Boletín Técnico No. 31

Compostaje de subproductos de la agroindustria de palma de aceite en Colombia: estado del arte y perspectivas de investigación

Tania Galindo Castañeda
Hernán Mauricio Romero

fedepalma 50 años
cenipalma

Boletín Técnico No. 31

Compostaje de subproductos de la agroindustria de palma de aceite en Colombia: estado del arte y perspectivas de investigación

Autores
Tania Galindo Castañeda
Hernán Mauricio Romero

Centro de Investigación en Palma de Aceite - Cenipalma
Bogotá, julio de 2012

Boletín Técnico No. 31

Compostaje de subproductos de la agroindustria de palma de aceite en Colombia: estado del arte y perspectivas de investigación

Publicación del Centro de Investigación en Palma de Aceite - Cenipalma, cofinanciada por Fedepalma - Fondo de Fomento Palmero.

Autores

Tania Galindo Castañeda - Programa de Biología y Mejoramiento de la Palma, Cenipalma

Hernán Mauricio Romero - Programa de Biología y Mejoramiento de la Palma, Cenipalma
Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia

Coordinación editorial

Yolanda Moreno M.
Oficina de Comunicaciones de Fedepalma

Diagramación

Fredy Johan Espitia Ballesteros

Corrección

Gilberto Barrios

Impresión

Molher Impresores

Cenipalma

Calle 20 A No. 43 A-50, piso 4.
PBX: (57-1) 2086300 Fax: (57-1) 3681152.
www.cenipalma.org
Bogotá, D. C., Colombia.

Julio de 2012
ISBN: 978-958-8630-35-5

Presentación

Para el Centro de Investigación en Palma de Aceite Cenipalma es grato poner a disposición de los palmicultores el presente boletín técnico sobre el proceso de compostaje basado en subproductos de la agroindustria de la palma de aceite.

Se considera que esta es una práctica muy importante si se le mira desde dos ópticas: el aprovechamiento de los subproductos que surgen de la extracción del aceite de palma en planta de beneficio y el efecto favorable que su utilización acarrea al retornar nutrimentos a los terrenos dedicados al cultivo de palma de aceite.

Es por ello que en el boletín se exponen, en forma didáctica y documentada, los aspectos técnicos del proceso de compostaje de subproductos de la actividad palmicultora, haciendo énfasis en los cambios físico químicos y microbiológicos que estos insumos sufren durante la obtención del compost.

Además, se compilan y referencian casos analizados en literatura científica nacional e internacional, se expone información consultada a palmicultores que han desarrollado compostaje en sus plantaciones y se presentan experiencias de empresas productoras de compost en Colombia.

Todo lo anterior con el propósito de examinar el tema del compostaje de subproductos a la luz de las necesidades del gremio palmicultor y de las perspectivas de investigación que puedan surgir en este campo.

Atentamente,

JOSÉ IGNACIO SANZ SCOVINO, *Ph.D.*
Director Ejecutivo
Cenipalma

Contenido

Pág.

Introducción 7

Problemática del manejo de subproductos de plantas de beneficio 9

Aspectos técnicos del compostaje 11
- Compost y compostaje 13
- Degradabilidad microbiana de subproductos sólidos 16
- Tecnologías para la producción de compostaje 19
- Etapas del proceso de compostaje de RV y FF en palma de aceite 20
  - Etapas iniciales 20
- Alternativas para agilizar la degradabilidad de la materia orgánica presente en RV 21
- Aplicación de efluentes 22
- Humedad de las pilas de compostaje 23
  - Fase termófila 25
  - Fase de maduración 25
- Parámetros de calidad del compost 26
- Características físico-químicas del compost de RV 27
  - Cambios durante el compostaje 27
- Características físico-químicas del producto final 30
- Compostaje de RV de palma de aceite frente a disposición en plato 31
  - Efectos positivos de la aplicación de compost en palma de aceite 32
- Desventajas de compostar y usar compost de subproductos 33

Regulaciones y normativa referentes al compost y compostaje 37

Uso de compost en la Zona Oriental colombiana 41

Perspectivas en investigación 45

Bibliografía 49

Introducción

Colombia es el quinto país productor de aceite crudo de palma en el mundo, con una producción acumulada de 753.000 t en 2010 (Fedepalma, 2011). El proceso de elaboración de aceite de palma deja como principales subproductos los racimos vacíos (RV), la fibra de fruto (FF) y los efluentes. Los racimos de fruto fresco (RFF), provenientes del campo, son procesados en la planta de beneficio, donde se esterilizan y se desfrutan para extraer el aceite, dejando así 20 kg de RV y 14 kg de FF por cada 100 kg de RFF que ingresan al proceso (García et ál., 2010). La esterilización de los RFF, la extracción del aceite y sus subsecuentes pasos de decantación y purificación, así como el procesamiento de la almendra del fruto, de la cual se extrae el aceite de palmiste, generan entre 65 y 85 kg de efluentes por cada 100 kg de RFF.

La palmicultura requiere una gestión adecuada de los subproductos que origina. El principio 5 de la RSPO (*Roundtable Sustainable Palm Oil*) establece en sus criterios 1, 2, 3, 4 y 6 que el reciclaje, la mitigación de impactos ambientales negativos y la eficacia energética son los ejes principales de desarrollo de una palmicultura ambiental y económicamente sostenible. Dentro de este contexto, el compostaje se constituye en una alternativa que puede ser considerada por los palmicultores o por las empresas productoras del mismo para solucionar el problema de utilización de subproductos y retorno de nutrientes al agroecosistema de la palma de aceite. Así lo han demostrado los análisis hechos por Schuchardt et ál. (2002); Siregar et ál. (2002); Baharuddin et ál. (2009); Singh et ál. (2010), y Stichnothe y Schuchardt (2010).

Se ha sugerido que las plantas de beneficio de fruto de palma de aceite, con niveles de procesamiento por encima de 20 t/h de RFF y 160.000 t RFF/año, generan cantidades de subproductos que justifican un programa para su manejo y reciclaje tecnificado (Miranda et ál., 2007), es decir, que las plantas de procesamiento de menor capacidad no encontrarán rentable el uso del compostaje para manejar los subproductos.

Recientemente, García et ál. (2010) presentaron un análisis acerca del uso de biomasa residual en las zonas Norte, Central y Oriental colombianas. Los resultados obtenidos demostraron que de los 2’858.868 t de fruto producido en 2008 en las plantaciones encuestadas en las tres zonas, los subproductos sólidos fueron de 1’212.528 t, es decir, el 39% del peso del RFF. Estos subproductos provinieron de tres posibles fuentes: RV, FF y cuesco.

De estos subproductos, 97.800 t, correspondientes al 8,7% del total, fueron utilizadas para compostaje. La materia prima que se utilizó en mayor porcentaje (8%) para

producir compost fue RV y la zona donde más se registró uso de compostaje fue la Zona Oriental. Es interesante el hecho de que en este estudio no se incluyeron los efluentes como subproductos compostables, lo que contrasta con los reportes internacionales que indican que el compost cobra su mayor valor agronómico cuando se prepara a partir de RV y efluentes.

Algunas empresas palmicultoras en Colombia han defendido el uso del proceso de compostaje como una forma viable de retorno de nutrientes al agroecosistema, así como una solución de disposición de subproductos. No obstante, son muchos los detractores del uso de este proceso, resaltando las desventajas que éste pueda tener. Con el objetivo de informar y enmarcar conceptualmente la elaboración de propuestas de investigación acerca de este tema, se realizó el presente documento, que reúne las experiencias de investigadores, productores y usuarios de productos relacionados con el compostaje en palma de aceite, principalmente en la Zona Oriental colombiana.

La primera parte considera aspectos técnicos del proceso de compostaje de subproductos en palma de aceite. Seguidamente, se resume el marco legal que rige la producción de compost en Colombia y algunas reglamentaciones ambientales asociadas con el proceso de compostaje en la Zona Oriental colombiana. Como tercera parte, se presentan los resultados de una encuesta llevada a cabo en la Zona Oriental palmera sobre el uso de la tecnología de compostaje. Por último, se resumen los puntos más importantes que podrían tratarse como temas de investigación relacionados y que pueden tenerse en cuenta al iniciarse un proyecto de compostaje en palma de aceite.

Problemática del manejo de subproductos de plantas de beneficio

Después de que los RFF de palma de aceite se han procesado en la planta de beneficio, los RV pueden ser utilizados de diferentes maneras. Una de éstas consiste en disponerlos en campo, ya que se sabe que allí liberan los nutrientes al suelo paralelamente a su proceso de descomposición (Calimán et ál., 2001). Otras alternativas frecuentes son la acumulación de RV en zonas de acopio, así como el compostaje de éstos.

Especialmente, la acumulación de RV en centros de acopio es una opción que puede tener consecuencias ambientales negativas, porque son puntos de anidación de plagas y animales peligrosos, como serpientes, ratas y moscas. Asimismo, se generan lixiviados que llegan finalmente a las fuentes de agua y al subsuelo, provocando problemas de contaminación. Al respecto, las entidades reguladoras de los asuntos ambientales del orden local en Colombia, las corporaciones regionales, sancionan la producción de lixiviados tanto en centros de acopio como en otras zonas donde se acumulan RV. A propósito de este tema, en la última revisión que se realizó a la "Guía ambiental para el subsector de la agroindustria de la palma de aceite" (Fedepalma, 2003), Cormacarena, Corporación Regional del Departamento del Meta, al oriente colombiano, resaltó la importancia de considerar los RV como abonos solamente después de sufrir un proceso de compostaje (León com. Pers. 2011). Dichas consideraciones están en estudio y discusión por parte de las diferentes instancias y los actores de esta problemática.

Los efluentes son los subproductos de mayor contenido nutricional en la agroindustria de la palma de aceite (Stichnothe y Schuchardt, 2010) y, por lo tanto, son considerados como los que presentan mayor potencial de contaminación si no se manejan de forma adecuada (Singh, 2010). Generalmente éstos son llevados a piscinas de oxidación consecutivas, de las cuales las primeras permiten una oxidación anaeróbica y las últimas proveen la oxidación bajo condiciones aerobias parciales, donde los microorganismos anaerobios facultativos predominan. Estos sistemas pueden llegar a disminuir la demanda química de oxígeno inicial desde 25.000 $mg*L^{-1}$ hasta los 100 $mg*L^{-1}$ (Chan y Chooi, 1982; Chooi, 1984, cit. en Singh et ál., 2010). No obstante, se considera que cada tonelada de efluente tratado en piscinas de oxidación genera aproximadamente 12,36 kg de metano (Yaacob et ál., 2006, cit. en Baharuddin et ál., 2009).

En un análisis de ciclo de vida de subproductos, presentado por Stichnothe y Schuchardt (2010), a través del cual se examinaron las diferentes alternativas de manejo de subproductos usadas en la agroindustria de la palma de aceite, se encontraron los resultados presentados en la Tabla 1. El potencial de calentamiento global, medido en CO_2 equivalente, indica el grado de sostenibilidad de un proceso. Según los autores, las opciones ambientalmente más sostenibles involucran el compostaje de RV y EF sin el uso de piscinas de oxidación ni disposición de RV en campo.

