



## Evaluación de enmiendas en el proceso de compostaje de residuos de curtiembres\*

Gustavo Castro García\*\*, Martha Constanza Daza Torres\*\*\*

*Evaluation of amendments in the composting process of remains from leather industries*

*Avaliação de emendas no processo de compostagem de resíduos de curtumes*

### RESUMEN

**Introducción.** La industria de curtiembres es reconocida por ser contaminante, principalmente por el vertimiento de residuos de grasas, pelo y metales pesados a los cuerpos de agua. **Objetivo.** Evaluar el proceso de compostaje de residuos seleccionados con el uso de enmiendas en una curtiembre del municipio de El Cerrito, Valle del Cauca. **Materiales y métodos.** Para ello se establecieron tres tratamientos mediante el montaje de pilas de compostaje: estiércol de cerdo

y pasto (*Cynodon nlemfuensis*) con y sin inóculo de microorganismos (T1 y T2) y viruta de madera (T3). Se realizó seguimiento a la temperatura y el pH durante el proceso de compostaje y se determinó el índice de germinación utilizando semillas de rábano (*Raphanus Sativus*). Los productos finales del tratamiento fueron evaluados para aplicación en suelos, según la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 del 2011. **Resultados.** El comportamiento de la temperatura no fue el típico encontrado durante el compostaje, alcanzando temperaturas máximas de 67 °C que no

\* Artículo derivado del proyecto de investigación "Estudio piloto sobre el compostaje de los residuos sólidos de una curtiembre de El Cerrito, Valle del Cauca" desarrollada en los años 2010-2012 financiada por el Centro Regional de Producción Más Limpia del Valle del Cauca y la empresa Curtiplies Ltda. \*\* Ingeniero agrícola, magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental y magíster en Ingeniería Civil. Docente tiempo completo Programa de Ingeniería Agronómica Universidad de La Salle. \*\*\*Ingeniera agrícola, magíster en Suelos y Aguas, candidata a Doctora en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Docente nombrada Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Universidad del Valle.

permitieron la suficiente higienización del producto. Los valores de pH alcanzados estuvieron por encima de 7, comportamiento alcalino que pudo afectar la actividad microbiológica durante el proceso. Los índices de germinación estuvieron entre 60 % y 80 % indicando la presencia de compuestos fitotóxicos que pueden incidir en la calidad del producto final para

su aplicación en suelos. **Conclusión.** El producto obtenido sería viable como enmienda orgánica no húmica según, la NTC 5167 del 2004, especialmente para usar en recuperación de suelos degradados.

**Palabras clave:** compost, cuero, enmienda.

## ABSTRACT

**Introduction.** Leather industries are known as a contaminant business, especially due to remains comprised of fat, hair and heavy metals that finally go to water bodies. **Objective.** To evaluate the composting process of selected remains, by the use of amendments, in a leather industry from El Cerrito, Valle del Cauca, Colombia. **Materials and methods.** Three treatments were established by assembling compost stashes: swine manure and grass (*Cynodon nlemfuensis*) with and without inoculated microorganisms (T1 and T2) and wood chips (T3). A follow up to the temperature and the pH during the composting process was performed and the germination rate was determined by the use of radish seeds (*Raphanus Sativus*). The final products of

the treatment were evaluated to be applied on soils, according to the technical Colombian rule NTC 5167, 2011. **Results.** The behavior of the temperature was not the usual one found in the composting process, reaching a maximum temperature of 67 °C, which did not allow the product to be hygienic enough. The pH values reached were above 7, an alkaline behavior that could affect the microbiological activity during the process. The germination rates were located between 60 % and 80 %, which means the presence of phytotoxic compounds that can influence the quality of the final product for its application in soils. **Conclusion.** The product obtained can become an organic amendment, according the NTC 5167 rule of 2004, especially for its use in the recovery of degraded soils.

**Key words:** compost, leather, amendment.

## RESUMO

**Introdução.** A indústria de curtumes é reconhecida por ser contaminante, principalmente pelo despejo de resíduos de gordura, pelo e metais pesados aos corpos de água. **Objetivo.** Avaliar o processo de compostagem de resíduos selecionados com o uso de emendas em uma curtume do município de El Cerrito, Valle del Cauca (Colômbia). **Materiais e métodos.** Para isto se estabeleceram três tratamentos mediante a montagem de pilas de compostagem: esterco de porco e pasto (*Cynodon nlemfuensis*) com e sem inoculo de microrganismos (T1 e T2) e palha de madeira (T3). Se realizou seguimento à temperatura e o pH durante o processo de compostagem e se determinou o índice de germinação utilizando sementes de rabanete (*Raphanus Sativus*). Os produtos

finais do tratamento foram avaliados para aplicação em solos, segundo a norma técnica Colombiana NTC 5167 de 2011. **Resultados.** O comportamento da temperatura não foi o típico encontrado durante a compostagem, alcançando temperaturas máximas de 67 °C que não permitiram a suficiente higienização do produto. Os valores de pH alcançados estiveram por encima de 7, comportamento alcalino que pôde afetar a atividade microbiológica durante o processo. Os índices de germinação estiveram entre 60 % e 80 % indicando a presença de compostos fitotóxicos que podem incidir na qualidade do produto final para sua aplicação em solos. **Conclusão.** O produto obtido seria viável como emenda orgânica não húmica segundo, a NTC 5167 de 2004, especialmente para usar em recuperação de solos degradados.

**Palavras chave:** composto, couro, emenda.

## INTRODUCCIÓN

En el mundo, la industria de curtiembres ha sido catalogada como un sector altamente

contaminante (Pal Vig, Singh, Hussain y Singh Dhaliwal, 2011). Sus residuos contienen altas cantidades de nitrógeno inorgánico y compuestos orgánicos lo que los hace interesantes para

ser utilizados como enmiendas edáficas. Sin embargo, también se caracterizan por las altas concentraciones de cromo, patógenos de origen fecal y compuestos orgánicos tóxicos que pueden limitar su uso en la agricultura (Contreras, Álvarez, Trujillo y Dendooven, 2004).

