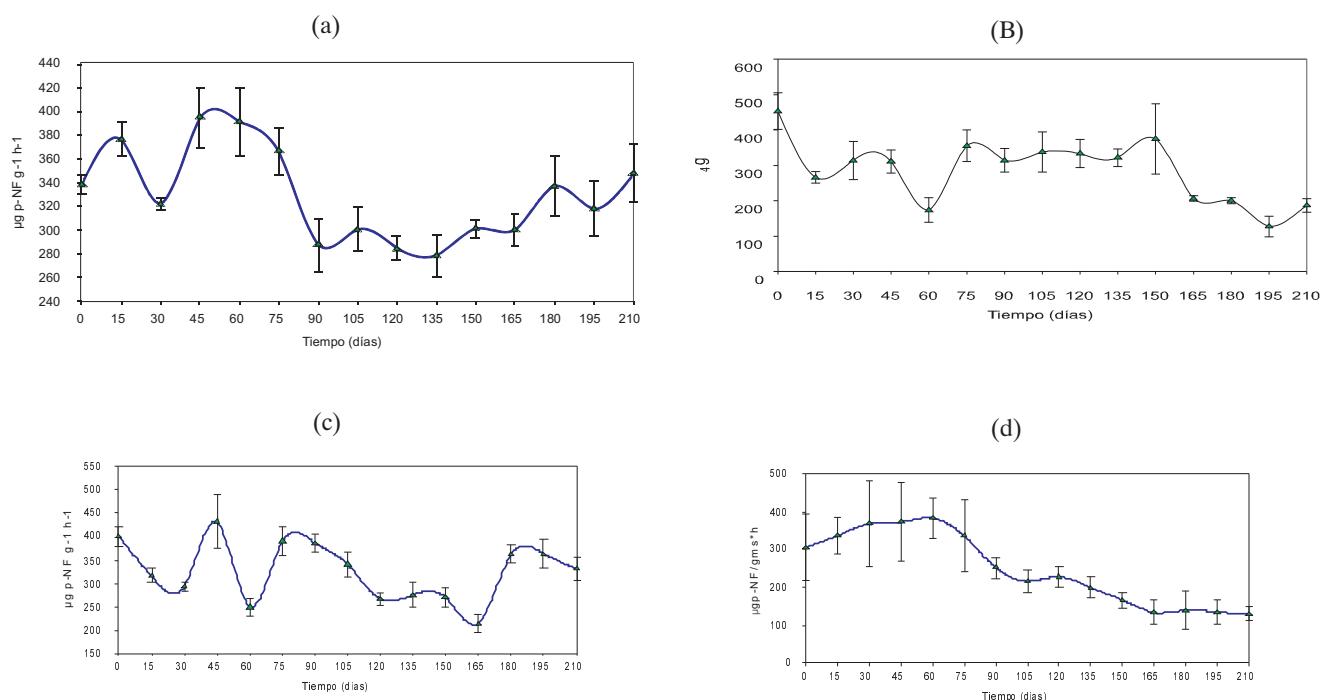


Figura 1. Actividad de las Enzimas Hidrolasas: (a) Fosfatasa, (b) Ureasa, (C) β -glucosidasa y (c) Arilsulfatasa durante el proceso de compostaje de la mezcla de residuos orgánicos (0-210 días). Las barras de error representan (\pm) la desviación estándar ($n=5$).

b. Arilsulfatasa

La Figura 1 (d) muestra gráficamente la dinámica de la actividad de la enzima Arilsulfatasa durante el proceso de compostaje de la mezcla orgánica, donde se aprecia un crecimiento continuo de la actividad enzimática en los primeros 60 días, cuando alcanza un valor máximo de $382,35 \mu\text{g p-NF g}^{-1} \text{h}^{-1}$, para luego mostrar un cambio altamente significativo con tendencia ascendente hacia el final de la medición: $305,32 \pm 89,37$ (0 días)- $129,37 \pm 19,14$ (210 días). Este cambio es originado probablemente por la mineralización de la materia orgánica del compost, debido a que productos de la degradación como P, N total y NO_3^- , entre otros, se ha demostrado que son esencialmente inhibidores de la actividad de la enzima arilsulfatasa [38].