Tabla 1. Potencial de calentamiento global de cuatro alternativas de uso de subproductos de la agroindustria de la palma de aceite. Modificación de Stichnothe y Schuchardt (2010).

Alternativa	CO2 eq*t-1 RFF
Acumular tusa y efluentes en piscinas	245,0
Disponer tusa en plato y acumular en piscinas	125,0
Compostaje de RV y efluentes	7,4
Producción de biogás y compostaje de RV y efluentes	6,2

Primera parte

Foto: Elizabeth Acevedo.

Aspectos técnicos del compostaje

Aspectos técnicos del compostaje

El compostaje es un proceso de **biodegradación** de una **mezcla compleja de sustratos** llevada a cabo por **comunidades microbianas** en condiciones aeróbicas en estado sólido. La transformación de la materia orgánica, mediante el compostaje, da como producto final **el compost**. Por medio de este procedimiento se puede estabilizar materia orgánica fresca y lograr un manejo de residuos y subproductos que involucran biomasa (Isam y Bertoldi, 2007). Para que un producto sea considerado compost, debe ser un recurso orgánico **estable y seguro** para ser utilizado en la agricultura (Icontec, 2004, en Barreto, 2008). Para el caso de la agroindustria, el objetivo principal del compostaje debería ser el reciclaje de material residual dentro del proceso productivo en forma de fertilizante o como mejorador de suelo (Flotats y Solé, 2008).

La pila de compostaje es un ecosistema cuyas poblaciones microbianas de hongos y bacterias (incluidos los actinomicetes) degradan aeróbica, constante y secuencialmente la materia orgánica, generando como producto de su metabolismo un material estable, potencialmente humificable, gases, agua y calor. Entender la forma en que influye la temperatura, el material orgánico inicial y la concentración de oxígeno proveniente de la aireación sobre el ecosistema microbiano es importante para mejorar la eficacia del proceso y controlarlo (Moreno y Mormeneo, 2008).

El proceso de descomposición de RV se ha investigado en las últimas dos décadas, encontrándose que es posible obtener un producto maduro y estable en el término de 2 a 12 semanas mediante el apilado y aireado de la mezcla de RV con efluentes (revisado en Schuchardt et ál., 2002; Stichnothe y Schuchardt, 2010). A continuación se describen las características del proceso de compostaje hecho con la metodología de pilas, ya que es la más usada para palma de aceite, y se explican los procesos biológicos y químicos relacionados.

Compost y compostaje

Es fundamental tener en cuenta que el compostaje es un proceso natural, en el que los principales actores son los microorganismos degradadores de materia orgánica. Por lo tanto, cualquier proceso o tecnología utilizada para compostar será provechosa en cuanto permita que los microorganismos hagan su trabajo, siendo necesario garantizar una matriz acuosa, una temperatura adecuada y un balance de nutrientes que sea metabólicamente favorable para que se lleve a cabo la degradación, preferiblemente oxidativa, del material vegetal.

En la Figura 1 se presenta un resumen del proceso de compostaje y las características predominantes para los subproductos de palma de aceite. El procedimiento, en general, comprende las siguientes etapas (Schuchardt et ál., 2002):

1. Prensado o picado de RV.
2. Conformación de pilas de tamaño adecuado para facilitar su volteo y paso de maquinaria.
3. Volteo periódico de pilas.
4. Humedecimiento periódico de pilas, preferiblemente con los efluentes provenientes de la planta de beneficio.
5. Finalización de proceso, acopio y transporte a destino final.

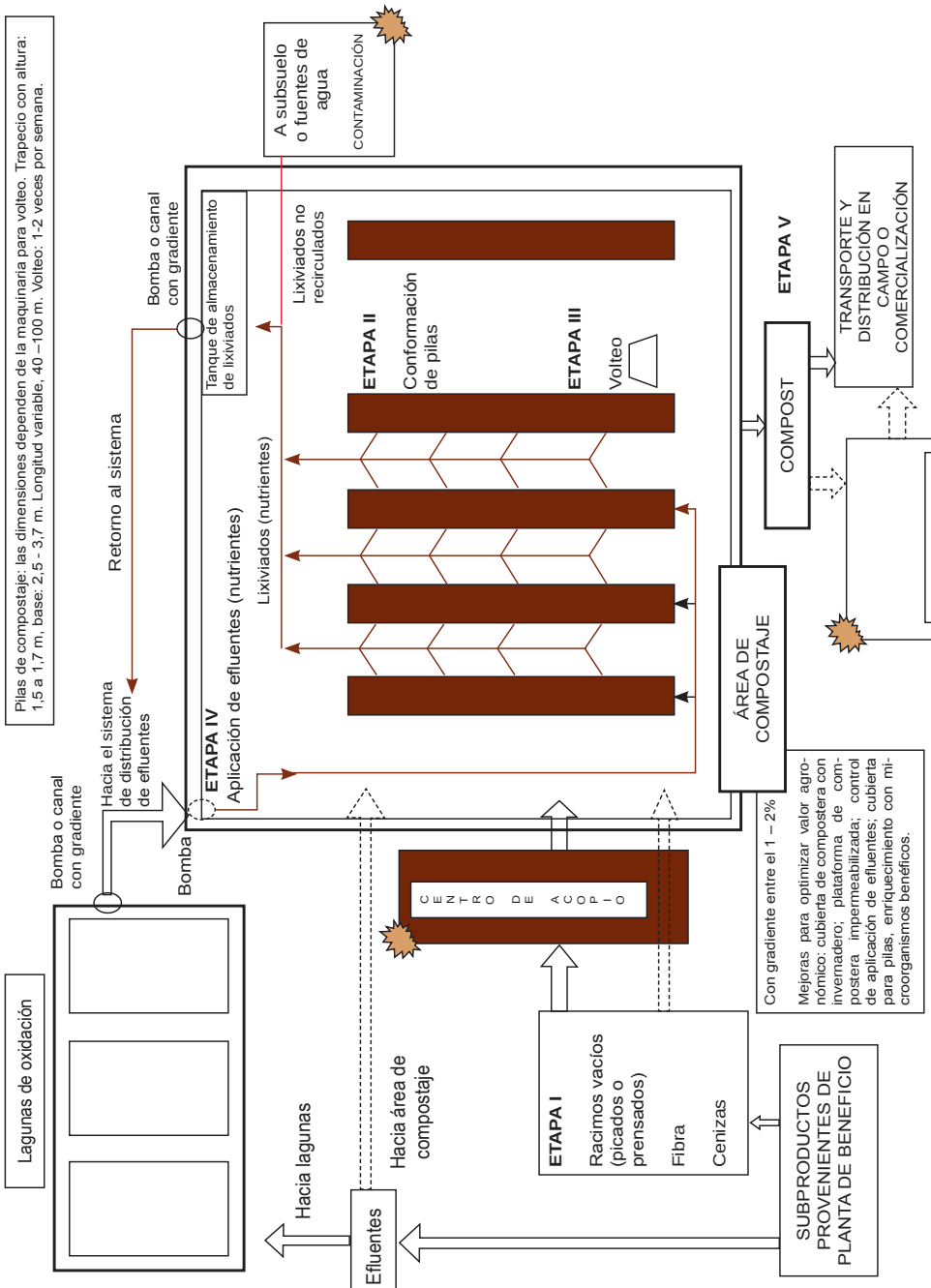


Figura 1. Proceso de compostaje de subproductos de palma de aceite con las etapas propuestas por Schuchardt et ál., 2002. Las líneas punteadas indican las alternativas de mejora. Los llamados de color rosado indican los puntos del proceso que provocan pérdida de nutrientes, especialmente potasio.

Degradabilidad microbiana de subproductos sólidos

En la Tabla 2 se muestran la composición y la degradabilidad de los materiales que conforman los subproductos sólidos de palma de aceite.

Tabla 2. Degradabilidad de algunos materiales presentes en residuos vegetales y su relación con la composición de RV y FF, productos de la extracción de aceite de palma. Adaptado de Isam y Bertoldi (2007) y García et ál. (2010).

Compuesto orgánico	Composición	Función	% en residuos compostables de subproductos de palma de aceite	Degradabilidad y microorganismos participantes en el proceso
Lignina	Polímeros de derivados de fenilpropano	Compuesto estructural	10 – 22	Muy resistente. Hongos principalmente. En trópicos, deuteromicetes y basiodiomicetes.
Celulosa	Polímero de glucosa	Compuesto estructural	33 – 45	Fácil. Hongos, algunas bacterias y actinomicetes.
Almidón	Polímero de glucosa	Material de reserva	No cuantificado	Buena. Anaeróbica y aeróbica. Clostridium.
Hemicelulosas	Monómeros de azúcares de bajo grado de polimerización	Componente de pared celular	18 – 20	Variable, generalmente se degrada junto con la lignina.
Pectina	Polímero de ácido galacturónico	Componente de pared celular	No cuantificado	Fácil. la mayoría de los microorganismos la pueden degradar, incluso patógenos de plantas.
Sucrosa	Disacárido de glucosa y fructosa	Vacuolas	No cuantificado	Muy fácil por parte de la mayoría de microorganismos.
Alcaloides y taninos	Azúcares	Vacuolas	No cuantificado	Variable.
Grasas y ceras	Glicerina y ácidos grasos	Material de reserva	No cuantificado	Variable.
Otros	Clorofila, ácidos nucleicos	Plastidios, núcleos y mitocondrias.	No cuantificado	Fácil.

La lignina es un material que no es de fácil degradabilidad, por lo tanto, encontrar la forma de agilizar su degradación, promoviendo el crecimiento de microorganismos lignolíticos durante el proceso de descomposición, podría representar mejoras en el proceso. Los hongos son los principales degradadores de este material en suelos húmedos y ácidos, mientras que las bacterias presentan mayor actividad lignolítica en suelos con pH básico y de condiciones áridas (Paul y Clark, 1996). Por eso, para agilizar el compostaje y la descomposición de RV y FF sería recomendable la aplicación o bioaumentación de hongos lignolíticos nativos, ya que los suelos donde se cultiva la palma de aceite son generalmente ácidos. La aplicación de otro tipo de microorganismos en etapas iniciales o avanzadas del proceso difícilmente podría agilizar las tasas de degradación. Los hongos lignolíticos más estudiados en investigaciones relacionadas con compostaje son *Phanerochaete* spp., *Pleurotus ostreatus, Trametes versicolor* y *Stereum hirsutum;* sin embargo, éstos suelen asociarse con otros deuteromicetes y ascomicetes en los ambientes naturales aumentando su actividad lignolítica a través de mecanismos de competencia (Baldrian, 2004). Otros hongos que se conocen por estar involucrados en la degradación de polímeros naturales presentes en desechos vegetales son *Trichoderma reesei, Aspergillus niger* y *Penicillium* spp. (Paul y Clark, 1996; Isam y Bertoldi, 2007).

