



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación de la calidad del compost producido a partir de la molienda de caña de azúcar en la compañía Riopaila Castilla, Valle del Cauca, Colombia

Alexander Bohórquez Páez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Escuela de Posgrado
Palmira, Colombia

2013

Evaluación de la calidad del compost producido a partir de la molienda de caña de azúcar en la compañía Riopaila Castilla, Valle del Cauca, Colombia

Alexander Bohórquez Páez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Agrarias

Director:

Ph.D. Juan Carlos Menjivar F.

Línea de Investigación:

Suelos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Escuela de Posgrado
Palmira, Colombia

2013

Dedicatoria

Al culminar una etapa más de mí vida dedico esta tesis, especialmente a Dios, a mis padres, a mi esposa y mi hijo gracias por todo su amor y paciencia al compartir el tiempo con el trabajo y el estudio.

A mis hermanos por su apoyo sincero y desinteresado

Agradecimientos

Mi más sincera gratitud a las siguientes personas que colaboraron de una u otra forma en la elaboración de este trabajo. A:

A Riopaila Castilla por su apoyo económico y espacio de tiempo para estudiar.

Al profesor Juan Carlos Menjivar por ser el guía y amigo en el crecimiento académico e intelectual.

A los jurados Dra. Sara Mejía y el Dr. Jairo Gómez, por compartir sus conocimientos y experiencia.

A mi familia por la paciencia al compartir el tiempo con el trabajo y el estudio.

A la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira por el aporte en mi formación como profesional y persona.

Resumen

En Colombia, el valle geográfico del Río Cauca, con el departamento del Valle del Cauca a la cabeza, es pionero en la producción de caña de azúcar para la producción de azúcar y recientemente para la producción de alcohol carburante. De acuerdo a Asocaña, en esta zona geográfica se tienen sembradas cerca de 223.905 has. de caña, que abastecen a los 13 ingenios de la zona.

Solamente en el Ingenio Riopaila-Castilla para el año 2011, las plantas de producción de azúcar y alcohol carburante produjeron Vinazas, 211.648 Ton. de Cachaza y 1'056.618 Ton. de Bagazo, según su último informe de gestión. Estos subproductos de la actividad productiva se han venido manejando de una manera ambientalmente amigable por medios de procesos de bioestabilización o compostaje en las dos plantas del ingenio.

Este trabajo evaluó el estado actual del proceso de compostaje que se viene realizando en estas plantas, con miras a determinar que parámetros eran susceptibles de mejoramiento para optimizar el proceso, seleccionar las mezclas de subproductos más eficientes y sobre todo, mejorar la calidad del compost producido para asegurar que se brindara un acondicionador de suelos con los mayores contenidos de nutrientes, para ser utilizados en las labores agronómicas del cultivo de caña.

Para esto, se diseñó un ensayo en donde se evaluaron diferentes mezclas de estos tres subproductos: Cachaza, Bagazo y Vinaza. Los tratamientos fueron: 100CZV; la totalidad del material compostado correspondió a cachaza. 75CZ25BGV; 75% del material correspondió a la cachaza y el restante 25% correspondió al bagazo. 50CZ50BGV; 50% del material compostado fue cachaza y 50% correspondió al bagazo. 25CZ75BGV; 25%

del material compostado correspondió la cachaza y el restante 75% correspondió a bagazo. Y 100BGV; la totalidad del material compostado fue bagazo de caña. A todos los tratamientos se le adiciono 2 m³ vinaza.

Se evaluaron las variables relación Carbono–Nitrógeno C/N, pH de la pasta saturada, conductividad eléctrica CE, humedad, porcentaje de cenizas, materia orgánica y retención de humedad, contenidos de Carbón orgánico oxidable total, Nitrógeno total, Fósforo, Calcio, Magnesio, Potasio, Hierro, Cobre, Manganeso, Zinc, en diferentes épocas de muestreo.

Los resultados obtenidos mostraron que la variable relación C/N inicial de las mezclas juega un papel fundamental en las relaciones C/N del compost terminado y en su calidad. De igual modo, se determinó que el tratamiento 50CZ50BGV fue el que presentó los mejores contenidos nutricionales y que el tiempo de compostaje que asegura una adecuada maduración y una máxima expresión de los contenidos de nutrientes en el compost terminado, es de mínimo 90 días. La variable más adecuada para utilizar como indicador de un óptimo proceso de compostaje de estos subproductos es la CE.

Palabras clave: Compostaje, Relación C/N, Cachaza, Bagazo, Vinaza, CE.

Abstract

This study evaluated the current state of the composting process being done in RioPaila-Castilla factory, in order to determine which parameters were susceptible to improvement to optimize the process, selecting the most efficient mix of products and above all, improve the quality of compost produced to ensure that provided by a soil conditioner to larger contents of nutrients, to be used in agricultural tasks in sugar cane crops. For this assay was designed in which various mixtures were evaluated three products: Cachaza, bagasse and vinasse.

The treatments were: 100CZV, the entire composted material corresponded to Cachaza. 75CZ25BGV, 75% of the material corresponded to the cachaza and the remaining 25% were in the bagasse. 50CZ50BGV, 50% composted material was cachaza. 25CZ75BGV, 25% composted material corresponded cachaza and the remaining 75% came from bagasse. And 100BGV, the whole was composted material bagasse. All treatments were added 2 m³ of vinasse.

Variables were evaluated Carbon-Nitrogen ratio C/N, saturated paste pH, electrical conductivity EC, moisture, ash percentage, organic matter and moisture retention, total oxidizable organic carbon, total Nitrogen, Phosphorus, Calcium, Magnesium, Potassium, Iron, Copper, Manganese, Zinc, sampling at different times.

The results showed that the variable C/N ratio initial blends plays a major role in the C/N ratios and finished compost quality. Similarly, it was determined that treatment was 50CZ50BGV has the better nutritional content and composting time ensuring an adequate maturation and ultimate expression of the nutrient contents in the finished compost is at least 90 days.

The variable most suitable for use as an indicator of optimum composting process of these byproducts is the CE.

Keywords: Composting, C/N ratio, Cachaza, bagasse, vinasse, CE

.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XII
Introducción	1
1. Marco Teórico	5
1.1 El compostaje como proceso de estabilización de residuos sólidos.....	5
1.1.1 Definición	5
1.1.2 Antecedentes	5
1.1.3 Principales Sistemas.....	7
1.2 Parámetros determinantes en el proceso de compostaje.....	17
1.2.1 Relación Carbono-Nitrógeno (C/N).....	17
1.2.2 Temperatura	19
1.2.3 Humedad	22
1.2.4 Condiciones aeróbicas o saturación de oxígeno	23
1.2.5 pH	24
1.2.6 Altura de la pila	25
1.2.7 Volumen de la pila.....	27
1.2.8 Tiempo de maduración.....	28
1.2.9 Tamaño de la partícula.....	29
1.3 Parámetros de calidad evaluados en el compost como acondicionador de suelos30	30
1.4 La microbiología del compostaje.....	35
1.5 Beneficios de la utilización del compost y su uso en la industria azucarera ...	40
1.5.1 Beneficios de la aplicación de compost al suelo.....	40
1.5.2 Utilización del compost y el compostaje en la industria azucarera.....	43
2. Materiales y Métodos	51
2.1 Localización geográfica del ensayo	51
2.2 Diseño experimental	51
2.2.1 Descripción de los tratamientos	51
2.2.2 Descripción de las unidades experimentadas	52
2.2.3 Variables de respuesta evaluadas.....	53
2.2.4 Análisis estadístico de la información.....	53
2.3 Métodos de muestreo y técnicas de laboratorio utilizadas en la determinación de las variables de respuesta	54

2.3.1	Métodos de muestreo de subproductos y compost	54
2.3.2	Métodos y técnicas de laboratorio utilizadas en la determinación de las variables55	
2.4	Conducción del experimento	60
3.	Resultados	61
3.1	Caracterización química de los subproductos utilizados en el ensayo	61
3.1.1	Cachaza	61
3.1.2	Bagazo de caña.....	62
3.1.3	Vinaza	63
3.2	Determinación de la relación C/N óptima para el proceso de compostaje	65
3.3	Evaluación de variables en los diferentes estados de maduración del compost70	
3.3.1	De acuerdo a los tratamientos	70
3.3.2	De acuerdo con las épocas de muestreo	72
3.4	Verificación de calidad del producto final de acuerdo a la Norma Icontec.....	79
3.5	Análisis de correlaciones.....	80
4.	Discusión.....	83
5.	Conclusiones	87
A.	Anexo: Datos variables utilizadas en correlaciones de Pearson.	88
B.	Anexo: Análisis de varianza de las variables evaluadas	89
	Bibliografía	95

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Pila aireada pasivamente.....	8
Figura 2. Pila estática con aireación pasiva	9
Figura 3. Pila estática con aireación forzada	10
Figura 4. Pilas con volteo en Planta Ingenio Riopaila	11
Figura 5. Sistema de compostaje tipo silo.....	14
Figura 6. Sistemas de compostaje tipo cajón.....	15
Figura 7. Sistema estático de cama rectangular	16
Figura 8. Sistema dinámico de cilindro rotativo.....	16
Figura 9. Efecto de la relación C/N sobre la velocidad del compostaje	18
Figura 10. Rangos de temperatura de bacterias mesofílicas y termofílicas.....	21
Figura 11. Variaciones en el pH durante el primer mes de compostaje	24
Figura 12. Altura máxima pilas con volteo	27
Figura 13. Efecto del tamaño de la partícula sobre el proceso de compostaje.....	30
Figura 14. Distribución espacial de las pilas en el lote del ensayo	52
Figura 15. Esquema del muestreo en la pila de compost.....	55
Figura 16. Relación C/N de acuerdo a tratamientos a los 90 días	66
Figura 17. Relación C/N de acuerdo a los tiempos de muestreo	68
Figura 18. Dinámica de algunas variables durante el ensayo	74

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Guía para determinar el tamaño de las pilas.....	25
Tabla 2. Parámetros guía para evaluar algunas calidades de compost en Estados Unidos.	34
Tabla 3. Requisitos específicos de calidad para el compost en Colombia	36
Tabla 4. Microorganismos comúnmente asociados con las pilas de compost.....	39
Tabla 5. Caracterización química de la cachaza.....	47
Tabla 6. Caracterización química del bagazo	48
Tabla 7. Caracterización química de vinazas con 10% y 15.6% de concentración	50
Tabla 8. Descripción de los tratamientos utilizados	52
Tabla 9. Métodos y técnicas de laboratorio utilizadas para la determinación de las variables evaluadas	57
Tabla 10. Caracterización química de la cachaza.....	61
Tabla 11. Caracterización química del bagazo	63
Tabla 12. Caracterización química vinaza	64
Tabla 13. Resumen diferencias estadísticas de las variables de respuesta entre tratamientos para todo el periodo del ensayo (medias entre paréntesis).....	71
Tabla 14. Resumen diferencias estadísticas de las variables de respuesta entre las épocas de muestreo (medias entre paréntesis).....	74
Tabla 15. Verificación calidad de los tratamientos de acuerdo a la norma ICONTEC 5167	80
Tabla 16. Matriz de correlaciones entre los parámetros de calidad evaluados en el ensayo	82
Tabla 17. Comparación calidad compost obtenido contra calidades comerciales de compost de subproductos de la industria azucarera	86

Introducción

El proceso de compostaje como una estrategia ambientalmente amigable para el aprovechamiento de residuos orgánicos es una tecnología que se ha venido estudiando desde hace mucho tiempo. Los primeros reportes sobre compostaje nos remontan a la India en los años 30, cuando se describe el sistema "Indore". Más tarde, en el año de 1940, Sir Albert Howard en el libro "*An agricultural testament*" recopila de manera sistemática las observaciones de su trabajo en la India y describe detalladamente algunas prácticas de protección del suelo como el uso de coberturas permanentes, las adiciones de materia orgánica al suelo y la producción de Compost utilizando el sistema Indore (Soto y Muschler, 2001).

El compostaje es un proceso aeróbico natural de descomposición controlada de diferentes tipos de materiales orgánicos realizado para obtener un compuesto final semejante al humus llamado Compost. Este proceso es básicamente el mismo mecanismo de descomposición natural que transcurre en los suelos, pero en el compostaje la descomposición se mejora y acelera por la mezcla de los subproductos o residuos orgánicos con otros ingredientes, realizada para optimizar el crecimiento microbial. En síntesis, como lo señala el Dr. Mark. S. Coyne del Colegio de Agricultura de la Universidad de Kentucky "el compostaje es una aceleración de los procesos naturales de mineralización de la materia orgánica".

La utilización del compostaje para el tratamiento de residuos y subproductos orgánicos de diverso origen y composición tiene muchas ventajas desde el punto de vista ambiental, pero quizás las más relevantes son: (1) Reducir grandes cantidades y volúmenes de residuos orgánicos de manera eficaz, los cuales manejados de otra forma requerirían grandes inversiones en tiempo e infraestructura, y (2) Generar, de manera simultánea, un producto final que puede ser utilizado como acondicionador orgánico natural de suelos en diferentes sistemas productivos agrícolas.

El compost como acondicionador orgánico natural puede mejorar a mediano y largo plazo las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos sobre los cuales se aplica. Entre las ventajas citadas se tienen el incremento de la porosidad, la disminución de la densidad aparente, la consolidación de la estructura y la consistencia, el incremento en la capacidad de intercambio catiónico, el aumento de la capacidad buffer, el incremento de algunos nutrientes esenciales y el aumento de la actividad biológica del suelo. (Coyne, 1999; Labrador, 2001; Ward, 2002; Brady and Weil, 2004 y FHJC, 2004).

En el país diferentes autores han abordado el proceso de compostaje desde diferentes escalas de los sistemas productivos, de esta forma se encuentran recomendaciones tanto para el compostaje de residuos de cosecha y residuos de poda en unidades productivas agropecuarias pequeñas y medianas, así como recomendaciones para el tratamiento industrial y comercial a gran escala de residuos orgánicos provenientes de plazas de mercado, subproductos de diferentes agroindustrias y estiércoles generados por empresas de producción avícola y bovina, entre otros.

De esta forma, FHJC (2004) recomienda el compostaje como el mejor método para aprovechar los residuos orgánicos y mejorar los suelos de las fincas pequeñas bajo el enfoque de agricultura orgánica. Blandón, Rodríguez y Dávila, (1998) por su parte, encontraron que las fincas cafeteras pequeñas pueden producir un compost de mejor calidad cuando compostan solamente la pulpa de café si adicionarle el mucilago. Del mismo modo, Estrada (2005) relaciona el compostaje como el tratamiento más adecuado para la gallinaza. También, con relación a la utilización de compost de residuos de agroindustria como acondicionador de suelos, Jaramillo (2012) evaluó agrónomicamente el efecto enmendante de dos tipos de compost de alperujo sobre suelos calizos de fertilidad orgánica baja en España.

Ubicándonos ya en la zona del Valle geográfico del río Cauca, en el contexto económico actual la agroindustria de la caña de azúcar (producción de azúcares, mieles y alcohol carburante) está generando subproductos orgánicos del proceso de molienda, en cantidades de importancia ambiental. Algunos ingenios ubicados en esta zona como el Ingenio Mayagüez, Riopaila-Castilla, Providencia e Incauca han encontrado en el

compostaje industrial de estos subproductos una solución a la generación de grandes cantidades de estos residuos (Salamanca, 2012).

Actualmente, toda la producción de la planta de compostaje del Ingenio Riopaila-Castilla se viene utilizando en campo dentro de las labores regulares de fertilización, con miras a realizar aportes nutricionales y a mejorar las características físicas y biológicas de los suelos. Sin embargo, este proceso de compostaje se viene realizando en esta planta de forma poco estandarizada sin tener en cuenta algunos parámetros básicos como diámetro de partícula y variabilidad temporal en la composición química de los subproductos, humedad, altura y tamaño de las pilas y relación Carbono/Nitrógeno óptima de las diferentes mezclas de subproductos. Del mismo modo, se tienen registros muy variables y poco precisos acerca de la composición química y los posibles aportes nutricionales del producto final debido a la alta variabilidad intrínseca del proceso y a las diferentes mezclas de subproductos ensayadas.

Por todo lo anteriormente relacionado, este trabajo de grado realizado con el patrocinio del Ingenio Riopaila-Castilla, tuvo como objetivo principal evaluar el proceso actual de compostaje realizado en la planta del ingenio para determinar que parámetros del proceso eran susceptibles de mejoramiento y de esta manera obtener un compost en el menor tiempo posible y con unas características físicas y químicas óptimas, de tal forma que pueda ser utilizado como acondicionador de suelos cumpliendo la norma NTC 5167 referente a este tipo de enmiendas de suelo.

Limitaciones de tiempo y presupuesto requeridos para este trabajo llevó a que este proyecto se concentrara en el proceso de elaboración y en la calidad y composición química del producto final. No fue un objetivo de este trabajo la evaluación agronómica en campo de la incorporación del compost producido en esta planta. Se recomiendan futuros estudios donde se evalúen los cambios a mediano y largo plazo en las propiedades físicas, los cambios en los contenidos nutricionales y la dinámica de las poblaciones microbianas, la biomasa microbiana y la tasa respiratoria de los suelos enmendados con este compost, entre otros indicadores. De igual modo, se recomiendan realizar estudios para evaluar el efecto de la aplicación de diferentes dosis de este compost sobre el rendimiento del cultivo de caña, tanto en toneladas de caña por hectárea como en rendimiento de azúcar por tonelada de caña.

Este trabajo se elaboró a partir de la hipótesis que la utilización de una adecuada relación Carbono/Nitrógeno C/N en la mezcla de subproductos utilizados para el proceso de compostaje (Cachaza, Bagazo y Vinaza) produce un compost de mejor calidad, en el menor tiempo posible y con los mejores contenidos nutricionales.

Objetivos

Objetivo General.

Evaluar la calidad del compost producido con subproductos de la molienda de Caña de azúcar *Saccharum officinarum* L. en el Ingenio Riopaila-Castilla S.A.

Objetivos Específicos

- Evaluar las concentraciones de nutrientes en diferentes épocas en el compost obtenido de las mezclas evaluadas.
- Determinar las correlaciones entre algunas variables químicas que definen la calidad del producto final, las diferentes mezclas de subproductos utilizadas y los tiempos de maduración del proceso de compostaje.

1.Marco Teórico

1.1 El compostaje como proceso de estabilización de residuos sólidos

1.1.1 Definición

Compostaje es la descomposición controlada o el proceso de pre tratamiento que convierte los residuos o subproductos orgánicos en materiales orgánicos biológicamente estables similares al humus que pueden ser utilizados como enmiendas para aplicar al suelo. La transformación de estos residuos ocurre al exterior del suelo por la mezcla, apilamiento u otra forma de almacenamiento de estos materiales bajo condiciones que promueven la descomposición aeróbica y la conservación de nutrientes. (Labrador, 2001; Cooperband, 2002 y Brady and Weil, 2004).

La descomposición de estos materiales es realizada por una mezcla de microorganismos, principalmente bacterias, hongos y actinomicetos o bacterias filamentosas. Estos microorganismos generalmente se encuentran en la superficie de las hojas, el pasto picado y la superficie de otros materiales y subproductos orgánicos y se desarrollan en un medioambiente húmedo, tibio y aeróbico. (Christian, Evanylo and Pease, 2009).

1.1.2 Antecedentes

El compostaje ha sido utilizado desde hace mucho tiempo en diferentes partes del mundo como un método para la estabilización de residuos orgánicos de diferente naturaleza. Los primeros reportes del sistema de compostaje tipo Indore utilizado en la India, los hace Sir Albert Howard en su libro "An agricultural testament". (Soto y Muschler, 2001).

En la actualidad, además de utilizarse como un mecanismo para el aprovechamiento de residuos orgánicos generados al interior de las unidades productivas agrícolas de todos los tamaños, ha probado ser también un excelente método para la reducción de diversos tipos de subproductos generados por diferentes fuentes o procesos industriales. De esta forma, algunos de los grandes centros urbanos tienen sus proyectos de compostaje de residuos sólidos domiciliarios; el NYC compost project realizado en el Jardín Botánico de NYC viene funcionando desde 1993. (NYC Department of Sanitation, 2012)

Ya en el ámbito nacional, en el municipio de Medellín para dar cumplimiento a los lineamientos establecidos dentro de su Plan de gestión integral de los residuos, se creó en el año 2006 el Centro de Acopio de San Antonio de Prado. En este centro se estabilizan los residuos por el método de compostaje. (Osorio, 2010).

En el valle de cauca por su parte, se conoce una experiencia exitosa en el manejo de los residuos generados por una plaza de mercado; la planta de compostaje de la Central de Abastecimientos del Valle del Cauca S.A. Esta planta maneja pilas estáticas aireadas de 16 toneladas de peso con ventilación forzada. (Cavasa, 2013).

Otras industrias, como las plantas productoras de aceite de palma africana *Elais guinensis* L., también han optado por el tratamiento de algunos de sus subproductos mediante el compostaje. Peláez y Restrepo (2004) relacionan la utilización de Raquis, Cuesco y Fibra de palma africana para la elaboración de compost que luego es utilizado en las labores agronómicas del cultivo.

Se tienen también referencias acerca de la utilización del compostaje para estabilizar residuos de difícil manejo como lo son los residuos de plantas de sacrificio de ganado. Hómez (1998) enumera algunas pautas para el compostaje de sangre, contenido ruminal, estiércol, uñas, cascos y restos de pelo provenientes de mataderos, de una manera eficiente e inocua.