c. Deshidrogenasa

La deshidrogenasa (oxidoreductasa) es una enzima intracelular asociada a los microorganismos proliferantes, la cual no es estabilizada por los coloides inorgánicos (arcillas) y orgánicos (húmicos) del suelo y una vez que es liberada al mismo sufre una rápida degradación por las proteasas [32, 34]. La Figura 2 muestra gráficamente la dinámica de la actividad de la enzima Deshidrogenasa durante el proceso de compostaje de los residuos orgánicos.

Se observa que la mayor actividad de esta enzima se presentó en los dos tiempos siguientes desde el inicio del proceso (15 y 30 días), considerando que es en éste momento cuando se crean las condiciones óptimas de humedad y temperatura, lo que estimula la síntesis de la enzima en mayor cantidad durante los primeros días del proceso [27]. Seguidamente se produce una disminución de la actividad de la enzima deshidrogenasa, y la misma se hace significativa hacia el final del proceso; lo cual se debe, probable y lógicamente, a la tendencia de los nutrientes a agotarse con el transcurso del tiempo. Sin embargo, la actividad de la enzima se mantiene hasta el final del proceso, esto podría significar que ninguno de los residuos orgánicos constituyentes de la mezcla presenta compuestos tóxicos que pudieran afectar la actividad biológica a tal punto que pudiera inhibirse la actividad de esta enzima [29]. Se ha considerado que las deshidrogenasas existen en el suelo como parte integral de las células vivas, con lo cual su determinación es un reflejo de las actividades oxidativas de la microflora del mismo [35].

En general, los resultados alcanzados en la evaluación de la actividad enzimática indican que el proceso de descomposición de los residuos en el proceso de compostaje, produjo cambios significativos en las actividad de las distintas enzimas, sugiriendo a su vez cambios en la actividad

biológica; lo que hace suponer que el tipo de materia orgánica empleada es biológicamente muy activa, y que la misma al descomponerse en el tiempo en humus y minerales produce cambios en la actividad enzimática debido a estos componentes.

2. Parámetros de humificación

Los residuos orgánicos pueden transformarse en complejos orgánicos mediante la acción de los microorganismos que se encuentran en el suelo dando así lugar a la formación de humus cuyo aspecto es negrozco. Este a su vez, se encuentra constituido por ácidos fúlvicos y fulvatos, ácidos húmicos y humatos y por las huminas, que son de vital importancia para un suelo rico en nutrientes, reduciendo la posibilidad de ocasionar daños a las raíces de las plantas cuando existe exceso de acidez. Las raíces, se encuentran mejor en un suelo rico en humus que en uno pobre en esta sustancia.

El humus es una sustancia muy especial y beneficiosa para el suelo y la planta. Aporta beneficios tales como agregar las partículas del suelo, mejorando por tanto su estructura, reteniendo agua y minerales y aportando nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, entre otros) lentamente a las plantas, a medida que este se descompone.

El compost está constituido principalmente por material orgánico que ha sido transformado, el cual contiene un alto valor en humus. Cuando las hojas de los árboles caen al suelo son inmediatamente atacadas por hongos y bacterias e inician su descomposición. Un porcentaje de la hoja se convierte en nutrientes minerales (N, P y K, entre otros) que pueden ser tomados directamente por las raíces de las plantas y otra parte de esa hoja se transforma en humus. Lo mismo ocurre con cualquier otra fuente orgánica que se adicione al suelo, ya sea de origen animal o vegetal, que al ser atacada por los microorganismos se produce el humus por un lado y los nutrientes minerales para las plantas, por otro.

La Figura 3 muestra las variaciones en el tiempo del COT en AH, AF y NH durante el proceso de compostaje de los residuos orgánicos.