La celulosa, otro compuesto abundante en los subproductos de la palma de aceite, es degradada por bacterias, hongos y mixomicetos. Sin embargo, por las características de la composición de las RV y la FF, con altos contenidos de carbón y bajos de nitrógeno (relaciones C:N alrededor de 70 (Salétes et ál., 2004)), los hongos podrían tener ventajas adaptativas al presentar micelios extensos que crecen sobre el material en descomposición. Hongos de los géneros *Chaetomium, Fusarium* y *Aspergillus* son ejemplos de hongos celulolíticos. Bacterias del género *Pseudomonas* y algunos actinomicetos se conocen también por su actividad celulolítica en condiciones aeróbicas y *Clostridium* bajo condiciones anaeróbicas (Isam y Bertoldi, 2007).

Se conoce poco acerca de las características microbiológicas específicas del compost de subproductos de palma de aceite. El trabajo de Baharuddin et ál. (2009) en Malasia y el de Peña y Rivera (1996) se destacan como los únicos que describen en detalle la sucesión de poblaciones microbianas en dicho proceso de compostaje. Especialmente, Baharuddin et ál. (2009) realizaron una reseña detallada de los cambios físico-químicos de RV y efluentes, y su relación con cambios en la composición de la comunidad bacteriana durante el proceso de compostaje.

Llama la atención el hecho de que la mayoría de las bacterias encontradas con técnicas de análisis molecular fueron no cultivables, es decir, que no pueden ser aisladas

en medios de cultivo sintéticos. Asimismo, la estructura de la comunidad bacteriana permaneció estable a lo largo del proceso, una vez que la temperatura inicial de la primera fase termofílica presentara incrementos por encima de los 44°C. Los grupos predominantes encontrados por estos autores se presentan en la Tabla 3. Estos resultados sugieren que la mayor parte de los microorganismos predominantes en el compost provinieron de los efluentes después de la primera fase termofílica, que las condiciones son relativamente estables para mantener una composición bacteriana similar y que posiblemente pretender inocular compost con microorganismos exógenos no tiene mayor impacto, dado que los efluentes proporcionan el inóculo requerido.

Tabla 3. Sucesión de grupos de bacterias en compost de RV y efluentes (modificado de Baharuddin et ál., 2009).

Grupos predominantes	Fuente	Tiempo de compostaje (días)	Temperatura (°C)
Firmicutes	RV y compost inmaduro día 2	0 y 2	32
Bacteroidetes	Efluentes	0	32
Cyanobacteria	Compost inmaduro	2	<44
Delta-Proteobacterium	Compost inmaduro	2	<44
Cyanobacteria (oscillatoriales cyanobacterium)	Compost inmaduro	3	44
Delta-Proteobacterium (desulfobacteraceae)	Compost inmaduro	3	44
Proteobacterium	Efluentes y compost inmaduro	> 10	>50 y < 40 cambios periódicos y 35 estable
Chloroflexi		>35	35 estable

En el trabajo de Peña y Rivera (1996) se cuantificaron microorganismos totales cultivables y se aislaron los celulolíticos, que posteriormente fueron reinoculados con el fin de agilizar el proceso de descomposición. Los autores observaron que los hongos fueron los microorganismos cultivables más abundantes al comienzo del proceso, encontrándose en concentraciones de hasta 10^{10} UFC*g^{-1}; mientras que las bacterias fueron menos abundantes al inicio del proceso con concentraciones del orden de 10^{-5} UFC*g^{-1}.

Estos valores cambiaron durante el compostaje de los RV, llegando a ser más abundantes las bacterias en el producto maduro (10^{13} UFC*g^{-1}) y menos cuantiosos los hongos (10^{3} UFC*g^{-1}). De igual manera, atribuyeron estos resultados a que los hongos predominaron al principio de la descomposición utilizando sustratos complejos,

que a medida que ocurrió el proceso de descomposición, se fueron transformando en sustratos más fáciles de degradar por parte de las bacterias.

Este análisis evidencia la importancia de encontrar cepas de hongos eficaces y adaptados a las condiciones del compost de RV con el fin de agilizar el proceso cuando prevalecen compuestos complejos como la lignina, que junto con la celulosa limitan la degradabilidad. A la luz de lo dicho por Baharuddin et ál. (2009) se puede inferir que los resultados presentados por Peña y Rivera (1996) se deben a que la mayoría de las bacterias que están en el compost son no cultivables.

Peña y Rivera (1996) encontraron diez cepas de microorganismos celulolíticos en compost de palma de aceite en Colombia. En etapas iniciales de la descomposición predominaron los hongos del género *Neurospora*; en etapas intermedias, *A. niger, Paecilomyces* sp., *Hyalodendron* sp. y *Chloridium* sp.; al final del proceso de descomposición se evidenciaron hongos de los géneros *Trichoderma, Rhizopus* y *Geotrichum*. Los mejores degradadores del compost, como lo mostraron los resultados de pruebas en campo, fueron: *Trichoderma, Neurospora* y *Geotrichum*.

Baharuddin et ál. (2010) describieron por medio de microscopía electrónica de barrido la apariencia de racimos prensados y desmenuzados antes y después del proceso de compostaje. Fue evidente que el material después de ser compostado presenta hoyos en su estructura, donde inicialmente había incrustaciones de sílice rodeadas de fuertes fibras de lignina y celulosa. Los autores atribuyeron a los microorganismos la presencia de estos hoyos en el producto final del compostaje.

Análisis de comunidades microbianas en compost de RV, abordadas con técnicas, tanto cultivo-dependientes como con técnicas basadas en ADN comunitario, serán necesarios para conocer más sobre las sucesiones de microorganismos en este proceso. Esta información permitiría controlar de forma más precisa las tasas de degradabilidad y bioaumentar cepas que naturalmente degraden rápidamente los sustratos más complejos.

Tecnologías para la producción de compostaje

Existe una amplia gama de tecnologías disponibles para compostar residuos y subproductos agroindustriales. El proceso se puede llevar a cabo sobre plataformas simples en parcelas privadas, así como en plantas centralizadas muy tecnificadas. Lo importante es que se realice el control mediante la homogenización y el mezclado de los residuos proporcionando oxígeno suficiente para la respiración aeróbica de los microorganismos descomponedores y la humectación necesaria para mantener la actividad de dichos microorganismos (Flotats y Solé, 2008).

Dentro de las plantas centralizadas, donde los volúmenes de residuos justifican la implantación de tecnologías que permitan un mayor aprovechamiento y eficacia del proceso, el rango de tecnologías puede ir desde las pilas sin aireación forzada y volteo mecánico de bajo costo, hasta sistemas con aireación forzada y control de temperatura.

Estas plantas pueden tratar hasta 100.000 t*año^{-1}, aunque en Europa se han documentado valores medios de procesamiento entre 10.000 a 30.000 t*año^{-1}(Flotats y Solé, 2008). En Colombia hasta el momento, para manejar subproductos de palma de aceite, la tecnología predominante es la de pilas con volteo mecánico. Esta forma permite procesar material a gran escala con un proceso relativamente sencillo.

En la revisión realizada por Teo et ál. (2009) se citan diez empresas que lideraban la producción de compost a partir de subproductos del cultivo de palma de aceite en Malasia en 2009. Todas ellas con sistemas similares al presentado en la Figura 1. El principio de funcionamiento de los sistemas de compostaje para palma de aceite contempla la concentración de nutrientes mediante la evaporación de agua de los efluentes y la maduración de la materia orgánica de los RV mediante la metodología de pilas. La inclusión de cenizas, FF y otros subproductos son opcionales para cada alternativa. Los sistemas pueden ser en áreas abiertas con plataformas de procesamiento extensas y menor inversión de capital inicial; o cerrados, con techos o invernaderos que implican mayores inversiones iniciales. Estos últimos son recomendados para regiones de alta precipitación.

Etapas del proceso de compostaje de RV y FF en palma de aceite

Etapas iniciales

El compostaje se inicia sobre material orgánico acumulado gracias a la acción de las comunidades de microorganismos que se encuentren sobre ella o aplicados a través de efluentes u otros aditivos. La actividad microbiana inicial comienza sobre los sustratos de mayor facilidad de degradación, llamada tradicionalmente **mesofílica**. En los procesos de compostaje de residuos de palma, específicamente de RV, esta etapa puede agilizarse si éstos son previamente tratados de forma mecánica con equipos que pican y/o prensan este material. De esta manera aumenta la superficie sobre la cual pueden actuar las enzimas degradadoras producidas por microorganismos respecto al volumen total.

Además, es importante disminuir la cantidad de aceite impregnado en el material ya que los microorganismos actúan más fácil en fase acuosa. Esto se logra prensando y

desmenuzando el material antes de ser llevado al área de compostaje. Al respecto, se ha observado que al utilizar una prensa de RV después del desfrutador, en el proceso de extracción de aceite, se logra reducir el tiempo de compostaje de tres a cuatro meses a 40–45 días (Laiton, 2010). Aunque se puede usar una picadora de este material prensado, Laiton (2010) reporta valores de extracción de aceite y estimaciones de costos favorables únicamente con el uso de la prensa, así como manifiesta que el picado no es necesario. Sin embargo, diferentes productores dicen que con el picado, sin prensa, inician sus procesos de compostaje (Garzón et ál., 2008; Gómez, com. pers. 2011; Leal com. pers. 2011; Pinzón com. pers. 2011).

Alternativas para agilizar la degradabilidad de la materia orgánica presente en RV

El uso de inoculantes microbianos para agilizar las tasas de descomposición en compost de palma de RV ha sido estudiado previamente, encontrándose resultados inconsistentes. Mientras que Shuchardt et ál. (1998) no hallaron efecto de la inoculación inicial, Goenadi et ál. (1998) sí vieron efecto. Al respecto, pocos productores de compost en el sector palmero de la Zona Oriental colombiana han observado resultados favorables en términos de disminución del tiempo de compostaje al aplicar productos comerciales bioactivadores o agilizadores. Sin embargo, es importante tener en cuenta que actualmente no hay productos microbiológicos específicos para compost de RV, así que los que se han usado no necesariamente son los más adecuados para este material.

En este sentido es aconsejable adicionar microorganismos específicos que degraden lignina y celulosa, así como que provengan del agroecosistema de la palma de aceite, ya que las condiciones agroecológicas pueden modificar su actividad. Los microorganismos aislados en otros agroecosistemas o en otras condiciones climáticas, y a partir de otros sustratos, posiblemente no funcionan sobre RV y FF. Gómez (com. pers. 2011) manifiesta que la aplicación de microorganismos nativos y producidos *in situ*, con técnicas seleccionadas para aislar los lignolíticos y celulolíticos, permite obtener un inoculante eficaz para la agilización de las primeras etapas de degradación de RV de palma de aceite.

