

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL COMPOSTAJE DE RESIDUOS DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL SURESTE DE MÉXICO

Miguel A. Pérez Méndez, Rufo Sánchez Hernández, David J. Palma López y Sergio Salgado García

RESUMEN

Diferentes mezclas de bagazo y cachaza de caña fueron sometidas a compostaje para caracterizar el proceso de la degradación controlada y evaluar el aporte de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ como fuente de nutrientes, así como para seleccionar variables químicas indicadoras de madurez de la composta. El aumento del bagazo en los sustratos mantuvo mayor porcentaje de humedad y redujo la temperatura. En la mayoría de los tratamientos, la fase termofílica del compostaje no se manifestó porque la pérdida de calor superó la ganancia térmica, debido particularmente al pequeño tamaño de las pilas. En la mayoría de los tratamientos la temperatura se estabilizó a los 113 días del compostaje. La adición de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ provocó disminución del pH e incrementó la conductividad eléctrica, NH_4^+ y NO_3^- . Como material compostado se consideró el material

fraccionado físicamente a partículas $<2\text{mm}$. La cachaza fue compostada más rápidamente que el bagazo por su menor relación C/N, mientras que el bagazo fue degradado más lentamente y aumentó la capacidad de intercambio de cationes (CIC). De las variables consideradas como indicadoras de madurez de las compostas se recomiendan aquellas asociadas a las etapas del compostaje; entre ellas, la disminución de temperatura después de la fase termofílica, la producción de NH_4^+ durante la fase termofílica, el incremento de NO_3^- durante la fase mesofílica, y el incremento de la CIC durante la síntesis de sustancias húmicas, particularmente en residuos con alta relación C/N, en los cuales se recomienda el uso de activadores biológicos como el $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, que no son necesarios en sustratos con baja relación C/N.

Introducción

En el estado de Tabasco México, la industria azucarera es una de las que genera mayores volúmenes de residuos

sólidos. Estos residuos son una fuente de contaminación de suelo, agua y aire si no son manejados adecuadamente. El compostaje es una alternativa para que los desechos agroin-

dustriales sean transformados en materiales útiles que pueden ser reincorporados al sistema de producción de donde se originaron. La cachaza y el bagazo de caña son los princi-

pales residuos que genera esta industria. La cachaza es un residuo que se obtiene durante la clarificación del jugo e incluye materias terrosas e impurezas orgánicas; por cada

PALABRAS CLAVE / Compostaje / Índice de Madurez / Residuos de Caña de Azúcar / Sulfato de Amonio /

Recibido: 02/11/2009. Modificado: 10/12/2010. Aceptado: 15/12/2010.

Miguel A. Pérez Méndez. Químico Biólogo Agropecuario, Universidad Autónoma del Estado de Yucatán, México. Maestro en Ciencias, Colegio de Postgraduados (COLPOS), Tabasco, México. Profesor-Investigador, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), México. e-mail: perezmm57@hotmail.com

Rufo Sánchez Hernández. Ingeniero Agrónomo, Instituto Tecnológico Agropecuario N° 28, México. Maestro en Ciencias en Fruticultura y Doctor en Ciencias en Edafología, Colegio de Postgraduados (COLPOS), México. Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, México. Doctor en Ciencias en Edafología, COLPOS, México. Profesor Investi-

gador, UJAT, México. Dirección: División de Ciencias Agropecuarias, UTAJ. Carretera Villahermosa-Teapa Km. 25+200, R/a La Huasteca Segunda Sección, Centro, Tabasco, México. e-mail: rusaher@hotmail.com.

David J. Palma-López. Doctorado en Ciencias en Génesis y Clasificación de Suelos, Institut National Polytechnique de Lorra-

ine, Francia. Profesor Investigador, COLPOS Tabasco, México. Profesor Investigador, COLPOS Tabasco, México. e-mail: dapalma@colpos.mx

Sergio Salgado García. Doctorado en Ciencias en Fertilidad de Suelos, COLPOS, México. Profesor Investigador, COLPOS Tabasco, México. e-mail: salgados@colpos.mx

CHEMICAL CHARACTERIZATION OF SUGARCANE WASTE COMPOSTING IN THE SOUTHEAST OF MEXICO

Miguel A. Pérez Méndez, Rufo Sánchez Hernández, David J. Palma López and Sergio Salgado García.

SUMMARY

Several mixtures of sugarcane bagasse and filter cake were subjected to composting treatment to characterize the controlled degradation process and to evaluate the effect of the incorporation of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ as nutrient source, as well as to select the chemical variables indicative of compost maturity. The increase of bagasse in the substrate led to higher moisture and lower temperature. In the majority of the treatments there was no thermophilic phase since heat loss was higher than thermal gain, due particularly to the small size of the containers. In the majority of the treatments, temperature stabilized 113 days after initiation of composting. The addition of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ provoked pH diminution and increase of electrical conductivity, NH_4^+ and NO_3^- . The material physically fractioned to particles $<2\text{mm}$ was

considered as composted material. The sugarcane filter cake was composted more rapidly than the bagasse due to its lower C/N ratio, whereas the bagasse suffered a slower degradation and an increased its cation exchange capacity (CEC). Of the variables considered as indicators of maturity of the compost, those associated with the composting stage are recommended; among them, the temperature diminution after the thermophilic phase, the production of NH_4^+ during the thermophilic phase, the increase of NO_3^- during the mesophilic phase, and the CEC increase during the synthesis of humic substances, particularly in those wastes with a high C/N ratio. In wastes with high C/N ratio, the use of biologic activators such as $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ is recommended, but it is not necessary in substrates with a low C/N ratio.

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS DE CANA DE AÇÚCAR NO SUDESTE DE MÉXICO

Miguel A. Pérez Méndez, Rufo Sánchez Hernández, David J. Palma López e Sergio Salgado García

RESUMO

Diferentes misturas de bagaço e cachaça de cana foram submetidas a compostagem para caracterizar o processo da degradação controlada e avaliar o aporte de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ como fonte de nutrientes, assim como para selecionar variáveis químicas indicadoras de maturidade do composto. O aumento do bagaço nos substratos manteve maior porcentagem de umidade e reduziu a temperatura. Na maioria dos tratamentos, a fase termofílica da compostagem não se manifestou porque a perda de calor superou o ganho térmico, devido particularmente ao tamanho pequeno das pilhas. Na maioria dos tratamentos a temperatura se estabilizou aos 113 dias da compostagem. A adição de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ provocou diminuição do pH e incrementou a condutividade elétrica, NH_4^+ e NO_3^- . Como material compostado foi considerado o material

fracionado fisicamente a partículas $<2\text{mm}$. A cachaça foi compostada mais rapidamente que o bagaço por sua menor relação C/N, enquanto que o bagaço foi degradado mais lentamente e aumentou a capacidade de intercâmbio de cátions (CIC). Das variáveis consideradas como indicadoras de maturidade do composto se recomendam aquelas associadas às etapas da compostagem; entre elas, a diminuição de temperatura depois da fase termofílica, a produção de NH_4^+ durante a fase termofílica, o incremento de NO_3^- durante a fase mesofílica, e o incremento da CIC durante a síntese de substâncias húmicas, particularmente em resíduos com alta relação C/N, nos quais se recomenda o uso de ativadores biológicos como o $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, que não são necessários em substratos com baixa relação C/N.