El contenido de COT en la fracción de AH decrece significativamente ($p < 0,05$) en el tiempo. Esto puede originarse debido a que los AH son afectados por microorganismos que los degradan con facilidad, además es necesario destacar que los microorganismos se desarrollan bajo ciertas condiciones de temperatura y humedad que pueden variar relativamente durante un periodo de tiempo el proceso de descomposición química. Son muchos los factores que influyen en el comportamiento de

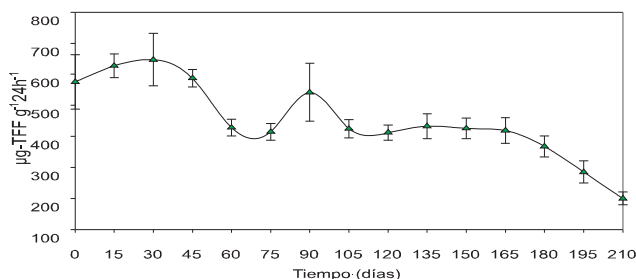


Figura 2. Variación en la Actividad de la enzima Deshidrogenasa durante el proceso de compostaje de la mezcla de residuos orgánicos (0-210 días). Las barras de error representan (\pm) la desviación estándar ($n=5$).

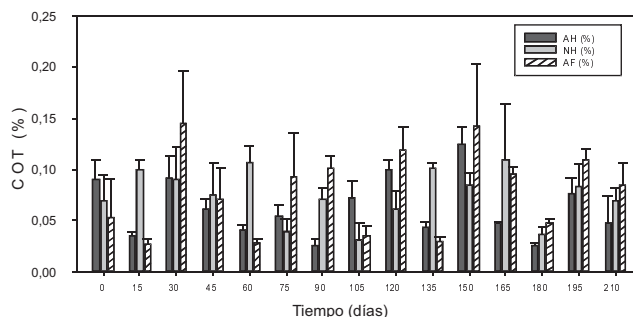


Figura 3. Variación en el contenido de COT para AH, AF y NH durante el proceso de compostaje (0-210 días). Las barras de error representan (\pm) la desviación estándar ($n=5$).

estas fracciones de la materia orgánica, interviniendo directamente las condiciones ambientales que suelen definir dicho comportamiento.

El COT en la fracción de NH presentó un comportamiento oscilatorio manteniendo una concentración constante hacia el final del proceso. Esta fracción contiene polisacáridos, polipéptidos o ligninas alteradas, las cuales no son consideradas como compuestos húmicos [12]. La materia orgánica no humificada en residuos orgánicos también es usada dentro de los parámetros que estiman la calidad de estos materiales, indicando la cantidad de carbono no humificado en relación al carbono humificado.

El contenido de COT en la fracción de AF aumentó significativamente a lo largo del proceso de compostaje, indicando un enriquecimiento en sustancias poli-condensadas.

La Tabla 4 muestra las variaciones en el tiempo en los parámetros de humificación calculados en base a los valores de COT obtenido en las diferentes fracciones de la materia orgánica (AH, AF y NH) durante el proceso de compostaje de los residuos orgánicos.

Tabla 4. Parámetros de Humificación calculados para la mezcla de residuos orgánicos durante el proceso de compostaje (0-210 días).

Día	IH	GH (%)	TH (%)	AF/AH	GP	RH (%)
0	0,331	74,766	0,481	0,778	1,286	0,6436
15	0,200	82,822	0,429	2,857	0,350	0,5185
30	0,797	55,828	0,591	0,978	1,022	1,0590
45	0,518	66,184	0,523	1,210	0,827	0,7897
60	0,196	83,616	0,572	2,610	0,383	0,6844
75	0,989	50,267	0,384	0,741	1,350	0,7641
90	1,041	49,239	0,402	2,731	0,366	0,8167
105	0,340	75,182	0,432	0,431	2,323	0,5743
120	0,739	57,500	0,695	0,610	1,639	1,2095
135	0,208	82,759	0,616	2,349	0,426	0,7448
150	0,676	59,659	0,889	0,680	1,471	1,4903
165	0,611	62,055	0,670	2,340	0,427	1,0804
180	0,774	56,364	0,264	1,480	0,676	0,4686
195	0,688	59,259	0,679	1,105	0,905	1,1459
210	0,733	58,000	0,489	1,468	0,681	0,8426

Fuente: Elaboración propia.