La adición de urea ocasiona una disminución de los valores de la relación carbono/nitrógeno (C/N) al comienzo del proceso (Salétes et ál., 2004; Torres et ál., 2004), hecho que podría agilizar el inicio de los procesos de descomposición. Sin embargo, Schuchardt et ál. (2002) y Salétes et ál. (2004) encontraron que la adición de urea no agiliza por sí sola el compostaje, ya que ésta es en gran medida volatilizada a causa de los altos incrementos de temperatura al empezar el proceso, los cuales pueden

llegar a cerca de los 70°C. No obstante, Salétes et ál. (2004) aplicaron conjuntamente compost maduro y urea (2 kg/t de RV) a los RFF justo antes de iniciar el proceso, logrando reducciones significativas en el volumen y peso final del producto al compararlo con productos sin dicho tratamiento. De esta manera, se inocularon las pilas con microorganismos nativos y con suficiente nitrógeno para agilizar su metabolismo oxidativo. Esta experiencia demuestra la potencialidad que tiene la inoculación inicial con cepas adaptadas a las condiciones específicas de las pilas de compostaje de RV manejadas adecuadamente para promover su actividad metabólica.

Aplicación de efluentes

La adición de efluentes provenientes de la planta de beneficio cumple la función de aportar la mayor cantidad de nutrientes a las pilas de compost. Asimismo, este subproducto proporciona humedad y microorganismos a las pilas de RV, que inicialmente traen una carga microbiana baja como resultado de la esterilización previa en la planta de beneficio. Teniendo en cuenta que se ha calculado que una tonelada produce 230 kg de RV y 650 kg de efluentes y que estas cantidades producen 92 kg de compost, se observa que la mayoría de los nutrientes presentes en este producto final provienen principalmente de los efluentes. Así, del total del nitrógeno que puede contener el compost final, el 70% procede de los efluentes, mientras que el 30% corresponde a los RV. Para el fósforo y el magnesio, los efluentes aportan el 96 y 70%, respectivamente. Esto implica que el valor agronómico del compost es mayor al utilizar efluentes en el proceso (Tabla 4).

Tabla 4. Contenido de nutrientes de RV, efluentes sin tratar en piscinas y compost resultado del compostaje de estos dos subproductos. Modificado de Stichnothe y Schuchardt (2010). Se asume un proceso de compostaje donde se degradó el 60% de la materia seca en un período de diez semanas. La variabilidad de los valores estuvo entre 11 y 45%. ps: peso seco.

Parámetro	RV	Efluente	Compost
Cantidad (kg)	230	650	92
Peso seco (kg/t)	350	41	500
pH	5,5-5,7	4 - 4,5	7,7
C/N	54	20	15
Nitrógeno (kg/t ps)	8	18,3	26,3
Fósforo (kg/t ps)	0,97	4,39	4,56
Potasio (kg/t ps)	24	55,4	79,6
Calcio (kg/t ps)	1,8	10,73	10,1
Magnesio (kg/t ps)	1,8	15,12	12,8

La tasa de aplicación ideal de efluentes respecto a RV es 3:1 (3.000 L de efluentes: 1 t de RV), ya que esta proporción coincide con la de RV y efluentes producidos en las plantas de beneficio (Salétes et ál., 2004). Esta cantidad debe ser acomodada de forma controlada para mantener la humedad en las pilas de compostaje, como se describirá más adelante. Al respecto, la protección de las pilas en regiones de altas precipitaciones asegura el control del volumen de agua adicionada con los efluentes.

Para garantizar un compostaje conjunto de efluente con RV se hace necesaria la instalación de sistemas de distribución de los efluentes como parte del diseño de las plantas compostadoras. Éstos incluyen bombas o canales en gradientes para impulsar los líquidos desde las piscinas o directamente desde los florentinos de la planta, cajas de distribución y mangueras para la aplicación sobre las pilas. Este último paso generalmente es manual, aunque puede acoplarse al equipo de volteo.

Adicional, se requiere un sistema de canales y pozos que colecten y recirculen los posibles lixiviados, ya sea por medio de una bomba o por gradiente de gravedad para su retorno a las pilas (Schuchardt et ál. 2002; Salétes et ál., 2004; Torres et ál., 2004). (Ver Figura 1). Es importante que estos lixiviados no lleguen a fuentes de agua ni se filtren por el suelo para evitar la contaminación del medio ambiente y la pérdida de nutrientes del sistema. Las infiltraciones hacia el subsuelo y las fuentes hídricas son duramente castigadas por las corporaciones regionales en Colombia (Fedepalma, 2003).

Humedad de las pilas de compostaje

Mantener los niveles de humedad óptimos para la actividad microbiana es un aspecto fundamental para el éxito del proceso de compostaje. Por un lado, se debe evitar el anegamiento de las pilas, ya que promueve condiciones de anaerobiosis y producción de lixiviados. Por otra parte, las tasas de evaporación en pilas son altas (Schuchardt et ál. 2002), especialmente en las primeras semanas del proceso, razón por la cual se debe impedir la pérdida excesiva de humedad. No obstante, controlar el contenido de humedad en las pilas es un punto importante para aprovechar al máximo los subproductos y no contaminar el medio ambiente.

El valor óptimo de humedad para promover un metabolismo activo y aeróbico de las comunidades microbianas en las pilas de compostaje es de 60% (Isam y Bertoldi, 2007). Schuchardt et ál. (2002) encontraron que la tasa óptima de aplicación de efluentes para mantener las pilas con humedad del 60% fue de 3,2 m^3*t EFB^{-1} en nueve semanas con una frecuencia de volteo de tres veces por semana en pilas bajo cubierta (tasa de evaporación de agua en pilas de 51 L*t EFB^{-1}*d^{-1}). Por su parte, Salétes et ál. (2004) observaron que la tasa de aplicación de efluentes fue de 3,1 m^3*t

EFB^{-1} en 14 semanas, con una frecuencia de volteo de dos veces por semana con pilas descubiertas.

A medida que se avanza hacia la maduración del compost se hace necesario aplicar una menor cantidad de efluentes. Salétes et ál. (2004) proponen el cronograma de aplicación de efluentes presentado en la Tabla 5.

Tabla 5. Propuesta de cronograma de aplicación de efluentes durante el compostaje de RF y EF. Tomado de Salétes et ál. (2004)[1]. Se propone para pilas no cubiertas en un proceso de compostaje que tardó 14 semanas, durante las cuales se presentó una precipitación total acumulada de 766 mm con un promedio semanal de 55 mm (máximo de 169 mm en la semana 7 y un mínimo de 0 en las semanas 3 y 4).

Semana	Rango de temperatura (°C)	Riesgo de secado excesivo en la pila	Fase	Cantidad mínima de efluente para aplicar en la semana (L*t-1 de RFF)		Frecuencia mínima recomendada (número de aplicaciones por semana)
				Intervalo	Media	
0 – 1	> 65	Muy alto	Termófila	740	740	2
2 – 5	55 – 65	Alto	Termófila	200 – 520	400	2
6 – 9	40 – 65	Moderado	Termófila	100 – 220	160	2
> 9	< 40	Bajo	Maduración	0 – 70	20	1
Total de efluentes aplicados (L) después de 14 semanas de compostaje						3.100

Aunque en algunas regiones no es necesario cubrir las pilas, ya que la precipitación y la aplicación de efluentes proporcionan la humedad requerida para compostar, en zonas muy lluviosas, como los Llanos Orientales colombianos, donde la precipitación oscila entre los 1.800 y 3.000 mm H_2O al año, es fundamental evitar que se laven los nutrientes y que se produzcan lixiviados.

El uso de plástico, membranas respirables e invernaderos espaciales son alternativas para proteger el material en procesamiento. De éstas, los plásticos tienen la ventaja de ser de bajo costo y de fácil maniobrabilidad, pero la desventaja es que impiden la difusión de oxígeno a las pilas, haciendo lento el proceso y, por ende, más costoso. Las membranas respirables impiden que se suba la temperatura y permiten un inter-

1 Original en inglés. **Copyright And Trademark Notice** All contents of this Web site are: Copyright 2003-2011, The JG Press, Inc., Emmaus, PA, USA, protected by international copyright law. All rights reserved. The JG Press, Inc., BioCycle, In Business, Compost Science & Utilization and other names of The JG Press's products referenced herein are trademarks or registered trademarks of The JG Press, Inc. Other trademarks/logos are the property of their respective owners. This web site is for the user's personal, noncommercial use. For any material that is downloaded, this Copyright And Trademark Notice must be included. The right to use it is not transferable to any other person or entity.

cambio gaseoso entre la pila y el medio ambiente. Por su parte, los invernaderos son una opción de mayor costo, sin embargo, tienen la ventaja de que se puede controlar el proceso con mayor precisión.

Fase termófila

Una vez los microorganismos inician el proceso de degradación, la alta actividad metabólica hace que la temperatura suba, provocando una aceleración del metabolismo. En consecuencia, se alcanzan los 70°C, temperatura por encima de la cual el proceso llega a la fase **termófila**. Durante los primeros 15 días después de conformadas las pilas con RV y FF se alcanzan alrededor de los 70°C, disminuyendo cada vez más a lo largo del proceso (Isam y Bertoldi, 2007).

Por encima de los 60°C la mayoría de microorganismos mueren y sólo persisten algunas bacterias que no pueden causar mayores incrementos de temperatura y, por lo tanto, comienza la fase de enfriamiento, o segunda fase mesofílica. Nuevamente se inicia un ciclo de aumento y disminución de la temperatura, siempre y cuando se suministre oxígeno suficiente a través de la aireación al material. En la palma de aceite, entre uno y dos volteos semanales parecen ser suficientes y económicamente viables para procesos que duren entre 6 y 10 semanas (Schuchardt et ál., 2002).

Fase de maduración

La sucesión de ciclos de enfriamiento y calentamiento se detiene una vez los sustratos contienen limitadas cantidades de carbono y nitrógeno, con una relación C/N por debajo de 20, momento en el cual se alcanza la fase de maduración (Heerden et ál., 2002 cit. en Baharuddin et ál., 2009). Shuchardt et ál. (2002) encontraron que al adicionar el equivalente a 2 kg $N*t^{-1}$ RV (peso fresco), es decir, 6 kg $N*t^{-1}$ RV (peso seco), en forma de urea, la maduración se alcanzó en la semana 4; sin la adición de urea la maduración se logró después de la semana 10. Los autores exponen que si se adicionan efluentes a las pilas a razón de 4.000 L * t^{-1} RV se obtiene un valor aproximado de nitrógeno equivalente a 2–3,2 kg*t RV. En contraste, Baharuddin et ál. (2009) observaron que el producto adquiría valores de C/N menores a 20 a la semana 6 sin el uso de fuentes de nitrógeno adicionales a los efluentes (aplicaciones de efluentes:RV de 3:1).

En la práctica, para determinar si el producto ha alcanzado su estado de madurez, se mide la temperatura de las pilas buscando el momento en el que la temperatura se estabiliza. Cuando este parámetro está alrededor de los 30°C se considera que el producto está en punto de maduración. Este procedimiento se puede optimizar haciendo un análisis para determinar la relación C/N y midiendo las tasas de respiración correlacionando los dos parámetros (Isam y Bertoldi, 2007; Bendeck, 2008).

Parámetros de calidad del compost

Para Colombia, la norma técnica NTC 5167, elaborada por el Icontec (Instituto Colombiano de Normas Técnicas), resume los parámetros de calidad para comercializar compost (Tabla 6). Si bien es un referente importante para determinar la calidad del producto final, éstos se usan de forma estricta para los compost que se van a comercializar. Para productos que se elaboran y se aplican en la misma plantación, Schuchardt et ál. (2002) exponen la posibilidad de utilizar materiales que no han completado todo el proceso de oxidación como para ser considerados compost maduros, denominándolos mulch.