tonelada de caña procesada se obtienen 30-50kg de este residuo (Hernández *et al.*, 2008). El bagazo se obtiene en grandes cantidades después de extraer el jugo de la caña, su producción es de 250-400kg por cada tonelada de tallos moladeros que ingresan a la fábrica (Pernalet *et al.*, 2008). Una problemática en el compostaje de los residuos de la caña de azúcar es su lenta degradación, por lo que la adición de fertilizantes para acelerar el proceso de compostaje se ha evaluado con resultados variables. Rao *et al.* (1995) indicaron que al ajustar la relación carbono/nitrógeno (C/N) en residuos de madera a niveles entre 30-50 mediante el aporte de N-urea y al mantener la humedad en 70% se fa-

vorece la mineralización del residuo durante el compostaje. Por su parte, Noble *et al.* (2002) registraron pérdidas de $1740\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de N-amoniaco al adicionar 2,1% de N-urea en paja de trigo, mientras que al sustituir la urea por sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ las pérdidas del amonio se redujeron a $428\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; según estos autores, la diferencia en dichas pérdidas dependieron del pH resultante durante el proceso. Por ello, las características de los residuos y las condiciones ambientales son factores determinantes que deben considerarse durante el compostaje (Santamaria-Romero y Ferrera-Cerrato, 2002). Para considerar como culminado el proceso de compostaje se debe considerar la estabilización del material,

por lo que diversos autores han propuesto indicadores que permitan identificar la madurez de la composta. Cuando una composta está madura, al aportarla al suelo como acondicionador edáfico no conlleva fitotoxicidad, hay liberación lenta de nutrientes, el consumo de N y O disminuye, y la liberación de CO_2 y calor se reduce. Por ello, las plantas no presentan restricciones en la absorción de nutrientes, no hay riesgos de afectar la concentración de O en la rizósfera, y no se observan quemaduras en los tejidos de las plantas (Buttler *et al.*, 2001; Brewer y Sullivan, 2003).

La naturaleza química de los residuos orgánicos determinan la clase de organismos activos durante el proceso de

descomposición de la materia orgánica (MO). Por ello, uno de los índices propuestos como indicadores de madurez en la composta, es la relación C/N. Ortiz y Ortiz (1980) mencionaron que un material con alta relación C/N, como es el caso de la paja de trigo, se descompone lentamente debido a la insuficiencia de N para satisfacer los requerimientos de los organismos que intervienen en la descomposición; dichos residuos forman cantidades relativamente pequeñas de humus y nitratos (NO_3^-), mientras que residuos con baja relación C/N, como los de alfalfa o trébol, se descomponen más rápido y proporcionan una mayor cantidad de humus y nitratos. Sin embargo, Jahn *et al.* (1999) lograron reducir la rela-

ción C/N de desechos municipales ricos en C a través de la conducción de un buen compostaje; en este caso la C/N inicial fue de 35 y al final fue de 13. Mathur *et al.* (1993) analizaron las ventajas y desventajas de este índice, y observaron que bajo un compostaje apropiado, el N se conserva y el carbono (C) se transforma en CO₂ y sustancias húmicas. La relación C/N ideal de una composta madura es ~10, sin embargo es difícil lograr este valor si se considera que los sustratos tienen diferentes niveles de compuestos de difícil degradación tales como la lignina. Los valores de 20 o algo mayores son aceptados, siempre y cuando el descenso de la relación C/N durante el compostaje sea mayor al 50% de la inicial.

La relación NH₄⁺/NO₃⁻ ha sido utilizada con frecuencia como indicador de madurez de la composta, aunque no existe un consenso acerca del valor adecuado que deben tener los materiales al concluir el proceso. Bernal *et al.* (1998) sugirieron que un valor de 0,09 es indicativo de que la composta ha alcanzado la madurez. Sánchez-Monedero *et al.* (2001) consideraron que las compostas alcanzan su madurez cuando registran una relación NH₄⁺/NO₃⁻ de 0,04-0,16.

La capacidad de intercambio de cationes (CIC) y cenizas hidrosolubles para medir la madurez de una composta fueron recomendados por Fariás *et al.* (1999). La razón por la que la CIC puede ser considerada como un indicador de madurez es que cuando el compostaje está en un nivel avanzado, se ve reflejado en la liberación de una gran cantidad de iones monovalentes como NH₄⁺ e H⁺, que incrementan considerablemente la CIC. Mathur *et al.* (1993) sugirieron que una composta está madura cuando, entre otros indicadores, tiene una CIC de 60cmol⁽⁺⁾·kg⁻¹. Venegas *et al.* (2004) reportaron que la CIC y pH indican el grado de humificación de la composta, argumentando que al descomponerse la MO se forman ácidos orgánicos que causan mo-

TABLA I
TRATAMIENTOS RESULTANTES DE LA MEZCLA DE CACHAZA Y BAGAZO DE CAÑA

Nº	Proporción cachaza : bagazo	Nivel de N (%)	Clave
1	100% cachaza : 0% bagazo	0,5	Ca100B0CN
2	100% cachaza : 0% bagazo	0	Ca100B0SN
3	75% cachaza : 25% bagazo	0,5	Ca75B25CN
4	75% cachaza : 25% bagazo	0	Ca75B25SN
5	50% cachaza : 50% bagazo	0,5	Ca50B50CN
6	50% cachaza : 50% bagazo	0	Ca50B50SN
7	25% cachaza : 75% bagazo	0,5	Ca25B75CN
8	25% cachaza : 75% bagazo	0	Ca25B75SN

dificaciones en ambas variables.

Dado que la cachaza y el bagazo de caña son residuos abundantes en el estado de Tabasco, y el compostaje representa una alternativa adecuada para aprovecharlos y evitar la contaminación del medio ambiente, los objetivos de este trabajo fueron: caracterizar químicamente el compostaje de mezclas de cachaza y bagazo de caña, evaluar el efecto de la incorporación del sulfato de amonio en el proceso de compostaje y, seleccionar variables indicadoras de la madurez de la composta.

Materiales y Métodos

El experimento fue llevado a cabo en las instalaciones del Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco, localizado a 17°58.587'N, 93°23.129'W, en el estado de Tabasco, México.

Tratamientos, diseño experimental y manejo de compostas

Los tratamientos consistieron en mezclas de cachaza y bagazo de caña de azúcar en diferentes proporciones, con o sin aplicación de fertilizante nitrogenado para activar la biomasa microbiana. Como acondicionamiento de los materiales, éstos fueron mantenidos durante 30 días a temperatura ambiente, protegidos de la lluvia con una película plástica hasta el momento de formar las pilas.