El HI fue menor a 1 y el GH fue mayor al 50% al final del proceso de compostaje de la mezcla de residuos, indicando que el compost obtenido es un material orgánico muy humificado; tal como se ha indicado también para los estiércoles bien maduros [10, 11]. Asimismo, el GP y la RH son índices muy sensitivos y han sido considerados como indicadores de maduración en los procesos de compostaje.

La falta de madurez en los residuos o sus composts es, sin duda, la responsable de los efectos deletéreos que se producen sobre las cosechas. De su uso se derivan riesgos como: la disminución de la concentración de oxígeno a nivel radicular; residuos con elevada relación C/N conllevan a una inmovilización de N, generando una competencia por éste en el suelo, entre los microorganismos y la planta; también a un aumento de la temperatura del suelo, lo que es incompatible con el desarrollo vegetal; acumulación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular y otros metabolitos orgánicos que son sustancias fitotóxicas; al igual que la destrucción incompleta de los organismos patógenos [1, 13].

Conclusiones

De los cambios producidos en las actividades enzimáticas y los parámetros de humificación, se puede concluir

que el proceso de compostaje de materiales orgánicos como el lodo residual, el estiércol caprino y el residuo del procesamiento de la sábila provoca, además de la biodegradación esperada de la materia orgánica, variaciones importantes en la actividad bioquímica, sugiriendo que la mineralización de la materia orgánica presente en los residuos orgánicos involucrados en el proceso generan compuestos capaces de activar la biomasa microbiana. Por otro lado, estos parámetros bioquímicos podrían ser considerados como indicadores sensibles a estos cambios, pudiendo referir la calidad de este tipo de materiales tomando en cuenta que, pese al tiempo empleado para el proceso de compostaje, la actividad de las enzimas se mantuvo en valores apreciables y los parámetros de humificación respondieron sensitivamente, permitiendo evaluar el estatus de humificación y la estabilidad del producto obtenido.

Asimismo, el conocimiento de la magnitud de los cambios generados en estos parámetros bioquímicos permitiría evaluar la conveniencia de la aplicación de este compost para mejorar la actividad microbiológica y consecuentemente la actividad bioquímica del suelo; sumado a la consideración, como alternativa ecológica, de reciclar en el mismo la materia orgánica y los elementos fertilizantes contenidos en este producto.

Agradecimientos

Al FONACIT (Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación) por la subvención otorgada al Proyecto de Investigación S1-2002000403 y al CONDES (Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico) de la Universidad del Zulia, por el registro del Proyecto No Financiado VAC-CONDES CC-0019-05.