Estos elementos con C/N mayores a 15 pueden ser empleados en campo, pero no son recomendables para viveros. Adicionalmente, no es aconsejable llevar productos frescos al campo cuya relación C/N sobrepase valores de 20, porque la aplicación de compost inmaduro en el suelo puede tener efectos adversos sobre la productividad del cultivo (Isam y Bertoldi, 2007). Esto se debe a que bajo estas condiciones hay un déficit metabólico de nitrógeno que ocasiona que los microorganismos que se encuentran en altas concentraciones en el producto, así como los presentes en el suelo, entran a competir con la planta por el nitrógeno del sistema proveniente de la fertilización.

Tabla 6. Parámetros de calidad del compost según la NTC 5167 (modificado de Barreto, 2008, y Schuchardt et ál., 2002).

Contenido de humedad	35%
Carbono orgánico oxidable	15% min.
N, P2O5, K2O totales	> 1 % c/u.
Relación C/N	<15 compost ; >15 mulch
CIC	30 meq./100 g min.
pH	4 a 9
Densidad máxima	0,6 g/mL
Capacidad de retención de humedad: mínimo su propio peso.	
Salmonella sp.: ausentes en 25 gramos de producto. Enterobacterias totales: < 1.000 UFC/g de producto. Además, deberán estar exentos de fitopatógenos.	

Características físico-químicas del compost de RV

Cambios durante el compostaje

En esta etapa se dan cambios específicos de los parámetros físico-químicos y, por lo tanto, de los contenidos relativos de cada nutriente. Los trabajos de Shuchardt et ál. (2002), Salétes et ál. (2004) y Baharuddin et ál. (2009) los describen en detalle (Figura 2).

Temperatura. En todos los reportes se muestra una fase termofílica que inicia en la primera semana con incrementos de hasta 70°C y una prevalencia de rangos entre 55 y 65°C hasta las semanas 4 a 9, dependiendo de las condiciones del proceso. Aunque en la Figura 2 se presenta una curva de tendencia a disminuir la temperatura, esta caída se da de forma cíclica, ya que los picos por encima de los 60°C eliminan gran parte de los microorganismos, dejando en las pilas solamente a los termófilos, razón por la cual ocurren caídas de temperatura después de los picos al reducirse la actividad microbiana. En estas condiciones la aplicación de efluentes compensa no sólo las pérdidas de microorganismos, sino de agua en las pilas.

Volumen. La disminución en volumen y la concomitante concentración de nutrientes son dos de las ventajas de compostar subproductos. Los procesos descritos en este apartado y los presentados por Torres et ál. (2004) indican reducción de volúmenes entre 60 a 40% del inicial.

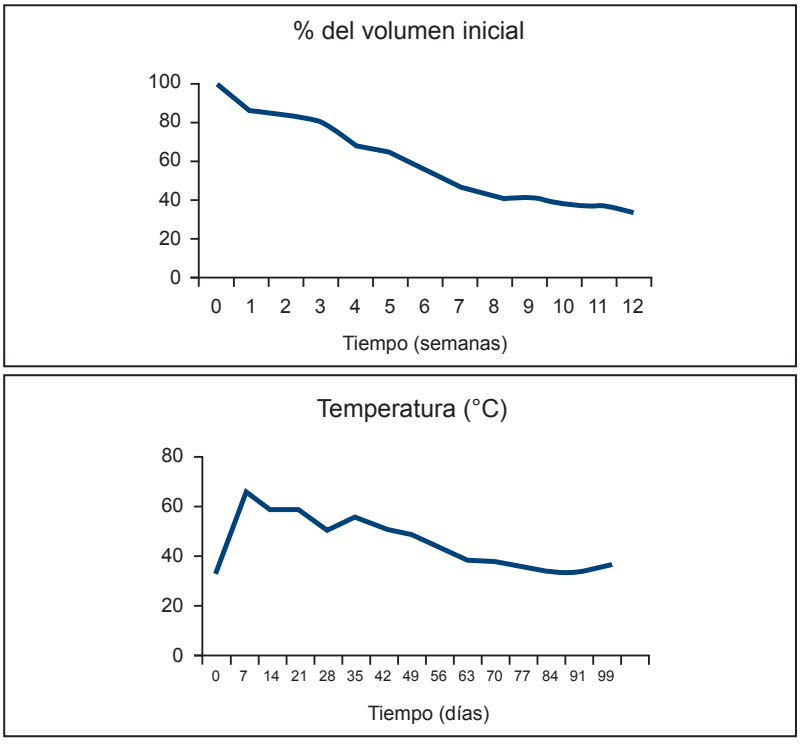
Relación C/N. Este parámetro muestra el estado nutricional del material vegetal para ser consumido por los microorganismos. Se observan valores muy altos al inicio del compostaje, que son disminuidos de forma rápida en las primeras semanas, indicando una fuerte actividad microbiana sobre los sustratos de mayor degradabilidad (Salétes et ál., 2004). Este valor es modificado con la adición de urea al comienzo del proceso y alrededor de la semana 5 alcanza valores inferiores a 20, independiente de la adición de urea (Figura 2). Dichos resultados demuestran que la adición no agiliza el proceso, ya que el estado de madurez se logra igualmente al agregar o no urea en la semana 5.

Contenido de nutrientes. Los contenidos relativos en base seca de todos los nutrientes se incrementan en el compost, indicando la propiedad de concentrarlos en este proceso (ver Tabla 4). Sin embargo, se dan pérdidas de forma similar a lo que ocurre en la aplicación de RV en campo (Calimán et ál., 2001). Para lograr el éxito en la recolección máxima de nutrientes del sistema, la impermeabilización y la correcta recirculación de los lixiviados generados son una práctica importante. Por otro lado, el

uso de lodos concentrados, provenientes de los fondos de las piscinas de oxidación, puede ser otra alternativa para aumentar el valor agronómico del compost.

Nitrógeno. Éste se pierde por una volatilización rápida en los primeros días debido a las altas temperaturas alcanzadas en las pilas (Salétes et ál., 2004). Por esta razón la aplicación de urea al inicio del proceso no es recomendable, porque se ha calculado que alrededor del 30% se pierde. En compensación, el balance del valor de C/N puede hacerse empleando urea en horas de la noche, 15 días después de que las pilas se han conformado, cuando la temperatura no llega a valores tan altos.

Otros nutrientes. Para el caso del fósforo y el magnesio, éstos se concentran a pesar de las pérdidas debidas a la producción de lixiviados (Salétes et ál., 2004). No ocurre igual con el potasio. Especialmente este nutriente es movilizado muy pronto de los tejidos de los RV y, por lo tanto, su pérdida puede controlarse si se evita el acopio de producto antes o después de compostarse. Sin embargo, la aplicación de lixiviados por sí sola durante el compostaje ya implica pérdidas de potasio en las pilas, debido a que el agua que trae este subproducto lo solubiliza y lo lleva a los lixiviados.



Continúa

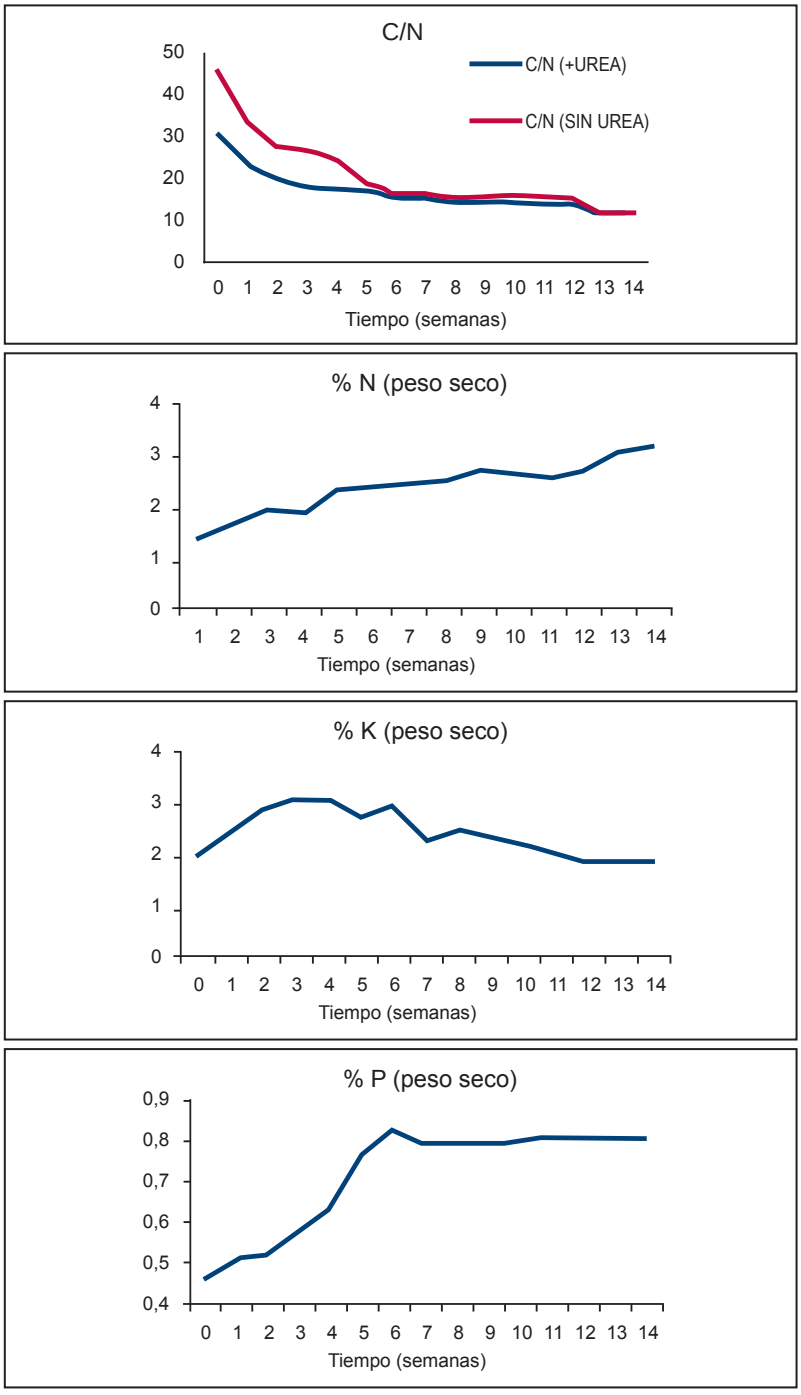


Figura 2. Tendencias en los cambios de algunas propiedades físico-químicas en pilas de compost de RV y efluentes. Los valores son promedios de los reportados por Shuchardt et ál. (2002), Salétes et ál. (2004) y Baharuddin et ál. (2009) para cada día o semana del proceso.