En la actualidad, las tendencias políticas y ambientales mundiales que recalcan cada vez más el concepto de un desarrollo más sostenible en sus componentes social, económico y ambiental apuntan a minimizar la huella ecológica, disminuir las emisiones

contaminantes y reducir los residuos generados por los procesos productivos en los sitios de disposición final, y simultáneamente propenden por la implementación de opciones de aprovechamiento más limpias como lo es el compostaje.

Es así como la Comunidad Económica Europea dentro de sus directivas para el reciclado de residuos se planteó como meta que la “cantidad de residuos biodegradables destinados a vertederos debía reducirse al 75 % respecto a los niveles de 1995 y al 50 % antes de 2009”. (Comisión Europea, 2011).

Por su parte, en Estados Unidos, de acuerdo con la EPA (2010) para el año 2009 se tenían 12 plantas de compostaje municipales a lo largo de todo el país. No se incluyen las plantas de propiedad privada comercial. En total estas plantas municipales tenían la capacidad para compostar 1.100 toneladas por día de residuos sólidos urbanos.

En Colombia, se tiene una reglamentación vigente sobre la gestión integral de residuos sólidos, la Ley 142 de 1994 emanada por el Congreso de la Republica. Esta política establece una jerarquía para el manejo de residuos sólidos. Sin embargo, “en la práctica esta norma no se ha cumplido adecuadamente en cuanto al manejo de los sitios de disposición final”. (Aluna consultores, 2011). En el país siempre ha habido una problemática en la disposición final, ya que se ha optado por utilizar los botaderos a cielo abierto, siendo estos considerados una opción con grandes falencias sanitarias y técnicas.

1.1.3 Principales Sistemas

Los sistemas de compostaje pueden clasificarse principalmente de dos formas: abiertos o cerrados, cada uno de estos a su vez comprende diferentes formas. (Costa, 1991; USDA, 2000 y Labrador, 2001).

Sistemas Abiertos

Son los sistemas tradicionales, donde los sustratos o subproductos a compostar son expuestos al aire ya sea bajo libre exposición o bajo cubiertas. Entre estos tenemos:

- Pila aireada pasivamente.

Este método de pila de compostaje estático pasivo involucra la formación de una pila con la mezcla de materiales o subproductos iniciales a compostar. Figura 1.

Figura 1. Pila aireada pasivamente



Fuente: USDA, 2000.

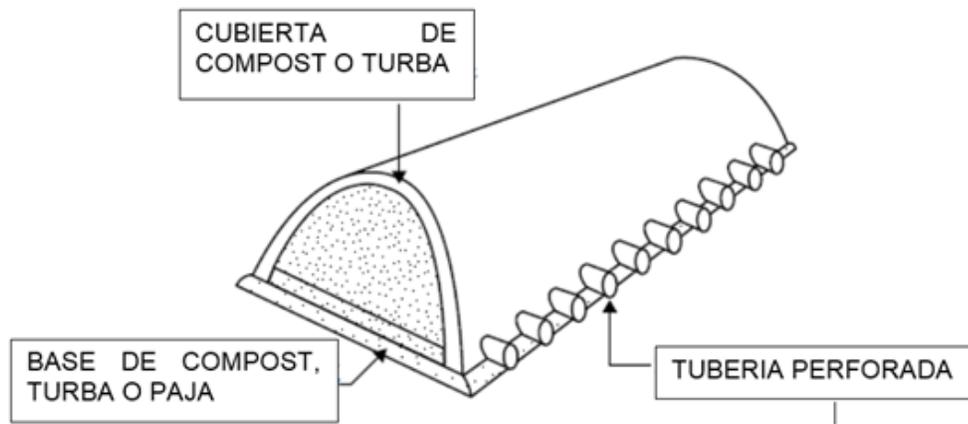
Esta pila puede ser volteada periódicamente al inicio del proceso para aumentar su porosidad. La aireación se logra debido al movimiento pasivo del aire a través de la pila. Por esto se requiere que la pila sea lo suficientemente pequeña para permitir el flujo pasivo del aire. Si la pila es muy grande, el aire no fluirá a través de ella y se generarán zonas anaeróbicas al interior de esta.

La limitante de este método es que se debe poner especial atención a la mezcla de los materiales iniciales. La mezcla debe ser capaz de mantener la estructura y porosidad necesaria para garantizar una buena aireación a lo largo de todo el proceso de compostaje. Una de las ventajas de este método es que requiere de mínimo trabajo y equipo.

- Pila estática con aireación pasiva.

Estas pilas estáticas de aireación pasiva no se voltean. La aireación de la pila es lograda únicamente con el movimiento pasivo del aire a través de tubería perforada instalada en la base o en la cama de la pila al momento del montaje. Figura 2.

Figura 2. Pila estática con aireación pasiva



Fuente: USDA, 2000.

La base o cama de la pila está compuesta principalmente de paja, compost o turba. La principal característica de esta cama es que debe ser porosa para que el aire que está entrando por las tuberías se distribuya finalmente a través de toda la pila.

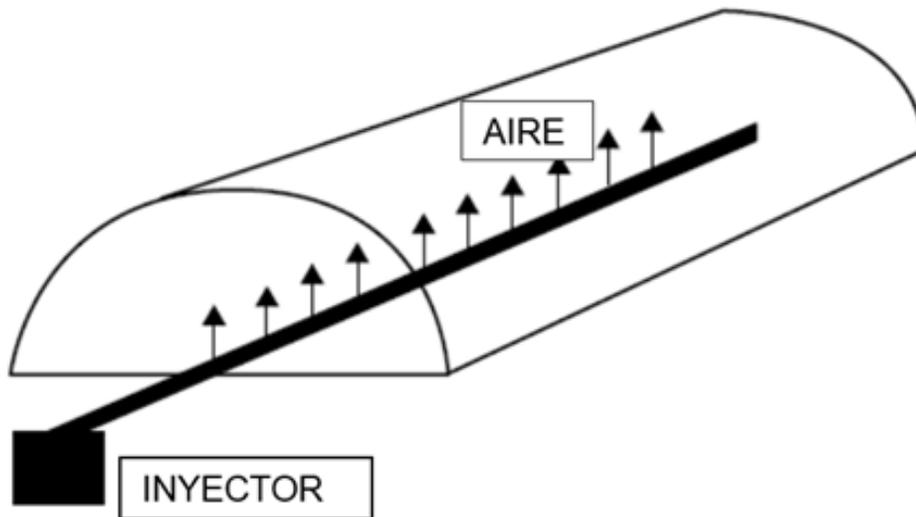
La principal diferencia entre estas pilas estáticas y las pilas con volteo es que estas llevan una cubierta o capa de compost terminado o turba en su parte superior. Esta capa sirve como un filtro que retiene los olores que pueda emitir la pila, también retiene la humedad, el amoníaco e impide la proliferación de moscas y otros vectores.

Una de los limitantes de esta pila es que su construcción inicial demanda considerable mano de obra. También requiere que la mezcla inicial sea cuidadosamente ajustada para garantizar la porosidad y tampoco puede ser tan altas como las pilas con volteo.

- Pila estática con aireación forzada.

Este sistema es una variación de la pila estática con aireación pasiva reseñada antes. La única diferencia con la anterior es que este sistema utiliza insufladores o ventiladores mecánicos para forzar el aire a través de las tuberías o canales. El aire puede ser succionado desde el interior de la pila o impulsado a través de las tuberías utilizando presión positiva. Figura 3.

Figura 3. Pila estática con aireación forzada



Fuente: USDA, 2000.

El uso de succión permite un mayor control de olores que la aireación con presión positiva. Generalmente en este caso se utiliza algún tipo de material filtrante que atrape los olores. La desventaja del uso de succión radica en que la cantidad de aire que se hace pasar a través de la pila es menor, comparada con la cantidad de aire que fluiría a través de la pila si el aire se insuflara.

Los inyectores de aires además de aportar Oxígeno a la pila también la refrigeran o enfrían. Estos pueden funcionar de forma continua o intermitentemente accionados por timers.

Una de las limitantes de este método, es que como en todas las pilas estáticas, la mezcla inicial de los materiales debe ser cuidadosa para garantizar una adecuada porosidad a través de todo el proceso de compostaje. La otra limitante es que su montaje requiere de cálculos adicionales: tamaño y número de inyectores, longitud y diámetro de las tuberías, tipo de tubería, etc.

Figura 4. Pilas con volteo en Planta Ingenio Riopaila



Según Ward (2002) estos “sistemas de compostaje fueron desarrollados para manejar la descomposición de grandes cantidades de materiales en una localización centralizada”.

El sistema de aireación de estas pilas es pasivo, tal como ocurre en las pilas de aireación pasiva ya referenciadas. La porosidad necesaria para una adecuada aireación pasiva es mantenida por los regulares volteos. Estos volteos también sirven para mezclar el material, liberar calor, vapor de agua y gases, así como sirven para acelerar el proceso de compostaje. Los volteos son más frecuentes durante las etapas iniciales cuando se presenta una mayor actividad microbiana y cuando la evolución de la temperatura es mayor. (USDA, 2000)

De acuerdo con Salamanca (2012), la mayoría de las plantas para el compostaje de subproductos de la industria azucarera en el país utilizan este sistema de compostaje. Estas plantas son de tipo invernadero, algunas a cielo abierto y otras con una cubierta de polietileno que protege a las pilas de las lluvias. La mayoría de estas plantas utilizan el volteo mecánico para facilitar la aireación y de esta forma garantizar un ambiente aeróbico para el proceso de descomposición. En estas plantas se realizan los volteos con la ayuda de máquinas volteadoras o mezcladoras.

Como todos los otros métodos, este método tiene tanto ventajas como desventajas. Según USDA (2000) y Ward (2002) algunas de las ventajas de este método son:

- Es altamente adaptable a las operaciones industriales. Ya hay disponible en el mercado equipos e instalaciones necesarias para el montaje de este tipo de composteras.
- La flexibilidad en los horarios de volteo permite ajustar las operaciones de acuerdo a la mano de obra, el material y los equipos disponibles.
- Como requiere de volteos periódicos, la estructura y la porosidad de la mezcla de subproductos no es tan crítica, por lo cual permite la elección de un gran número de materiales o subproductos a compostar.
- Se disminuye la necesidad de operaciones secundarias para estabilizar el compost.
- Se puede obtener la maduración completa del compost.
- Tiene la capacidad de manejar grandes volúmenes de materiales iniciales si se cuenta con suficiente espacio para el establecimiento de las pilas.
- Se incrementa la calidad del producto terminado, en comparación con una pila estática, debido a que los volteos permanentes contribuyen a un mejor secado y separación del material (tamaño de partícula más pequeña y textura más fina).

Y algunas de las desventajas mostradas por este sistema son:

- Los excesos de humedad en la pila pueden generar condiciones anaeróbicas que propicien la generación de olores ofensivos.

- La necesidad de volteos regulares, especialmente en las primeras etapas, hacen de este un método altamente demandante en mano de obra y trabajo.
- Requiere un poco más de manejo y cuidado que otros métodos porque los volteos deben ser lo suficientemente frecuentes para asegurar la adecuada porosidad y mantener las temperaturas termofílicas.
- Los olores ofensivos pueden ser un problema, especialmente después de voltear las pilas.
- Requiere de grandes cantidades de equipo y espacio disponible para montar las pilas.
- Los costos de mantenimiento de equipo y maquinaria pueden acumularse y ser mayores en comparación con otros métodos.

Sistemas cerrados o en compartimentos confinados

Según Ward (2002) estos sistemas son quizás los más utilizados para el tratamiento de desechos sólidos a nivel domiciliario y a pequeña y mediana escala.

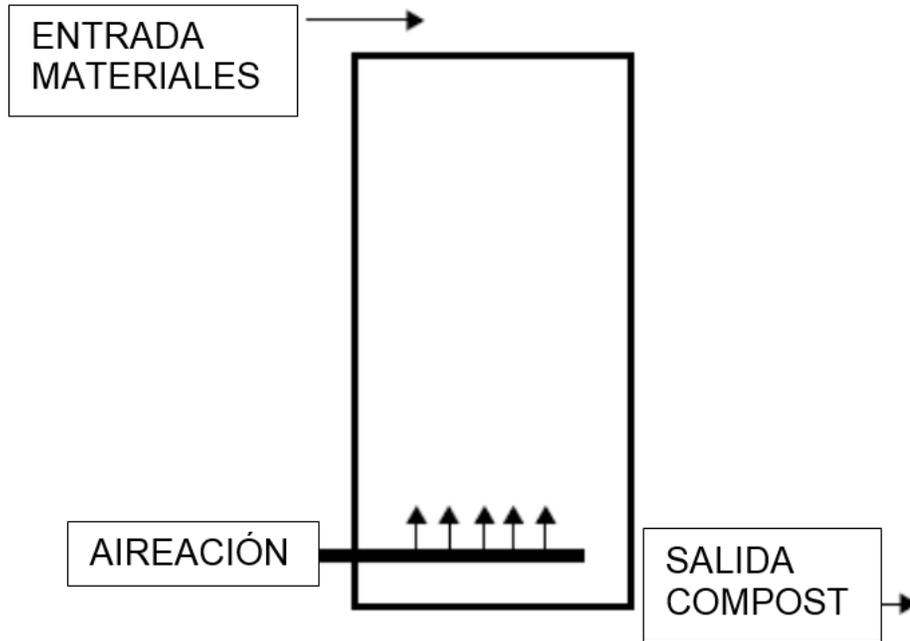
Estos sistemas pueden incluir algunos sistemas de compostaje como:

- Sistemas de disposición verticales

Los cuales a su vez pueden ser:

- **Continuos o de Tipo Silo.** Son sistemas con alturas de 4 a 10 m donde el material compostable se encuentra confinado en un único espacio o compartimento vertical. Figura 5.

El tiempo de compostaje es corto (dos semanas) pero requiere de un tiempo de curado adicional. En este sistema los materiales se cargan por la parte superior del silo y el compost se retira por la parte inferior con la ayuda de un eje helicoidal o sinfín.

Figura 5. Sistema de compostaje tipo silo

Fuente: USDA, 2000.

“En este sistema la aireación es proporcionada desde la base de silo y forzada a subir a través de todo el material, compostándose. También se controla temperatura en este sistema”. (USDA, 2000).

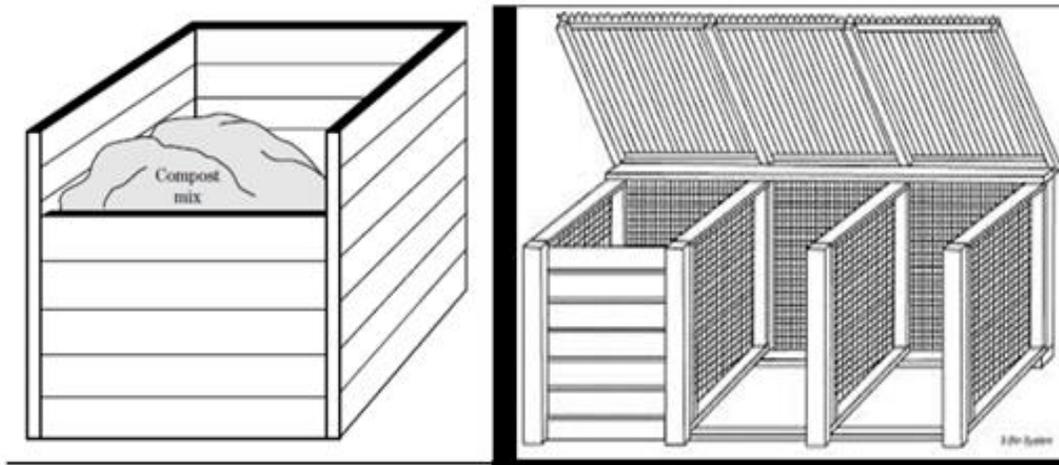
- Discontinuos o de Tipo Cajón.

En este método el compostaje se realiza en cajones, cajas o container que pueden ser hechos de madera, metal, plástico o cualquier otro material. Se puede utilizar un solo cajón o un conjunto de cajones en donde el compostaje se va volteando de un cajón a otro según su grado de madurez.

La altura de los cajones generalmente va de 2 a 3 m y los cajones o container pueden estar destapados o cubiertos. Figura 6.

Las mismas condiciones que para las pilas de aireación forzada aplican a este método. El material sin airear en los contenedores debe ser regularmente volteado para facilitar sus condiciones aeróbicas.

Figura 6. Sistemas de compostaje tipo cajón



Fuente: USDA, 2000 y NYC Department of Sanitation, 2012 respectivamente

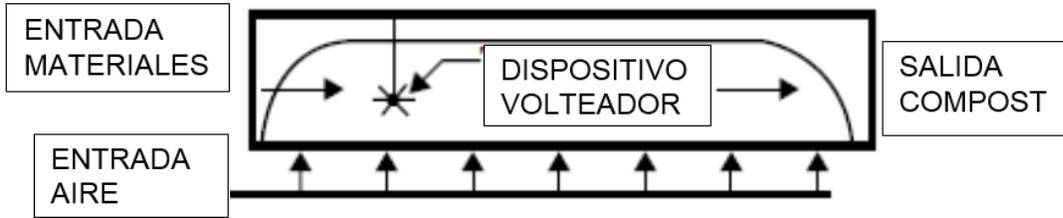
- Sistemas de disposición horizontales

Estos a su vez pueden ser:

- Estáticos o de Cama rectangular con volteador.

En este sistema los materiales a compostar se depositan sobre una superficie sólida estática y ancha (Cama) y un dispositivo volteador automático se desplaza a lo largo de la cama regularmente, realizando el volteo y movimiento de los materiales. Figura 7.

Figura 7. Sistema estático de cama rectangular



Fuente: USDA, 2000.

En algunos sistemas se utilizan también inyectores, para forzar aire al interior de las camas. La duración del proceso de compostaje es determinada por la longitud de la cama y la frecuencia de los volteos. Sin embargo, el tiempo de compostaje puede variar entre 15 y 30 días. El producto obtenido por este método requiere de un periodo extendido de curado posterior

- Dinámico o de cilindros rotativos.

Este sistema de cilindros rotativos es el método indicado cuando se requieran compostar pequeñas cantidades de material. Este método consiste de un cilindro o barril, de diferentes dimensiones, al interior del cual se colocan los residuos a compostar, los cuales son aireados o movidos cuando el barril gira sobre su eje central o sobre uno de sus lados. Figura 8.

Figura 8. Sistema dinámico de cilindro rotativo



Fuente: Orlando.ebayclassifieds.com, 2012 y Rynk and Colt, 1997, respectivamente.

Este sistema permite que mezclas adicionales de residuos sean cargadas en el tubo una vez se ha iniciado el proceso de compostaje. El cilindro debe ser girado con alguna periodicidad para garantizar la aireación de la mezcla y las condiciones aeróbicas del proceso de compostaje. El tamaño del tubo estará limitado por el peso del material que el operario pueda girar cuando el cilindro o tubo este lleno a su capacidad

Sistemas semi-cerrados

Otros autores hablan de un sistema que difiere un poco de los anteriormente mencionados. En este tipo de sistemas las operaciones que se realizan se encuentran dentro de un contenedor cubierto y cerrado que dispone de un sistema de extracción de la atmosfera interior a través de tuberías colocadas a lo largo del techo; bajo este sistema se logra un mejor control de las operaciones. (Gordillo y Chávez, 2010).

1.2 Parámetros determinantes en el proceso de compostaje

1.2.1 Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)

Algunos autores como Costa (1991); Rynk and Colt (1997); USDA (2000); Labrador (2001) y NYC Department of Sanitation (2012) concuerdan en que la relación C/N de los materiales utilizados, es el principal factor a tener cuenta al momento de realizar las mezclas de los diferentes subproductos o materiales a compostar. Por esto, la hipótesis de este trabajo se fundamentó en que una óptima relación C/N produce como resultado un compost de mejor calidad y características químicas.

La relación C/N de una mezcla de subproductos nos expresa la proporción entre los contenidos de Carbono y de Nitrógeno de estos materiales. Tanto el carbono como el nitrógeno son fundamentales (el carbono como fuente de energía y el nitrógeno como sustrato para la síntesis proteica) para los organismos involucrados en el proceso de compostaje, pero esta proporción debe estar en una cifra adecuada. (Coyne, 1999)

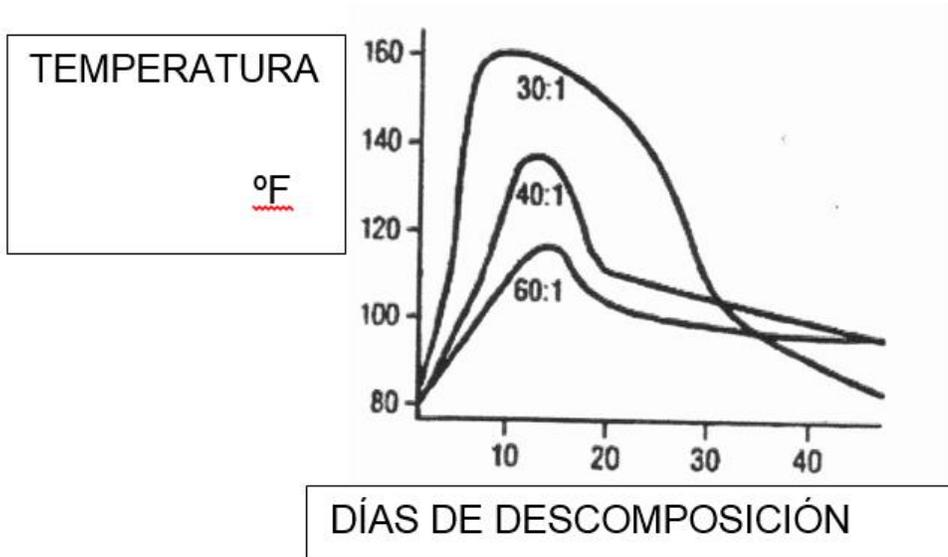
Labrador (2001) afirma que “La relación C/N es un indicador de la velocidad que va a llevar el proceso y del estado de evolución del humus formado es un índice de calidad de la materia orgánica”.