El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con un arreglo factorial 4×2 con cuatro repeticiones, donde el primer factor fueron

cuatro niveles de cada residuo (25, 50, 75 y 100%) y dos niveles de nitrógeno (0 y 0,5%). De las combinaciones posibles resultaron ocho tratamientos (Tabla I), generándose un total de 32 pilas de 2×1×1m de largo, ancho y alto, respectivamente, con un peso seco de ~100kg. Como fuente de N se suministró sulfato de amonio (NH₄)₂SO₄ cuya concentración de N es 20,5%. El fertilizante fue disuelto en 18 litros de agua y mezclado homogéneamente en las pilas de residuos. Al inicio del proceso de compostaje se ajustaron los contenidos de humedad de las pilas en ~60% de acuerdo a recomendaciones en trabajos previos (Cabañas-Vargas *et al.*, 2005). Para determinar la cantidad de agua requerida en el ajuste, la humedad inicial fue determinada por gravimetría, cuantificando la pérdida de peso de una muestra después de secarla en estufa a 105°C durante 24h (Coras-Merino, 1999).

Variables de estudio

Las técnicas empleadas para realizar los análisis físicos y químicos fueron las recomendadas por el Laboratorio de Análisis de Plantas y Aguas (LASPA) del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, México. La temperatura fue tomada en cada tercer día mediante un termómetro convencional de mercurio, mientras que la temperatura ambiente fue obtenida de la base de datos de la estación meteorológica Cárdenas I, operada por la Comisión Nacional del Agua, y localizada a menos de 1km del sitio del experimento.

El pH se determinó en extracto acuoso de agua:composta (1:15) con un potenciómetro Orion Modelo 720 (Venegas *et al.*, 2004). La conductividad eléctrica (CE) se midió en el extracto acuoso usado para determinar el pH, el cual se dejó reposar por 24h y posteriormente se tomó la lectura en un aparato YSI Modelo 3200 (Santamaría-Romero *et al.*, 2001). El carbono orgánico (CO) se obtuvo a partir de la materia orgánica (MO) utilizando el factor de Van Bemmelen (1,724), y la MO por calcinación a 450°C durante 12h (Ball, 1964). La capacidad de intercambio de cationes (CIC) fue determinada en lixiviados extraídos con acetato de amonio 1N; el N-total se determinó por el método semi-microKjeldhal (Bremmer, 1965), mientras que el N inorgánico (NO₃⁻ y NH₄⁺) se cuantificó por espectrofotometría de absorción de inyección de flujo (FIAS). El fósforo se determinó por espectrofotometría de absorción atómica en lixiviados extraídos con fosfomolibdato de amonio (Olsen y Dean, 1965). Con los resultados de las variables mencionadas se calcularon las relaciones C/N y NH₄⁺/NO₃⁻ (Buttler *et al.*, 2001). Las muestras para determinar las variables químicas fueron obtenidas a partir de la mezcla homogénea de diez sub-muestras tomadas en diferentes puntos de las pilas. La medición de la temperatura se realizó en cinco puntos de los montículos, a diferentes profundidades. Estas lecturas fueron promediadas, graficadas y relacionadas con la temperatura ambiente.

Muestreos y análisis estadístico

Las muestras para medir pH, CE, N-total y MO fueron colectadas a los 0, 35, 56, 84 y 113 días después de haberse iniciado el compostaje; mientras que para N inorgánico (NH₄⁺, NO₃⁻) y humedad fue a los 14, 28, 42, 56, 84 y 113 días después de haberse iniciado el compostaje. Se realizaron volteos aeróbicos después de la toma de datos

físicos y la colecta de las muestras, tal como fue recomendado por Eng *et al.* (1992). Las muestras estuvieron compuestas por diez submuestras tomadas aleatoriamente en las pilas, y duplicadas en dos series. Las muestras se guardaron en bolsas plásticas y se etiquetaron. Una serie se envió al laboratorio para obtener extractos para determinar contenidos de NH_4^+ y NO_3^- , extractos que fueron mantenidos en refrigeración hasta su procesamiento final. Para determinar el resto de las variables, se utilizó la segunda serie de muestras, que fueron secadas al aire y a la sombra durante una semana, y posteriormente se tamizaron a 2mm, excepto las utilizadas para determinar N-total, donde el tamizado fue a 0,5mm. La fracción de material que no pasó los tamices se consideró material no compostado y se excluyó de los análisis químicos.

Los datos obtenidos fueron reunidos para realizar análisis de varianzas, comparación de medias (Tukey, $p < 0,05$) y correlación lineal (Pearson). Para ello se usó el paquete estadístico SAS para Windows versión 6.12 (SAS Institute, 1999).

Resultados y Discusión

Variables físicas (humedad y temperatura)

Los tratamientos elaborados a partir de bagazo de caña conservaron permanentemente un mayor contenido de humedad ($r = 0,91$, $p < 0,001$). En los tratamientos cuya proporción de bagazo de caña fue $> 50\%$, la humedad fue $> 70\%$. En tratamientos que no incluyeron bagazo de caña (Tratamiento Ca100B0) el contenido de humedad fue el más bajo registrado. Trabajos similares han reportado humedades de 40-72% como lo más recomendable para una mejor degradación, y han sugerido que el aporte de residuos absorbentes como pajas o estiércoles son adecuados para mantener la composta en esos niveles de humedad (Rynk, 1992; Velasco-Velasco *et al.*, 2003). Los presentes resultados indicaron que la adición

de N, así como la composición del sustrato, estimuló el proceso de la degradación, lo cual se vio reflejado en un ligero incremento de la temperatura. Al respecto, Eghball *et al.* (1997) señalaron que al principio de la descomposición de los residuos orgánicos frescos, la temperatura se incrementa, disminuye la concentración de O y la biodisponibilidad del N, por lo que el suministro de N favorece al compostaje. A eso se atribuye que los tratamientos que recibieron 0,5% de N-sulfato de amonio como activador del proceso, tuvieron una temperatura superior al resto de los tratamientos ($r = 0,44533$, $p = 0,0106$). No obstante, la respuesta de la temperatura a los incrementos de N no se observaron en los tratamientos en donde el sustrato fue cachaza al 100% (Ca100B0CN y Ca100B0SN). Según Sánchez-Hernández *et al.* (2007), la cachaza es un residuo orgánico que contiene 2,2% de N-total, lo que favorece la relación C/N y la ubica alrededor de 22, por lo que aunque se suplementen con activadores microbianos no se evidencian respuestas importantes, como sucede en aquellos otros residuos que tienen bajos contenidos de N, en donde la relación C/N es > 35 , como en el caso del bagazo de caña. Madrid y Castellanos (1998) evaluaron el efecto de la adición de sulfato de amonio sobre el grado de humificación de la cachaza en el compostaje, sin encontrar respuestas significativas. La composición de los residuos también fue un factor que influyó en la dinámica de la temperatura a lo largo del proceso. Los resultados indicaron que al incrementar la proporción de bagazo de caña entre 25-50% en la mezcla, la temperatura se incrementó en $\sim 3^\circ\text{C}$; cuando la proporción de bagazo de caña superó el 75% los porcentajes de humedad fueron los más altos registrados, lo que ocasionó el descenso en la temperatura. En la Figura 1 se presenta la dinámica de la temperatura de los tratamientos; se observó que