Características físico-químicas del producto final

El compost terminado de RV se define por presentar altos contenidos de materia orgánica (cerca del 50% en base seca), nitrógeno (hasta 4,5% en base seca), potasio (hasta 7,9% en base seca) y calcio (hasta 4,5% en base seca), así como bajos contenidos de fósforo (2,5% en base seca). Los contenidos de metales pesados no sobrepasan los valores permitidos por la Unión Europea (Schuchardt et ál., 2002). En la Tabla 7 se muestran análisis de diferentes compost de RV.

Tabla 7. Composición de diferentes compost hechos a partir de RV de palma de aceite. n.r. (No reporta). C.V. (Coeficiente de variación entre los valores presentados).

Referencia	Escala	Base de determinación	N (%)	P (%)	K (%)	Mg (%)	Ca (%)	pH
Sunitha y Varghese (1999)	Experimental	Peso fresco	1,13	0,30	0,90	0,23	n. r.	n.r.
Aisueni & Omoti (2001)	n.r.	n.r.	3,50	1,40	3,00	0,90	2,40	8,40
Schuchardt et ál. (2002)	Comercial	Peso seco	2,34	0,31	5,53	0,96	1,46	7,50
Salétes et ál. (2004)	Experimental en plantación	Peso seco	1,20	0,33	1,16	0,44	12,80	n.r.
Torres et ál. (2004)	Comercial	Peso seco	2,8 – 4,5	1,5-2,52	4,4-5,01	0,73-0,84	4,33-4,59	n.r.
Ling-Hoak et ál. (2007)	Experimental	Peso seco	1,23	0,17	1,54	0,28	0,53	5,91
Garzón et ál. (2008)	Comercial	Peso seco	2,75	0,40	0,36	0,82	0,94	6,70
Baharuddin et ál. (2009)	Experimental	n.r.	2,20	1,30	2,80	1,00	0,70	8,10
Galindo, 2011 (2009)	Comercial	Peso fresco	1,47	0,99	2,28	0,76	1,18	7,50
Yahya et ál. (2010)	Experimental en plantación	n.r.	2,54	1,19	2,89	0,81	1,16	8,50
Stichnothe y Schuchardt (2010)	Comercial	Peso seco	2,63	0,46	7,96	1,28	1,01	7,70
Baharuddin et ál. (2010)	Experimental	Peso seco	4,70	1,25	5,16	1,41	2,55	7,41
Galindo (2011)	Comercial	Peso fresco	0,92	0,70	1,69	0,85	2,22	7,35
Rango			0,92 - 4,7	0,3 - 2,52	0,36 - 7,96	0,23 - 1,41	0,53 - 4,59	5,91 - 8,5
Promedio			2,4	0,9	3,2	0,8	2,8	7,5
C. V. (%)			49,6	72,1	67,5	40,8	119,1	10,3

Compostaje de RV de palma de aceite frente a disposición en plato

La disposición de RV en campo es considerada una buena práctica agronómica, especialmente al compararla con la disposición de RV en centros de acopio. Esta técnica tiene la ventaja de que libera los nutrientes en campo directamente en el suelo, donde están las raíces, y puede mejorar las características en el sitio definitivo. Calimán et ál. (2001) han descrito la dinámica de liberación de nutrientes de los RV aplicados directamente en suelos de palma de aceite. A partir de este trabajo se sabe que, bajo un régimen de precipitación de 2.600 mm al año, el 90% de potasio se libera al suelo en tres meses, y de forma más lenta lo hacen el magnesio y el fósforo, los cuales se liberan en 90% hacia los 300 días, así como el nitrógeno que después de 300 días aún persiste en el suelo en forma de materia orgánica.

Sin embargo, al comparar la alternativa de disposición de racimos frescos en campo definitivo con la opción de compostar RV y efluentes, esta práctica puede ser desventajosa, especialmente en plantas de procesamiento que superan las 30 $t*hora^{-1}$ (Calimán et ál., 2001; Schuchardt et ál., 2002; Salétes et ál., 2004; Teo et ál., 2009). Las principales razones son las siguientes:

- Los altos costos de transporte y distribución en campo por aumentos en los precios de los combustibles al transportar RV fresco al campo. Al compostar RV y efluentes se reduce el volumen de los subproductos hasta en 60% y el peso hasta en 55% (Siregar et ál., 2002; Torres et ál., 2004). Estas reducciones en volumen ocasionan una concentración de nutrientes en el producto final (ver Tabla 4).

- El uso de RV fresco se limita a áreas cercanas a la planta de extracción. La aplicación de compost puede organizarse con el empleo de fertilizantes y por su disminución en volumen puede llegar a zonas más alejadas de la planta de beneficio.

- Los altos valores de C/N de RV fresco dispuesto en el campo crea inconvenientes de inmovilización del N por utilización de los microorganismos descomponedores. El compost es un material maduro y estable que aporta y mejora las comunidades de microorganismos en el suelo.

- La descomposición es más lenta, tardando hasta un año, frente a tres meses que dura el compostaje de RV y efluentes.

- Mayor producción de metano cuando es aplicado en zonas con suelos arcillosos y propensos a la inundación, generándose contaminación y un alto potencial

de calentamiento global. El uso de compost mejora las características físico-químicas del suelo por aumentar los microporos e introducir materia orgánica en las capas superficiales del suelo.

- Las tusas acumuladas en campo pueden ser reservorio de serpientes, roedores e insectos. El compost, por el contrario, elimina cualquier tipo de patógeno presente en el material vegetal y no es apto para albergar plagas peligrosas.

- El compostaje es más sostenible en términos ambientales, ya que produce 16 veces menos CO_2eq*t^{-1} RFF que la alternativa de disposición de RV en plato sin uso de efluentes (ver Tabla 1). Esta reducción de potencial de calentamiento global es debida a que con esta opción se evita la emisión de metano en piscinas de oxidación, se hace un ahorro económico en transporte y se retorna mayor cantidad de nutrientes al sistema (Stichnothe y Schuchardt, 2010).

- Esta alternativa no tiene en cuenta el uso de efluentes, en tanto que el compostaje de RV y efluentes sí, aportando mayor cantidad de nutrientes y evitando el problema medioambiental que representa la subutilización de los efluentes.

Efectos positivos de la aplicación de compost en palma de aceite

Parte de la incertidumbre ante la conveniencia del uso de compost en el cultivo de la palma de aceite proviene del hecho de que no hay suficiente evidencia científica de los efectos de esta práctica sobre la productividad del cultivo y las características de los suelos que han sido enmendados con este tipo de materia orgánica. Sin embargo, algunos resultados demuestran una acción positiva sobre la dinámica del fósforo, la proliferación de raíces y el crecimiento inicial en vivero. No se han encontrado referencias acerca de los efectos sobre la productividad y, por lo tanto, este debería ser un tema principal de investigación para empresas interesadas en promover o bien evitar el uso del compost en palma de aceite.

Aisueni y Omoti (2001) aplicaron compost de RV en suelos ácidos nigerianos y observaron la tendencia de aumento de contenido de fósforo total a través del tiempo. Los mismos autores evaluaron la respuesta de plántulas de vivero y encontraron mayores promedios en peso seco a los 12 meses en vivero en los tratamientos donde se habían aplicado entre 150 y 200 g de compost complementados con 12 g de NPK 20:10:10 por palma y por año. Asimismo, Darmosarkoro y Sutarta (2002) detallaron un efecto positivo de la aplicación de compost de RV sobre las propiedades físico-químicas de un ultisol en Indonesia. El pH aumentó de 5,9 a 6,3; la capacidad de intercambio de K se incrementó siete veces; el fósforo disponible subió de 27,8 a 70,0 ppm, y el aluminio intercambiable disminuyó de 0,95 $meq*100g^{-1}$.

En cuanto a la sanidad del cultivo, existen reportes de resultados exitosos, especialmente con enfermedades provocadas por patógenos del suelo. Arbain y Chong (2009) encontraron que al aplicar compost enriquecido con *Trichoderma* es posible mejorar las producciones de RFF en palmas infectadas con *Ganoderma*.

Hassan et ál. (2009), en Malasia, instalaron un experimento para determinar la respuesta de palma de aceite a la aplicación de compost de RV y efluentes en suelos de lotes con bajos valores de productividad en cultivo establecido. Los autores hallaron resultados positivos de las características del suelo y la proliferación de raíces en las parcelas experimentales donde se había aplicado compost. Las raíces penetraron a mayores profundidades (hasta 70 cm) en suelos enmendados con compost, gracias a que la capa superficial con contenido de materia orgánica fue tres veces más ancha (15 cm) que la correspondiente en suelos sin compost (5 cm), donde las raíces sólo se encontraron en los primeros 30 cm. La biomasa de raíces consecuentemente fue mayor en los suelos con compost, siendo 111% mayor al compararla con suelos sin compost. El contenido de fosfato disponible en los primeros 15 cm de suelos enmendados con compost fue significativamente mayor con valores de 155,9 mg*L^{-1} frente a 85,81 mg*L^{-1} en los suelos sin compost.

En las parcelas experimentales los mejores niveles de productividad se alcanzaron al aplicar 25 kg por palma de compost en combinación con el 100% de la fertilización inorgánica (1,19 kg N y 2,4 kg K2O por palma al año), en las parcelas experimentales los mejores niveles de productividad se alcanzaron al aplicar 25 kg por palma de compost en combinación con el 100% de la fertilización inorgánica (1,19 kg N y 2,4 kg K2O por palma al año) después de seis años de medición.

Desventajas de compostar y usar compost de subproductos

Dentro de las desventajas de manejar residuos agroindustriales mediante el compostaje están la pérdida de entre 20-40% de nitrógeno en forma de amoniaco y de 40-60% de carbono en forma de CO_2 (Flotats y Solé, 2008).

El principal inconveniente de establecer composteras en plantaciones de palma de aceite es la inversión inicial en infraestructura y desarrollo del proceso necesaria para lograr los mejores rendimientos y el máximo aprovechamiento de los subproductos. Sin embargo, una correcta planificación del proyecto cuantifica las tasas de retorno de la inversión inicial y permite establecer la factibilidad del uso de esta tecnología en una plantación o un conjunto de ellas. La inversión no necesariamente es una desventaja si el proceso es proyectado a largo plazo, ya que esta es una solución definitiva al problema del manejo de subproductos y mediano plazo puede repre-

sentar beneficios tributarios. Detalles de ejemplos de costos y beneficios se pueden encontrar en Schuchardt et ál. (2002) y Torres et ál. (2004).

Por otro lado, existe la idea errónea de que el compost puede usarse como reemplazo de la fertilización. Esto debe tratarse con mucho cuidado en el caso de la palma de aceite, porque las altas demandas en nutrientes del cultivo no permiten un cambio total ni sustituciones drásticas de la aplicación de fertilizantes de síntesis química o de origen mineral. La liberación de nutrientes en el compost es lenta, razón por la cual éste puede utilizarse como un complemento de la fertilización, según sea el contenido de nutrientes en el producto, o bien como enmienda orgánica que mejora las propiedades del suelo para retener más nutrientes. Estudios relacionados con el efecto de compostaje acerca de la eficacia de la fertilización deben realizarse con el fin de determinar el verdadero aporte de este producto sobre el contenido nutricional del cultivo con palma de aceite en suelos colombianos.