“Una relación C/N de 30:1 o de 40:1 es la apropiada para la mezcla inicial de materiales a compostar, aunque una relación de 20:1 también ha sido recomendada. Las relaciones muy altas pueden causar una inmovilización del nitrógeno mientras que las relaciones muy bajas, por debajo de 20:1, pueden causar pérdidas del nitrógeno por lixiviación o volatilización cuando todo el nitrógeno orgánico se mineraliza” (Coyne, 1999).

De igual modo Bass, Bilderback and Powell (1997) también afirman que las relaciones ideales al inicio del proceso de compostaje deben estar entre 20:1 y 30:1.

Por su parte, NYC Department of Sanitation (2012) afirman que la relación óptima para el proceso es aquella en donde se tengan 30 partes de Carbono por 1 de nitrógeno. Por otro lado, estos mismos autores también afirman que una adecuada relación C/N inicial permite que el proceso de compostaje se desarrolle de una forma más rápida. Figura 9.

Figura 9. Efecto de la relación C/N sobre la velocidad del compostaje



Fuente: NYC Department of Sanitation, 2012

Según Fogiel (2003) es mejor tener una mezcla inicial de materiales que esté por encima de la relación ideal (30:1 o 25:1) que tener una más baja de este valor. Entre más altos sean los contenidos de carbono en la mezcla de compost, más nitrógeno se conservará y menos probabilidad habrá de que en el proceso se generen condiciones anaeróbicas que puedan generar olores ofensivos debido a la volatilización del nitrógeno en forma de amoníaco.

Dependiendo de la naturaleza de los materiales se tienen unos contenidos de carbono y nitrógeno diferentes. Los residuos de origen vegetal, se caracterizan por presentar generalmente unas relaciones C/N elevadas, contienen más polisacáridos estructurales ricos en Carbono que en Nitrógeno. Aunque se sabe, que las plantas y el material vegetal contiene más nitrógeno en sus estados juveniles y menos en su época de madurez. Los residuos de origen animal en cambio, presentan por lo general una baja relación C/N; son muy ricos en compuestos nitrogenados y pobres en carbono. (Moreno y Moral, 2007).

Por esto, para tratar de lograr las relaciones C/N más adecuadas Brady and Weil (2004) recomiendan compostar simultáneamente materiales con una baja relación C/N (como estiércoles bovinos y lodos de aguas residuales) con materiales con una relación C/N alta (como aserrín, viruta de madera, hojas caídas, residuos de poda y residuos sólidos domiciliarios). De esta forma, la mezcla proporciona suficiente carbono para que los microorganismos inmovilicen los excesos de nitrógeno y minimicen cualquier lixiviación peligrosa de nitratos proveniente de los materiales con baja relación C/N.

1.2.2 Temperatura

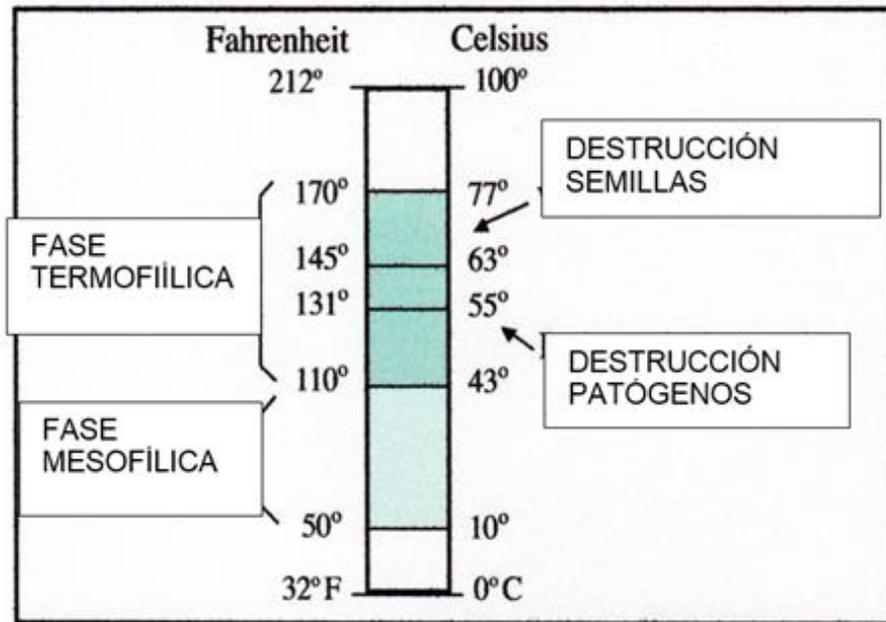
De acuerdo con Fogiel (2003) la temperatura es la forma más conveniente y significativa de monitorear el progreso de una pila de compost. Una mezcla de residuos compostandose que exceda los 71 °C debe voltearse para liberar calor. Si bien se necesita que la pila alcance temperaturas por encima de los 60°C para garantizar la muerte de muchos microorganismos patógenos y semillas de malezas, por encima de los 71 °C el calor también comienza a matar a los microorganismos encargados de la descomposición de los materiales.

La temperatura es un indicador de la actividad microbial. El calor de la pila es producido por la oxidación aeróbica de los subproductos por parte de la comunidad microbiana asociada al proceso. Cuando estos respiran la temperatura en la pila de compost se incrementa. Entre mayor sea la diversidad biológica de los materiales, más rápido será el aumento de la temperatura en el compost. (Coyne, 1999).

Hay diversos grupos de microorganismos específicos asociados a diferentes fases mesofílicas y termofílicas del proceso de compostaje. La sucesión de estos microorganismos se discutirá más adelante en el acápite de Microbiología del compostaje.

Aunque en un principio se podría esperar que la temperatura de la pila no supere el rango de 40 a 60°C, óptimo biológico de los microorganismos termófilos, en la práctica se hace necesario que se alcancen y se sostengan temperaturas más elevadas que estas con el fin de eliminar parásitos y microorganismos patógenos. (Solans, Alonso y Gadea, 2008).

Al respecto Christian, Evanylo and Pease (2009) afirman que las semillas de malezas, los huevos de insectos y larvas y los potenciales microorganismos patógenos son destruidos cuando las temperaturas permanecen o se sostienen en el rango superior de la etapa termofílica (43 a 71 °C) por varios días. Figura 10.

Figura 10. Rangos de temperatura de bacterias mesofílicas y termofílicas

Fuente: Christian, Evanylo and Pease, 2009

Anotando los registros diarios de temperatura, se puede obtener un patrón normal del desarrollo de la temperatura en la pila. Desviaciones en este patrón normal de incrementos de la temperatura pueden indicar una disminución o un cambio inesperado en la actividad microbiana. La temperatura debe empezar a incrementarse sostenidamente a medida que las poblaciones microbianas empiezan a desarrollarse. Si esta no empieza a incrementarse en los primeros días después de montada la pila, se deben hacer cambios o ajustes en la mezcla de los materiales. (USDA, 2000).

La presencia de un patrón normal de incremento de temperatura a medida que el proceso de degradación va transcurriendo adecuadamente es un buen indicador de una acertada mezcla y de una buena relación C/N en los materiales, como ya se discutió antes. Figura 9.

1.2.3 Humedad

Autores como Costa (1991); Moon (1997); Rynk and Colt (1997); USDA (2000); Labrador (2001); Solans, Alonso y Gadea (2008) y Christian, Evanylo and Pease (2009) concuerdan en que la humedad óptima de la mezcla de materiales a compostar al inicio del proceso debe estar entre un 50 y un 60%.

“Teóricamente, una descomposición aeróbica puede realizarse entre unos valores de humedad del 30-70%, siempre que se pueda asegurar una buena aireación, que dependerá tanto del método empleado para ello como de la porosidad del residuo a compostar. En la práctica, se debe evitar una humedad superior al 60% porque el agua desplazaría el aire del espacio entre las partículas del residuo y el proceso viraría hacia reacciones anaerobias. Por otra parte, si la humedad baja del 40%, disminuye la actividad de los microorganismos y el proceso se retrasa. Por ello un intervalo entre el 40-60% es el adecuado para la mayoría de residuos a compostar.” (Solans, Alonso y Gadea, 2008).

Aunque la humedad garantiza la supervivencia de los microorganismos (pues les aporta el agua necesaria para sus procesos metabólicos), no es una condición deseable que las pilas estén excesivamente húmedas. Demasiada agua desplaza el aire de los espacios porosos y genera condiciones indeseables de anaerobiosis (ausencia de oxígeno) en la pila. Si el material compostándose está demasiado húmedo, la mezcla mecánica y la aireación pueden facilitar el secado. De igual forma, materiales absorbentes secos y porosos pueden ser adicionados a la pila (Rynk and Colt, 1997).

Según Christian, Evanylo and Pease (2009) una prueba rápida para determinar si el contenido de humedad de la pila es el apropiado, consiste en tomar una manotada representativa del material y apretarlo. Si una o dos gotas de agua pueden ser exprimidas del material sin dificultad, la pila está en buenas condiciones de humedad. Sin embargo, en plantas grandes e industriales un Higrómetro puede ser usado para mediciones más precisas de los contenidos de humedad de la pila.

1.2.4 Condiciones aeróbicas o saturación de oxígeno

Como ya lo referenció antes Rynk and Colt, 1997 el contenido de humedad de la pila está directamente relacionado con las condiciones aeróbicas y la saturación de oxígeno de la pila.

El oxígeno es esencial para el metabolismo y respiración de los microorganismos descomponedores aeróbicos que llevan a cabo el proceso de compostaje. Los microorganismos aeróbicos utilizan el oxígeno para oxidar (quemar o metabolizar) la materia orgánica y obtener de esta forma energía y alimento. En una pila demasiado humedad el oxígeno (el cual difunde ciento de veces más rápido a través del aire que a través del agua) probablemente quedará atrapado entre los poros de la pila taponados o llenos con agua. Cuando el suministro de oxígeno se disminuye, los organismos aeróbicos no pueden generar la energía que necesitan para sobrevivir y el proceso de compostaje se torna anaeróbico. (NYC Department of Sanitation, 2012).

Al respecto Solans, Alonso y Gadea (2008) afirman que si el compostaje se torna anaeróbico se disminuirá el rendimiento y se producirían olores ofensivos producto de la fermentación. Para conseguir una buena distribución del oxígeno en toda la masa se hace necesaria la adición de un material de soporte (triturado de poda o madera) que proporcione estructura y porosidad al residuo a compostar o utilizar algún otro sistema de aireación.

Con respecto a la cantidad de oxígeno necesaria para un adecuado compostaje aeróbico, se encuentran diferentes cifras relacionadas por algunos autores. Según Moon (1997) una concentración de oxígeno de al menos 5% en volumen en la mezcla de materiales a compostar, es generalmente requerida para asegurar unas condiciones aeróbicas continuas del proceso de compostaje. USDA (2000) también asegura que una saturación del 5% es la concentración mínima de oxígeno requerida para mantener las condiciones aeróbicas en la pila. Por su parte, Labrador (2001) asegura que una saturación de oxígeno menor al 20% provoca condiciones anaeróbicas en el compostaje y se generan H₂S y otros productos intermedios Fitotóxicos. Para esta autora, la máxima actividad microbiana se presenta cuando las pilas tienen saturaciones de oxígeno comprendidas entre el 28 y el 55%.

1.2.5 pH

El PH de la mezcla de materiales a utilizar en el proceso de compostaje no es un parámetro crítico en el proceso. (Christian, Evanylo and Pease, 2009)

Autores como Moon (1997); USDA (2000); Labrador (2001); Christian, Evanylo and Pease (2009) y NYC Department of Sanitation (2012) concuerdan en que durante el proceso de compostaje el pH generalmente varía entre los valores de 5.5 y 8.5. Figura 11.

Los niveles de pH varían debido a la composición de los materiales o subproductos utilizados en la mezcla original compostada y a la producción de varios productos e intermediarios a lo largo del proceso de compostaje. Los primeros días después del montaje de la pila (estado de descomposición microbiana activa) se caracterizan por un descenso brusco en el valor del pH hasta niveles de 4 o 5. Este descenso del pH puede ser causado por la producción de ácidos orgánicos en zonas aeróbicas de la pila o por la acumulación de ácidos orgánicos intermediarios provenientes de abundantes sustratos ricos en carbono. Las condiciones ácidas del medio generalmente disminuyen las poblaciones de microorganismos aeróbicos, especialmente las bacterias, y hace más lento el proceso de compostaje. (USDA, 2000).

Figura 11. Variaciones en el pH durante el primer mes de compostaje



Fuente: NYC Department of Sanitation, 2012

Sin embargo, el proceso de compostaje no se detendrá, porque las poblaciones de otros microorganismos, especialmente hongos, finalmente desarrollan rutas metabólicas que los hacen capaces de utilizar compuestos ácidos como sustrato. Cuando las poblaciones de estos microorganismos consumen los compuestos ácidos, el pH del medio o de la pila sube y se estabiliza nuevamente. (USDA, 2000).

Solans, Alonso y Gadea (2008) concuerdan que al inicio del compostaje se produce una acidificación de la pila pero luego, a lo largo del proceso, se produce una progresiva alcalinización.

En la mayoría de los casos, el pH no necesita ser ajustado debido a la alta capacidad buffer natural o propia de las pilas. Un adecuado proceso producirá al final un compost con pH cercano a la neutralidad (6.5 a 8.0) independiente del pH mostrado por la pila al inicio del proceso (Moon, 1997; USDA, 2000 y NYC Department of Sanitation, 2012).

1.2.6 Altura de la pila

De acuerdo con Cooperband (2002) la altura y el ancho ideal de una pila de compost dependen de la porosidad y el contenido de humedad de los subproductos a compostar, del método de compostaje y de los equipos específicos que se tengan disponibles, entre otros factores. Por ejemplo, una compostera húmeda y con materiales densos puede ser apilada tan alto como una pila hecha con materiales secos y ligeros, sin el riesgo de generar condiciones anaeróbicas al interior de las pilas. Tabla 1.

Tabla 1. Guía para determinar el tamaño de las pilas

Método de Compostaje	Alto (m)	Ancho (m)
Pila aireada pasivamente	1 – 1.8	3.6
Pila estática con aireación pasiva	1 – 1.8	3.0
Pilas con volteo		
Maquina volteadora halada por tractor	1.8 – 2.4	3.0
Maquina volteadora autopropulsada	1 – 2.7	2.7 - 6.0
Bucket loader o palas grúas	1.8 – 3.6	3.0 – 6.0
Pila estática con aireación forzada	1.8 – 3.6	3.0 – 6.0
Sistemas de disposición verticales discontinuos o tipo cajón	No aplica	No aplica

Fuente: Cooperband, 2002.

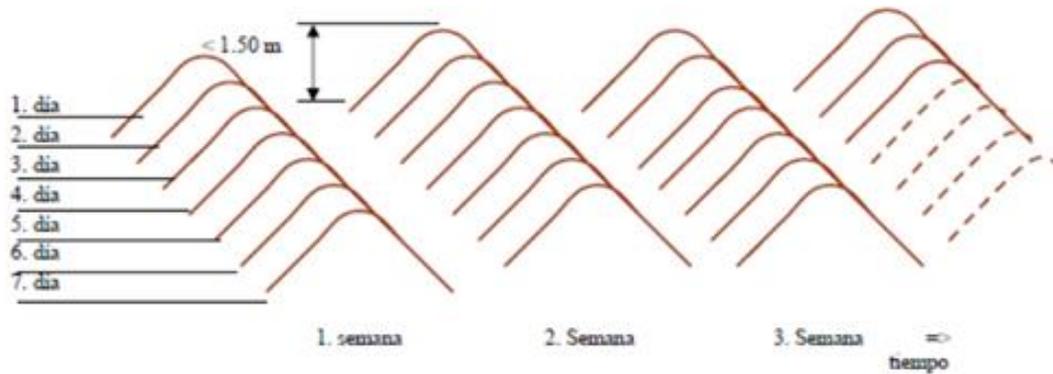
Las pilas pequeñas pueden ser capaces de mantener unas saturaciones internas de oxígeno más altas que las pilas grandes, pero las pilas grandes pueden retener mejor las altas temperaturas que las pilas pequeñas. (Cooperband, 2002).

Por su parte Labrador (2001) afirma que la altura es un factor importante al momento de montar la pila. Si se sobrepasa la altura y el tamaño recomendados, se podrían generar zonas anaeróbicas al interior de las pilas y los organismos no tendrán el oxígeno necesario para sobrevivir. De igual modo, si la pila es muy alta podría compactarse y generar mucha presión a su interior. Se deben apilar los materiales tratando de conseguir un adecuado equilibrio entre humedad y aireación.

De igual modo Christian, Evanylo and Pease (2009) afirman que el tamaño de la pila influye en su rendimiento. Para mantener las altas temperaturas necesarias para las pilas estas debe ser lo suficientemente grandes para permitir que el calor generado por los procesos metabólicos exceda a calor perdido a través de las superficies expuestas.

Por su parte USDA (2000) afirman algo similar a Cooperband (2002). Estos autores aseguran que “el tamaño, altura y longitud de la pila es variable y depende de diversos factores como recursos y equipo disponible, tipo de materiales, clima, instalaciones, mano de obra disponible, etc. Generalmente, la altura de las pilas puede ir desde 1.8 hasta 3.0 m, su ancho puede ir desde 4.5 hasta 6.0 m y su longitud puede ser tan larga como el constructor lo determine al momento del montaje”.

Sin embargo autores como Röben (2002) afirman que las pilas no deben ser más altas de 1.50 m pues la aireación natural se podría impedir y se podrían generar condiciones anaeróbicas. Pero también afirma este autor que para los sistemas de compostaje con aireación artificial, el límite puede ir desde 2.5 hasta 3.0 m. Figura 12.

Figura 12. Altura máxima pilas con volteo

Fuente: Röben, 2002

1.2.7 Volumen de la pila

Según NYC Department of Sanitation (2012) el volumen de la pila determina su capacidad para autoaislarse de las condiciones del lugar en el cual se está desarrollando el proceso de compostaje, por esto el volumen de las pilas afecta directamente su tasa de descomposición.

De acuerdo a Cooperband (2002) al seleccionar el volumen de las pilas a compostar se deben tener en cuenta los mismos actores involucrados en la selección de la altura de las pilas.

Para NYC Department of Sanitation (2012) el volumen o cantidad de material a compostar también es un factor importante a tener en cuenta al momento de montar las pilas. Según estos autores, pilas con dimensiones mayores a 1.5 m de ancho por 1.5 m de alto en cualquier longitud, pueden facilitar la generación de condiciones anaeróbicas, por lo cual tendrían que ser volteadas con mayor frecuencia o aireadas por medio de algún mecanismo de ventilación forzada. Como regla general, una pila de compost con unas dimensiones de 1 m de ancho, por 1 m alto y con 1 m de largo aproximadamente (1 m³), sería lo suficientemente pequeña para permitir la circulación fácil de aire a través de la

pila pero al mismo tiempo sería lo suficientemente pequeña para retener el calor y la humedad.

Sin embargo, en muchos de los procesos industriales de compostaje, como es el caso de los subproductos de la industria azucarera, por limitantes inherentes a la producción a gran escala, es imposible mantener pilas de este tamaño (1 m³) tan pequeño.

Como los volúmenes de material disminuyen con el progreso de la biodegradación, se pueden mezclar dos pilas para hacer una, con el fin de economizar el espacio. Si se mezclan estas pilas, es importante tener en cuenta que tengan la misma edad o grado de maduración, para no mezclar compost maduro con compost sin terminar. (Röben, 2002).

1.2.8 Tiempo de maduración

El tiempo gastado por el proceso de compostaje estará en función de todos los otros factores involucrados en el proceso y de la manipulación mecánica del compost. (Coyne, 1999).

Dependiendo de los materiales y las condiciones de la pila, se puede tomar varias semanas o más de un año realizar el proceso de compostaje. El compost generalmente puede estar listo para su uso luego de 3 o 6 meses, realizando volteos continuos, manteniendo una humedad adecuada y seleccionando una adecuada mezcla inicial de materiales a compostar. Con volteos diarios y materiales de rápida descomposición, el tiempo de compostaje puede reducirse a menos de un mes. Aquellos métodos que involucran poco o ningún volteo, usualmente requieren más de un año para que el compost esté en condiciones de ser usado. (Rynk and Colt, 1997).