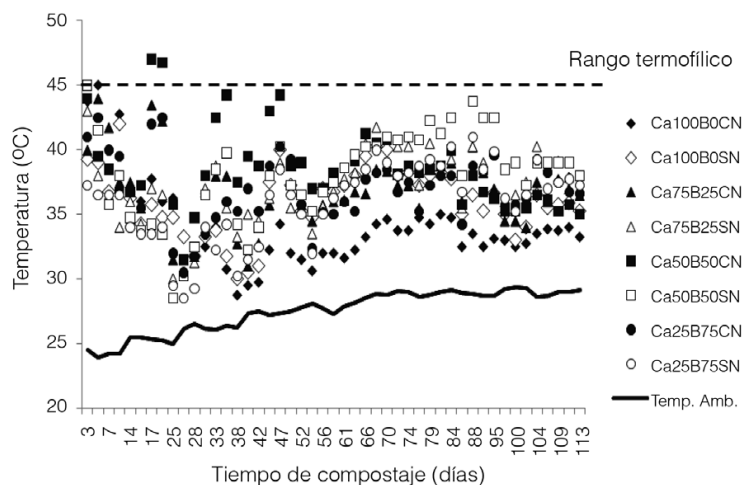


Figura 1. Temperatura en pilas con mezclas de cachaza durante el compostaje.

después de la conformación de las pilas, solo el tratamiento compuesto de 50% de cachaza + 50% de bagazo de caña (Ca50B50CN) alcanzó un nivel termofílico ($> 45^\circ\text{C}$), aunque la duración de esta fase fue muy breve y observable a partir del día 19, es probable que la fase termofílica del compostaje no fue evidente debido a una disipación de calor ocasionada porque las pilas tuvieron dimensiones muy pequeñas y se prestaron a una pérdida de temperatura mayor a la generada.

MacGregor *et al.* (1981) señalaron que cuando las temperaturas del sustrato descienden a valores próximos a la temperatura ambiente es porque el material se acerca a la madurez, aunque es necesario considerar otros factores, tales como pH, CIC, relación C/N, NH_4^+ y NO_3^- . Las temperaturas observadas en este experimento estuvieron en el rango mesofílico en la mayor parte del periodo observado, lo cual se entiende como una estabilización rápida de la MO. Los tratamientos que mantuvieron la temperatura $> 35^\circ\text{C}$ durante los primeros 28 días fueron los que recibieron la adición de N-sulfato de amonio, lo que indicó que precisamente el uso de fertilizantes nitrogenados como activadores biológicos ayudan a superar más rápido la etapa termofílica de la composta. Sin embargo, en el proceso intervienen otros factores, por lo que a los 35 días los diferentes sustratos,

independientemente del nivel de N suministrado, prácticamente alcanzaron la misma temperatura. Sánchez-Hernández *et al.* (2006) refirieron que la duración de la etapa termofílica es influenciada por la composición química de los residuos, condiciones de humedad y temperatura del medio ambiente. Como se puede observar en Figura 1, el descenso o incremento de la temperatura ambiente no tuvo una influencia directa sobre la dinámica de la temperatura de la composta, lo que discrepa a lo reportado por Santamaría-Romero y Ferrera-Cerrato (2002), quienes observaron que la temperatura de la composta varía paralelamente a los cambios de la temperatura ambiente, particularmente cuando los materiales han superado la fase de agotamiento o termofílica. Iñiguez *et al.* (2006) documentaron incrementos en la temperatura de compostas de bagazo de agave hasta los 239 días, y aunque la temperatura disminuyó, los autores sostuvieron que después de ese tiempo el bagazo no se ha degradado completamente.

Variables fisicoquímicas (pH, CE, CIC)

La reacción de los sustratos expresados como pH fue una variable influenciada ligeramente por la composición de los residuos. La adición de N-sulfato de amonio fue el factor

Tabla II
RESUMEN DE LOS ANÁLISIS DE VARIANZAS DE VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS EN LOS TRATAMIENTOS

Tratamiento (mezcla)	pH		CE (dS·m ⁻¹)		CIC (cmol ⁺ ·kg ⁻¹)	
	Agua:Compost (1:1)					
Ca100B0	6,0 d ^{§ 1}	7,7 a ²	3,11 a ¹	0,67 c ²	31,6 b ¹	33,1 ab ²
Ca75B25	5,5 e	7,3 b	3,12 a	0,56 c	32,3 ab	33,3 ab
Ca50B50	5,4 e	7,2 bc	3,04 ab	0,57 c	32,2 b	32,2 b
Ca25B75	5,0 f	7,0 c	2,64 b	0,55 c	34,0 ab	35,4 a
CV (%)	4,9		25,7		4,4	
Prob F<0,05	<0,0001		<0,0001		0,032	

Ca: cachaza, B: bagazo, ¹tratamientos con (NH₄)₂SO₄, ²tratamientos sin fertilizante, [§]tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales, CV: coeficiente de variación, Prob.: probabilidad.

que mayor impacto causó sobre el pH (Tabla II).

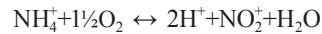
La composta derivada de la cachaza se caracterizó por presentar un pH ligeramente mayor que el que presentó la composta obtenido del bagazo de caña. De manera similar, Venegas-González *et al.* (2004) realizaron un monitoreo del pH durante el compostaje de cachaza por 36 meses y observaron que el pH se incrementó entre los 8 y 12 meses, aunque a partir de los 24 meses se registró un descenso hasta alcanzar un rango similar al pH del sustrato inicial. Como se observa en la Figura 2a, los sustratos que no recibieron aportes de sulfato de amonio siguen una dinámica casi constante a lo largo del proceso, lo cual se debió a que la duración de la fase termofílica, que es cuando se incrementa la temperatura y se registran cambios importantes en la fisicoquímica de la composta, tuvo poca duración.

Se observó que el pH, en los tratamientos que recibieron una dosis de sulfato de amonio equivalente a 0,5% de N, disminuyó ~2,5 unidades al final del proceso. Epstein *et al.* (1997) señalaron que el pH es un indicador fisicoquímico que varía de acuerdo al grado de humificación. Hacia el final del proceso del compostaje el pH desciende debido a la formación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular.

Los tratamientos que recibieron las adiciones de N-sulfato de amonio tuvieron un comportamiento diferente. Se observó que el pH en dichos tratamientos disminuyó permanentemente durante el compostaje, diná-

mica que se explica por la transformación del fertilizante aportado, el cual una vez que se incorpora al sustrato se transforma e induce cierta alcalinidad; luego las bacterias nitrificantes transforman el amonio a nitrato y se produce una reacción ácida (Salgado-García *et al.*, 2001). La tendencia observada en este estudio había sido documentada por Santamaría-Romero *et al.* (2001), quienes al someter residuos orgánicos a compostaje observaron un incremento del pH a las cuatro semanas, y una disminución a partir de la octava sema-

na. Esta dinámica se debe al proceso de nitrificación que ocurre una vez superada la etapa de amonificación, etapa que indica la cercanía a la estabilización de la composta. Keeney *et al.* (1972) describieron el proceso de nitrificación y lo definieron como la oxidación microbiológica del ion amonio mediante la cual se forman los iones nitratos. Esto ocurre rápidamente bajo condiciones de aireación, a baja temperatura y un pH de 6,5-7,5. De las numerosas reacciones de oxidación y reducción, la nitrificación inicial por las bacterias, hongos y organismos autótrofos se puede expresar (Kusnetzov, 1970) como