Una desventaja adicional es que el contenido nutricional del compost y su calidad pueden ser muy variables, dependiendo del proceso y del material inicial, razón por la que es necesario realizar análisis físico-químicos frecuentemente. No obstante, una vez se ha normalizado y estabilizado la metodología de producción, se pueden manejar los rangos de contenidos nutricionales para establecer los aportes de nutrientes de este tipo de productos al sistema de la palma.

Al respecto, Baharuddin et ál. (2010) proponen que la variabilidad en la composición del compost de RV y efluentes se da debido a la variación en las características físico-químicas y biológicas de los efluentes después de pasar por las piscinas de oxidación. Los autores propusieron una tecnología de tratamiento de los efluentes, mediante la cual se normalizaron sus características físico-químicas antes de ser aplicadas a los RV frescos. En dicho trabajo se utilizó un digestor anaeróbico con el que se trataron efluentes con el fin de producir lodos con altos contenidos de nutrientes (1,2 $mg*L^{-1}$ P; 5,16 $mg*L^{-1}$ K; 2,5 $mg*L^{-1}$ Ca; 1,4 $mg*L^{-1}$ Mg), así como de microorganismos (21111 $mg*L^{-1}$ sólidos disueltos), incluso al compararlo con efluentes frescos sin tratar.

La aplicación de compost inmaduro en el suelo puede tener efectos adversos sobre la productividad del cultivo. Esto se debe principalmente a que el compost inmaduro presenta relaciones C/N altos, es decir, que hay un déficit metabólico de nitrógeno, lo que ocasiona que los microorganismos que se encuentran en altas concentraciones en el producto, así como los que están en el suelo, puedan entrar a competir con la planta por el nitrógeno del sistema proveniente de la fertilización. Esta desventaja se elimina implementando procesos de compostaje bajo óptimas

condiciones y haciendo controles periódicos sobre los productos y el suelo donde se ha usado este material.

Otros inconvenientes pueden ser la diversidad en el origen del material, la adición de tierra, la arena y los cantos al producto terminado como consecuencia de una mala impermeabilización de la plataforma de producción, así como los bajos niveles tecnológicos y de informalidad.

Segunda parte

Foto: Patricio Ramírez.

Regulaciones y normativa referentes al compost y compostaje

Regulaciones y normativa referentes al compost y compostaje (Revisado en Barreto, 2008)

Dos aspectos relacionados con la producción de compost pueden ser verificables y sometidos a evaluación por parte de entidades gubernamentales así como ser tenidas en cuenta a la hora de iniciar proyectos en compostaje y aplicar compost en el campo en Colombia. Por un lado están los lineamientos y requerimientos que hace el Gobierno Nacional colombiano para el manejo integral de los subproductos de la agroindustria (denominados residuos sólidos), el otorgamiento de licencias ambientales, la concesión de permisos ambientales y la administración del recurso hídrico. Y por otro está la normatividad técnica que define los parámetros mínimos de calidad de compost en Colombia, consignada en la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 "Materiales orgánicos utilizados como fertilizantes o acondicionadores de suelos".

La normatividad ambiental es manejada por las corporaciones regionales, las cuales se constituyen en entes verificadores del orden local. Es importante tener en cuenta la reglamentación pertinente con el fin de evitar sanciones y eventuales cierres. Actualmente, para el caso de la Zona Oriental, las corporaciones regionales usan principalmente la siguiente normatividad:

"Decreto 2820 de 2010. Reglamentación para la obtención de licencias ambientales para la ejecución de obras, el establecimiento de industrias o el desarrollo de cualquier actividad, que de acuerdo con la ley y los reglamentos pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente, o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje"[1].

"Decreto 4741 de 2005. Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral". "Residuo o desecho peligroso. Es aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente. Asimismo, se consideran residuo o desecho peligroso los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos"[2].

Artículos **16, 25 y 26** de la Ley 142 de 1994. La Ley 142 "establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones. Aplicación de la

1 http://www.dmsjuridica.com/codigos/legislacion/decretos/2010/2820.htm

2 http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18718

ley a los productores de servicios marginales, independiente o para uso particular. Concesiones y permisos ambientales y sanitarios. Permisos municipales".

Artículo 25 del Decreto 3930 de 2010. "Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados".

Decreto 1713 de 2002. "Por el cual se reglamentan la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto-Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993, en relación con la gestión integral de residuos sólidos". "Artículo 78. Requisitos previos para la comercialización de materia orgánica estabilizada. Los productos finales obtenidos mediante procesos de compostaje y lombricultura, para ser comercializados, deben cumplir, previamente, los requisitos de calidad exigidos por las autoridades agrícolas y de salud en cuanto a presentación, contenido de nutrientes, humedad, garantizar que no tienen sustancias y/o elementos peligrosos que puedan afectar la salud humana, el medio ambiente y obtener sus respectivos registros".

La normatividad técnica que define parámetros de calidad de compost en Colombia está consignada en la Norma Técnica Colombiana NTC 5167: "Materiales orgánicos utilizados como fertilizantes o acondicionadores de suelos", la cual adopta las definiciones consignadas en el Glosario de la NTC 1927: "Reglamento técnico de fertilizantes y acondicionadores de suelos". Los parámetros que exige la norma deben cumplirlos los productores de compost que comercializan sus productos y que certifican la calidad ante el ICA. Para el caso del compostaje de subproductos de plantas extractoras de palma de aceite que no comercialicen compost, dichos parámetros y los valores que establece son puntos de referencia para determinar el estado de calidad del producto final y el estado general del proceso de compostaje (ver Tabla 6).

Otras reglamentaciones relacionadas con la calidad y producción de compost son:

- Ley 99 de 1993. Ley Ambiental.
- Ley 101 de 1993. Ley de Desarrollo Agropecuario y Pesquero.
- Decreto 1840 de 1994 (Funciones del ICA).
- Resolución 0187 de 2006, del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (Agricultura Ecológica).
- Resolución CCI 011 de 1998. Reglamento General para la Certificación de Productos Ecológicos. Corporación Colombia Internacional.
- Resolución ICA 0150 de 2003. Reglamento Técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos.

Tercera parte

Foto: Álvaro Cristancho.

Uso de compost en la Zona Oriental colombiana

Uso de compost en la Zona Oriental colombiana (Revisado en Barreto, 2008)

El empleo de compost en esta zona ha cambiado en los últimos dos años, debido a los requerimientos hechos por las corporaciones regionales acerca del manejo de subproductos, las que prohíben el acopio masivo de RV y limitan la disposición de RV en campo por posibles descargas de lixiviados a las fuentes de agua. En una encuesta realizada en el comité agronómico de la Zona Oriental, en agosto de 2010, se encontraron los resultados presentados en la Figura 3.

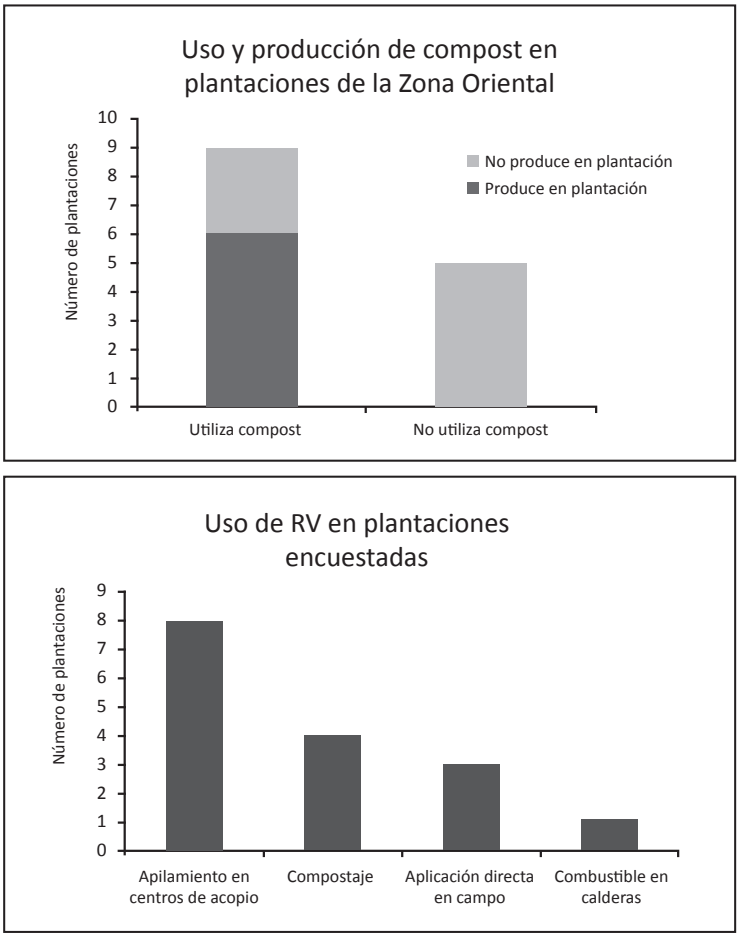


Figura 3. Resultados de encuesta realizada en comité agronómico, en agosto de 2010, acerca del uso de compost en 14 plantaciones de la Zona Oriental colombiana. Las plantaciones comprendían 40.000 ha en el momento de la prueba. No se representan las áreas de las plantaciones, ya que no en todas se aplica compost en el 100% de la encuesta.

Cuarta parte

Foto: Patricio Ramírez.

Perspectivas en investigación

Perspectivas en investigación

Si bien el compostaje se muestra como una alternativa importante para el manejo y aprovechamiento de subproductos de la palma de aceite, existen algunos temas importantes para ser investigados referentes al compost de subproductos:

1. Microbiología del compost de RV y efluentes. Se requiere una caracterización de la dinámica de las comunidades de microorganismos presentes en pilas de compostaje, realizada con herramientas de biología molecular que ayude a detectar microorganismos cultivables y no cultivables. Identificar, especialmente, consorcios de microorganismos eficaces degradadores de lignina y celulosa, así como verificar las condiciones óptimas para su desarrollo en las pilas sería una información útil para acortar los ciclos de degradación. Además, examinar la calidad de los efluentes que estimulan eficazmente a los microorganismos degradadores entre 1. Efluentes provenientes de piscinas; 2. Lodos, y 3. Efluentes provenientes directamente de la planta de beneficio, ayudaría a diseñar cronogramas de aplicación y prácticas favorables para el desarrollo de microorganismos degradadores.

2. Cambios en las propiedades físico-químicas del suelo y en la productividad del cultivo asociados a la aplicación de compost. Efecto de la aplicación de compost sobre productividad, eficacia de la fertilización, propiedades del suelo y estado fitosanitario del cultivo.

3. Infraestructura que presente la mejor relación costo-beneficio para el proceso de producción de compost. Diseñar soluciones para la recirculación de lixiviados, la construcción de una plataforma adecuada y la verificación de la necesidad de implementar invernaderos o cubiertas localizadas, así como correlacionar esto con variables climáticas de precipitación y radiación solar.

4. Estudios comparativos de costos de las diferentes alternativas de manejo de subproductos. Este balance económico debe hacerse teniendo en cuenta los beneficios que trae sobre la productividad del cultivo cada una de estas alternativas al corto y mediano plazo.