El proceso de la curtiembre se divide en tres etapas: rivera, curtido y acabado. En la etapa de rivera se generan el 60 % del total de los residuos sólidos, los cuales están compuestos principalmente por lodos de grasa y pelo. En la etapa de curtido se aplican principalmente sales de cromo para darle al cuero la propiedad de conservación y durabilidad en el tiempo, y en la etapa de acabado se le da al cuero el color y la textura final (Montañez, Sánchez Tovar y Roux, 2014). De las tres etapas, la de curtido es la más crítica puesto que el 90 % de las curtiembres mundiales utilizan sales de cromo (III) y cromo (VI) para la conservación del cuero (Celary y Sobik-Szołtysek, 2014); el primero es termodinámicamente estable pero puede ser tóxico para algunos microorganismos (Pereira, Resende, Azeitero, Oliveira y De Figueiredo, 2005), mientras que muy poca cantidad de cromo VI puede reducirse con ayuda de sustancias como, por ejemplo, la materia orgánica del suelo. Entre el 30 % y el 50 % del cromo aplicado se pierde con el agua residual generada en el proceso de transformación del cuero (Montañez et al. 2014).

Los residuos de la industria de curtiembres son de difícil manejo biológico debido principalmente al contenido de metales pesados. Estos residuos han sido manejados de diferentes maneras como, por ejemplo, disposición en rellenos sanitarios (Altas, 2009), solidificación-estabilización (Montañez et al. 2014), vitrificación (Celary y Sobik-Szołtysek, 2014), vermicompostaje enriquecido (Pal Vig et al, 2011) y vermicompostaje con fermentación previa (Ravidran, Contreras-Ramos y Sekaran, 2015).

El compost de estos residuos ha sido utilizado para aplicación al suelo, pero es usado con restricción, pues es estrictamente dependiente de la concentración de cromo, que debe ser menor a  $350 \text{ mg kg}^{-1}$  (Li, Chuan.Bo, Jing y Feng,

2005), ya que pueden llegar a contaminar el suelo y el agua (Celary y Sobik-Szołtysek, 2014) y ocasionar bioacumulación en las plantas (Fijalkowski, Rosikon, Grobelak y Kacprzak, 2011).

Se ha reportado que suelos enmendados con este tipo de compost elevan la concentración de cromo, inhiben la actividad microbiana (Silva, Barajas-Aceves, Araujo, Araujo y Melo, 2014) y promueven la erosión de suelos (Barajas-Aceves, Ríos-Beber, Oropeza y Rodríguez, 2014). Sin embargo, otros autores como Santos, Núñez, Melo y Araujo (2011) encontraron que la aplicación de dosis de hasta  $60 \text{ Mg Hm}^{-2}$  de este compost no afectó la actividad microbiana del suelo, lo que conduce a que su efecto dependa de la manera como se llevan el proceso de compostaje y de las dosis empleadas. Silva et al. (2010) recomiendan que su uso debe ser restringido a recuperación de suelos y al cultivo de ornamentales y jardines, donde los seres humanos no tengan directa exposición.

El Cerrito (Valle del Cauca), al suroccidente de Colombia, es una población reconocida por la industria del cuero, actividad fundamental para el desarrollo económico de la población. En estas curtiembres, en promedio, se procesan 10.000 pieles al mes, de los cuales se generan 40 toneladas de lodos de grasa y pelo, que son manejados inadecuadamente (Centro Regional de Producción Más Limpia-CRPLM, 2003). Por ello la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca –CVC–, en conjunto con CRPLM se han propuesto implementar prácticas de separación en la fuente de residuos para poder dar un manejo adecuado y minimizar el efecto contaminante. Debido a que en la etapa de rivera no se utilizan materiales para el curtido, como sales de cromo, se espera que estos residuos tengan baja concentración de este metal (Haroum, Idris y Omar, 2007). Estos residuos sólidos son principalmente orgánicos, los cuales pueden ser considerados para su aprovechamiento luego de un proceso de compostaje (Posso, 2006). Recientemente se viene trabajando la etapa de rivera sin destrucción de pelo, lo que permite reducir la

carga contaminante en el vertimiento, generando un residuo sólido con alto contenido de materia orgánica, altos contenidos de nitrógeno, calcio y sodio, bajo contenido de metales pesados y pH alcalinos; esta última condición es la que limita su biodegradación (Cuervo, 2010).

El compostaje es una biotecnología de estabilización y aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, con el fin de obtener productos aptos para su aplicación al suelo. En el compostaje es necesario establecer condiciones iniciales adecuadas como la relación carbono/nitrógeno (C/N), cuyo valor más conveniente es alrededor de 30:1 (Tchobanoglus, Thiesen y Samuel, 1994). Otros parámetros de diseño importantes son el contenido de humedad inicial en la mezcla (60 %) y la porosidad ( $l\ g\ mL^{-1}$ ). Los productos obtenidos del compostaje deben presentar condiciones aptas para su aplicación en el suelo; en Colombia, la calidad de los compost es controlada por la Norma Técnica Colombiana 5167 del 2011 (NTC, 2011).