De acuerdo con Moon (1997) el producto final del proceso debe haber sido expuesto a un periodo de compostaje de mínimo 42 días calendario y un periodo de curado de mínimo 30 días calendario antes de su distribución y aplicación. Esto, con miras a garantizar su total inocuidad al ser utilizado como acondicionador de suelos

Se conoce como curado a la maduración lenta del compost una vez la fase activa de compostaje ha concluido. En esta fase algunos compuestos volátiles logran escapar del compost, alguna descomposición adicional puede ocurrir y la humedad del material compostado disminuye. (Coyne, 1999).

1.2.9 Tamaño de la partícula

El proceso de compostaje es afectado por el tamaño de la partícula y la estructura de los materiales o subproductos a compostar. Partículas que son demasiado pequeñas se compactarán fuertemente y reducirán la porosidad en la pila. Sin embargo, partículas de tamaño más pequeño proporcionarían una mayor superficie expuesta que partículas de tamaño más grande, acelerando de esta forma el proceso de compostaje. Partículas muy friables pueden contribuir a la compactación de la pila. (Evanylo and Pease, 2009).

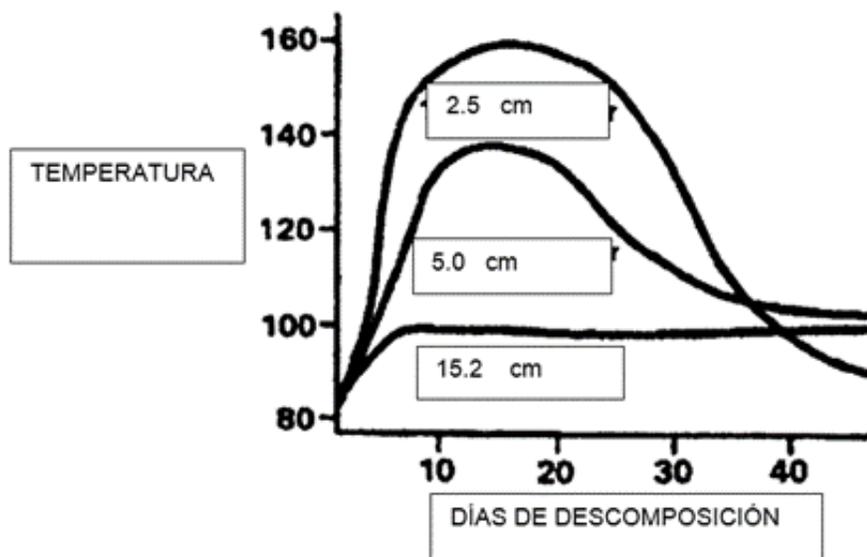
Según NYC *Department of Sanitation* (2012) la tasa de descomposición orgánica está directamente relacionada con la cantidad de área superficial accesible al ataque de los microorganismos. Esto es debido a que la mayoría de la actividad microbiana se presenta en la superficie de las partículas orgánicas, de esta forma, exponiendo un área superficial adicional se incrementa la cantidad de comida accesible a los microorganismos y la tasa de descomposición se aumenta.

Diferentes autores tienen opiniones divididas sobre el tamaño ideal de las partículas del sustrato a compostar. Según Labrador (2001) el tamaño ideal de la partícula de los materiales a compostar debe estar entre 1 y 5 cm de diámetro. A un menor tamaño se presenta una mayor facilidad para el ataque microbiano y por ende una mayor velocidad de degradación. Los residuos líquidos o semilíquidos deben mezclarse con materiales que les aporten mayor porosidad.

Para NYC *Department of Sanitation* (2012) el tamaño ideal de la partícula que más favorece la tasa de descomposición de los residuos es aquel diámetro de partícula cercano a 1 pulgada o sea 2.5 cm. Figura 13.

Por su parte, para Christian, Evanylo and Pease (2009) el tamaño de partícula ideal se encuentra entre 0.3 y 5 cm.

Figura 13. Efecto del tamaño de la partícula sobre el proceso de compostaje



Fuente: NYC Department of Sanitation, 2012.

1.3 Parámetros de calidad evaluados en el compost como acondicionador de suelos

La calidad del compost está determinada por sus características químicas, físicas y biológicas. Debido a que algunas de estas características son de algún modo subjetivas, no existe un método único estandarizado para determinar la calidad de un compost. (USDA, 2000).

Labrador (2001) afirma algo similar. Esta autora asegura que la calidad del compost es una expresión de sus características y que esta calidad “también refleja que hemos obtenido un producto orgánico estable, con un contenido elevado en sustancias húmicas,

equilibrado en nutrientes, óptimo en microorganismos útiles, que presenta una granulometría idónea, así como un olor agradable y una coloración oscura y que está libre de contaminantes y de sustancias Fitotóxicas, siendo su dinámica en el suelo semejante a la de las sustancias húmicas originales”.

Esta misma autora avanza un tanto más en el concepto al afirmar que no se debe confundir la calidad del compost con su madurez. “La madurez del compost significa que los nutrientes y la energía que contienen los materiales que han contribuido al producto final han sido combinados de forma adecuada, siguiendo un proceso correcto y formando como consecuencia una masa orgánica estable”. La calidad de un compost refleja su madurez, pero también refleja o incluye otras características físicas, químicas y biológicas restantes.

Por su parte, Cegarra (1994) y Mazzarino (2005) aseguran que la calidad del compost está determinada por los materiales originales (su grado de digestión, su contenido original de nutrientes, etc.) y por el sistema de compostaje utilizado. Los autores afirman que para evaluar la calidad del compost se proponen criterios basados en la cuantificación de algunos parámetros físicos, químicos y biológicos. Estos criterios definen las características benéficas del compost y permiten recomendar su aplicación para diferentes finalidades agrícolas.

Christian, Evanylo and Pease (2009) también aseguran que las características físicas, químicas y biológicas son utilizadas para evaluar la calidad de un compost terminado. El producto final debe estar libre de materiales extraños tales como pedazos de plástico y otras basuras. Este también debe estar estable y maduro y tener concentraciones de sales solubles y metales pesados por debajo de los límites permitidos.

Moon (1997) afirma que el grado requerido de calidad del compost depende del uso final que se le vaya a dar a este y de la sensibilidad de ese uso final.

Según USDA (2000) las características físicas utilizadas para determinar la calidad del compost son: tamaño de partícula, textura, apariencia y ausencia de residuos no compostables. Las características químicas son: contenido de materia orgánica, contenido de humedad, pH, contenido de metales pesados, contenidos de nutrientes y sales solubles. Las características biológicas son: la actividad microbiana y la inocuidad para producir enfermedades, relacionada con su grado de madurez.

Labrador (2001) además de las características anteriores, suma como características biológicas utilizadas para evaluar la calidad final de un compost, el análisis de grupos funcionales y los ensayos de respirometría.

Respecto a la evaluación de la calidad final del compost, Moon (1997) afirma que esta se puede medir utilizando varios criterios como contenido de humedad, contenidos de nutrientes, distribución del tamaño de la partícula, estabilidad, contenido de otros elementos (p.e. metales pesados), consistencia de producto a través del tiempo y poblaciones de microorganismos patógenos.

Christian, Evanylo and Pease (2009) aseguran que la evaluación de estas características (físicas, químicas y biológicas) del compost y la determinación de su calidad sirven para asegurarse que el compost no vaya ser usado inapropiadamente y para saber si la composición química de este debe ser ajustada o enmendada antes de su uso. Estos autores proporcionan algunas guías para evaluar algunas de las diferentes calidades de compost que se distribuyen en Estados Unidos. Tabla 2.

Es importante evaluar la calidad del compost cuando esta va a ser usado en cultivos de alto valor comercial, cultivos para la alimentación humana y cultivos sensibles, entre otros. La calidad de un compost es generalmente basada en la evaluación de parámetros como pH, contenido de sales solubles, estabilidad y la presencia de componentes indeseables como semillas de malezas, metales pesados, compuestos Fito tóxicos y

objetos extraños. Algunos criterios de calidad como el tamaño de la partícula final, puede no ser importante para ciertos usos dentro de la misma unidad productiva. “El suelo también amortigua muchos de los potenciales efectos adversos que puede causar un compost de baja calidad.” (Rynk, 1992).

Por su parte, USDA, 2000 afirman que las características químicas finales del compost son importantes de evaluar porque determinan su valor como abono o acondicionador de suelos, su potencial toxicidad para los cultivos y su facilidad de incorporación.

Si el compost va a ser rotulado y vendido como una enmienda de alta calidad, se debe establecer un laboratorio de control de calidad o contar con un laboratorio externo que evalúe las características del compost. Así mismo, se deben realizar análisis regulares de los contenidos de nutrientes del compost cuando este se va a usar como remediador para algún problema específico de nutrientes en el suelo. (Rynk, 1997).

La mayoría de métodos para la determinación de algunas de las características químicas están estandarizados pero cada laboratorio tiene sus propios protocolos para cada una de las corridas analíticas de los diferentes elementos analizados. En este ensayo se contó con la colaboración del Laboratorio de Suelos y Tejido foliar del Ingenio Riopaila-Castilla. En este laboratorio se determinaron variables como el pH de la pasta saturada, conductividad eléctrica, humedad, cenizas, materia orgánica, relación C/N, porcentaje de saturación y algunos nutrientes como carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, cobre y zinc. Los métodos para la determinación de cada una de estas variables se discutirán en el acápite Materiales y Métodos.

Tabla 2. Parámetros guía para evaluar algunas calidades de compost en Estados Unidos.

Características	Grado de calidad			
	Sustrato único	Sustrato para mezclas en viveros	Abono o sustituto suelo	Enmienda para suelos
Uso recomendado	Como sustrato o medio único de crecimiento sin ninguna mezcla adicional.	Sustrato o medio de crecimiento para mezclar con otros materiales, para bandejas y macetas en invernaderos.	Aplicación en pastizales y gramas establecidas.	Mejorador de suelos agrícolas, Establecimiento/mantenimiento de siembras en labores de paisajismo, Restauración de suelos degradados.
Color	Café oscuro a negro.	Café oscuro a negro.	Café oscuro a negro.	Café oscuro a negro.
Olor	Debe tener buen olor a tierra.	No debe tener olores cuestionables.	No debe tener olores cuestionables.	No debe tener olores cuestionables.
Tamaño de partícula	< 1.2 cm	< 1.2 cm	< 0.6 cm	< 1.2 cm > 1.2 cm para restauración suelos degradados
pH	5.0 – 7.6	5.0 – 7.2	5.5 – 8.0	Se debe definir el rango
Sales solubles (dSm ⁻¹)	< 2.5	< 4	< 5	< 20
Tasa respiratoria				
O ₂ =mg/kg.hr	< 200 (O ₂)	< 200 (O ₂)	< 200 (O ₂)	< 400 (O ₂)
CO ₂ =mg/día		≤ 5 (CO ₂)	≤ 5 (CO ₂)	≤ 10 (CO ₂)
Elementos trazas/Metales pesados	No exceder los estándares de la EPA para el compost proveniente de residuos orgánicos. (Part. 503 Reg).			

Fuente: Rynk, 1997 y Christian, Evanylo and Pease, 2009.

En el país todavía no se ha llegado hasta una reglamentación que defina las características de diferentes calidades de compost. Solo se tiene una legislación que define una sola calidad de compost y los requerimientos mínimos que este debe cumplir para poder ser comercializado como abono o acondicionador orgánico natural de suelos. Estos requisitos y algunas definiciones importantes sobre el tema se recogen en las NTC1927 de 1997 sobre Fertilizantes y acondicionadores de suelo; Definiciones, clasificación y fuentes de materias primas y la NTC 5167 de 2004 sobre Productos para

la industria agrícola; Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo, ambas emitidas por el INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS ICONTEC.

Sin embargo, de acuerdo a Salamanca (2012) los productores nacionales de compost, agrupados en la Asociación nacional de compostajes industriales, tienen como objetivo “llevar el producto al ámbito internacional y alcanzar los estándares europeos de producción”.

De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 de 2004, las características mínimas de un compost para ser apto de comercializarse como acondicionador orgánico natural de suelos son las siguientes. Tabla 3.

En este trabajo, se comprobará la calidad final de las mezclas evaluadas contra algunos de los parámetros expresados en esta tabla y además se evaluarán otras características no presentes en esta tabla como el contenido de algunos nutrientes, conductividad eléctrica y porcentaje de materia orgánica.

1.4 La microbiología del compostaje

En una pila de compost se tiene una interacción entre microorganismos y macroorganismos que efectúan su trabajo sobre los residuos compostables. El compost presenta hasta al final de su proceso de descomposición, una enorme población de microorganismos y también algunos macroorganismos. (Kiehl, 1998).

De acuerdo con Sylvia et. al. (1999) y Kiehl (1998) los macroorganismos o mesofauna, los cuales ayudan al proceso de compostaje, son pequeños animales observables a simple vista que habitan el suelo o están presentes en la mayoría de los sustratos orgánicos.

Tabla 3. Requisitos específicos de calidad para el compost en Colombia

Parámetro a caracterizar en base seca	Límites permisibles
Contenido de cenizas	Máximo 60%
Contenido de humedad	
Para materiales de origen vegetal	Máximo 35%
Contenido de carbono orgánico oxidable total	Mínimo 15%
Contenido N total	Declararlos si cada uno es mayor al 1%.
Contenido P ₂ O ₅ total	Declararlos si cada uno es mayor al 1%.
Contenido K ₂ O total	Declararlos si cada uno es mayor al 1%.
Relación C/N	Declararla
Capacidad de Intercambio Catiónico CIC	Mínimo 30 meq/100 g suelo
Capacidad de retención de humedad	Mínimo su propio peso
pH	Mayor de 4 y menor de 9
Densidad	Máxima 0.6 g/cm ³
Metales pesados*	
Arsénico	41 mg/kg
Cadmio	39 mg/kg
Cromo	1200 mg/kg
Mercurio	17 mg/kg
Níquel	420 mg/kg
Plomo	300 mg/kg
Poblaciones <i>Salmonella</i> spp.	Ausente 25 g producto final
Poblaciones Enterobacterias totales	< 1000 UFC / g producto final

Fuente: ICONTEC, Norma Técnica Colombiana NTC 5167 de 2004.

Esta macrofauna realiza un ataque físico sobre los materiales o subproductos orgánicos, rompiéndolos en pequeños pedazos. Este rompimiento de los pedazos gruesos es principalmente un paso preparativo que acelera la tasa de descomposición al aumentar el área superficial por unidad de volumen de los residuos. Entre esta macrofauna se

tienen isópodos, miriápodos, quilópodos, cucarrones, ácaros, colémbolos y lombrices de tierra, entre otros.

Sin embargo, el proceso de compostaje está principalmente gobernado por la acción de los microorganismos. (Tchobanoglous, 1994).

Se asume que hay microorganismos en el compost. Si ellos venían con los materiales compostados o fueron adicionados después como parte del proceso de compostaje es otra pregunta. Un rápido proceso de compostaje supone que una grande y activa población microbiana está presente. Esta población microbiana consiste de un grupo mezclado de bacterias termofílicas y mesofílicas, actinomicetos (bacterias filamentosas) y hongos. (Coyne, 1999).

Según USDA (2000) durante el proceso de compostaje, los microorganismos degradan el material bruto presente en la mezcla a compostar para sintetizar nuevo material celular y obtener energía de estos procesos catabólicos. Diversas reacciones químicas son llevadas a cabo debido a compuestos complejos son degradados en compuestos más simples y luego sintetizados en la forma de nuevos compuestos.

Antes de que los microorganismos puedan sintetizar nueva biomasa microbiana, ellos requieren suficiente energía para estos procesos. Hay dos posibles rutas metabólicas para la producción de energía por parte de los microorganismos heterótrofos: La respiración y la fermentación. (Coyne, 1999).

Al respecto USDA (2000) afirma que la respiración puede ser tanto Aeróbica como Anaeróbica. En la respiración aeróbica los microorganismos utilizan el oxígeno molecular O₂ como aceptor electrones para producir la energía metabólica a partir de sus fuentes de carbono. Se produce dióxido de carbono y agua en el proceso. La producción de energía no se logra por medio de una única reacción sino que se obtiene a través de varias reacciones acopladas. Estas reacciones, muy eficientes energéticamente hablando, también producen varios compuestos intermedios que sirven como sustrato para otras reacciones.

En la respiración anaeróbica en cambio, los microorganismos utilizan otros compuestos diferentes al O₂ como aceptores finales de electrones para la obtención de su energía, algunos de estos compuestos son los Nitratos NO₃⁻, Carbonatos CO₃²⁻ y Sulfatos SO₄²⁻, entre otros. Estas reacciones pueden producir olores o compuestos indeseables como el Ácido sulfhídrico H₂S y el Metano CH₄. La fermentación por su parte, es la forma más simple de producción de energía, no requiere de oxígeno y es muy ineficiente energéticamente hablando. La mayoría del carbono degradado a través de la fermentación es convertido en productos finales, no hay síntesis de biomasa microbiana y la energía se libera en muy poca cantidad. (USDA, 2000).

Al respecto Coyne (1999) afirma que la respiración aeróbica es la ruta metabólica preferida sobre la respiración anaeróbica y la fermentación en el proceso de compostaje debido a que es más eficiente, genera más energía, opera a altas temperatura y no produce la misma cantidad de compuestos olorosos.

Evaluaciones de la fisiología de las poblaciones microbianas han mostrado que se producen grandes cambios en la distribución de las poblaciones durante el proceso de compostaje. La mayoría de los microorganismos trabajan en grupos específicos distribuidos acopladamente a lo largo del proceso de compostaje. De esta forma se tienen primero los microorganismos de una etapa mesofílica (aproximadamente de 20°C a 40°C), luego viene una etapa termofílica (entre 40°C y 80°C) y por último se tiene una etapa de estabilización o curado que consiste en un enfriado gradual de la pila. (Sylvia et. al. 1999). Algunas de las especies de microorganismos encontrados en estos grupos se pueden observar en la tabla 4.

De acuerdo con Tchobanoglous (1994) la etapa mesófila es la etapa inicial, empieza el crecimiento de los microorganismos que se manifiesta por un aumento rápido de la temperatura con respecto a la temperatura del material inicial. La duración de esta etapa es variable. En esta etapa, abundan las bacterias y hongos mesofílicos. Debido a la actividad metabólica de todos estos microorganismos la temperatura aumenta hasta 40°C, el pH disminuye desde un valor neutro hasta 5.

La siguiente es la etapa termófila. En esta etapa en donde la temperatura puede alcanzar los 75°C, las poblaciones de bacterias y hongos mesofílicos mueren o permanecen en estado de dormancia mientras que las bacterias termofílicas, actinomicetos y hongos termofílicos encuentran su óptimo, produciéndose CO₂ en volúmenes importantes que difunden desde el núcleo a la corteza eliminando todos los Mesófilos patógenos, hongos, esporas, semillas, larvas de insectos y elementos biológicos indeseables. La degradación de los ácidos obtenidos en la etapa anterior provoca el incremento del pH pasando desde 5,5 hasta 7,5 donde permanecerá casi constante hasta el final del proceso, el color del compost se pone más oscuro paulatinamente y el olor original se comienza a sustituir por olor a tierra. (Gordillo y Chávez, 2010).

Tabla 4. Microorganismos comúnmente asociados con las pilas de compost

	Bacterias	Hongos
Mesófilos	<i>Pseudomonas spp.</i> <i>Achromobacter spp.</i> <i>Bacillus spp.</i> <i>Flavobacterium spp.</i> <i>Clostridium spp.</i> <i>Streptomyces spp.</i>	<i>Alternaria spp.</i> <i>Cladosporium spp.</i> <i>Aspergillus spp.</i> <i>Mucor spp.</i> <i>Humicola spp.</i> <i>Penicillium spp.</i> <i>Geotrichum spp.</i>
Termófilos	<i>Bacillus spp.</i> <i>Bacillus stearothermophilus.</i> <i>Streptomyces spp.</i> <i>Thermoactinomyces spp.</i> <i>Thermus spp.</i> <i>Thermomonospora spp.</i> <i>Microployspora spp.</i> <i>Clostridium thermocellum.</i>	<i>Aspergillus fumigatus.</i> <i>Mucus pusillus.</i> <i>Chaetomium thermophile.</i> <i>Humicola lanuginosa.</i> <i>Absidia ramosa.</i> <i>Sporotrichum thermophile.</i> <i>Torula thermophile (Levadura)</i> <i>Thermoascus aurantiacus</i>

Fuente: Coyne, 1999 y Sylvia et. al. 1999

Le sigue en orden de sucesión la 2da. etapa mesófila. Con el agotamiento de los nutrientes y la energía, la actividad de los termófilos empieza a escasear hasta desaparecer, consecuentemente la temperatura en la pila desciende desde los 75°C hasta la temperatura ambiente desarrollándose nuevamente los microorganismos Mesófilos que utilizarán la energía. (Gordillo y Chávez, 2010).

La última etapa es la etapa de maduración o curado. Esta etapa se transcurre cuando la fase de calentamiento en las pilas ha terminado, sin embargo algunas reacciones siguen presentándose pero muy lentamente y algunos cambios físicos y químicos ocurrirán a futuro en el compost. El proceso de compostaje aún no está completo en este estado y el compost probablemente todavía contenga algunos compuestos intermediarios del proceso de descomposición que pueden generar malos olores, atraer plagas y afectar adversamente la germinación de las semillas. (Sylvia et. al. 1999).