5. En la presente revisión no se consideraron aspectos relacionados con la maquinaria que puede utilizarse para compostar subproductos. Este tema debe ser revisado e incluido en experimentos para la optimización del proceso.

6. Balance de masa del proceso. Es importante establecer las cantidades de subproductos que se ingresan y que se obtienen después del compostaje en una planta

de producción a escala comercial. La mayoría de reportes detallados, que relacionan ciclos completos de nutrientes, se presentan para experimentos pequeños de no más de 20 t de producto final. Estas producciones pueden ser muy diferentes cuando se escala el proceso a los requerimientos de plantas de capacidades por encima de 30 $t*h^{-1}$. Sin embargo, esta información es muy variable y poco disponible para los nuevos proyectos que inician compostaje. Al elegir la factibilidad de implementar un proyecto, estos datos son determinantes en la toma de la decisión final. Con esta información sería posible determinar en qué proporción se devuelven los nutrientes aplicados con la fertilización al aplicar compost de los subproductos propios en el cultivo.

7. Efectos de la aplicación de compost enriquecido con microorganismos degradadores de lignina, degradadores de celulosa y hemicelulosa, así como la adición de microorganismos promotores de crecimiento vegetal junto con biocontroladores. La adición de micorrizas, hongos del género *Trichoderma* o bacterias solubilizadoras de fosfatos o fijadoras de nitrógeno podría dar un valor agregado en esta práctica. Adicionalmente, la aplicación conjunta de fertilizantes químicos debe examinarse como forma de disminuir los costos de aplicación.

8. Se debe estudiar el uso del compost comparativamente con otras alternativas de uso de subproductos. Una comparación del efecto de la aplicación de compost, biocarbón y RV fresco al suelo, en términos de la respuesta tanto del cultivo como del suelo, daría mayor soporte a la hora de elegir alguna de ellas.

Bibliografía

Aisueni, N.O. Omoti, U. 2001. The Role of Compost in Sustainable Oil Palm Production. Proceedings of the 2001 PIPOC International Palm Oil Congress (Agriculture). p. 23.

Arbain, M.A. Chong, T.C. 2009. Field application of *Trichoderma* and Arbuscular Mycorrhizal fungi for the control of *Ganoderma* Basal Stem Rot of oil palm. Proceedings of Agriculture, Biotechnology & Sustainability Conference. PIPOC 2009 International Palm Oil Congress *Palm Oil – Balancing Ecologics with Economics.* Volume 2: Poster Papers, AP3. p. 439.

Baharuddin, A.S. Hock, L.S. Yusof, M.Z. Abdul, N. Shah, U. Hassan, M.A. Wakisaka, M. Sakai, K. Shirai, Y. 2010. Effects of palm oil mill effluent (POME) anaerobic sludge from 500 m3 of closed anaerobic methane digested tank on pressed-shredded empty fruit bunch (EFB) composting process. African Journal of Biotechnology Vol. 9(16), pp. 2427-2436. Consultado en línea en: http://www.academicjournals.org/AJB

Baharuddin, A.S., M. Wakisaka, Y. Shirai, S. Abd-Aziz, N.A. Abdul-Rahman and M.A. Hassan, 2009. Co-composting of empty fruit bunches and partially treated palm oil mill effluents in pilot scale. Int. J. Agric. Res., 4: -78.

Baldrian, P., 2004, Increase of laccase activity during interspecific interactions of white-rot fungi, FEMS Microbiology Ecology, 50: 245-253.

Barreto, J. 2008. Norma Técnica Colombiana 5167. (1ª Actualización. Mayo 31 de 2004) "Materiales orgánicos usados como fertilizantes o acondicionadores de suelos". Comité Técnico Icontec 73: Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos. Presentación en: Primer Congreso de Compost y Compostajes. Bogotá, febrero de 2008.

Barreto, J.R. 2009. Norma Técnica Colombiana 5167. (1ª Actualización. Mayo 31 de 2004) "Materiales orgánicos usados como fertilizantes o acondicionadores de suelos". Comité Técnico Icontec 73: Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos. Presentación realizada en el "Primer Congreso de Compost y Compostajes", celebrado en Bogotá, febrero de 2009.

Darmosarkoro, W. Sutarta, E.S. 2002. Application of EFB on acidic soil in north Sumatra to increase soil bases and decrease aluminium. International Oil Palm Conference, Nusa Dua, Bali.

Fedepalma, 2011. Boletín Estadístico Mensual del Sector Palmero. Abril 2011. Publicación de la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma. Unidad de Planeación y Desarrollo Sectorial.

Flotats, X. Solé, F. 2008. Situación actual del tratamiento de residuos orgánicos: aspectos científicos, económicos y legislativos. En: Moreno, J. Moral, R (Edit. Cient.). 2008. Compostaje. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa. 570 p.

Galindo, T. Informe visita a plantación. Documento interno de trabajo de Cenipalma, Colombia (Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite). Informe de visita a plantación. Enero de 2011.

Garzón, E.M. Mosquera, M. Bernal, P. Montiel, L. 2008. Documento interno de trabajo de Cenipalma, Colombia (Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite). Informe de visita a plantación. Julio de 2008.

Goenadi, D.H., Away, Y., Sukin, Y., Yusuf, H.H., Gunawan Aritonang, P. 1998. Pilot-scale composting of empty fruit bunches of oil palm using lignocellulosic-decomposing bioactivator. International Oil Palm Conference, Nusa Dua, Bali, September 23-25, 1998, 494-499.

Gómez, H. Comunicación personal. Compostar Ltda. Madrid, Cundinamarca. 28 de enero de 2011.

Hassan, A. Z. Kim, O. Abdullah, Z. Rahman, M.S. 2009. The effect of EFB-compost application on oil palm under terrace planting. Proceedings of Agriculture, Biotechnology & Sustainability Conference. PIPOC 2009 International Palm Oil Congress Palm Oil – Balancing Ecologics with Economics. Volume 2: Poster Papers, AP17. 603 p.

Isam, H. De Bertoldi, M. 2007. Microbiology of the composting process. En Diaz, L.F. de Bertoldi, M. Bidlingmaier, W. Compost Science and Technology, 8. Publicado por Elsevier. 380 pp.

J, P. Calimán, B. Martha. Salétes, S. 2001. Dynamics of nutrient release from empty fruit bunches in field conditions and soil characteristic changes. Proceedings of the 2001 PIPOC International Palm Oil Congress (agriculture).

Laiton P., Philibert. 2010. Trabajo con prensa de racimos vacíos. Palmas (Colombia) v.31, No. 4. P 45-52.

Leal, Z. Comunicación personal. Agraris. Villanueva, Casanare, 24 de marzo de 2011.

León, O. 2011. Comunicación personal a través de llamado telefónico a Cormacarena, Villavicencio. 3 de mayo de 2011.

Ling-Hoak, O. Keong-Hoe, L. Khoon-San, C. 2007. Conversión de efluentes y RV en fertilizante orgánico con cero desperdicios. Revista Palmas. Vol. 28. Tomo 2. 180-190 p.

Miranda, H. Schuchardt, F. Wulfert, K. Tjahjono, D. 2007. Manejo sostenible de efluentes y RV en plantas de beneficio de palma de aceite mediante un nuevo proceso. Revista Palmas. Vol. 28 Ed. Especial Tomo II. p. 191-198.

Moreno, J. Mormeneo, S. 2008. Microbiología y bioquímica del proceso de compostaje. En: Moreno, J. Moral, R. Editorial Científica. 2008. Compostaje. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa. 570 p.

Paul, E., Clark, F., 1996, Soil microbiology and biochemistry, Academic Press, 2 Ed, San Diego.

Peña, A. Rivera, G. 1996. Aislamiento y caracterización de cepas microbianas para un proceso de compostaje de desechos de la palma de aceite. Tesis para obtener el título de Bacterióloga. Facultad de Ciencias Básicas. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. 80 p.

Pinzón, R. Comunicación personal. Plantación palmera. San Martín, Meta. 4 de enero de 2011.

Salétes, S. Siregar, S. Calimán, J.P. Liwang, T. 2004. Ligno-Cellulose Composting: Case study on monitoring oil palm residuals. Compost Science & Utilization Vol. 12. N° 4. 372-382.

Schuchardt F, Darnoko D, Guritno P. 2002. Composting of empty oil palm fruit bunch (EFB) with simultaneous evaporation of oil mill waste water (POME). Enhancing oil palm industry development through environmentally friendly technology. En: Proceedings of Chemistry and Technology Conference, Nusa Dua Bali, Indonesia, July 8–12, 2002, pp. 235–243.

Schuchardt, F., Endang Susilawati and Purboyo Guritno. 1998. Influence of C/N ratio and inoculum upon rotting characteristics of oil palm empty fruit bunch. International Oil Palm Conference, Nusa Dua, Bali: 501-510.

Segura, M. Ramírez, C. Chinchilla, C. Torres, R. 2000. Uso de dos bioensayos para estimar el efecto residual y el valor nutricional de un composte hecho de la fibra de RV de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*, Jacq). ASD Oil Palm Papers, N° 22, 12-16. 2000.

Singh, R. P. Hakimi Ibrahim, M. Esa, N. Iliyana, M.S. 2010. Composting of waste from palm oil mill: a sustainable waste management practice. Rev Environ Sci Biotechnol (2010) 9:331–344.

Siregar, F.A. Salétes, S. Calimán, J.P. Liwang, T. 2002. Empty fruit bunch compost: Processing and Utilities. En Memorias: International Oil Palm Conference. Nusa Dua, Bali, Indonesia. Julio 8-12, 2002.

Stichnothe, H. Schuchardt, F. 2010. Comparison of different treatment options for palm oil production waste on a life cycle basis. Int J Life Cycle Assess 15: 907–915.

Sunita, S. Varghese, T. 1999. Composting of oil palm wastes for efficient recycling of nutrients in palm plantation. The Planter, Kuala Lumpur, 75 (885): 677-681 (1999).

Teo, L., Muhammad, S. Ong, K. P. Zainuriah, A. 2009. Alternative oil palm fertilizer sources and management. Proceedings of Agriculture, Biotechnology & Sustainability Conference. PIPOC 2009 International Palm Oil Congress Palm Oil – Balancing Ecologics with Economics. Volume 3: More Poster Papers & Inserts. L1 9 p.

Thambirajah, J.J. Zulkali, M.D. Hashim, M.A. 1995. Microbiological and biochemical changes during the composting of oil palm empty-fruit bunches. Effect of nitrogen supplementation on the substrate. *Bioresource Technology* 52 (1995) 133-144.

Torres, R. Acosta, A. Chinchilla, C. 2004. Proyecto comercial de compostaje de los desechos agroindustriales de la palma aceitera. Palmas – Vol. 25 N° Especial, Tomo II, 2004.

Yahya, A. Puay, C.S., Abiodun, T.I., Suryanto, H. 2010. Effect of adding palm oil mill decanter cake slurry with regular turning operation on the composting process and quality of compost from oil palm empty fruit bunches. Bioresource Technology, 101: 22. 8736-8741.