Durante la nitrificación de la MO hay una liberación de io-

nes H⁺ que contribuyen a un aumento en la concentración electrolítica que ocasiona un descenso en el pH. El análisis de correlación indicó que el descenso del pH provocó una disminución en los niveles de CE de las compostas, debido básicamente tanto al tipo de residuo, como a la adición del fertilizante. La cachaza se caracterizó por un mayor contenido de sales respecto al bagazo de caña, aunque la diferencia fue solamente de 0,5dS·m⁻¹. Como se observa en la Tabla II, la CE fue estimulada mayormente por el factor N (fertilizante); los tratamientos que recibieron (NH₄)₂SO₄ tuvieron 2,5dS·m⁻¹ más que los que no recibieron ningún aporte de fertilizante (Figura 2b). Sin embargo, los niveles observados fueron menores a los reportados por Santamaría-Romero *et al.* (2001), quienes reportaron niveles de 9dS·m⁻¹ en compostas basadas en mezclas de estiércol y restos vegetales, los cuales hacia el final del compostaje descendieron hasta 7,8dS·m⁻¹. Según Tisdale y Nelson (1982) la aplicación de un fertilizante aumenta la concentración salina de una solución. El índice salino es una medida que permite conocer en cuánto se incrementa la presión osmótica de la solución, tomando como referencia el incremento que provoca el nitrato de sodio, con valor relativo de 100. La sal sulfato de amonio tiene un índice salino de 1618, que explica el aumento de CE observado en los tratamientos adicionados con sulfato de amonio. Al principio del compostaje, en todos los tratamientos se observó una ligera disminución de la CE, la cual coincidió con la fase termofílica, lo que sugiere que en esta fase se registran cambios fisicoquímicos evidentes en la composta. De acuerdo con Wolf (1999), la relación estrecha que se observa entre el pH y la CE se debe a que en un medio ácido ocurren fenómenos de dilución de cationes básicos como Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺. La CE que otros autores han reportado en compostas derivadas de materiales fibrosos como el bagazo de

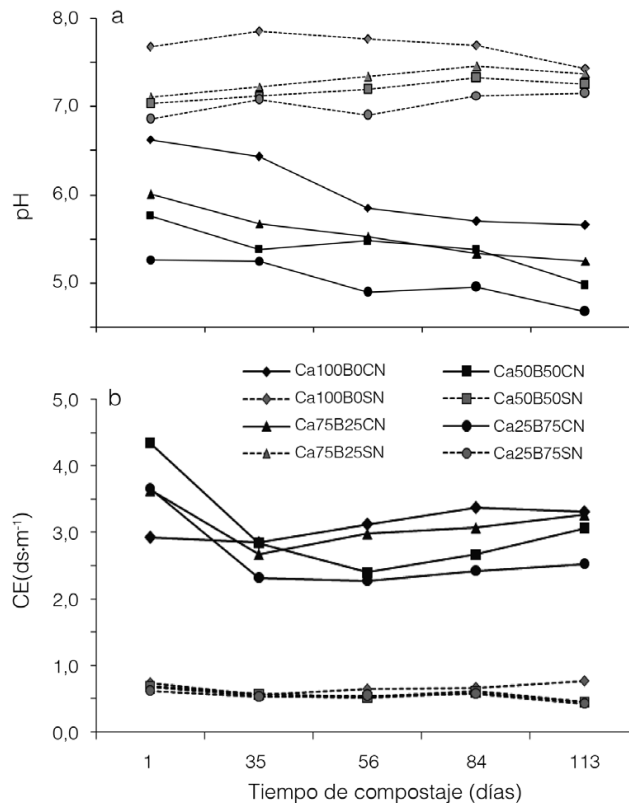


Figura 2. Dinámica del pH (a) y de la CE (b) durante el compostaje de mezclas de cachaza-bagazo de caña.

caña es de $0,3\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. No obstante, cuando el bagazo se mezcla con cachaza, la CE se incrementa a $1,23\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Meunchang *et al.*, 2004), lo que confirma que las características fisicoquímicas de los residuos sometidos a compostaje son determinantes de las características que se obtienen en las compostas al final del proceso (Sánchez-Hernández *et al.*, 2007).

Estudios realizados por diferentes autores han sugerido que la CIC es una variable cuya dinámica es afectada por el grado de humificación de los residuos orgánicos. Venegas *et al.* (2004) detectaron variaciones de la CIC en compostas obtenidas de cachaza, refirieron que los cambios ocurren durante la formación de sustancias húmicas por las reacciones de los grupos funcionales. Los resultados obtenidos en esta investigación establecieron que el incremento de bagazo de caña en el sustrato dio como resultado compostas con CIC más altas que aquellos obtenidos a partir de cachaza; esta tendencia al incremento de la CIC por el aporte de residuos orgánicos resistentes a la degradación como es el caso del bagazo de caña, fue observado tanto en los sustratos adicionados con $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ como en aquellos que no recibieron dicho enriquecimiento. Por otro lado, la adición de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ a los sustratos provocó una disminución de la CIC debido a que el suministro de N estimuló la mineralización de compuestos orgánicos, y después de dicho proceso la MO más lábil es oxidada biológicamente hasta transformarse en compuestos minerales, mientras que la MO más resistente se convierte en humus. Los grupos funcionales que constituyen este humus son los responsables del incremento en la CIC (Dubach y Mehta, 1977). Los resultados obtenidos concuerdan con los de Sánchez-Hernández *et al.* (2007), quienes señalaron que después de la disminución de compuestos nitrogenados durante el compostaje se consolida el proceso de la humificación de moléculas orgánicas más resistentes

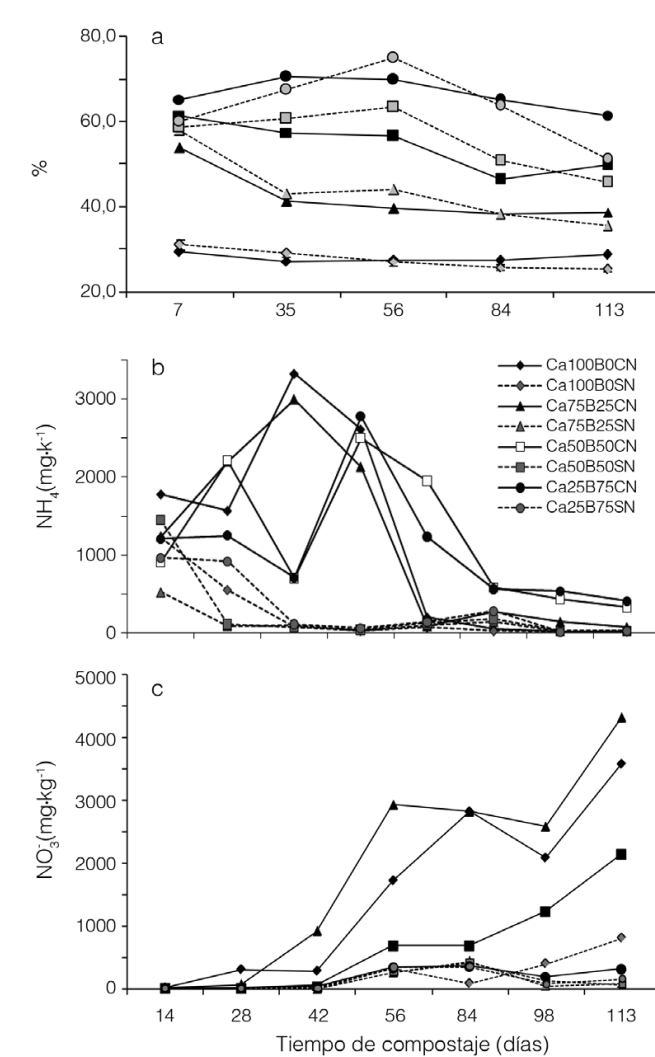


Figura 3. Dinámica de la MO (a), del N amoniacal (b), y de los nitratos (c) durante el compostaje de mezclas de cachaza-bagazo de caña.

tes a la degradación, y durante este proceso la formación de sustancias húmicas provoca un incremento de la CIC.