Los estiércoles y los residuos de cosecha han sido utilizados para cambiar las condiciones iniciales de humedad, relación C/N y pH de los residuos iniciales provenientes de la etapa de rivera y mejorar el proceso de compostaje, lo que ha permitido obtener productos de mejor calidad (Contreras et al. 2004). Pal Vig et al. (2011) encontraron que el uso de estiércol vacuno permitió la sobrevivencia de las lombrices por lo que se obtuvo una mejor calidad de compost proveniente de residuos de curtiembres. Asimismo, Ravidran et al. (2015) encontraron que la fermentación previa de los residuos antes del compostaje permitió alcanzar un compost con calidad aceptable que no resultó tóxico a las semillas de zanahoria. Silva et al. (2010) hallaron que el compost enmendado con residuos de caña de azúcar y estiércol de ganado incrementó el contenido de nutrientes en los suelos usados para el cultivo de ornamentales. Cuervo (2010) evaluó la aplicación de tres inóculos a los residuos de rivera (caldo de cultivo, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales –PTAR– y organismos eficientes) y encontró que dicha aplicación favoreció el proceso de

compostaje al alcanzar temperaturas en el rango termófilo, donde el compost obtenido con los lodos de PTAR, junto a la viruta de madera como material estructurante, fue el más estable con alto valor agronómico. Garro et al. (2015) encontraron que la aplicación de estiércol de conejo (1/6 p/p) y hojas de roble y álamo (1/6 p/p) a los residuos de pelaje (2/3 p/p) benefició el proceso de compostaje, al acelerar la ruptura y separación de las capas que rodean el pelo y favorecer la presencia de hongos, obteniendo un producto estructurante aireado que contribuye al aporte lento de sustancias nitrogenadas en suelos empobrecidos

El propósito de este trabajo fue evaluar tanto el proceso de compostaje de residuos orgánicos sólidos provenientes de la etapa de rivera de una curtiembre del municipio de Cerrito (Valle del Cauca Colombia), como la caracterización de la calidad del producto final obtenido. Para el proceso de compostaje se utilizaron enmiendas como el estiércol de cerdo, residuos de pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*) y la viruta de madera, además de la aplicación de microorganismos eficientes (ME).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en municipio de El Cerrito, Valle del Cauca, ubicado al suroriente del departamento del Valle ( $3^{\circ}\ 41'\ 02''\ N$  y  $76^{\circ}\ 18'\ 40''\ O$ ) a una altura de 987 m. s. n. m. con temperatura y precipitación medias anuales de  $23\ ^{\circ}C$  y 1557 mm, respectivamente.

El diseño experimental consistió en el montaje de tres tratamientos con una réplica cada uno, para un total de 6 unidades experimentales, las cuales consistieron en pilas de forma cónica de 1 m de altura por 1 m de diámetro de base. En la etapa de rivera del proceso de curtiembres se realizó una separación en la fuente por tipo de residuo y se escogieron los pelos y lodos de grasa como materia prima para el proceso de compostaje por tener menor concentración de cromo (Haroum et al. 2007). Mediante balance de masas se determinaron las proporciones

de las diferentes enmiendas a evaluar. A los residuos de curtiembres seleccionados se les adicionaron estiércol de cerdo y pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*), con y sin microorganismos eficientes (T1 y T2), y viruta de madera (T3) (tabla 1). Los residuos de curtiembres (pelo y lodos de grasa) fueron de naturaleza básica (tabla 2); el pelo tenía alto contenido de humedad y baja relación C/N, situación opuesta a la encontrada en los lodos de grasa, los cuales alcanzaron relaciones C/N de aproximadamente 166, lo que indicó la presencia de compuestos recalcitrantes

de difícil descomposición. En cuanto al pH de las enmiendas utilizadas, estuvieron entre 5,9 y 8,0 correspondientes a las virutas de madera y al pasto estrella, respectivamente. El pasto estrella presentó el más bajo porcentaje de carbono mientras que el estiércol de cerdo contó con el mayor porcentaje de humedad (90 %), mayor porcentaje de nitrógeno y la más baja relación C/N. La más baja humedad encontrada y el menor contenido de nitrógeno fueron hallados en la viruta de madera la cual presentó el mayor porcentaje de carbono y la más alta relación C/N.

**Tabla 1. Tratamientos propuestos y proporciones de las enmiendas mezcladas con residuos de curtiembres**

Tratamientos	Composición %						Total (%)	Peso (kg)
	Pelo	LG	EC	VM	PE	ME		
T1	12.7	42.9	41.4	0	3	-	100	338
T2	12.7	42.9	41.4	0	3	*	100	338
T3	18.1	61.5	0	20.5	0	-	100	236

Fuente: elaborada por los autores

LG: Lodos de grasa; EC: Estiércol de Cerdo; VM: viruta de Madera; PE: Pasto estrella; ME: microorganismos eficientes.

\* Aplicación líquida durante el proceso en dosis de 100 mL L<sup>-1</sup> de solución con microorganismos de acuerdo con lo recomendado por Sanclemente, García y Valencia (2011)

**Tabla 2. Caracterización de las enmiendas utilizadas en el compostaje de residuos provenientes de curtiembres de El Cerrito Valle del Cauca Colombia**

Parámetro	Pelo	Lodo de Grasa	Pasto	Estiércol de cerdo	Viruta de madera
pH	8,4	8,2	8,0	6,2	5,9
Humedad B.H (%)	70,4	55,0	14,0	90,8	4,0
Carbono (%)	19,2	59,3	32,3	48,8	53,8
Nitrógeno (%)	1,7	0,4	2,2	3,8	0,2
Relación C/N	11,8	166,0	15,0	13,0	269,0
Densidad (Mg m <sup>-3</sup> )	1,2	1,1	0,5	0,3	0,2

Fuente: elaborada por los autores

El estiércol de cerdo utilizado fue de naturaleza ácida, con alto contenido de humedad y baja relación C/N. El pasto estrella provino de la poda de lotes en barbecho y jardines, y fue triturado para obtener un tamaño de partícula adecuado en la mezcla (tamaño máximo de 5 cm). La viruta

provino de la industria de la madera y muebles de la región, la cual fue limpiada y tamizada para homogeneizar tamaños de partícula menores a 5 cm. Los microorganismos eficientes (ME) fueron preparados adicionando 100 mL de solución madre de ME junto a 30 mL de melaza

y se llevó a un litro con agua tibia libre de cloro, de acuerdo con recomendaciones de Palacios, Toruño y Pérez (2007).