1.5 Beneficios de la utilización del compost y su uso en la industria azucarera

1.5.1 Beneficios de la aplicación de compost al suelo

Diversos autores como Rynk (1997); Moon (1997); USDA (2000); Labrador (2001); Christian, Evanylo and Pease (2009); Brady and Weil (2008); AAPFCO (2012) y NYC Department of Sanitation (2012), entre otros, han reportado los beneficios de la utilización de compost como acondicionador o mejorador de suelos desde hace varios años.

Incluso algunos autores como NYC Department of Sanitation (2012) han ido un poco más allá y han planteado el debate de manejar el compost no como un acondicionador de suelos y suplemento de la fertilización sino como un sustituto de la fertilización tradicional. Estos autores afirman que aplicaciones regulares (de 3 a 5 pulgadas de espesor) de compost de buena calidad a través de varios años, pueden llegar a enriquecer el suelo lo suficiente como para eliminar la necesidad de fertilizantes tradicionales.

Sin embargo en la escuela ortodoxa de las ciencias del suelo, para la mayoría de investigadores y conocedores el compost se debe manejar siempre como un acondicionador de suelos y nunca como un sustituto de la fertilización. Brady and Weil (2008) y Sylvia et. al. (1999) afirman que aunque el compost es una buena fuente de nutrientes para los cultivos, este se diferencia de los fertilizantes inorgánicos, en que el

compost requiere una descomposición microbial adicional para poder liberar la mayoría de sus nutrientes.

“La mineralización de los compuestos orgánicos en el compost produce una liberación gradual y constante de nutrientes para las plantas. Sin embargo, el confiar o disponer solamente de las fuentes de nitrógeno orgánico generalmente termina en fallas en los planes de fertilización al no poder cumplir con las demandas de nitrógeno por parte de los cultivos comerciales en crecimiento activo. Fertilización suplementaria generalmente debe ser adicionada para cumplir con la demanda inmediata de nitrógeno por parte de la planta” (Sylvia et. al. 1999).

En este trabajo se tomará la corriente ortodoxa de las ciencias del suelo en donde se maneja el compost como un acondicionador orgánico natural o una enmienda para suelos.

De este modo, AAPFCO (2012) afirma que la utilización del compost como acondicionador orgánico reporta varios beneficios al suelo entre los que se tienen:

- Mejoramiento de la estructura y la porosidad del suelo, creando un mejor medioambiente para el desarrollo radical.
- Incremento de la infiltración y permeabilidad y reducción de la densidad aparente en suelos compactados.
- Mejoramiento de la tasa de infiltración de humedad y reducción de la erosión y la lixiviación de nutrientes.
- Aumento de la capacidad de retención de humedad en suelos arenosos.
- Aumento de la Capacidad de intercambio catiónico CIC de los suelos, mejorando la habilidad de estos para retener los nutrientes que pueden ser tomados por la planta.
- Suministro de materia orgánica a los suelos.
- Ayuda y promueve la proliferación de microorganismos benéficos.

- Aporte de microorganismos benéficos al suelo y de un medio de crecimiento apto para ellos.
- Promueve un crecimiento radical vigoroso.
- Facilita a los suelos retener los nutrientes por más tiempo.
- Aporta humus, el cual facilita la agregación del suelo y permite que los nutrientes estén más disponibles para la absorción por parte de las plantas.
- Aumenta el efecto buffer o tampón del pH de los suelos.
- Enlaza y degrada algunos contaminantes específicos.

Por su parte Labrador (2001) asegura que al hacer aplicaciones de compost al suelo se incrementa la actividad microbiana, se incrementan las poblaciones de microorganismo benéficos, se incrementa la estabilidad estructural, se mejoran los parámetros físicos del suelo, se influencia positivamente el desarrollo vegetal y se minimizan las pérdidas de nutrientes comparados con otro tipo de fertilizantes industriales.

Barzegar, Yousefi and Daryashena (2002) afirman que en suelos agrícolas trabajados de manera no sostenible, los contenidos de materia orgánica tienden a disminuir como componente del suelo. Sin embargo, mediante la adición de compost y otros materiales que mejoran la estructura del suelo, los contenidos de materia orgánica se puede mantener. Además, también se produce una interacción entre las sustancias húmicas que contiene el compost y las arcillas del suelo mejorando de este modo las propiedades fisicoquímicas de los suelos.

Al respecto FHJC (2004) asegura que el compost es un nutriente para el suelo, ya que mejora su estructura, ayuda a reducir la erosión y contribuye a que las plantas absorban agua y nutrientes; además favorece el mantenimiento de la vida animal y de los microorganismos del suelo.

USDA (2000) por su parte afirma que la principal función de la aplicación de compost al suelo es la adición de humus y materia orgánica. La adición de humus y materia orgánica incrementa la capacidad de retención de agua y nutrientes, disminuye la densidad aparente del suelo y mejora la aireación y la porosidad del suelo. Estos resultados son efectos directos de la aplicación del compost al suelo, pero también se tienen efectos indirectos como la promoción de la actividad microbial del suelo y de la actividad de las lombrices de tierra. Los cambios en el suelo producidos por la adición de compost también estimulan el crecimiento radical. Un sistema radical aumentado hace a la planta ser más resistente a la sequía porque es capaz de obtener más agua del suelo. También, hace que la planta pueda absorber más nutrientes.

Finalmente, Piccolo (2002) asegura que el compost es rico en ácidos húmicos y fúlvicos. Estos ácidos están constituidos por grupos hidrofílicos e hidrofóbicos, que interaccionan con la fracción mineral del suelo ocasionando la aglutinación de las arcillas para formar Microagregados limosos. Estos Microagregados mejoran la capacidad de retención de agua y aumentan la aireación y los contenidos de carbono en la biomasa del suelo.

1.5.2 Utilización del compost y el compostaje en la industria azucarera

Desde hace varios años en diferentes países con vocación cañicultora se han venido desarrollado investigaciones sobre aprovechamiento de los diferentes subproductos de la agroindustria azucarera.

Hernández et. al. (2008) en su trabajo realizado en la región de Chiapas, México comparó el efecto de la aplicación de diferentes dosis de vinaza y compost de cachaza con la fertilización química tradicional. Los autores evaluaron algunas propiedades químicas, el rendimiento y la calidad de jugo de la caña de azúcar cultivada sobre un Gleysol mólico. En un ciclo productivo de evaluación, no se presentó diferencia significativa en las propiedades químicas del suelo para los tratamientos. Respecto al rendimiento y la calidad de jugo de la caña si se presentaron diferencias entre

tratamientos; los mayores valores fueron obtenidos por la fertilización química seguida del tratamiento con compost, los valores más bajos fueron presentados por el testigo y los tratamientos con vinaza respectivamente.

También en México, Pérez et. al. (2011) evaluaron el proceso de compostaje de diferentes mezclas de bagazo y cachaza de caña. En este estudio, los autores evaluaron la adición de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ en las mezclas y el comportamiento de algunas variables químicas que pudieran tomarse como indicadoras de la calidad y madurez del producto terminado. Estos autores encontraron que a medida que se aumentaba la proporción de bagazo en las mezclas con cachaza, se aumentaba consecuentemente el porcentaje de humedad en las pilas y se reducía la temperatura. Sin embargo, debido al tamaño de las pilas, esta disminución de temperatura no permitió que el compost alcanzara su fase termofílica. La adición de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ provocó una disminución del pH, un incremento en la conductividad eléctrica y en los contenidos de NH_4^+ y NO_3^- en el producto final. Debido a su menor relación C/N, el tratamiento donde solo se compostó cachaza produjo las mayores cantidades de compost en el menor tiempo, comparado con los otros tratamientos en donde se mezclaban diferentes relaciones de cachaza con bagazo. Este tratamiento también presentó la mayor Capacidad de intercambio catiónico CIC.

En Ecuador, se realizó una investigación similar en donde se evaluaron diferentes mezclas de subproductos de la agroindustria azucarera para determinar cuál producía compost en el menor tiempo posible. Simultáneamente, también evaluaron algunas variables químicas del compost como temperatura, pH, conductividad eléctrica CE, porcentaje de materia orgánica y humedad, macro y micronutrientes y relación C/N.

Estas variables se midieron al inicio y al final del proceso. Al finalizar el proceso, se encontró que la mezcla con mejores contenidos de macro y micronutrientes correspondió al tratamiento con 50% de bagazo, 25% de cachaza y 25% de ceniza. El tratamiento con 40% bagazo, 30% cachaza y 30% ceniza presentó la mejor relación C/N. El tratamiento

con 50% de bagazo, 25% cachaza y 25% ceniza presentó los mayores contenidos de materia orgánica (Gordillo y Chávez, 2010).

En el país ya se han reportado también algunos trabajos sobre el uso del compostaje y el compost en la industria de la caña de azúcar. Salamanca (2012) asegura que en el valle geográfico del río Cauca se vienen compostando los residuos de la industria azucarera y del alcohol carburante en seis plantas ubicadas en los departamentos de Valle, Risaralda y Cauca. Estas plantas de procesamiento de residuos de caña son la de mayor tamaño y capacidad en el país y tienen en conjunto, una producción mayor a las 24.000 toneladas mensuales de compost.

Salamanca (2008) evaluó el efecto de la incorporación de diferentes mezclas de vinaza, cachaza, bagazo y lixiviado de raquis de plátano en un Typyc haplustol del municipio de El Cerrito en el Valle del Cauca. Esta autora evaluó algunas características o propiedades biológicas del suelo como actividad microbiana, biomasa microbiana y la dinámica de complejos enzimáticos como la ureasa y la Nitrogenasa.

Por su parte Muñoz (2012) evaluó el efecto de la aplicación de diferentes dosis de compost (producido de la mezcla de cachaza, vinaza y residuos de cosecha) en combinación con reducciones de las dosis de fertilizantes de síntesis (regularmente recomendada por Cenicaña para el cultivo) sobre la productividad de la caña. Este investigador encontró que “durante los tres primeros cortes, la dosis de compost de 5 toneladas por hectárea sin reducción de la dosis de fertilización, produjo un incremento en la productividad de la caña de azúcar”.

Los principales residuos orgánicos que se produjeron en la planta de los Ingenios Riopaila y Castilla S.A. durante el proceso de molienda son el bagazo, la cachaza, las cenizas de la combustión del bagazo y los efluentes líquidos o vinazas. De acuerdo con datos proporcionados por empleados del Laboratorio de producción del Ingenio Riopaila, por cada tonelada de tallos que ingresan al proceso de transformación agroindustrial, se

generan 250 kg de bagazo, 30 kg de cachaza, 6 kg de cenizas y 45 kg de melaza, igualmente por cada litro de alcohol anhidro producido a partir de la meladura se generan 13 litros de vinaza.

Diferentes autores han abordado ya el estudio de estos subproductos. Zerega, (1993) asegura que la cachaza es uno de los principales residuos de la industria de la caña de azúcar. Se producen de 30 a 50 kg por tonelada de materia prima procesada, lo cual representa entre 3 y 5% de la caña molida. Este porcentaje y su composición pueden variar de acuerdo con las características agroecológicas de la zona en donde se cultive la caña.

La cachaza es rica en fósforo, calcio, nitrógeno y pobre en potasio, generalmente. Esto es debido a que, en algunas fábricas, se tratan con fosfato los jugos para clarificarlo más rápidamente y a la alta solubilidad de este elemento. El contenido de calcio de este subproducto varía con las cantidades de cal empleadas durante el proceso de clarificación del jugo. Los altos contenidos de nitrógeno se deben a la gran cantidad de materia orgánica que presenta este residuo, sin embargo todavía se desconoce la cantidad exacta de nitrógeno aprovechable que pueda liberar la cachaza a través del tiempo. Esta liberación es controlada por diversos factores ambientales. Este material es también una fuente importante de magnesio y zinc (Castaldi et. al. 2005).

Según Arbeláez (1992), quien evaluó el efecto de la incorporación de tres diferentes tipos de cachaza sobre algunas propiedades químicas del suelo y sobre la productividad de la caña, la composición química de la cachaza fresca (de hasta 60 días) es:

Tabla 5. Caracterización química de la cachaza

Parámetro		Parámetro	
Carbono Orgánico %	19.5	Mg (%)	0.67
N total %	0.6	Fe (ppm)	1600
Relación C/N	32.5	Mn (ppm)	486
Materia Orgánica %	33.5	Cu (ppm)	58.50
P %	0.71	Zn (ppm)	198
K %	0.60	Humedad (%)	65.30
Ca (%)	2.10		

Fuente: Arbeláez, 1992.

La cachaza utilizada como enmienda para el suelo, reporta varios beneficios; incrementa temporalmente la CIC y aumenta la capacidad de retención de humedad del suelo, además, durante su descomposición produce gran cantidad de CO₂ que al reaccionar con el agua se transforma en H₂CO₃ y junto con otros ácidos de origen orgánico ayudan a poner en disolución nutrientes que estaban insolubles en los suelos a un pH alcalino. (Laura and Idnani, 1973).

Respecto al bagazo Peña (1999) afirma que este es un residuo fibroso que se obtiene de la extracción del jugo en el proceso de molienda de la caña. Es un residuo heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, presenta una relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad, en las condiciones en que se obtiene. Al salir del molino o del difusor recibe el nombre de bagazo verde con 50% de fibra leñosa y aproximadamente un 55% de humedad. En las condiciones actuales el bagazo es empleado como combustible para generación de calor dentro de la misma industria azucarera, para producción de pulpa y papel, para la fabricación de tableros aglomerados y para la alimentación animal. Estos otros usos hacen que estos subproductos de la caña sean cada vez más costosos y de difíciles de utilizar con fines agronómicos.

La composición química del bagazo, de acuerdo con Sánchez (2013) es mostrada en la Tabla 6.

Tabla 6. Caracterización química del bagazo

Parámetro	Método	Valor
Materia orgánica (%)	Walkley Black	73,31
Carbón orgánico (%)	Walkley Black	42,52
N Total (%)	Kjeldahl	0,23
Relación C:N		184,8
P ₂ O ₅ (%)	Digestión nitro perclórica	0,80
K ₂ O (%)	Digestión nitroperclórica	0,02
Humedad	Método de Estufa	48,3
CaO (%)	Digestión nitro perclórica	0,30
MgO (%)	Digestión nitroperclórica	0,32
Na ₂ O (%)	Digestión nitroperclórica	0,88
Mn	Digestión nitroperclórica	39,13
Zn	Digestión nitroperclórica	206,37
B (%)	Galmes Mitchell, 1979 (colorimetría)	13,70
Fe	Digestión nitroperclórica	47,20
Cu	Digestión nitroperclórica	1065,77
S (%)	Turbiedad	3,56
pH	Potenciómetro	5,50

Fuente: Sánchez, 2013

Con fines agronómicos, el bagazo se incorpora al suelo para el mejoramiento de algunas propiedades físicas como la tasa de infiltración, la retención y distribución de la humedad a través del perfil. Es recomendado particularmente en cultivos semipermanentes como la caña de azúcar. Se recomienda mezclarlo con cachaza y restos de cosecha, para

prolongar sus efectos residuales en el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo (Zerega, 1993).

Con respecto a la vinaza, varios autores como García y Rojas (2006); Irizarry (2006); Montenegro (2008); Narvárez (2008); y Salamanca (2008), entre otros, han estudiado su utilización como fertilizante líquido para suelos, no solo en cultivos de caña de azúcar sino también en otros cultivos de importancia agronómica.

La vinaza es el subproducto o residuo líquido resultante del proceso de producción del etanol. Es obtenido ya sea por la destilación de melaza fermentada o por la fermentación directa de los jugos de caña. Puesto que su origen es la planta de caña, la vinaza está compuesta por materiales orgánicos y nutrientes minerales que hacen parte de compuestos y constituyentes vegetales como aminoácidos, proteínas, lípidos ácidos diversos, enzimas, bases, ácidos nucleicos, clorofila, lignina, quinona, ceras, azúcares y hormonas. (García y Rojas, 2006).

Quintero (2008) estudió el efecto de la aplicación de vinaza directamente al suelo (sin ser utilizada dentro de ningún proceso de compostaje) como fertilizante líquido, sobre las características químicas de suelos sembrados bajo caña. En este trabajo el autor reporta que en el Valle del Cauca se producen vinazas con una concentración de 10% y 55% de sólidos totales. Estas vinazas se están aplicando como fertirrigación al suelo dependiendo de sus contenidos de Potasio disponible.

Según Irizarry (2006) la composición química de la vinaza depende de varios factores como las características de la materia prima usada en la producción del alcohol, el sustrato empleado en la fermentación, el tipo y la eficiencia de la fermentación, el proceso de destilación utilizado y de las variedades y grado de maduración de la caña utilizada en la molienda.

De acuerdo con Quintero (2008) la caracterización de las vinazas de 10% y 55% de sólidos totales, se puede observar en la Tabla 7.

Tabla 7. Caracterización química de vinazas con 10% y 15.6% de concentración

Análisis	Unidad	10% Sólidos totales	15.6% Sólidos totales
Materia Orgánica	%	4.2 – 6.7	5.75
Carbono orgánico	%	2.4 – 3.8	3.3
N total	%	0.063 – 0.11	0.24
Relación C/N	--	38 – 34.5	13.75
P ₂ O ₅	kg m ⁻³	0.07 – 0.25	0.6
K ₂ O	kg m ⁻³	6.0 – 10.8	13.8
CaO	kg m ⁻³	1.0 – 3.1	4.3
MgO	kg m ⁻³	1.3 – 2.2	3.2
Na ₂ O	kg m ⁻³	--	0.9
SO ₄ ⁻²	kg m ⁻³	3.8	3.3
B	mg L ⁻¹	--	3.3
Cu	mg L ⁻¹	--	17.46
Fe	mg L ⁻¹	--	181.7
Mn	mg L ⁻¹	--	69.7
Zn	mg L ⁻¹	--	18.42
Densidad	kg m ⁻³	1030	--
pH	--	3.5 – 4.3	4.27

Fuente: Quintero (2008) y Gallego, Muñoz and Hernández (2012).

2. Materiales y Métodos

2.1 Localización geográfica del ensayo

Los ensayos se realizaron en las plantas de compostaje de los Ingenios Riopaila y Castilla S.A. La planta del ingenio Riopaila se encuentra ubicada en el corregimiento de La Paila, del municipio de Zarzal y la planta del ingenio Castilla está ubicada en el corregimiento de San Antonio de los Caballeros, perteneciente al municipio de Florida, ambos municipios ubicados en el departamento del Valle del Cauca.

La planta de compostaje del ingenio Riopaila, está ubicada en las coordenadas N 04°31'26.9" y W -76°08'78.03" y presenta una altitud de 916 m.s.n.m. Por su parte la planta Castilla se encuentra ubicada en las coordenadas N03°36'38" y W76° 27'96" y presenta una altitud de 1050 m.s.n.m.

2.2 Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar BCA con cinco (5) tratamientos y cuatro (4) repeticiones.

2.2.1 Descripción de los tratamientos

Para establecer los tratamientos se utilizaron los subproductos provenientes del proceso de molienda en los ingenios Riopaila y Castilla. Los subproductos utilizados fueron Cachaza, Bagazo de caña y Vinaza con la caracterización química anotada en el acápite de resultados. La descripción de estos tratamientos se puede observar en la Tabla 8.

2.2.2 Descripción de las unidades experimentadas

La unidad experimental del ensayo correspondió a una pila de compost de 20 toneladas de peso. Las pilas de cada uno de los tratamientos, se ubicaron en los patios siguiendo el diseño experimental de bloques completos al azar previamente definido. Figura 14.

Tabla 8. Descripción de los tratamientos utilizados

Tratamiento	Convención	Descripción.
1	100CZV	La totalidad del material compostado (20 toneladas) fue cachaza con adición de 2 m ³ vinaza.
2	75CZ25BGV	El 75% del material compostado (15 toneladas) correspondió a la cachaza y el restante 25% (5 toneladas) correspondió al bagazo. Se adicionó también 2 m ³ vinaza.
3	50CZ50BGV	50% del material compostado (10 toneladas) correspondió a la cachaza y 50% (10 toneladas) correspondió al bagazo. Se adicionó también 2 m ³ vinaza.
4	25CZ75BGV	El 25% del material compostado (5 toneladas) correspondió a la cachaza y el restante 75% (15 toneladas) correspondió al bagazo. Se adicionó también 2 m ³ vinaza.
5	100BGV	La totalidad del material compostado (20 toneladas) fue bagazo de caña con la adición de 2 m ³ vinaza.

Figura 14. Distribución espacial de las pilas en el lote del ensayo



2.2.3 Variables de respuesta evaluadas

- Relación Carbono – Nitrógeno C/N
- pH de la pasta saturada
- Conductividad eléctrica
- Humedad
- Porcentaje de cenizas
- Porcentaje de materia orgánica
- Contenido de Carbón orgánico oxidable total COOT
- Contenido de Nitrógeno total
- Contenido de Fósforo
- Contenidos de Calcio, Magnesio y Potasio
- Contenidos de Hierro, Cobre, Manganeso y Zinc
- Retención de humedad

2.2.4 Análisis estadístico de la información

Las variables anteriormente descritas, evaluadas para diferentes fechas, fueron sometidas a un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software SAS versión 9.1.3 segunda edición 2006. Aquellas donde se detectaron diferencias significativas entre medias se sometieron a la prueba de promedios de Duncan. Tanto los Anova como las pruebas de Duncan se realizaron para los tratamientos, repeticiones y los tiempos de muestreo.