Variables químicas (MO, N-total, P, NH_4^+ , NO_3^-)

La dinámica de la MO observada a lo largo del proceso estuvo influenciada principalmente por la composición de los residuos, y en menor medida por el suministro de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Evidentemente, los tratamientos que incluyeron alguna proporción de bagazo de caña tuvieron un mayor porcentaje de MO con relación al que solo tuvo cachaza, siendo la razón que la cachaza está compuesta por una mezcla de MO y materia mineral (tierra y cenizas), mientras que el bagazo tiene como característica princi-

pal la riqueza de compuestos orgánicos tales como celulosa, hemicelulosa y lignina. Como resultado de la mineralización se registró un ligero descenso de la MO durante el proceso (Figura 3a).

El aporte de N- $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ tuvo un efecto sobre la degradación de MO en todos los tratamientos. Como evidencia de ello, los tratamientos que recibieron $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ como activador biológico, siempre estuvieron por debajo de los tratamientos que no recibieron el fertilizante. Según Santamaría-Romero y Ferrera-Cerrato (2002), el aporte de N disminuye la relación C/N y favorece la degradación, inclusive de aquellos residuos de difícil degradación por su alto contenido de C y bajo contenido de N. De acuerdo con el análisis de correlación,

una de las variables físicas que se vio afectada favorablemente por el porcentaje de MO fue la retención de humedad ($r=0,85885$, $p<0,0001$). En cuanto a la variable N-total, el tratamiento Ca25B75SN fue el que menor N-total registró con respecto al total de tratamientos que no recibieron suplementos de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. De igual manera, de las mezclas adicionadas con el fertilizante, el tratamiento que no se mezcló con cachaza (Ca100B0CN) fue el que menor N-total tuvo (Tabla III), lo que indicó que la composición química del bagazo de caña fue determinante en el bajo contenido de N-total observado. Sánchez-Hernández *et al.* (2007) reportaron una relación C/N de 30 en sustratos de bagazo de caña, lo que se refleja en una lenta degradación y contenidos de N-total de 1,2%. La incorporación del 75% de bagazo en una mezcla con cachaza redujo significativamente el contenido del N-total, que se explica por la inmovilización de N que provoca la biomasa microbiana al degradar mezclas con altas relaciones C/N (Berrocal, 1988).

El California Compost Quality Council (CCQC, 2001) mencionó que el contenido de N-total de una composta se debe al contenido de N que tiene el residuo del cual proviene, y adicionalmente definió el N-total como la suma del N mineral más el N orgánico, por lo que el 34% del N-total detectado en los tratamientos adicionados con sulfato de amonio, provino también del fertilizante aportado.

Paralelamente, la variable P presentó diferencias altamente significativas, las cuales de acuerdo con el ANOVA se debieron tanto a la composición de los residuos, como al suministro de N-sulfato de amonio. Como se observa en la Tabla IV del total de los residuos evaluados, la cachaza es el residuo que mayor P aporta a la composta. Arreola-Enríquez *et al.* (2003) caracterizaron la cachaza y le atribuyeron un contenido de P de 0,85-1,11%. Según Alexander (1980), el P al igual que el N sufre alteraciones que incluyen procesos

como la solubilidad, mineralización e inmovilización, procesos que son gobernados por la biomasa microbiana; además señala que los tejidos vegetales??? contienen 0,05-0,50% de P, y que su contenido está íntimamente ligado a otros constituyentes del humus, siendo el contenido de P de 0,3-1,0 y de 5-20% de la concentración de C y N, respectivamente. Añade que las condiciones que favorecen la solubilización del P son el rango termofílico de la temperatura y las condiciones de acidez del medio. De lo anterior se explica porqué la adición de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ incrementó significativamente la concentración del P de los sustratos, siendo la razón que la transformación del $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ estimula la fase termofílica y propicia un medio ácido que incrementó la solubilización de dicho elemento.

Por otra parte, el CCQC (2001) mencionó que uno de los problemas asociados con el uso de compostas inmaduras es la toxicidad provocada por compuestos orgánicos y la producción de amonio (NH_4^+), que inhiben la germinación y desarrollo radicular de las plantas. Señala que durante las etapas iniciales del compostaje, la formación de nitrato (NO_3^-) es casi nulo, solo hasta que el sustrato ha superado la fase termofílica y adquiere un rango mesofílico hay una liberación de NO_3^- , debido a que entonces es cuando aparecen los organismos que transforman el NH_4^+ a NO_3^- . Por ello, las concentraciones de NH_4^+ y NO_3^- son variables químicas propuestas para determinar el grado de madurez de una composta. La concentración de NH_4^+ de una composta, según su grado de madurez, es $>500\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en una composta inmadura, entre $100\text{-}500\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en una composta madura, y en una composta muy madura es $<100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En la Tabla IV se presentan los resultados del ANOVA para las variables NH_4^+ y NO_3^- . Entre las mezclas

TABLA III
RESUMEN DE LOS ANÁLISIS DE VARIANZAS DE VARIABLES QUÍMICAS EN LOS TRATAMIENTOS

Tratamiento (mezcla)	MO		C-Org (%)		Nt		C/N	
	Ca100B0	28,0 d ^{§1}	27,7 d ²	16,2 d ¹	16,1 d ²	1,19 a ¹	0,90 b ²	14,1 f ¹
Ca75B25	42,3 c	43,7 c	24,6 c	25,3 c	1,18 a	0,80 bc	21,2 ef	34,1 cd
Ca50B50	54,3 b	55,8 b	31,5 b	32,3 b	1,16 a	0,67 cd	27,3e d	52,8 b
Ca25B75	66,3 a	63,3 a	38,5 a	36,7 a	0,92 b	0,55 d	42,2b c	70,8 a
CV (%)	16,8		16,7		16,2		34,3	
Prob F \leq 0,05	<0,0001		<0,0001		<0,0001		<0,0001	

Ca: cachaza, B: bagazo, ¹tratamientos con $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, ²tratamientos sin fertilizante, [§]tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales, CV: coeficiente de variación, Prob.: probabilidad.