Una vez montadas las pilas se voltearon diariamente de forma manual. Se monitorizaron por espacio de 120 días la temperatura y el pH. La temperatura fue medida diariamente en el centro de la pila con un termómetro de carátula de 30 cm, mientras que el pH fue determinado a partir de una muestra compuesta de submuestras tomadas al azar de diferentes lugares de la pila, utilizando el método potenciométrico en una relación 5:1 v/v y se realizó tres veces por semana.

El control del contenido de humedad se efectuó manteniéndola por encima del 50 %, y se ejecutó por el método del puño propuesto por Palacios et al. (2007), que consiste en apretar con la mano una muestra de material con el fin de aplicar una fuerza normal, estableciendo que si salen entre 3 y 5 gotas de agua la humedad está cerca del 50 %. Esta determinación se realizó con una frecuencia de 4 veces por semana.

Con los compost obtenidos se realizaron bioensayos de fitotoxicidad según la metodología descrita por Varnero, Rojas y Orellana, (2007) estimando el índice de germinación (IG). Las muestras fueron seleccionadas según la apariencia física del producto obtenido (T1 y T2).

Como planta indicadora se utilizaron semillas de rábano (*Raphanus sativus*) las cuales fueron dispuestas en papel filtro y localizadas en cajas de Petri que fueron ubicadas en condiciones oscuras a 28 °C por 4 días.

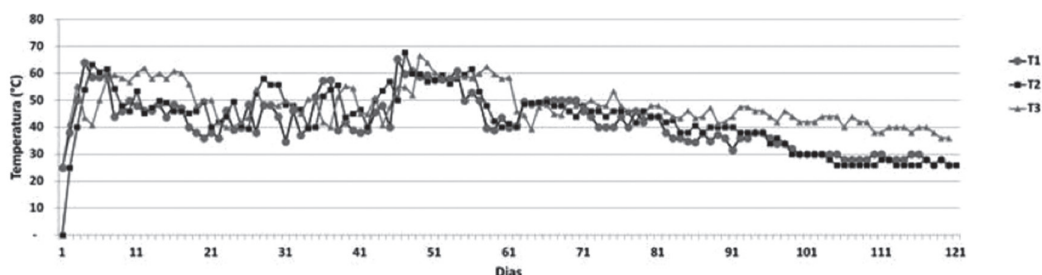
Finalmente, a los productos obtenidos se les hizo una caracterización físico-química según la Norma Técnica NTC 5167 del 2011 y se efectuó una comparación entre los parámetros obtenidos y lo que dictamina la norma.

Se aplicaron parámetros estadísticos descriptivos a los datos obtenidos. También fueron aplicadas las pruebas de Shapiro-Wilk para verificar la distribución normal de los datos y la de Levene para determinar la homogeneidad de varianzas. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete SSPS 20.

## RESULTADOS

### Comportamiento de la temperatura durante el proceso de compostaje de residuos de curtiembres

La temperatura presentó un comportamiento diferente a lo reportado por Tchobanoglus et al. (1994) durante el proceso de compostaje, en donde no se logró diferenciar las etapas (latente, mesófila, termófila, enfriamiento y maduración) que distinguen este proceso (figura 1).



**Figura 1. Evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje de residuos de curtiembres**

Fuente: elaborado por los autores.

T1= residuos de pelo y lodo de grasas + estiércol de cerdo + pasto estrella. T2= residuos de pelo y lodo de grasas + estiércol de cerdo + pasto estrella + microorganismos eficientes (ME). T3= residuos de pelo y lodo de grasas + virutas de madera.

Al final de la primera semana del montaje se observó en todos los tratamientos pérdida de humedad, lo que ocasionó un descenso en la temperatura. Según Gea et al. (2007) en el tratamiento biológico de grasas, la actividad microbiológica hace que la humedad de las pilas disminuyan a valores cercanos al 40 %. El tratamiento T3 presentó una mejor retención de humedad en la pila; sin embargo, los lodos de grasas se apelmazaron con mayor facilidad en la mezcla. Las operaciones de acondicionamiento de las pilas permitieron dar una mejor

distribución del tamaño del terrón, lo cual se apreció considerablemente a partir del día 60 del tratamiento. Las pilas después de este tiempo mostraron una mejor apariencia física de soltura.

### Comportamiento del pH durante el proceso de compostaje de residuos de curtiembres

El comportamiento del pH registró una tendencia hacia la alcalinidad ( $\text{pH} > 7$ ) (figura 2). Estos residuos generados en la etapa de rivera contienen compuestos químicos tales como sulfuros de sodio y el carbonato de calcio que incidieron en el pH de las pilas de los tratamientos (Iñiguez, Rodríguez y Virgen, 2006). Los valores de pH oscilaron entre 7.4 y 9.3 unidades, similares a los encontrados por Haroum et al. (2007) en el proceso de compostaje de residuos de curtiembres sin selección previa.

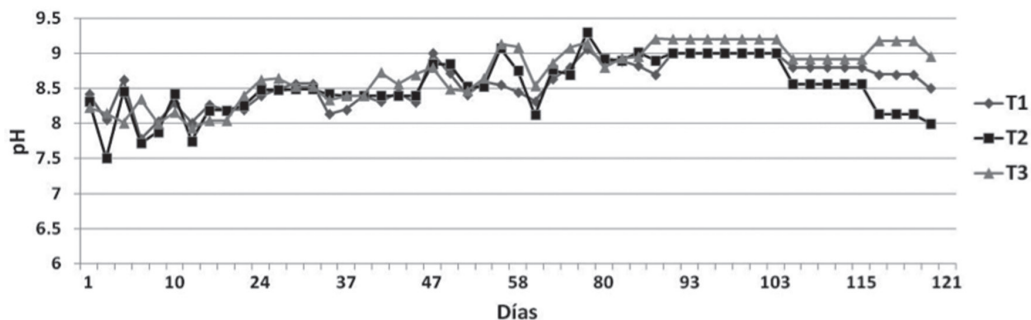


Figura 2. Evolución del pH durante el proceso de compostaje de residuos de curtiembres

Fuente: elaborada por los autores.