Adicionalmente, se realizó un estudio de correlación para todas las variables al final del ensayo, o sea a los 90 días de montadas las pilas, para estimar cuál de estas variables estaba relacionadas y tenían mayor peso dentro de la variabilidad total del ensayo. Identificando estas variables se podrá determinar cuáles pueden ser las más apropiadas para predecir los contenidos finales de nutrientes y la calidad final del compost.

2.3 Métodos de muestreo y técnicas de laboratorio utilizadas en la determinación de las variables de respuesta

2.3.1 Métodos de muestreo de subproductos y compost

Para la caracterización química de los subproductos sólidos utilizados para el proceso de compostaje se procedió a tomar una muestra compuesta de acuerdo a lo recomendado por ICA, 1992. De esta forma, utilizando guantes de látex, se tomaron 10 submuestras de diferentes lugares de los montones de cachaza y bagazo provenientes de la planta de producción.

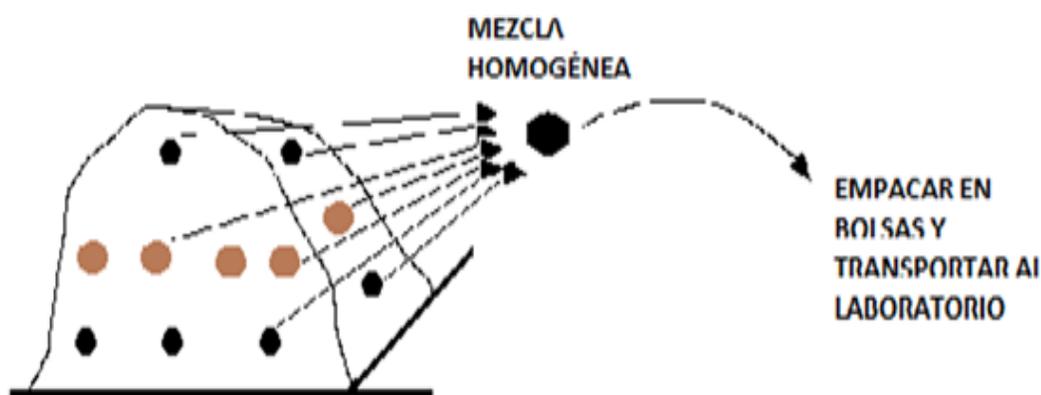
Se trató de tomar las submuestras del modo más representativo posible tomándolas de la parte superior, central e inferior de los montones de residuos.

Las submuestras fueron luego depositadas en un recipiente plástico limpio, mezcladas y homogenizadas. Finalmente se tomaron 500 g de cada uno de los residuos, se empacaron y se rotularon en bolsas plásticas tipo Ziploc®. Una vez las muestras fueron recolectadas, se depositaron en una nevera de icopor con pilas refrigerantes que las mantenían a una temperatura de 4°C aproximadamente, mientras se transportaban al laboratorio.

En el caso del subproducto líquido, la vinaza, se tomó una muestra simple. Con la ayuda de guantes de látex, se tomó la muestra directamente de la válvula de salida del isotanque en donde se encontraba almacenada la vinaza para su transporte desde la planta. Para esto, se abrió un poco la válvula del isotanque, se dejó salir un poco de vinaza y luego se procedió a recolectar 500 ml de esta en un frasco de vidrio tipo Schott® de tapa rosca con capacidad para 1000 ml. Las muestras de Cachaza, Bagazo y Vinaza fueron llevadas en el mismo día de su recolección al Laboratorio Ingeniería y laboratorio de la ciudad de Cali. Estas muestras solo fueron analizadas al inicio del ensayo.

En el caso del compost, se utilizaron muestras compuestas. De cada pila se tomó una muestra representativa conformada por varias submuestras tomadas de diferentes partes de la pila. Figura 16. Se tomaron muestras al momento de montar las pilas, a los 42, 51, 59, 73 y 90 días después de iniciado el proceso.

Figura 15. Esquema del muestreo en la pila de compost



Fuente: Modificado de Muldowney, 2011.

2.3.2 Métodos y técnicas de laboratorio utilizadas en la determinación de las variables

Relación C/N

Las relaciones C/N de las muestras de compost se calcularon dividiendo los contenidos de carbono sobre los contenidos de nitrógeno de la misma.

pH de la pasta saturada de compost

El pH de las muestras de compost fue medido directamente en su pasta saturada con agua según lo recomendado por Gordillo y Chávez, 2010 y Muldowney, 2011. Para esto, se tomaron muestras de 10 gr de compost y se tamizaron, luego se les adicionó 50 ml de

agua destilada (relación 1:5 p/v) y se mezcló. Al cabo de 12 horas se realizaron las lecturas introduciendo directamente la sonda del pHmetro dentro de la pasta saturada. Una vez estabilizada la lectura se realizaron las anotaciones del valor de pH.

Conductividad eléctrica

La medida de la conductividad eléctrica de las muestras de compost se realizó sobre el extracto de su pasta saturada siguiendo las recomendaciones de ICONTEC, 2004 y Muldowney, 2011. Se pesaron aproximadamente 100 gr de cada una de las muestras y se humedecieron con agua destilada hasta alcanzar su punto de saturación. Se mezcló hasta obtener un brillo metálico característico sobre la superficie de la pasta. Utilizando un embudo Buchner y con la ayuda de vacío se obtuvo el extracto de la pasta. Una vez obtenido el extracto, se introdujo directamente en el, la sonda del conductivímetro para realizar las lecturas de sales solubles o conductividad eléctrica.

Humedad

La determinación de humedad en las muestras de compost se realizó por el método gravimétrico. Se siguieron las recomendaciones dadas por ICONTEC, 2004 y para las determinaciones se utilizaron muestras de 100 g aproximadamente. Las muestras fueron secadas en estufa a 105 °C por 24 horas. Luego se dejaron enfriar en un desecador hasta peso constante. Para la determinación del porcentaje de humedad de utilizó la fórmula:

$$\% \text{ HUMEDAD} = \frac{\text{PESO MUESTRA HÚMEDA} - \text{PESO MUESTRA SECA}}{\text{PESO MUESTRA HÚMEDA}} \times 100$$

Contenido de Fósforo

Los contenidos de fósforo en la forma de P₂O₅ se determinaron por el método de Bray II modificado. La cuantificación del ion fosfato en la solución extractora se determinó después por métodos colorimétricos con la ayuda de un espectrofotómetro.

Tabla 9. Métodos y técnicas de laboratorio utilizadas para la determinación de las variables evaluadas

Elementos	Unidades	Métodos
Materia Orgánica		Volumetría
Subproductos		Espectrometría molecular. Walkley and Black
Materia Orgánica		Mufla. Pérdidas por ignición
Compost		
Carbono Orgánico	%	Colorimetría espectrofotómetro.
Oxidable total		(Walkley and Black, 1934)
N-Total		Colorimetría espectrofotómetro
		Digestado de ácido sulfúrico. (Kjeldahl)
Relación C/N	-----	Fórmula matemática
Humedad		Gravimetría
Ca		Espectrometría de absorción atómica. Digestado mezcla Nítrico-Perclórica.
Mg		Espectrometría de absorción atómica. Digestado mezcla Nítrico-Perclórica.
Na		Espectrometría de emisión atómica.
K		Espectrometría de emisión atómica. Digestado mezcla Nítrico-Perclórica.
B		Espectrometría molecular manual. Azometina. Agua caliente (Mahler et al. 1984)
Cenizas	%	Mufla. Pérdidas por ignición.
Sílice		Espectrometría de absorción atómica.
Al		Espectrometría de absorción atómica.
Fe		Olsen modificado. Espectrometría de absorción atómica.
P-Total		Colorimetría espectrofotómetro. Digestado de ácido sulfúrico. (Bray II modificado)
Mn		Olsen modificado. Espectrometría de absorción atómica.
Zn		Olsen modificado. Espectrometría de absorción atómica.
Cu	mg Kg ⁻¹	Olsen modificado. Espectrometría de absorción atómica.
S-Total	mg Kg ⁻¹	Turbidimetría. Digestado mezcla Nítrico-Perclórica.
Conduc. eléctrica	dS m ⁻¹	Conductimetría
CIC	cmol. Kg ⁻¹	Espectrometría de absorción atómica.
pH	----	Potenciometría. En Agua 1:1 p/v
Densidad (Vinaza)	g L ⁻¹	Picnómetro.

Fuente: Laboratorio Ingeniería y laboratorio, 2012 y Laboratorio de suelos y tejido foliar Ingenio Riopaila-Castilla, 2012.

Porcentaje de cenizas

Las cenizas de las muestras se determinaron por el método de las pérdidas por ignición mediante la utilización de una mufla. Este método está ampliamente referenciado por ICONTEC, 2004; Pansu and Gautheyrou, 2006 y Muldowney, 2011.

Las pérdidas por ignición son calculadas por gravimetría. (Pansu and Gautheyrou, 2006). Para esta determinación, del material preparado y utilizado para el cálculo de humedad, se pesaron 5 g de las muestras de compost en crisoles de porcelana. Se colocaron los crisoles en la mufla a una temperatura de 430 °C durante 24 horas. Al cabo de este tiempo se sacaron y se dejaron enfriar en un desecador. Se registró su peso hasta peso constante. Para el cálculo del porcentaje de cenizas se utilizó la fórmula:

$$\% \text{ CENIZAS} = \left[\frac{\textit{peso final}}{\textit{peso inicial}} \times 100 \right] \left[\frac{100 - \% \textit{ humedad}}{100} \right]$$

Porcentaje de materia orgánica

Como se acaba de referenciar, los porcentajes de materia orgánica de las muestras de compost se determinaron también por el método de las pérdidas por ignición.

Contenido de Carbón orgánico oxidable total COOT

Los contenidos de Carbono orgánico oxidable total de las muestras se determinaron por el método de Walkley and Black.

De acuerdo con Pansu and Gautheyrou, 2006 la determinación del COOT por medio de la oxidación con dicromato de potasio en un medio abierto fuertemente ácido, fue propuesta por primera vez por Schollenberger (1927) y luego por Walkley and Black (1934) de quien toma el nombre el método.

Después de una primera fase de oxidación/mineralización a la que es sometida la muestra, a una temperatura de 150 °C por un periodo de 30 minutos, se realizó la cuantificación del dicromato que no se redujo en la reacción. Esta cuantificación del

exceso del ion dicromato, se hizo (en presencia de sulfato ferroso amónico) por colorimetría con la ayuda de un espectrofotómetro

Contenido de Nitrógeno total

El nitrógeno total de las muestras se determinó utilizando el método de Kjeldahl.

El análisis de Nitrógeno total utilizando un método de oxidación húmeda se deriva del propuesto por Kjeldahl en 1883. El propósito de este método es transformar los compuestos de nitrógeno orgánico en compuestos inorgánicos en un medio de ácido sulfúrico concentrado y en presencia de catalizadores. (Pansu and Gautheyrou, 2006).

El nitrógeno inorgánico obtenido se cuantificó finalmente por colorimetría con un espectrofotómetro.

Contenido de Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio

Los contenidos de las muestras se cuantificaron mediante el método de la digestión ácida con una mezcla de ácido Nítrico y ácido Perclórico. Se utilizó luego una solución extractora de Acetato de Amonio 1M y finalmente, se cuantificaron los contenidos por espectrometría.

Contenido de Hierro, Cobre, Manganeso y Zinc

Para esta caracterización en el compost se utilizó el método de Olsen modificado. En este método las muestras son atacadas con una solución extractora de NaHC03 0.5 M, EDTA 0.01 M y 0.01% de Superfloc 12 durante 10 minutos. Luego la solución es filtrada y finalmente los contenidos del elemento son cuantificados por medio de espectrometría de absorción atómica. (Pansu and Gautheyrou, 2006).

Retención de humedad

Se utilizó el método de desorción de humedad para estimar este porcentaje de saturación en las muestras de compost. La determinación se realizó saturando con agua muestras de 100 g de compost al que ya se le había calculado anteriormente su porcentaje de humedad. Posteriormente se dejó drenar libremente el exceso de agua que las muestras

no eran capaces de retener. Se anotó el volumen de agua requerido para alcanzar el punto de saturación de dichas muestras.

De acuerdo a ICONTEC, 2004 la fórmula utilizada en laboratorio para calcular el porcentaje de saturación de una muestra es la siguiente:

$$\% \text{ Saturación} = \left[\frac{A \times 100}{W_m} \right] \left[\frac{100 - \% \text{ Humedad}}{100} \right]$$

Dónde:

A = Peso en g del volumen de agua utilizado para alcanzar el punto de saturación.

W_m = Peso en g de la muestra.

% Humedad = Contenido de humedad inicial de la muestra.

2.4 Conducción del experimento

Para el ensayo se establecieron pilas de tamaño diferente a las utilizadas regularmente en las labores de compostaje de las plantas. Para facilidad y homogenización, las pilas se establecieron con base en su peso y no con base en su volumen. La cachaza y el bagazo fueron pesados en una báscula industrial antes de realizar las mezclas de los tratamientos. Todas la pilas del ensayo se establecieron con un peso aproximado de 20 toneladas y una altura de 1.5 m.

La cachaza y el bagazo una vez pesados, fueron combinados en diferentes porcentajes de la mezcla total, de tal forma que cuando se aumentaba la cantidad de uno se disminuía la cantidad del otro. La vinaza en cambio, para efectos de homogenizar los tratamientos, se aplicó en todos los tratamientos con una misma dosis única de 2 m³ por pila de compost montada.

Una vez establecidas las pilas, se realizaron 2 volteos semanales el primer mes y posteriormente solo 1 volteo por semana hasta la finalización del ensayo. Para realizar estos volteos se utilizó un bulldozer o palagrúa.

3.Resultados

3.1 Caracterización química de los subproductos utilizados en el ensayo

3.1.1 Cachaza

La caracterización química de la cachaza utilizada para el proceso de compostaje se puede observar en la Tabla 10. Se referencian los promedios de dos muestras.

Tabla 10. Caracterización química de la cachaza

Elementos	Unidades	Muestra
Materia Orgánica		50.1
Carbono Orgánico Oxidable total	%	12.8
N-Total		0.26
Relación C/N	-----	49.2
P-Total		0.8
K		0.1
Humedad		20
Ca		0.41
Mg		0.13
Na		0.003
Mn	%	0.009
Zn		0.002
B		< 0.006
Al		0.11
Fe		0.25
Cenizas		2.1
Sílice		< 0.003
Cu	mg Kg ⁻¹	0.001
S-Total	mg Kg ⁻¹	0.02
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	1.008
CIC	cmol. Kg ⁻¹	26.1
pH	---	5.4

Fuente: Laboratorio Análisis ambiental, Ingeniería y laboratorio, 2012.

La caracterización química de la cachaza mostró datos similares a los obtenidos por otros autores. Los contenidos de nutrientes mayores N, P y K no superan la unidad y concuerdan con lo observado por Arbeláez (1992) y Zerega (1993). Los contenidos de materia orgánica concuerdan con los reportados por Zerega, 1993 quien reporta contenidos superiores al 50%, sin embargo el estudio de Arbeláez (1992) también reporta unos contenidos de materia orgánica más bajos, 33.5%. La relación C/N alta (49.2), coincide con la relación también amplia (31.98) reportada por Arbeláez (1992).

Estos cambios en la composición química de la cachaza son atribuibles a diversos factores relacionados con el tipo de proceso utilizado en la molienda, la variedad de caña, su grado de madurez, su porcentaje de humedad, el porcentaje de sacarosa del tallo, entre otros. La alta variabilidad en la composición química de este subproducto ya ha sido referenciada por autores como Arbeláez (1992); Zerega (1993) y Cifuentes, De León y Porres (2001).

3.1.2 Bagazo de caña

La caracterización química del bagazo utilizado para el proceso de compostaje se puede observar en la Tabla 11. Se referencian los promedios de dos muestras.

Los resultados obtenidos tienen valores muy similares a los obtenidos por Sánchez (2013) para casi todos los parámetros. Los contenidos de nitrógeno total, fósforo y potasio se mantienen por debajo de 0.8%. La humedad está cercana al 48% y los contenidos de Ca, Mg y Na se mantienen por debajo de la unidad. El pH de 5.0 concuerda también por el reportado (5.5) por este autor. Sin embargo, los valores de materia orgánica y carbón orgánico total, son diferentes de los reportados por Sánchez (2013). En este ensayo los valores para estas variables (45.8 y 25.6% respectivamente), fueron muchos más bajos que los reportados por el autor (73.3 y 42.5% respectivamente).

Esta variabilidad puede ser también explicada por los mismos factores relacionados para la cachaza.

3.1.3 Vinaza

La caracterización química de la vinaza utilizada para el proceso de compostaje se puede observar en la Tabla 12.

Aunque diferentes autores, entre ellos García y Rojas (2006); Irizarry (2006); Quintero (2008) y Narváez (2008), referencian la alta variabilidad en la composición de las vinazas, la caracterización química de la vinaza utilizada en el ensayo fue muy diferente a lo mostrada por otros autores.

Tabla 11. Caracterización química del bagazo

Elementos	Unidades	Muestra
Materia Orgánica	%	45.8
Carbono Orgánico Oxidable total	%	25.6
N-Total	%	0.13
Relación C/N	-----	196.9
P-Total	%	0.1
K	%	0.03
Humedad	%	47.1
Ca	%	0.03
Mg	%	0.03
Na	%	0.002
Mn	%	0.002
Zn	%	0.0005
B	%	< 0.006
Al	%	0.04
Fe	%	0.07
Cenizas	%	7.1
Sílice	%	< 0.003
Cu	mg Kg ⁻¹	0.0001
S-Total	mg Kg ⁻¹	0.02
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	0.148
CIC	cmol. Kg ⁻¹	17.39
pH	----	5.0

Fuente: Laboratorio Ingeniería y laboratorio, 2012.

Los contenidos de materia orgánica y carbono orgánico (3.6 y 2.1% respectivamente) están bajo comparados con los reportados por Quintero (2008) y Gallego, Muñoz y Hernández (2012). Sin embargo, los valores de nitrógeno total, por debajo de la unidad, si concuerdan con lo reportado por estos autores. La relación C/N y los valores de densidad y pH también se encuentran dentro del rango reportado por estos autores.

Tabla 12. Caracterización química vinaza

Elementos	Unidades	
Materia Orgánica	%	3.6
Carbono Orgánico Oxidable total	%	2.1
N Total	%	0.17
Relación C/N	-----	12.35
P ₂ O ₅	kg m ⁻³	21.31
K ₂ O	kg m ⁻³	2.65
CaO	kg m ⁻³	0.75
MgO	kg m ⁻³	0.63
Na	kg m ⁻³	0.28
SO ₄ ⁻²	kg m ⁻³	0.0001
B	mg L ⁻¹	0.5
Cu	mg L ⁻¹	0.5
Fe	mg L ⁻¹	3.0
Mn	mg L ⁻¹	2.0
Zn	mg L ⁻¹	3.0
Al	%	0.001
Sílice	%	0.023
Cenizas	%	0.2
Densidad. 20 °C.	kg m ⁻³	1015
pH	----	4.0
Humedad	%	95.3
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	3.715
CIC	cmol. Kg ⁻¹	243.5

Fuente: Laboratorio Análisis ambiental, Ingeniería y laboratorio, 2012.

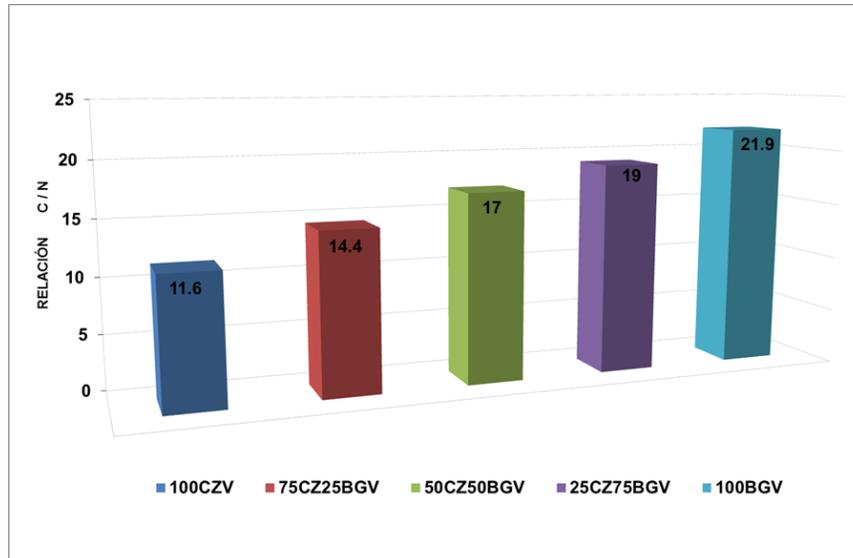
Los contenidos de fósforo por el contrario, están altos (21.3 kg m⁻³), y no concuerdan con lo reportado por los autores, valores por debajo de la unidad. Los contenidos de potasio, elemento que se encuentra en mayor concentración en las vinazas según autores como García y Rojas (2006); Irizarry (2006); Quintero (2008) y Gallego, Muñoz y Hernández (2012), entre otros, para la vinaza analizada mostró valores muy bajos (2.65 kg m⁻³). Generalmente según estos autores, los valores de este elemento y dependiendo de la concentración de la vinaza, se encuentran por encima de 6 kg m⁻³.