Referencias

- [1] ABAD, M. (1998). La gestión de los residuos orgánicos. pp. 27-37. En: **Residuos Orgánicos. Aprovechamiento Agrícola como Abono y Sustrato**. F. Orozco P y W. Osorio (Eds.). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional de Antioquia. Universidad Nacional de Colombia. Impresos Caribe, Ltda. Medellín, Colombia.
- [2] ACOSTA, Yudith; ZÁRRAGA, Anghie; RODRÍGUEZ, Lesdybeth y EL ZUAHRE, Maziad (2012). Cambios en las propiedades fisicoquímicas en el proceso de compostaje de lodos residuales. **Multiciencias**. Vol. 12. Extraordinario. (En prensa).
- [3] ANDRADE, C.; BAO, I.; FERNÁNDEZ, C. y GUI-TIAN, F. (1985). Caracterización química y poder fertilizante de los lodos residuales de la planta depuradora de aguas de Santiago de Compostela. **An. Edafol. Agrobiol.** 144-156.
- [4] AYUSO, M.; HERNÁNDEZ, T; GARCÍA, C. y COSTA, F. (1992). Utilización de un lodo aerobio como sustitutivo de fertilizantes fosforados inorgánicos. **Suelo y Planta**. 2: 271-280.
- [5] BANDICK, A. y DICK, R. (1999). Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biol. Biochem.** 31: 1471-1479.
- [6] BENÍTEZ, E.; NOGALES, R.; ELVIRA, C.; MASCIAN-DARO, G. y CECCANTI, B. (1999). Enzyme activities as indicators of the stabilization of sewage sludges composting with *Eisenia foetida*. **Biores.Techn.** 67: 297-303.
- [7] BURNS, R. (1982). Enzyme Activity in Soil: Location and a possible role in microbial ecology. **Soil Biol. Biochem.** 14: 423-427.
- [8] CANET, R.; POMARES, F.; ESTELA, M. y TARAZONA, F. (1998). Efectos de diferentes enmiendas orgánicas en las propiedades del suelo de un huerto de cítricos. **Agrochimica**. 42 (1-2): 41-49.
- [9] CASIDA, L. J. R.; KLEIN, D. y SANTORO, T. (1964). Soil-dehydrogenase activity. **Soil Sci.** 98: 371-376.
- [10] CIAVATTA, C.; ANTISORI, L. V. SEQUI, P. (1988). A first approach to the characterization of the presence of humified materials in organic fertilizers. **Agrochimimica**. 32 (5-6): 510-517.
- [11] CIAVATTA, C.; GOVI, M.; VITTORI, L. y SEQUI, P. (1990). Characterization of humified compounds by extraction and fractionation on soil polyvinylpyrrolidone. **J. Chromat.** 22 (164): 141-146.
- [12] CIAVATTA, C. y GOVI, M. (1993). Use of insoluble polyvinylpyrrolidone and isoelectric focusing in the study of humic substances in soils and organic wastes. **J. Chromat.** 643: 261-270.
- [13] COSTA, F.; GARCÍA, C.; HERNÁNDEZ, T. y POLO, A. (1991). **Residuos Orgánicos Urbanos. Manejo y Utilización**. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Murcia. España. 181p.
- [14] COURTIER-Murias, Denis.; SIMPSON, André J.; MAR-ZADORI, Claudio; BALDONI, Guido; CIAVATTA, Claudio; FERNÁNDEZ, José M.; LÓPEZ-DE-SÁ, ESTHER G. y PLAZA César (2013). Untraveling the long-term stabilization mechanisms of organic materials in soils by physical fractionation and NMR spectroscopy. **Agricult., Ecosyst. & Environ.** 171: 9-18.
- [15] DÍAZ-Burgos, M.; CECCANTI, B. y POLO, A. (1993). Monitoring biochemical activity during sewage sludge composting. **Biol. Fertil. Soils**. 16: 145-150.
- [16] EIVAZI, F. y TABATABAI, M. (1990). Factors affecting glucosidase and galactosidase activities in soils. **Soil Biol. Biochem.** 22: 891-897.
- [17] FAUCI, M. y DICK, R. (1994). Soil microbial dynamics: short-term effects of inorganic nitrogen. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 58: 801-806.
- [18] FONDO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS (FONAIAP). (1990). **Manual de Métodos y Procedimientos de Referencia. (Análisis de suelo para diagnóstico de fertilidad)**. Serie D. Nº. 26. UCLA, Maracay. 206 p.
- [19] GALVEZ, A; SINICCO, T; CAYUELA, M. L; MINGORANCE, M. D.; FORNASIER, F. y MONDIN, C. (2012). Short term effects of bioenergy by-products on soil C and N dynamics, nutrient availability and biochemical properties. **Agricult., Ecosyst. & Environ.** 160: 3-14.
- [20] GRAVES, R. (2000). National Engineering Handbook: Composting. [documento en línea] Disponible en: <http://www.cfe.cornell.edu/compost/microorg.html>.
- [21] JING-Chun, Tang; YASUSHI, Inoue; TSUYOSHI, Yasuta; SHIGEKATA, Yoshida y ARATA, Katayama (2011). Chemical and microbial properties of various compost products. **Soil Sci. Plant Nutr.** 49 (2): 273-280.
- [22] KANDELER, E. y GERBER, H. (1988). Short-term assay of soil urease activity using colorimetric. 457 p.
- [23] LAL, R. (2000). Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. **Soil Sci.** 165 (3): 191-207.
- [24] NANNIPIERI, P.; SEQUI, P. y FUSI, P. (1996). Humus and enzyme activity. pp. 293-328. In: **Humic Substances in Terrestrial Ecosystems**. A. Piccolo (ed.). Marcel Dekker, New York.
- [25] NANNIPIERI, P. (1994). The potential use of soil enzymes as indicators of productivity, sustainability and pollution. pp. 238-244. In: **Soil Biota Management in Sustainable Farming Systems**. C. Pankhurst; B. Doube; V. Gupta and P. Grace (Eds.). CSIRO. Victoria. Australia.