T1= residuos de pelo y lodo de grasas + estiércol de cerdo + pasto estrella. T2= residuos de pelo y lodo de grasas + estiércol de cerdo + pasto estrella + microorganismos eficientes (ME). T3= residuos de pelo y lodo de grasas + virutas de madera.

Estos valores altos de pH pudieron afectar la actividad microbiológica (Román, Martínez y Pantoja, 2013). El tratamiento T3 al cabo de los 120 días obtuvo los mayores valores de pH,

debido probablemente a la presencia de una mayor cantidad de residuos y, por lo tanto, de sales básicas.

### Bioensayo de fitotoxicidad

Los índices de germinación obtenidos estuvieron entre 76,5 % y 63,0 % para los tratamientos T1 y T2, respectivamente, lo que indica que en ambos existe la presencia de compuestos fitotóxicos que pueden alterar la calidad del suelo, afectar el cultivo y contaminar aguas subterráneas.

### Evaluación fisicoquímica de los productos obtenidos

Para estos análisis se seleccionaron los tratamientos T1 y T2; el tratamiento T3 fue descartado puesto que su apariencia física, luego

de 120 días de compostaje, no fue adecuada, al presentar coloraciones grisáceas con olores desagradables que indican que no se alcanzó la estabilización del compost. La tabla 3 resume las características de los compost obtenidos en los tratamientos seleccionados.

**Tabla 3. Características físicas, químicas y biológicas de compost proveniente de residuos de curtiembres mezclados con enmiendas**

Parámetro	Unidad	T1	T2	NTC5167
pH	Unidades	8,6	8,7	7 – 9
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	cmol(+) kg <sup>-1</sup>	30,5	19,7	>30
Carbono orgánico (C. Org.)	%	16,2	15,9	>15
Nitrógeno total (N)	%	1,7	1,4	≥ 1 %
Relación carbono/nitrógeno (C/N)	na	9,1	11,7	Declarar
Sodio soluble (Na)	cmol(+) kg <sup>-1</sup>	0,5	0,6	Declarar
Relación de adsorción de sodio (RAS)	cmol(+) L <sup>-1</sup>	13,9	21,0	Declarar
Porcentaje de saturación de sodio intercambiable (PSI)	%	12,2	17,3	Declarar
Humedad	%B.S	40,5	55,1	< 20 %
Capacidad de retención de humedad (base seca)	%	86,3	65,8	>50 %
Densidad	Mg m <sup>-3</sup>	0,8	0,8	Reportar
Cromo	Mg kg <sup>-1</sup>	24,0	21,0	<1200
E. coli	UFC g <sup>-1</sup>	-	-	<1000 UFC g <sup>-1</sup>
Recuento de enterobacterias totales	UFC g <sup>-1</sup>	-	300,0	<1000 UFC g <sup>-1</sup>
Salmonella	Ausente en 25 g	presencia	presencia	Ausencia

Fuente: elaborada por los autores.

Los valores finales de pH estuvieron dentro del rango recomendado (7-9) (NTC, 2011). El pH es una característica química fuertemente afectada por el tipo de iones aportados por los materiales de partida como la influencia de sales aplicadas en la etapa de rivera (Madrid, Quevedo y Andrade, 2000), y es determinante en el valor alcanzado por el producto final y, por lo tanto, en su potencial uso. Similares resultados fueron encontrados por Contreras et al. (2004), quienes resaltaron que condiciones alcalinas pueden favorecer la volatilización del nitrógeno

y aumentar la concentración de amoníaco que es tóxico para los microorganismos. La adición de estiércol de cerdo elevó la capacidad de intercambio catiónico (CIC), es decir, la capacidad de retener cationes de cambio (bases) y agua; por lo tanto, un buen compost debe tener una CIC alta, para que así retenga cationes, evite la pérdida por lixiviación y, además, permita conservar la humedad del suelo (Jaramillo, 2002). Los contenidos tanto de carbono orgánico como de nitrógeno total se encuentran por encima del rango recomendado por la norma técnica NTC



5167 para materiales orgánicos no húmicos ( $>15\%$  y  $\geq 1\%$ , respectivamente). La relación C/N final se encuentran por debajo de lo recomendado ( $<20$  unidades) indicando materiales de rápida mineralización una vez lleguen al suelo (Haroun et al. 2009).

El contenido de sodio en el producto final es admisible para su aplicación al suelo ( $< 1$  cmol (+)  $\text{kg}^{-1}$ ) (Jaramillo, 2002). Los productos obtenidos en ambos tratamientos presentaron valores de relación de adsorción de sodio (RAS) mayores de 10 cmol(+) $\text{kg}^{-1}$ , y porcentajes de sodio intercambiable (PSI) entre 10 % y 20 %,

En cuanto al contenido de humedad, la norma dictamina que debe encontrarse por debajo de 20 %, por lo cual ninguno de los productos terminados cumplió, lo que puede dificultar su manipulación durante el empaque y el almacenamiento. El valor de la capacidad de retención de humedad (CRH) exige como mínimo la mitad de su propio peso, por lo que en todos los tratamientos se cumple con esta condición ( $>50\%$ ). La densidad aparente obtenida fue de 0,83  $\text{Mg m}^{-3}$  para ambos tratamientos, acorde con los niveles de carbono orgánico y de retención de humedad encontrados. Estos valores están por encima de los reportados en abonos comunes empleados en la agricultura como lombricompost (0,40  $\text{Mg m}^{-3}$ ) y pollinaza (0,46  $\text{Mg m}^{-3}$ ) (Pérez, Perez y Vertel, 2010).