Los demás elementos restantes, desde el calcio hasta el zinc, se encuentran en valores mucho más bajos comparados con los reportados por los autores ya citados.

3.2 Determinación de la relación C/N óptima para el proceso de compostaje

Los resultados del análisis de varianza muestran que existe diferencia significativa en la relación C/N por efecto de los tratamientos; más se presentan diferencias altamente significativas por efecto de la época, no por la interacción tratamiento por época.

En la Figura 16 generada a partir de la prueba de comparación de medias, se observa que el tratamiento 100BGV presentó los mayores valores, las menores relaciones C/N se presentaron en el tratamiento 100CZV.

Figura 16. Relación C/N de acuerdo a tratamientos a los 90 días

De acuerdo a esto, se puede inferir que para un periodo de 90 días y bajo las condiciones evaluadas, la relación C/N inicial de cada una de las mezclas o tratamientos fue un factor determinante en la relación C/N final del compost producido. En otras palabras, las mezclas y cantidades de subproductos utilizados determinaron la relación C/N del producto final obtenido. Esto comportamiento concuerda con lo expresado por Costa (1991); Rynk and Colt (1997); USDA (2000); Labrador (2001) y NYC Department of Sanitation (2012).

Los valores mostrados por los tres tratamientos con las relaciones C/N más altas (21.9, 19 y 17 respectivamente) se consideran adecuados y están muy cercanos a los valores ideales para compost terminado reportados por autores como Hernández et al (2008) y Gordillo y Chávez (2010). Gordillo y Chávez (2010) en su trabajo de evaluación de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos industriales azucareros, asegura que la relación C/N óptima final del compost debe ser de 25. Por su parte Hernández et al (2008) al evaluar el aporte de nutrientes realizado al suelo por diferentes compost producido a partir de subproductos de la industria azucarera, encontraron que el compost con una relación C/N de 21.6 fue el que realizó

los mayores aportes de nutrientes e incrementos en los porcentajes de materia orgánica del suelo, después de una año de aplicaciones.

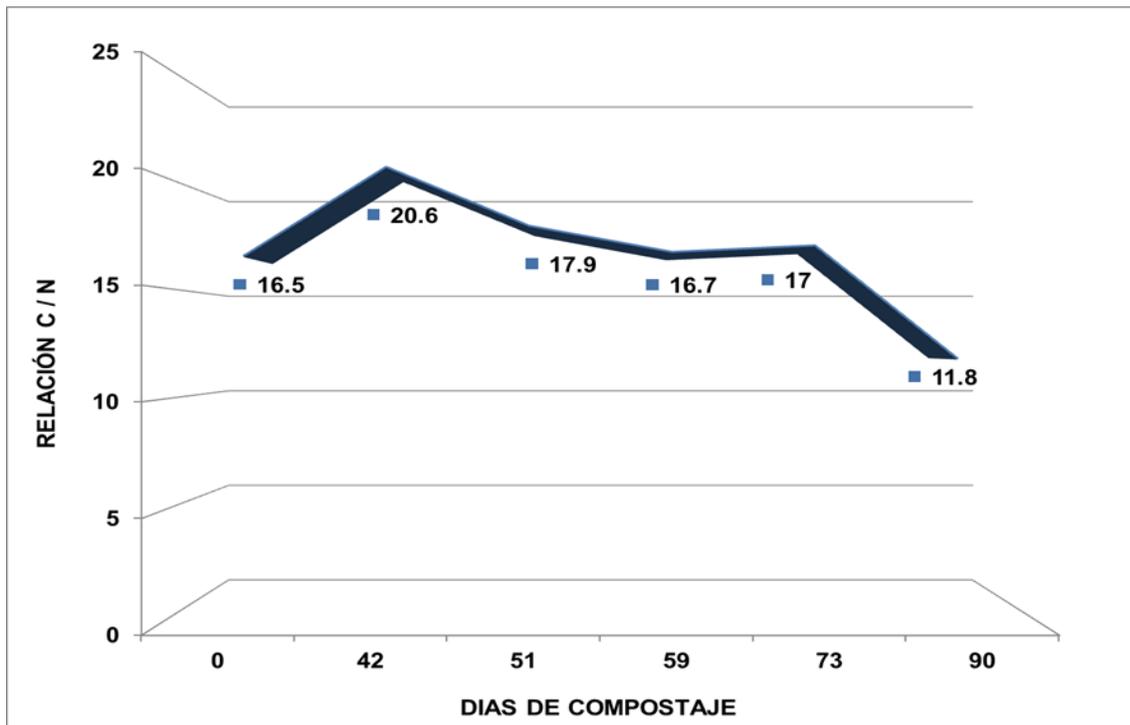
De igual modo, la tendencia creciente de las medias presentadas por los tratamientos, en donde 100CZV mostró los menores valores de relación C/N y 100BGV presentó los valores más altos, concuerdan con lo encontrado por Cifuentes, de León y Porres (2012). Estos autores evaluaron la dinámica de algunos parámetros de calidad en el proceso de compostaje de diferentes mezclas porcentuales de subproductos como bagazo y cachaza provenientes de la industria cañera en Guatemala. Ellos encontraron que al final del ensayo, el tratamiento compuesto por un 100% de bagazo sin cachaza presentó las relaciones C/N más altas mientras que el tratamiento compuesto por un 100% de cachaza sin bagazo presentó las relaciones C/N más bajas.

Esta tendencia mostrada se debe a la calidad del sustrato y específicamente a la relación C/N inicial del sustrato. Los tratamientos en donde se tiene solo bagazo, son tratamientos con abundantes materiales fibrosos ricos en carbono y por esto su relación C/N inicial de 196.6, según la Tabla 11. Por el contrario, en los tratamientos con solo cachaza, se tiene un menor contenido de carbono y por ende una relación C/N inicial más baja, 49.2 según Tabla 10. Como lo referencia autores como Rynk and Colt (1997); Coyne (1999); Labrador (2001) y NYC Department of Sanitation (2012), entre otros, las mezclas con relaciones C/N altas, al cabo de un determinado periodo de tiempo, van a tomar mucho más tiempo en estabilizarse y descomponerse, que mezclas con relaciones C/N más bajas. De acuerdo a esto, y para el mismo periodo de tiempo, las mezclas de solo bagazo terminaron con relaciones C/N más altas que las mezclas de solo cachaza.

De esta forma, utilizando el parámetro relación C/N como variable discriminante se podría seleccionar a los tratamientos con las relaciones C/N cercanas al rango de 20 a 25 (en este caso las más altas), estos serían entonces 100BGV, 25CZ75BGV y 50CZ50BGV respectivamente. Los tratamientos 100CZV y 75CZ25BGV no se recomendarían para el proceso de compostaje por mostrar unas relaciones C/N finales muy bajas. Adicionalmente a la relación C/N, los tratamientos se evaluaron también con respecto a su calidad final. Más adelante se analiza y discute si los tres tratamientos, anteriormente seleccionados, presentaron valores semejantes o diferentes para las demás variables evaluadas.

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas en la relación C/N de acuerdo a la época de muestreo. (Anexo B). En la figura 17, generada a partir de la prueba de comparación de medias se puede observar que la época 90 días mostró las menores relaciones mientras que la época 42 días presentó las relaciones C/N más altas a lo largo de todo el ensayo

Figura 17. Relación C/N de acuerdo a los tiempos de muestreo



Una menor relación C/N en el producto final es un indicador de calidad del compost. Por esto, se puede afirmar que bajo las condiciones evaluadas, las mejores relaciones C/N teniendo en cuenta todos los tratamientos, se presentaron a los 90 días. Entre los 51 y los 73 días del ensayo los tratamientos presentaron las mismas relaciones C/N y estas relaciones aún no eran las más bajas. En otras palabras, si se planteara el aprovechamiento de las pilas de compost antes de los 73 días de montadas, por ejemplo, se podría correr el riesgo de utilizar un compost que no ha alcanzado su proceso de madurez total y que no ha alcanzado su relación C/N óptima.

Por otra parte, analizando la dinámica de las relaciones C/N de los tratamientos evaluados, se puede comprobar que estos siguen una tendencia decreciente desde el montaje de las pilas con algunos picos, como en el día 42, en donde temporalmente se aumentan las relaciones. Esto concuerda con lo expresado por Fogiel (2003); USDA (2000); Labrador (2001) y Cifuentes, de León y Porres (2012) entre otros, quienes afirman que las relaciones C/N inician con un valor alto y van disminuyendo a medida que transcurre el proceso de degradación de los materiales en las pilas de compost.

La disminución de esta relación C/N a través del tiempo se puede entender fácilmente si se toma el proceso de compostaje como un sistema, en cual hay unas entradas de subproductos o sustratos y unas salidas de productos. Los microorganismos asociados son fundamentales para el proceso de compostaje. Sylvia et al (2005) afirma que “los microorganismos pueden ser vistos como la fuerza generadora o el motor que sustancialmente transforma las entradas (sustrato, agua, oxígeno) en productos (principalmente compost, nuevas células microbiales, dióxido de carbono y calor). Además del compost como producto final, gran parte de la biomasa ingresada como sustratos, se pierde en forma de calor o en forma de gases como el dióxido de carbono y el amoníaco.

Los picos en los cuales se aumentan las relaciones C/N pueden ser originados por una disminución en los contenidos de nitrógeno de la pilas. Estas bajas de nitrógeno pueden ser debidas a un aumento de la inmovilización por parte de los microorganismos asociados ocasionadas probablemente por condiciones temporales de anaerobiosis; las cuales hacen que los microorganismos sean menos eficientes en la producción de energía.

3.3 Evaluación de variables en los diferentes estados de maduración del compost

3.3.1 De acuerdo a los tratamientos

Teniendo en cuenta todos los muestreos del ensayo, el análisis de varianza presentó diferentes comportamientos estadísticos de acuerdo con las variables de respuesta evaluada.

De este modo, el pH de la pasta saturada, el porcentaje de humedad, el porcentaje de cenizas y los contenidos de Potasio, Magnesio, Hierro y Cobre no presentaron diferencia significativa entre tratamientos. Los contenidos de potasio y cobre aunque no presentaron diferencia significativa entre tratamientos, aún después de transformados los datos, presentaron letras diferentes en los agrupamientos de las pruebas de promedios. Por esto, en la tabla aparecen con letras diferentes. Tabla 13.

La CE presentó diferencia estadísticamente significativa, mientras que los porcentajes de materia orgánica, la retención de humedad y los contenidos de Carbono orgánico, Nitrógeno total, Fósforo, Calcio, Manganeso y Zinc presentaron diferencias altamente significativas ($F = <0.01$) con respecto a los tratamientos evaluados. Anexo B.

Con respecto a las variables CE, porcentaje de materia orgánica y los contenidos de Manganeso y Zinc, lo encontrado en este ensayo no concuerda con lo reportado por Cifuentes, de León y Porres (2001). Estos autores no encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, al evaluar diferentes mezclas de cachaza y bagazo utilizado en la mezcla inicial.

Sin embargo, al igual que en este ensayo, los anteriores autores reportaron diferencias estadísticamente significativas para los contenidos de Nitrógeno total, Fósforo y Calcio y no encontraron tampoco diferencia significativa para el valor de pH y los contenidos de Potasio, Magnesio y Cobre.

Las diferencias encontradas entre los resultados de los dos ensayos podrían deberse a la utilización de vinaza y a la duración del experimento. En el caso de Cifuentes, de León y

Porres (2001) los autores no utilizaron vinaza en las mezclas y llevaron las lecturas hasta un periodo de 120 días.

Tabla 13. Resumen diferencias estadísticas de las variables de respuesta entre tratamientos para todo el periodo del ensayo (medias entre paréntesis)

FUENTE VAR.	VARIABLES DE RESPUESTA															
	pH Past a	CE	Hum.	Cen.	M Org	COOT	N - Tota	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Retenc
100CZV	a (7.3)	a (7.7)	a (36.7)	a (32.9)	a (30.2)	a (11.5)	a (1.0)	a (2.5)	a (0.7)	a (2.0)	a (0.5)	a (0.9)	a (0.05)	a (0.00)	a (0.01)	a (113.7)
75CZ25 BGV	a (7.1)	a (8.0)	a (37.5)	a (33.4)	a (29.0)	a (10.9)	b (0.7)	b (1.3)	a (0.8)	b (1.3)	a (0.4)	a (0.9)	b (0.04)	ab (0.00)	b (0.00)	a (112.7)
50CZ50 BGV	a (7.1)	ab (5.4)	a (43.4)	a (28.4)	a (28.1)	a (11.2)	bc (0.6)	b (1.3)	ab (0.6)	b (1.3)	a (0.4)	a (0.8)	bc (0.03)	ab (0.00)	bc (0.00)	a (109.3)
25CZ75 BGV	a (7.2)	ab (6.4)	a (44.3)	a (27.6)	a (27.9)	a (10.7)	c (0.6)	c (0.9)	ab (0.6)	bc (1.1)	a (0.4)	a (0.7)	c (0.03)	b (0.00)	cd (0.00)	a (112.1)
100BG V	a (7.1)	b (4.0)	a (36.4)	a (43.2)	b (20.3)	b (6.6)	d (0.3)	d (0.3)	b (0.4)	c (0.8)	a (0.4)	a (1.1)	c (0.02)	ab (0.00)	d (0.00)	b (83.0)

De igual forma y respecto a los contenidos de Nitrógeno total, lo encontrado en este ensayo concuerda con lo reportado por Satizha y Devarajan (2007). Estos autores evaluando la calidad del compost en diferentes mezclas de cachaza, bagazo y otros aditivos orgánicos e inorgánicos en un ingenio azucarero de la India, encontraron también diferencias significativas entre los tratamientos.

Analizando solamente las variables de respuesta que presentaron una diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos, podemos observar que el tratamiento que con los mejores contenidos de nutrientes es 100CZV, mientras que el tratamiento con el contenido de nutrientes más bajo corresponde a 100BGV.

Se pudo observar que el contenido de nutrientes en el compost finalizado, mostró una tendencia decreciente directamente proporcional a los contenidos porcentuales de cachaza en las mezclas iniciales. De este modo, los restantes tres tratamientos;

75CZ25BGV, 50CZ50BGV y 25CZ75BGV, respectivamente, se ubicaron en la mitad de la tabla con contenidos medios de todas las variables evacuadas. En términos generales, podría afirmarse que el contenido de nutrientes totales tiende a ser mayor en las mezclas iniciales en donde se tiene un menor contenido de bagazo y un mayor contenido de cachaza.

Esta misma tendencia en el comportamiento de los nutrientes en el compost finalizado es reportada por el trabajo de Cifuentes, de León y Porres (2001).

Sin embargo, analizando la variable CE se observa que así como la utilización de una mayor proporción de cachaza en los tratamientos aumenta los contenidos de nutrientes, aumenta también la variable CE, efecto indeseado. Esto es debido a la composición química de este subproducto, el cual presenta un mayor contenido de cationes como Ca, Mg, Na y K en comparación con el bagazo. Además, la cachaza presenta una CE 10 veces mayor (1.0) que el bagazo (0.1). Tablas 10 y 11.

De esta forma, los tres tratamientos con los contenidos más altos de nutrientes serían en su orden: 100CZV, 75CZ25BGV y 50CZ50BGV. Sin embargo, y de acuerdo a lo discutido ya en el acápite Relación C/N óptima del proceso de compostaje, los tratamientos 100CZV y 75CZ25BGV no se recomendarían para el proceso de compostaje por mostrar unas relaciones C/N finales muy bajas. Adicionalmente, estos dos tratamientos muestran unos valores altos de CE, como se acabó de discutir. Tabla 13.

Quedando así, solamente el tratamiento 50CZ50BGV como el mejor tratamiento, al tener una adecuada relación C/N final, unos contenidos de nutrientes aceptables y la menor CE de los tres tratamientos discutidos

3.3.2 De acuerdo con las épocas de muestreo

Analizando las variables estudiadas con respecto a los diferentes días de muestreo, para determinar su dinámica en el tiempo del ensayo, se encontraron diferencias altamente significativas; ($F = <.0001$) para todas ellas. Anexo B. Tabla 14.

Las variables fueron analizadas no solamente con base en su mejor valor dentro del agrupamiento, asignado con la letra (a), sino que, se analizó también en cuál de las épocas de muestreo estas variable tenía un valor más cercano a los valores estándar referenciados por la literatura.

A excepción de las variables pH de pasta saturada, porcentaje de humedad, materia orgánica y retención de humedad, las demás variables evaluadas mostraron una tendencia creciente en función de los días de compostaje. En otras palabras, los elementos tienden a aumentar su contenido o concentrarse en el compost a medida que transcurren los procesos de degradación de los compuestos orgánicos presentes en los subproductos mezclados inicialmente. Figura 18.

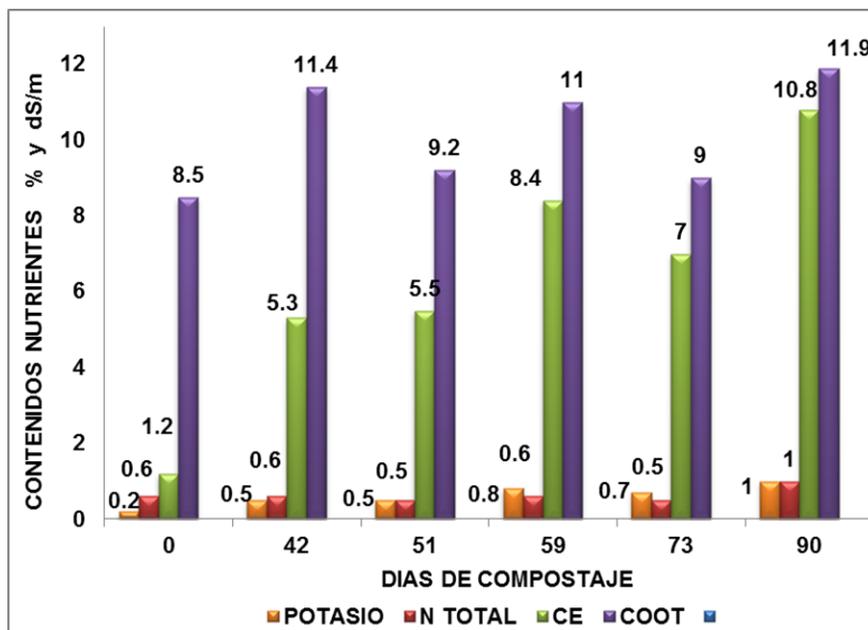
Al respecto Rynk (1992) afirma que “el proceso de compostaje retiene la mayoría de los nutrientes suministrados por los materiales crudos y los almacena en la forma de compuestos orgánicos más estables. Esto reduce la disponibilidad inmediata de nutrientes para las plantas pero también permite a estos ser liberados con una tasa más gradual”.

Para la totalidad de los datos evaluados, se presentaron sin embargo algunos pocos datos outliers en algunas variables para algunas épocas de muestreo. Estos datos pueden ser atribuidos a errores en el momento del muestreo.

Esta tendencia creciente de la mayoría de los nutrientes presentes en el compost a medida que transcurre el tiempo, concuerda con lo reportado por los trabajos de Rynk (1992) y Cifuentes, de León y Porres (2001).

Tabla 14. Resumen diferencias estadísticas de las variables de respuesta entre las épocas de muestreo (medias entre paréntesis)

FUENTE VAR.	VARIABLES DE RESPUESTA															
	pH Past a	CE	Hum.	Can.	M Org	COOT	N - Tota	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Retenc
0 Días	b (7.3)	D (1.2)	a (51.2)	d (22.0)	b (26.7)	b (8.5)	bc (0.6)	c (1.0)	d (0.2)	bc (1.2)	e (0.2)	d (0.6)	d (0.02)	c (0.00)	d (0.00)	a (141.9)
42 Días	c (7.0)	c (5.3)	bc (40.9)	c (28.4)	a (30.5)	a (11.4)	b (0.6)	d (0.8)	c (0.5)	ab (1.4)	d (0.3)	c (0.7)	cd (0.03)	b (0.00)	c (0.00)	b (118.7)
51 Días	c (7.1)	c (5.5)	bc (41.5)	bc (32.4)	b (26.0)	b (9.2)	c (0.5)	d (0.8)	c (0.5)	b (1.2)	c (0.4)	bc (0.9)	bcd (0.03)	b (0.00)	bc (0.00)	cd (90.8)
59 Días	ab (7.3)	ab (8.4)	c (35.5)	b (33.7)	a (30.6)	a (11.0)	b (0.6)	a (2.5)	ab (0.8)	ab (1.3)	b (0.5)	bc (0.8)	b (0.03)	b (0.00)	b (0.00)	b (109.9)
73 Días	a (7.4)	b (7.0)	ab (46.4)	b (33.2)	c (20.3)	b (9.0)	c (0.5)	b (1.4)	b (0.7)	c (0.9)	cd (0.4)	b (0.9)	bc (0.03)	b (0.00)	bc (0.00)	d (82.2)
90 Días	d (6.8)	a (10.8)	d (21.4)	a (50.0)	ab (28.4)	a (11.9)	a (1.0)	b (1.1)	a (1.0)	a (1.5)	a (0.2)	a (1.5)	a (0.05)	a (0.00)	a (0.00)	c (92.7)

Figura 18. Dinámica de algunas variables durante el ensayo

Para el caso del pH de la pasta saturada, que mostró una tendencia decreciente en el tiempo del compostaje, los resultados de este ensayo concuerdan con lo reportado por Rynk (1992); USDA (2000); Solans, Alonso y Gadea (2008) y NYC Department of Sanitation (2012), entre otros. De igual modo, todas las épocas de muestreo presentaron valores cercanos a la neutralidad que los ubican dentro del rango aceptable para un compost, de acuerdo a estos mismos autores.