TABLA IV
RESUMEN DE LOS ANÁLISIS DE VARIANZAS DE VARIABLES NH_4^+ y NO_3^- EN LOS TRATAMIENTOS

Tratamiento (mezcla)	P-Olsen		NH_4^+	NO_3^-
			($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	
Ca100B0	1096,4 a ^{§1}	1078,5 a ²	1195,1 a ¹	246,2 b ²
Ca75B25	1115,2 a	950,0 ab	1143,3 a	128,4 b
Ca50B50	978,5 ab	853,5 ab	1197,8 a	249,1 b
Ca25B75	787,5 c	557,1 c	1082,1 a	312,2 b
CV (%)	14,35		77,25	
Prob F \leq 0,05	<0,034		<0,0001	

Ca: cachaza, B: bagazo, ¹tratamientos con $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, ²tratamientos sin fertilizante, [§]tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales, CV: coeficiente de variación, Prob.: probabilidad.

sin adición de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, la menor concentración de NH_4^+ fue de $16,7\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, observada en el tratamiento Ca100B0SN, mientras que la mayor concentración se detectó en Ca25B75SN con $24,5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

La tendencia observada en los tratamientos enriquecidos con $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ sigue el mismo patrón, aunque en estos casos las diferencias fueron más notorias. La menor concentración de NH_4^+ fue de $19,0\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, observada en el tratamiento Ca100B0CN y la mayor fue de $406,2\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, registrada en Ca25B75CN. En ningún caso se superó el valor de $500\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ característico de compostas inmaduras. La probabilidad de F fue significativa para los factores composición (residuos) y adición de N (fertilizante). Es evidente que el contenido de NH_4^+ registrado en las compostas fue debido a la transformación del $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y la lenta degradación de residuos con alta relación C/N como el bagazo de caña. El análisis de correlación indicó que las variables que afectaron la producción de

NH_4^+ fueron la humedad ($r=0,34$, $p=0,054$) y las variables fisicoquímicas como pH ($r=-0,61$, $p=0,0002$) y CE ($r=0,42$, $p=0,018$), de lo cual se infiere que los cambios ocurridos durante la fase termofílica, como son la disminución del pH e incremento de la CE, favorecen el aumento del N-amoniaco. De acuerdo con los criterios propuestos por CCQC (2001) el valor final de 19 y $75,4\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de NH_4^+ en los tratamientos Ca100B0CN y Ca75B25CN, respectivamente, los ubican como materiales orgánicos estabilizados muy maduros (composta). Los valores de $324,8$ y $406,2\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ observados en los tratamientos Ca25B75CN y Ca50B50CN entran en el intervalo de compostas maduras, aunque estas concentraciones se acercan a $500\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, característico de compostas inmaduras. Esto quiere decir que a pesar de mostrar cierto grado de estabilidad, la actividad microbiana continúa, y que para llegar al grado de madurez de las compostas de cachaza, el proceso requiere de mayor tiempo.

Como se observa en la Figura 3b, en los tratamientos que no recibieron enriquecimiento con $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, la pérdida de NH_4^+ se registró desde el inicio del proceso hasta el día 28, lo que coincide con la fase termofílica de corta duración durante el compostaje; a partir del día 28 hasta el final del proceso la concentración sostuvo una tendencia constante. Por su parte, en los tratamientos con suplemento de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, la mayor producción de NH_4^+ se presentó en los días 28-42, aunque cabe mencionar que en estos tratamientos se registró una gran variabilidad.

Las concentraciones de NO_3^- siguieron una tendencia inversa al contenido de NH_4^+ . Al incrementar el bagazo de caña en el sustrato el contenido de NO_3^- se redujo, mientras que en los tratamientos con mayor proporción de cachaza el contenido aumentó (Tabla IV). La concentración final de 3579 y $813\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en los tratamientos Ca100B0CN y Ca100B0SN respectivamente, indicó que la cachaza es un residuo caracterizado por una rápida estabilización y transformación a N mineral.

Como se puede observar en la Figura 3c, el incremento de NO_3^- a los 56 días de compostaje coincidió con el descenso del NH_4^+ , particularmente en los tratamientos enriquecidos con $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, lo que evidencia que el N mineral detectado en forma de NH_4^+ y NO_3^- provino de las transformaciones del $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

A partir de las concentraciones de NH_4^+ y NO_3^- se ha sugerido la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ como indicador de la conclusión del compostaje. Para una composta inmadura este índice es >3 , para una composta madura es de $0,5\text{-}3$, y en una composta muy madura es $<0,5$. Sin embargo, cuando la concentración tanto de NH_4^+ como de NO_3^- es $<250\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en base seca, esta relación no provee un indicador confiable de madurez; en la mayoría de los

tratamientos no es aplicable dicho índice, ya que no superaron el límite de los 250mg·kg⁻¹ de NH₄⁺ y NO₃⁻.

Conclusiones

El aumento del bagazo de caña en los sustratos incrementó la humedad y redujo la temperatura. En general, la adición de 0,5% de (NH₄)₂SO₄ a los sustratos aceleró el incremento de la temperatura, aunque no se consiguieron temperaturas termofílicas, debido probablemente a que las pilas fueron demasiado pequeñas. Las transformaciones del (NH₄)₂SO₄ ocasionaron disminución del pH e incrementos de la CE, NH₄⁺ y NO₃⁻. Por ello, el uso de (NH₄)₂SO₄ como activador biológico se recomienda solo en residuos que presentan alta relación C/N como es el caso del bagazo de caña. En residuos con menor relación C/N como la cachaza, el efecto del (NH₄)₂SO₄ no es relevante, ya que dicha relación no se reduce considerablemente. En aquellas mezclas dominadas por residuos resistentes a la degradación como el bagazo de caña se observó un aumento de la CIC debido a la humificación de moléculas constituyentes de la MO más resistentes. Como indicadores de madurez de una composta se recomienda mayormente aquellas variables químicas asociadas estrechamente con las diferentes etapas del compostaje; entre ellas, la disminución de la temperatura que indica la superación de la fase termofílica, la producción de NH₄⁺ durante la fase termofílica, el incremento del NO₃⁻ durante la fase mesofílica y, el incremento de la CIC durante la síntesis de sustancias húmicas, particularmente en aquellos residuos con alta relación C/N.