La concentración de cromo encontrada cumplió con lo establecido por la norma, donde se advierte que este elemento pesado debe encontrarse por debajo de 1200  $\text{mg kg}^{-1}$ . Compost con altos contenidos de metales pesados pueden afectar la calidad del suelo, el cultivo y las aguas subterráneas (Giachetti y Sebastiani, 2006).

No se encontró contenido de *E. Coli* y se evidenció la presencia de enterobacterias totales por debajo de lo recomendado (valor inferior a 1000 UFC  $\text{g}^{-1}$ ); en ambos tratamientos existió conteo de *salmonella* sp., lo que restringe su uso agrícola.

## DISCUSIÓN

El comportamiento de la temperatura durante el proceso de compostaje podría estar relacionado con las operaciones de acondicionamiento (disminución del tamaño del terrón), operaciones que fueron necesarias debido a los apelmazamientos y baja capacidad de retención de humedad en las pilas, que permitió entrada de aire y modificó las temperaturas alcanzadas. Similares resultados fueron hallados por Haroun et al. (2007) quienes hicieron seguimiento a la temperatura durante el proceso de compostaje de residuos de curtiembres y tampoco encontraron el comportamiento típico relacionado con las diferentes etapas del compostaje. Para T1 y T2, luego del cuarto día, alcanzaron temperaturas por encima de 60 °C, mostrando una respuesta positiva de la actividad metabólica de los microorganismos, situación que obligó a realizar un primer volteo para su aireación; en cuanto al tratamiento (T3) al cuarto día no superaba los 57 °C lo que no garantizó la higienización del producto. Sin embargo, Contreras et al. (2004) aplicaron un proceso de compostaje de residuos de curtiembres enmendados con estiércol de vaca y residuos vegetales de trigo, y reportaron que las temperaturas máximas alcanzadas fueron de 40 °C, suficientes para eliminar patógenos. Los rangos más altos de temperatura (60 °C – 67 °C) fueron alcanzados entre los 45 y los 55 días para todos los tratamientos por lo que la fase de enfriamiento inició a partir del día 62, luego de realizar volteos más frecuentes y controlar la humedad en el rango recomendado para el proceso de compostaje (40 % – 60 %). Ruggieri, Artola, Gea y Sánchez (2008) monitorizaron la temperatura durante el proceso de compostaje de residuos ricos en grasa y encontraron que a partir del segundo día y hasta el día 25 del proceso se alcanzaron temperaturas por encima de 50 °C, para luego pasar a la fase de enfriamiento. Es posible que en las pilas se hubieran presentado condiciones anaerobias debido a la estructura plástica de los lodos de grasas y su tendencia a apelmazarse (Tchobanoglus et al. 1994).

En cuanto al comportamiento del pH, Pal Vig et al. (2011) también encontraron que, aun con

la adición de estiércol vacuno como enmienda al compostaje de los residuos de curtiembres, los valores de pH hallados fueron alcalinos, y a mayor cantidad de enmienda, mayores pH fueron registrados. El aumento en el pH puede obedecer a la presencia excesiva de nitrógeno que se volatiliza en formas amoniacales y que al disolverse en el agua, incrementan la generación de OH<sup>-</sup>. No obstante, Ravidran et al. (2015) encontraron que, con la adición de residuos verdes y estiércol vacuno a residuos de curtiembres fermentados para luego someterlos al proceso de vermicompost, los valores de pH finales alcanzados estuvieron entre 6,0 y 7,0. Los pequeños descensos de los valores de pH que se presentaron a lo largo del proceso obedecieron posiblemente al acondicionamiento de la pila y, por ende, a la estimulación de la actividad microbiológica, lo cual generó la producción de ácidos orgánicos.

Los índices de germinación estuvieron entre 21 % y 35 % por encima de lo encontrado por Haroum et al. 2009, al realizar las pruebas en compost proveniente de residuos de curtiembres sin ninguna clasificación. Dichos autores consideran que índices de germinación por encima de 50 % son aceptables puesto que indican que la madurez es suficiente, y compuestos fitotóxicos como los ácidos acético, propiónico y butílico no pueden ser metabolizados y no inhiben la germinación; Álvarez y Grigera (2005) aseguran que IG por encima del 50 % indican que la probabilidad de encontrar patógenos como *Escherichia coli*, *Salmonella sp.* y *Shigella sp.* se reduce de forma importante.

El producto terminado de ambos tratamientos presentaron pH alcalinos. Según las condiciones del suelo y de cultivo, la aplicación de un compost con estas características puede afectar negativamente la producción, en especial por la dinámica de metales pesados y por la alta saturación de bases intercambiables que pueden inducir problemas de antagonismo y salinidad en los casos más extremos (Guerrero y Monsalve, 2007).

La adición de estiércol de cerdo elevó la CIC de los composts obtenidos, lo que puede deberse a procesos de humificación que al producir grupos funcionales, y dadas las condiciones de pH, puede presentar la desionización de H<sup>+</sup> generando cargas negativas (Contreras et al. 2004).

Los valores de CO hallados en los composts estuvieron por debajo de los reportados por Pal Vig et al. (2011) los cuales estuvieron entre 16 % y 26 %, lo que indica gran actividad microbiológica por la transformación del carbón en CO<sub>2</sub>; por lo tanto, la estabilización de la materia orgánica fue alcanzada en el producto final. Estos autores también encontraron que el contenido de N total depende del contenido de N inicial de los sustratos y que a medida que aumentaba la relación entre residuos y estiércol, mayor cantidad de N se encontraba en el producto final. Los valores altos de N total encontrados pueden deberse a que tanto el pelo como el estiércol de cerdo son ricos en este nutriente y a que el sustrato de carbono decreció durante el proceso, generando CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Haroum et al. 2009).