- [26] NANNIPIERI, P.; GRECO, S. y CECCANTI, B. (1990). Ecological significance on biological activity in soil. pp. 293-355. In: **Soil Biochemistry**. Vol. 6. J. Bollag and G. Stotzky (Eds.). Marcel Dekker, Inc., New York, NY.
- [27] PASCUAL, J. (1995). Efectividad de los Residuos Orgánicos en la Mejora de la Calidad de los Suelos Áridos: Aspectos Biológicos y Bioquímicos. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. España. 428 p.
- [28] PERUCCI, P. (1992). Enzyme activity and microbial biomass in a field soil amended with municipal refuse. **Biol. Fertil. Soils**. 14: 54-60.
- [29] PERUCCI, P. (1990). Effect of addition of municipal solid waste compost on microbial biomass and enzymes activities in soil. **Biol. Fertil. Soils**. 10: 221-226.
- [30] ROCA, A.; PAZ, A.; VIDAL, E. (2008). **Análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo tras la adición de compost procedente de RSU**. Universidad de Coruña, España. pp. 187.
- [31] ROIG, Neus; SIERRA, Jordi; MARTÍ, Esther; NADAL, Martí; SCHUHMACHER, Martha; y DOMINGO, José L. (2012). Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: Effects on soil functioning. **Agricult., Ecosyst. & Environ.** 158: 41-48.
- [32] ROSSEL, D.; TARRADELAS, J.; BITTON, G.; MOREL, J. (1997). Use of enzymes in soil ecotoxicology: a case for dehydrogenase and hydrolytic enzymes. pp. 179-206. In: **Soil Ecotoxicology**. J. Tarradelas, G. Bitton and D. Rossel (Eds.). Lewis Publishers. Boca Raton, Florida.
- [33] SEQUI, P.; DE NOBILE, M.; LEITA, G. y CERCIGNANI, G. (1986). A new index of humification. **Agrochimica**. 30: 1-2.
- [34] SKUJINS, J. (1976). Extracellular enzymes in soil. **Crit. Rev. Microbiol.** 4: 383-421.
- [35] SKUJINS, J. (1978). History of abiotic soil enzyme research. In: **Soil Enzymes**. pp.1-49. Burns R.G. (Ed.). Academic Press, Inc., London.
- [36] SPEIR, T. y ROSS, D. (1978). Soil phosphatase and sulphatase. pp. 198-250. In: **Soil Enzymes**. R. Burns (Ed). Academic Press, Inc., London.
- [37] SPIERS, G. y MCGILL, W. (1979). Effect of phosphorus addition and energy supply on acid phosphatase production and activity in soils. **Soil Biol. Biochem.** 11: 3-8.
- [38] TABATABAI, M. y BREMNER, J. (1969). Use of *p*-nitrophenylphosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biol. Biochem.** 1: 301-307.
- [39] TABATABAI, M. (1982). Soilenzymes. pp. 903-947. In: **Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties**. Segunda Edición. Page, Miller and Keeney (Eds.). Nº. 9. ASA-SSSA. Madinson, USA.