REFERENCIAS

- Alexander M (1980) *Introducción a la Microbiología del Suelo*. Traducción al español de Juan José Peña Cabriales. AGT. México. 491 pp.
- Arreola J, Palma DJ, Salgado S, Camacho W, Obrador JJ, Juárez JF, Pastrana L (2003) Evaluación de abono órgano-mineral de cachaza en la producción y calidad de la caña de azúcar. *Terra 21*: 351-357.
- Ball DF (1964) Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soil. *J. Soil Sci.* 15: 84-92.
- Bernal P, Cegarra J, Roig A, Sánchez MA, Paredes C (1998) Composting of organic wastes as a strategy for producing high quality organic fertilizers. *8th Int. Conf. of the RAMIRAN Network*. FAO European Cooperative. Roma, Italia. pp. 171-182.
- Berrocal M (1988) Efecto de los residuos de la industria azúcar-alcoholera, bagazo, cachaza y vinaza, en la producción de caña de azúcar en un vertisol de Guanacaste. *Agron. Costarric.* 12: 147-153.
- Bremmer JM (1965) Total nitrogen En Black CA (Ed.) *Methods for Soil Analysis*. Part 2. SSSA. Madison, WI. EEUU. pp. 1148-1179.
- Brewer L, Sullivan DM (2003) Maturity and stability evaluation of composted yard trimmings. *Compost Sci. Utiliz.* 11: 96-112.
- Buttler A, Sikora J, Steinhilber M, Douglas W (2001) Compost age and sample storage effects on maturity indicators of biosolids compost. *J. Env. Qual.* 30: 2141-2148.
- Capistrán F, Aranda E, Romero (1999) *Manual de Reciclaje, Compostaje y Lombricompostaje*. Instituto de Ecología. Xalapa, Veracruz, México. 159 pp.
- CCQC (2001) *Compost Maturity Index*. California Compost Quality Council. Nevada City, CA, EEUU. 26 pp.
- Coras-Merino PM (1999) *Propiedades Físicas del Suelo Relacionadas con el Riego*. Universidad Autónoma Chapingo. México. 211 pp.
- Dubach P, Mehta C (1977) The chemistry of soil humic substances. *Soil Fert.* 26: 293-300.
- Eghball B, Power JF, Gilley JE, Doran JW (1997) Nutrient, carbon, and mass loss of beef cattle feedlot manure during composting. *J. Env. Qual.* 26: 189-193.
- Eng F, Klibansky M, Leon M, Brizuela M, Grisel D, Reyes-Betancourt D, González A, Rodríguez R (1992) Degradación biológica de la cachaza por compostaje. *ICIDCA* 26: 33-38.
- Epstein E, Willson GB, Burge WD, Mullen DC, Enkiry NK (1997) A forces aeration system for composting of wastes-water-sludge. *J. Water Contr. Fed.* 48: 688-694.
- Fariás CDM, Ballesteros GMI, Bendeck M (1999) Variación de parámetros fisicoquímicos durante un proceso de compostaje. *Rev. Col. Quím.* 28: 75-86.
- Hernández GI, Salgado S, Palma D, Lagunes L del C, Castelán M, Ruiz O (2008) Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un Gleysol mólico de Chiapas, México. *Interciencia* 33: 855-860.
- Iñiguez G, Rodríguez R, Virgen G (2006) Compostaje de materiales de descarte y aguas residuales de la industria de curtidurías. *Rev. Int. Contam. Amb.* 22: 113-123.
- Janhel M, Melloni R, Cardoso E (1999) Urban solid waste maturity. *Sci. Agric.* 56: 301-304.
- Keeney DR, Walsh LW (1972) Available Nitrogen in rural ecosystems. Sources and fate. *Hortscience* 7: 219-223.
- Kuznetsov SI (1970) Microflora of Lakes and their Geochemical Activities. Izdatel' Stvo Naudaka. Leningrado, URSS. 440 pp.
- MacGregor ST, Millar FC, Psarianos KM, Finstein MS (1981) Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature. *Appl. Env. Microbiol.* 41: 1321-1330.
- Madrid C, Castellanos Y (1998) Efecto de activadores sobre la calidad de composts elaborados con cachaza y bagazo de la caña de azúcar. *Venezuelos* 1: 22-28.
- Mathur S, Owen GP, Dinell H, Schnitzer M (1993) Determination of compost biomaturity. *Biol. Agric. Hort.* 10: 65-85.
- Meunchang S, Panichsakpatana S, Weaver RW (2004) Co-composting of filter cake and bagasse; by-products from a sugar mill. *Bioresource Tech.* 96: 437-442.
- Noble R, Hobbs PJ, Mead M, Pennington D (2002) Influence of straw types and nitrogen sources on mushroom composting emissions and composting productivity. *Indust. Microbiol. Biotechnol.* 29: 99-110.
- Olsen SR, Dean LA (1965) Phosphorus. En Black CA (Ed.) *Methods for Soil Analysis*. Part 2. SSSA. Madison, WI. EEUU. pp. 1035-1049.
- Ortiz VB, Ortiz SC (1980) *Edafología*. 3^a ed. Universidad Autónoma Chapingo. México. 331 pp.
- Pernalet Z, Piña F, Suárez M, Ferrer A, Aiello C (2008) Fraccionamiento del bagazo de caña de azúcar mediante tratamiento amoniacal efecto de la humedad del bagazo y de la carga de amoniac. *Bioagro* 2: 3-10.
- Rao N, Grethlein T, Reddy CA (1995) Effect of C/N ratio and moisture content on the composting of poplar wood. *Biotechnol. Lett.* 17: 889-892.
- Rynk R (1992) *On-farm Composting Handbook*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. NRAES-54 Ithaca, NY, EEUU.
- Salgado S, Bucio L, Riestra D, Lagunes L del C (2001) *Caña de Azúcar. Hacia un Manejo Sustentable*. Colegio de Postgraduados. Tabasco, México. 394 pp.
- Sánchez G, Olguin EJ, Mercado G (1999) Accelerated coffee pulp composting. *Biodegradation* 10: 35-41.
- Sánchez-Hernández R, Ordaz-Chaparro VM, Palma-López DJ, Sánchez BJ (2006) *El Vermicompostaje: Elemento Útil en la Agricultura Sustentable*. Fundación Produce Tabasco. Colegio de Postgraduados. Tabasco, México. 47 p.
- Sánchez-Hernández R, Ordaz CH VM, Benedicto VGS, Palma LDJ, Sánchez BJ (2007) Chemical characteristic of several vermicompost in Mexico. *Compost Sci. Utiliz.* 15: 47-52.
- Sánchez-Monedero MA, Roig A, Paredes C, Bernal MP (2001) Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresour. Technol.* 78: 301-308.
- Santamaría S, Ferrera-Cerrato R, Almaraz-Suárez JJ, Galvis-Spínola A, Barois-Boullard I (2001) Dinámica y relaciones de microorganismos, C-orgánico y N-total durante el compostaje y vermicompostaje. *Agrociencia* 35: 377-384.
- Santamaría-Romero S, Ferrera-Cerrato R (2002) Dinámica poblacional de *Eisenia andrei* (Bouché 1972) en diferentes residuos orgánicos. *Terra* 20: 303-310.
- SAS (1999) *SAS/STAT. Guide for personal computer. Ver.9* SAS Institute. Cary, NC, EEUU. 889 pp.
- Tisdale SL, Nelson WL (1982) *Fertilidad de los Suelos y Fertilizantes*. 1^a ed. UTHERA., México. 760 pp.
- Velasco V (2002) *Alternativa Tecnológica del Reciclaje de los Desechos Orgánicos del Colegio de Postgraduados*. Tesis. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 91 pp.
- Venegas GJ, Cajuste LJ, Trinidad SA, Gavi RF, Sánchez GP (2004) Behavior of the pH and cation exchange capacity in organic wastes with different humification rate. *Proc. 1st Intl. Congr. Vermicompost and Organic Wastes*. Guadalajara, México. pp. 97-99.
- Wolf B (1999) *The Fertile Triangle. The Interrelationship of Air, Water, and Nutrients in Maximizing Soil Productivity*. Foot Products/Haworth. Nueva York, EEUU. 463 pp.