Similares relaciones C/N a las halladas en el presente trabajo fueron reportadas por Ravidran et al. (2015) en los productos terminados quienes, a pesar de la adición de enmiendas como estiércol de ganado y residuos vegetales, no lograron incrementar dicha relación, obteniendo un producto de rápida descomposición. Igualmente, Cuervo (2010) reportó valores bajos de relación C/N (5,6-6,3) a pesar del uso de inóculos como lodos de PTAR y ME.

La concentración de sodio y los valores hallados de RAS y PSI ameritan especial cuidado, ya que en exceso, el sodio actúa como agente dispersante, afectando negativamente propiedades del suelo, como la estructura, la infiltración y el drenaje del agua; además, incrementa su alcalinidad y limita la disponibilidad de nutrientes como el fósforo, el hierro y el zinc (Oviedo, Daza, Marmolejo y Torres, 2013). Lo anterior sugiere que su uso debe ser restringido, puesto que su aplicación excesiva puede contribuir a la degradación de los suelos.

A pesar de la baja concentración de cromo hallada, se debe tener en cuenta que en suelos ricos en materia orgánica, con alta CIC, este metal pesado puede ser retenido, bioacumularse en la cadena trófica y afectar la salud de los seres humanos (Tenorio, 2006).

La presencia de *Salmonella sp* pudo deberse a que las temperaturas alcanzadas durante el proceso de compostaje no fueron suficientemente altas para higienizar el producto final, o a las condiciones de baja aireación que favorecieron la reproducción de esta bacteria anaeróbica facultativa Gram negativa.

## CONCLUSIONES

El proceso de compostaje de residuos de curtiembres presentó problemas con la humedad a pesar de la adición de enmiendas, lo que ocasionó apelmazamientos que impidieron la aireación y no permitieron alcanzar altas temperaturas en el proceso de compostaje, necesarias para la higienización del producto, comprometiendo su calidad final para uso agrícola.

El compost final no cumplió con todas las especificaciones de la norma técnica NTC 5167 del 2011. Por ello, el producto obtenido no es apto para su aplicación en suelos agrícolas. Para mejorar la calidad del producto terminado es necesario continuar buscando enmiendas capaces de brindar mejores condiciones durante el proceso de compostaje y obtener un producto de mejor calidad agrícola.

## AGRADECIMIENTOS

Al profesor Luis Fernando Marmolejo Rebellón de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle por su asesoría en la realización de este trabajo. A la empresa Curtipieles Ltda., y a la Corporación Autónoma Ambiental del Valle del Cauca –CVC– por la financiación del proyecto. Agradecimientos especiales al ingeniero de producción Diego Fernando Domínguez, a la ingeniera Paola Andrea Vásquez del Centro

Regional de Producción Más Limpia –CRPML– y al ingeniero Harold Hernández de la CVC.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altas, L. (2009). Inhibitory effect of heavy metals on methane-producing anaerobic *granular sludge*. *J. Hazard. Mater.* 162, 1551–1556.
- Álvarez, R. y Grigera, S. (2005). Analysis of soil fertility and management effects on yields of wheat and corn in the rolling Pampa of Argentina. *J. Agron. Crop Sci.* 191, 321–329.
- Barajas-Aceves, M.; Ríos-Berber, J.; Oropeza-Mota, J. y Rodríguez-Vásquez, R. (2014). Assessment of tannery waste in semi-arid soils under a simulated rainfall system. *Soil Sediment Contam. Int. J.* 23(8), 954–964.
- Celary, P. y Sobik-Szołtysek, J. (2014). Vitrification as an alternative to landfilling of tannery sewage sludge. *Waste Manage.* 34, 2520–2527.
- Contreras, S.; Álvarez, D.; Trujillo, N. y Dendooven, N. (2004). Composting of tannery effluent with cow manure and wheat straw. *Bioresour. Technol.* 94, 223–228.
- CRPML –Centro Regional de Producción Más Limpia– (2003). *Proyecto mejoramiento de la competitividad de la cadena productiva del cuero del Valle del Cauca con aplicación de producción más limpia –PML–*. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca –CVC–, Cali.
- Cuervo, N. (2010). Estudio del proceso de compostaje de los lodos producidos en la operación de pelambre en la industria del curtido de pieles. Trabajo de maestría. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Fijałkowski, K.; Rosikon, K.; Grobelak, A. y Kacprzak, M. (2011). Migration of various chemical compounds in soil solution during induced phytoremediation. *Arch. Environ. Prot.* 37(4), 49–59.
- Garro, M.; Galarza, P.; Sarmiento, P. y Hours, R. (2015). Compostaje de residuos sólidos de curtiembre. En *Enfoques interdisciplinarios para la sustentabilidad del ambiente. Memorias del II Congreso Internacional de Ciencia y tecnología ambiental y II Congreso Nacional de la Sociedad Argentina de Ciencia y Tecnología Ambiental*. María Dos Santos y Rosa Torres (eds). Buenos Aires,

- Argentina: Sociedad Argentina de Ciencia y Tecnología Ambiental Editorial.
- Gea, T.; Ferrer, P.; Alvaro, G.; Valero, F.; Artola, A., y Sánchez, A. (2007). Co-composting of sewage sludge: fats mixtures and characteristics of the lipases involved. *Biochem. Eng. J.* 33, 275-283.
- Giachetti, G. y Sebastiani, L. (2006). Metal accumulation in poplar plant grown with industrial wastes. *Chemosphere*, 64, 446-454.
- Guerrero, J. y Monsalve, J. (2007). Evaluación del compostaje de subproductos derivados del sacrificio y faenado de ganado. *Scientia Technica*, 13(34), 595-600.
- Haroum, M.; Idris, A. y Omar, S. (2007). A study of heavy metals and their fate in the composting of tannery sludge. *Waste Manage.* 27, 1541-1550.
- Haroum, M.; Idris, A. y Omar, S. (2009). Analysis of heavy metals during composting of the tannery sludge using physicochemical and spectroscopic techniques. *J. Hazard. Mater.* 165, 111-119.
- Lñiguez, G.; Rodríguez, R., y Virgen, G. (2006). Compostaje de material de descarte y aguas residuales de la industria de curtiduría. *Rev. Inter. Contam. Amb.* 22(3), 113-123.
- Jaramillo, J. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Li, G.; Chuan-Bo, Z.; Jing, Z. y Feng, W. (2005). Chrome sludge compost-effects on crops and soils. *J. Soc. Leather Technol. Chem.* 90, 10-13.
- Madrid, C.; Quevedo, V. y Andrade, E. (2000). Estudio de la biotransformación aeróbica de los desechos lignocelulósicos pergamino de café (*Coffea arabica* L.) y tallos de pasto guinea (*Panicum maximum*). *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, 17, 505-517.
- Montañez, M.; Sánchez Tovar, R. y Roux, M. (2014). The effectiveness of the stabilization/solidification process on the leachability and toxicity of the tannery sludge chromium. *J. Environ. Manage.* 143, 71-79
- NTC –Norma técnica Colombiana 5167. (2011). Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación –ICONTEC–.
- Oviedo, R.; Daza, M.; Marmolejo, L. y Torres, P. (2013). Influencia de la incorporación de pasto estrella como material de soporte (*Cynodon plectostachyus*) en el compostaje de biorresiduos de origen municipal. *Ingeniería y Desarrollo* 31(2), 251-271.
- Palacios, A.; Toruño, A. y Pérez, J. (2007). Procesamiento de la pulpa de café para abono orgánico. Universidad Nacional Autónoma De Nicaragua. Disponible en [https://www.unan.edu.ni/dir\\_invest/web\\_judc/proyectos\\_matagalpa/pdf/ensayos/pulpa\\_cafe.pdf](https://www.unan.edu.ni/dir_invest/web_judc/proyectos_matagalpa/pdf/ensayos/pulpa_cafe.pdf). Fecha de consulta: febrero 13 de 2015.
- Pal Vig, A.; Singh, J.; Hussain, S. y Singh Dhaliwal, S. (2011). Vermicomposting of tannery sludge mixed with cattle dung into valuable manure using earthworm *Eisenia fetida* (Savigny). *Bioresource Technol.* 102, 7941-7945.
- Pereira, M.; Resende, P.; Azeiteiro, U.; Oliveira, J. y De Figueiredo, D. (2005). Differences in the effects of metals on growth of two freshwater green algae (*Pseudokirchneriella subcapitata* (Korshikov) Hindak and *Gonium pectorale* Müller). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 75, 515-522.
- Perez, R.; Perez, A. y Vertel, M. (2010). Caracterización nutricional, físico química y microbiológica de tres abonos orgánicos para uso en agroecosistemas de pasturas en la subregión Sabanas del departamento de Sucre Colombia. *Revista Tumbaga*, 5, 27-37.
- Posso, S. (2006). *Propuesta de manejo de residuos sólidos en curtiembres de El Cerrito Valle del Cauca desde la perspectiva de Producción Más Limpia*. Trabajo de Grado. Universidad del Valle. Cali.
- Ravidran, B.; Contrera-Ramos, S. y Sekaran, G. (2015). Changes in earthworm gut associated enzymes and microbial diversity on the treatment of fermented tannery waste using epigeic earthworm *Eudrilus eugeniae*. *Ecol. Eng.* 74, 394-401.
- Roman, P.; Martínez, M. y Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura –FAO–28-30.
- Ruggieri, L.; Artola, A., Gea, T. y Sánchez, A. (2008). Biodegradation of animal fats in a co-

- composting process with wastewater sludge. *Int. Biodeter. Biodegr.* 62, 297-303.
- Sanclemente, O. E.; García, M. y Valencia, F. L. (2011). Efecto del uso de melaza y microorganismos eficientes sobre la tasa de descomposición de la hoja de caña (*Saccharum officinarum*). *Rev. Invest. Agra. Amb.* 2(2), 13-19.
- Santos, J.; Núñez, L.; Melo, W. y Araujo, A. S. (2011). Tannery sludge compost amendment rates in soil microbial biomass of two different soils. *Eur. J. Soil Biol.* 47, 146-151.
- Silva, J.; Leal, T.; Araújo, A.; Araújo, R.; Gómez, R.; Melo, W. y Singh, R. (2010). Effect of different tannery sludge compost amendment rates on growth, biomass accumulation and yield responses of *Capsicum* plants. *Waste Manage.* 30, 1976-1980.
- Silva, M.; Barajas-Aceves, M.; Araújo, A., Araújo, F. y Melo, W. (2014). Soil Microbial biomass after three years consecutive composted tannery sludge amendment. *Pedosphere* 24(4), 469-475.
- Tchobanoglus, G., Thiesen, H., y Samuel, V. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. México: McGraw Hill.
- Tenorio, G. (2006). Caracterización de la biosorción de cromo con hueso de aceituna. *Tesis doctoral Universidad de Granada*. Disponible en <http://hera.ugr.es/tesisugr/16476736.pdf>. Fecha de consulta: febrero 19 de 2015.
- Varnero, M.T.; Rojas, C. y Orellana, R. (2007). Indices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *R.C.Suelo Nutr.Veg.* 7(1), 595-600.