En el caso del porcentaje de humedad se observó también una tendencia decreciente a medida que transcurrió el proceso de compostaje. Esto concuerda con lo reportado por el trabajo de Cifuentes, de León y Porres (2001). Las épocas en las cuales el producto terminado mostró la humedad más cercana a la ideal, hasta un 35% según ICONTEC (2004), fueron los 90 y 59 días después de montar las pilas, respectivamente. En el caso de la humedad, entre menor sea su porcentaje, mejor es la calidad del compost. Salamanca (2012) relaciona compost comerciales con contenidos de humedad de máximo 15%.

Los porcentajes de materia orgánica disminuyeron a medida que transcurrió el tiempo en este ensayo. El mismo comportamiento tuvo el COOT. Esta disminución de la materia orgánica es generada por las pérdidas de elementos desde el sistema de la pila de compost, y estas pérdidas pueden darse ya sea por lixiviación de compuestos, por volatilización de Amoniac y Dióxido de carbono y/o por inmovilización por parte de los microorganismos asociados al proceso de compostaje.

Aunque para estas dos variables se presentaron algunos outliers en los datos, se puede observar su tendencia decreciente. Esta tendencia decreciente también está referenciada por Satisha y Devarajan (2007) y Raj y Antil (2011).

Al respecto Bernal, Albuquerque y Moral (2009) también afirman que “durante la fase activa de los procesos de compostaje el COOT disminuye en los materiales debido a la descomposición de la materia orgánica gracias a los microorganismos. Estas pérdidas de materia orgánica reducen el peso de la pila y disminuyen la relación C/N. La tasa de degradación de la materia orgánica disminuye gradualmente a medida que el compostaje avanza debido a la reducción en las fuentes de Carbono disponible. Las reacciones de síntesis de nuevos complejos y compuestos orgánicos polimerizados (Humificación)

prevalecen sobre la mineralización durante la fase de maduración de la pila de compost. Este proceso genera un producto final estabilizado el cual actúa como un abono de lenta liberación para propósitos agronómicos”.

Los porcentajes de materia orgánica mostrados por el compost obtenido en este ensayo se encuentran dentro de un rango aceptable referenciado por algunos autores. Con respecto a los valores finales de materia orgánica en el compost se tiene una amplia variabilidad, básicamente debido a los sustratos utilizados y a los métodos empleados en la elaboración. De este modo, Peláez y Restrepo (2004) cita valores altos (47.2%), Sánchez (2013) referencia valores de 26.4% y Altamirano y Cabrera (2006) referencia valores de 14.9 y 23.1%.

Los valores de COOT del compost obtenido al final de este ensayo se encuentran muy cerca a los recomendados por ICONTEC (2004), a su vez, Salamanca (2012) reporta compost de tipo comercial con valores similares a los obtenidos en este trabajo.

La capacidad de retención de humedad disminuyó a medida que avanzó el proceso de compostaje en el ensayo. Los valores mostrados por el compost de este ensayo se encuentran dentro los valores adecuados referenciados por algunos autores. Salamanca (2012) reporta valores en compost comerciales de 75 y 102% mientras que Sánchez (2013) reporta valores en compost comerciales de 60 y 97%.

El porcentaje de cenizas se incrementó con el tiempo a medida que el proceso de compostaje transcurrió. Este comportamiento concuerda con lo encontrado por Cifuentes, de León y Porres (2011) y Suzuki (2004). Su porcentaje, al final del proceso de compostaje de 90 días, se encuentra dentro del rango adecuado citado por diferentes autores. Salamanca (2012) referencia valores de cenizas del 41 y 60% en compost comerciales. Altamirano y Cabrera (2006) citan valores de 20 y 60%, mientras que Peláez y Restrepo (2004) referencian valores de 47.5%.

La CE aumento a medida que transcurrió el experimento. Esta tendencia concuerda con la referenciado por Suzuki et al (2004). En este trabajo los autores evaluaron algunas variables químicas durante el proceso de compostaje de viruta de madera, residuos de

poda y estiércoles. Esta tendencia es debida a los procesos de degradación y mineralización de los materiales orgánicos, que a medida que transcurre el proceso, van liberando compuestos (Cationes como Ca, Mg, K, Na y aniones como Bicarbonatos, Cl, Sulfatos, Carbonatos y Nitratos) responsables de la salinidad en la solución del compost. A medida que el proceso de compostaje avanza, y si las pérdidas no son excesivas, estos elementos se van concentrando en la solución del compost aumentando los valores de CE.

Los valores de CE encontrados en el compost del ensayo podrían parecer altos a simple vista, como se discutió con anterioridad. También, los autores reportan una amplia variabilidad para este parámetro. Suzuki et al (2004) anota valores que están entre un rango de 0.2 a 6.8 dSm-1. Por su parte, Campitelli y Ceppi (2008) aseguran que el valor máximo de CE para un compost debe ser de 4 dSm-1. Mientras que Christian, Evanylo and Pease (2009) afirman que si el compost se va utilizar como un mejorador de suelos y no como un sustrato único para plantas de vivero, puede tener un valor máximo de 20 dSm-1. Tabla 2.

Si se tiene esto en cuenta, el compost obtenido en este ensayo por el mejor tratamiento al cabo de los 90 días del proceso, muestra una CE (5.4 dSm-1) que aunque alta, permite que este sea usado en las labores de campo regulares del cultivo de caña como acondicionador de suelos.

Los contenidos de nitrógeno total, como ya se anotó para los otros nutrientes, presentaron una tendencia creciente desde el inicio del ensayo. Esto concuerda con lo reportado con Bernal, Albuquerque y Moral (2009). Al respecto estos autores afirman que “generalmente, los contenidos de nitrógeno total se incrementan durante el compostaje debido a un efecto de concentración”.

Esta tendencia creciente en el nitrógeno total a medida que transcurre el proceso de compostaje también fue reportada por Suzuki et al (2004) y Campitelli y Ceppi (2008). Los contenidos de nitrógeno encontrados en este ensayo se encuentran dentro del rango adecuado por diferentes autores. Altamirano y Cabrera (2006) citan valores en el rango de 0.6 y 1.0%. Cifuentes, de León y Porres (2011) reportan rangos entre el 1 y el 4%. Por su parte Peláez y Restrepo (2004) referencian valores de 2.6%.

Los contenidos de fósforo también aumentaron a medida que transcurrió el proceso. Sus valores también se encuentran dentro del rango reportado por algunos autores. Peláez y Restrepo (2004) anotan valores de 1.44% mientras que Altamirano y Cabrera (2006) reportan valores entre el 0.6 y el 0.9%. Por su parte, Suzuki et al (2004) relacionan valores de 0.8% en su trabajo.

Respecto al potasio su tendencia fue también creciente a medida que se desarrolló en ensayo. Sus valores también se encuentran dentro del rango reportado por algunos autores. Suzuki et al (2004) cita valores de 1.6% mientras que Peláez y Restrepo (2004) relacionan valores de 1.6%. Por su parte Altamirano y Cabrera (2006) reporta valores en el rango entre 1.8 y 1.5%

Los contenidos de calcio mostrados por el compost son bajos comparados con lo referenciado por la literatura. Peláez y Restrepo (2004) anotan valores de 2.6% mientras que parte Altamirano y Cabrera (2006) referencian valores comprendidos entre el 4.0 y 5.0%. Por s parte Suzuki et al (2004) reportan valores del 6%. Esto puede ser debido al bajo aporte de este elemento proporcionado por la cachaza y la vinaza, esta última, como ya se discutió antes, presentó valores muy bajos de este elemento comparados con los referenciados por la literatura. También como ya se recomendó antes, hasta no conseguir una vinaza con una concentración más alta de nutrientes o de mayor concentración, se debería pensar entonces en aumentar las dosis de estas utilizadas para el proceso de compostaje. Se recomiendan realizar ensayos que evalúen la aplicación de 4 y 6 m³ de vinaza por pila de compost de 20 toneladas; en este ensayo se utilizó una dosis de 2 m³ de vinaza por pila.

Los contenidos de magnesio también se encuentran por debajo de lo referenciado por la literatura para algunos tipos de compost. Peláez y Restrepo (2004) referencian valores de 0.5% mientras que Altamirano y Cabrera (2006) anotan valores entre 1.5 y 1.6%. Esta disminución en el contenido de este elemento es debido también a la deficiencia de este en los subproductos utilizados, como se acaba de explicar para el caso del calcio.

De esta forma, analizando la tabla con la dinámica de las variables a través de los diferentes tiempos de muestreo evaluados, se puede comprobar que la calidad y los

contenidos de nutrientes en el compost son mayores a los 90 días. Para todos los tratamientos evaluados, la calidad del compost al final de los 90 de compostaje supera ampliamente la calidad del compost con un menor tiempo de degradación.

3.4 Verificación de calidad del producto final de acuerdo a la Norma Icontec

La comparación de la calidad final del compost en cada uno de las mezclas respecto a la NTC 5167 de 2004, se muestra en la Tabla 15.

Debido a diferentes limitaciones relacionadas con los recursos disponibles para el desarrollo de este proyecto, algunas variables incluidas en la norma ICONTEC 5167 para evaluación de calidad de compost en Colombia, no pudieron llevarse a cabo.

Analizando las variables que sí pudieron caracterizarse se observa que casi en todos los tratamientos se presentan una tendencia general hacia el no cumplimiento de los parámetros de la norma.

Por ejemplo, el contenido de humedad en todos los tratamientos está demasiado alto teniendo en cuenta que el porcentaje permitido por la norma es del 35% y algunas calidades comerciales de compost presentan solamente el 15% de humedad, según Salamanca, (2012). Se recomienda por esto, realizar tratamientos adicionales una vez se tenga el compost terminado para disminuir su contenido de humedad. La solarización bajo condiciones controladas sería una alternativa conveniente para deshidratar y quitar humedad al producto final antes de ser utilizado en campo.

Para el caso de los contenidos de nutrientes mayores, el nitrógeno total y el fósforo, estos presentaron contenidos aceptables cercanos a la unidad en la mayoría de tratamientos, como ya se discutió al comparar contra otras fuentes. En cambio, los contenidos de potasio están bajos (por debajo de la unidad) en todos los tratamientos; comparados contra esta norma.

Tabla 15. Verificación calidad de los tratamientos de acuerdo a la norma ICONTEC 5167

Parámetro a caracterizar en base seca	Límites permisibles	Tratamientos				
		100CZV	75CZ25BGV	50CZ50BGV	25CZ75BGV	100BGV
Cenizas	Máximo 60%	32.9 Cumple	33.4 Cumple	28.4 Cumple	27.6 Cumple	43.2 Cumple
Humedad Para materiales de origen vegetal	Máximo 35%	36.7 No Cumple	37.5 No Cumple	43.4 No Cumple	44.3 No Cumple	36.4 No Cumple
Carbono orgánico oxidable total	Mínimo 15%	11.5 No cumple	10.9 No cumple	11.2 No cumple	10.7 No cumple	6.6 No cumple
N total	Declararlos si cada uno es mayor al 1%.	1.0 Se declara	0.7 No se declara	0.6 No se declara	0.6 No se declara	0.3 No se declara
P ₂ O ₅ total	Declararlos si cada uno es mayor al 1%.	2.5 Se declara	1.3 Se declara	1.3 Se declara	0.9 No se declara	0.3 No se declara
K ₂ O total	Declararlos si cada uno es mayor al 1%.	0.7 No se declara	0.8 No se declara	0.6 No se declara	0.6 No se declara	0.4 No se declara
Relación C/N	Declararía	11.6 Aceptable	14.4 Aceptable	17.0 Aceptable	19.0 Aceptable	21.9 Alta
CIC	Mínimo 30 meq/100 g suelo	No se realizó.				
Porcentaje de saturación	Mínimo su propio peso Muestra 100 g	113.7 Cumple	112.7 Cumple	109.3 Cumple	112.1 Cumple	83.0 No cumple
pH	Mayor de 4 y menor de 9	7.3 Cumple	7.1 Cumple	7.1 Cumple	7.2 Cumple	7.1 Cumple
Densidad	Máxima 0.6 g/cm ³	No se realizó.				

La relación C/N es aceptable para todos los tratamientos a excepción de 100BGV, el cual presenta una relación por encima de 20. El porcentaje de saturación de humedad tuvo el mismo comportamiento que la relación C/N. El pH de la pasta estuvo dentro de los rangos aceptables para todos los tratamientos evaluados.

3.5 Análisis de correlaciones

Los coeficientes de correlación (r) fueron determinados entre los 17 parámetros evaluados para los diferentes tiempos de muestreo del ensayo. Con base en la tabla de correlaciones de Pearson (Anexo A), se elaboró un tabla resumen con la matriz de correlaciones. Tabla 16.

La variable conductividad eléctrica, al expresar de manera indirecta los contenidos de la mayoría de elementos, fue la que estuvo mejor correlacionada. Por esto, esta variable podría ser usada para evaluar la calidad y los contenidos de nutrientes en el compost final.

Campitelli y Ceppi, (2008) también recomiendan la utilización del parámetro conductividad eléctrica como un índice que puede sugerir la calidad final del compost. Estos autores, al evaluar diferentes parámetros químicos, físicos y biológicos que pudieran servir como indicadores o índices de la calidad final de diferentes tipos de compost, encontraron que la variable conductividad eléctrica estuvo altamente correlacionada con otros parámetros como pH, carbón soluble en agua y nitrógeno total, entre otros.

Otras variables como el porcentaje de humedad, los contenidos de zinc y la relación C/N también estuvieron altamente correlacionados, cada uno con otros 13 parámetros. Estas variables también podrían ser consideradas adecuadas para evaluar la madurez y algunos parámetros de calidad final del compost.

Contrario a lo que se pudiera esperar, la relación C/N no estuvo significativamente correlacionada con el porcentaje de materia orgánica, los contenidos de carbón orgánico, ni el porcentaje de saturación. La ausencia de correlación entre la relación C/N y los contenidos de carbón orgánico no concuerda con lo reportado por Campitelli y Ceppi (2008), pues estos autores encontraron una correlación positiva entre estas dos variables al estudiar el proceso de compostaje sobre diferentes tipos de materiales. Esto podría deberse a que la selección del método, de digestión ácida de Walkley Black utilizado para evaluar el carbón orgánico oxidable total en este ensayo, no sería la más adecuada para cuantificar esta variable.

Tabla 16. Matriz de correlaciones entre los parámetros de calidad evaluados en el ensayo

	pH	Cond.	Hum.	Ceniz.	MO	COOT	N total	P2O5	K2O	CaO	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	C/N	Sat.
pH Pasta	I	-0.250 **	0.314 **	NS	-0.297 **	-0.323 **	-0.203 **	NS	-0.270 **	NS	-0.306 **	-0.212 *	NS	-0.181 *	NS	-0.240 **	NS
Conduct.		I	-0.389 **	0.242 **	0.292 **	0.403 **	0.458 **	0.193 **	0.937 **	NS	0.589 **	0.198 **	0.341 **	0.417 **	0.339 **	-0.234 *	-0.27 *
Humedad			I	-0.872 **	-0.253 **	-0.228 **	-0.537 **	-0.243 **	-0.540 **	-0.401 **	-0.895 **	-0.812 **	-0.719 **	-0.828 **	-0.667 **	0.430 **	NS
Cenizas				I	-0.250 **	-0.191 **	0.210 **	NS	0.351 **	NS	0.750 **	0.912 **	0.553 **	0.764 **	0.493 **	-0.442 **	-0.494 **
MO					I	0.830 **	0.648 **	0.429 **	0.375 **	0.458 **	0.288 **	-0.194 **	0.329 **	NS	0.348 **	NS	0.575 **
COOT						I	0.635 **	0.448 **	0.501 **	0.366 **	0.364 **	NS	0.353 **	0.184 **	0.375 **	NS	0.488 **
N total							I	0.529 **	0.518 **	0.676 **	0.621 **	0.257 **	0.828 **	0.594 **	0.820 **	-0.537 **	0.302 **
P2O5								I	0.282 **	0.429 **	0.342 **	NS	0.503 **	0.386 **	0.518 **	-0.275 **	0.274 **
K2O									I	NS	0.724 **	0.322 **	0.441 **	0.524 **	0.433 **	-0.248 **	NS
CaO										I	0.388 **	NS	0.611 **	0.391 **	0.616 **	-0.447 **	0.252 **
Mg											I	0.756 **	0.762 **	0.818 **	0.734 **	-0.426 **	-0.215 **
Fe												I	0.649 **	0.799 **	0.297 **	-0.413 **	-0.440 **
Mn													I	0.848 **	0.949 **	-0.598 **	NS
Cu														I	0.832 **	-0.533 **	-0.262 **
Zn															I	-0.567 **	NS
C/N																I	NS
Sat.																	I

NS = No significativa.

* Significativa a $p < 0.05$ **Significativa a $p < 0.01$

4. Discusión

Luego de analizar de forma independiente los valores de las relaciones C/N de cada uno de los tratamientos o mezclas iniciales, se comprobó que bajo las condiciones de este ensayo, estas relaciones C/N de las mezclas sirven como un buen indicador o pronóstico de las relaciones C/N del compost terminado, reafirmando lo referenciado por diversos autores y comprobando la hipótesis de este ensayo.

Las relaciones C/N evaluadas al final del proceso de compostaje de 90 días, mostraron que los mejores tratamientos, con valores más cercanos a 20 (rango recomendado como óptimo por varios autores) fueron 100BGV, 25CZ75BGV y 50CZ50BGV, respectivamente.

Cuando la relación C/N se analizó con base en los tiempos de muestreo y no con base en los tratamientos, iniciales de las mezclas también mostraron un cambio con respecto a las relaciones C/N del compost terminado. Efectivamente se notó la disminución entre las relaciones iniciales y finales referenciado por diversos autores y, se expresó la habilidad del compostaje como un proceso práctico y conveniente de estabilización de materiales orgánicos.

De otra forma, analizando ya los tratamientos con respecto a la dinámica de otras variables químicas evaluadas en el compost terminado, se pudo observar que efectivamente si hubo diferencias entre tratamientos al final del proceso de compostaje. El tratamiento que mostró los contenidos más altos de nutrientes fue 100CZV, mientras que a su vez, el tratamiento que exhibió la calidad más baja de nutrientes fue 100BGV. Tabla 13.

Sin embargo, aunque el tratamiento 100CZV presentó los mayores contenidos para todos nutrientes evaluados, a su vez fue el que mostró las menores relaciones C/N iniciales y finales y la CE más alta. Por esto, este tratamiento no se podría recomendar para los procesos de compostaje.

Si se utilizara este tratamiento en donde se compostó exclusivamente cachaza con vinaza, con relaciones C/N iniciales de 49.2 y relaciones finales de 11.6, aunque se tendrían buenos contenidos de nutrientes proporcionados por la cachaza, se favorecería la pérdida en exceso de compuestos nitrogenados de los subproductos a compostar. “Altas relaciones C/N pueden hacer el proceso de compostaje muy lento debido al exceso de sustratos degradables para los microorganismos, pero cuando se tienen relaciones C/N muy bajas, se presenta es un exceso de N por C degradable y el N inorgánico es producido en exceso y puede perderse ya sea por volatilización del Amoniaco o por lixiviación, desde la pila de compostaje”. Bernal, Albuquerque y Moral (2009).

De esta forma, y analizando las relaciones C/N, los contenidos de nutrientes y la CE del compost terminado, se observa entonces que el mejor tratamiento correspondería a 50CZ50BGV. Tabla 13. De acuerdo a esto, bajo las condiciones evaluadas, y al final de un periodo de compostaje de 90 días, el mejor tratamiento evaluado en este ensayo fue 50CZ50BGV.

Del mismo modo, al evaluar la dinámica de las variables con respecto a los tiempos de muestreo, se pudo comprobar que a los 90 días de compostaje se observó la mejor calidad y la máxima expresión de los contenidos de la mayoría de nutrientes. La mayoría de nutrientes se encontraron dentro del rango aceptable para un compost de buena calidad. La comparación de la calidad del compost obtenido en este ensayo (medias del mejor tratamiento en la mejor época de muestreo) contra dos calidades de compost referenciadas por Salamanca (2012) se puede observar en la Tabla 17.

Como se puede observar, la mayoría de las variables evaluadas se encuentran dentro de un rango similar a las calidades comerciales de compost. Solamente algunos elementos como el Potasio y el Calcio se encuentran un tanto bajos. Los contenidos de Manganeso, por el contrario, se encuentran altos.

Los bajos contenidos de Potasio, Calcio y Magnesio fueron originados por el escaso aporte de estos nutrientes a través de la vinaza utilizada, que como ya se discutió mostró valores muy bajos comparados con los valores referenciados por otros autores para este subproducto. Hasta que no se pueda disponer de otras vinazas más concentradas y con un contenido más alto de potasio para las labores de compostaje, se recomendaría entonces realizar futuros estudios en donde se evalúe la utilización de una dosis más alta a la utilizada en este ensayo, como por ejemplo 6 m³ de vinaza por pila de compost de 20 toneladas.

Se encontraron variables, como la conductividad eléctrica, la humedad, el contenido de zinc y la relación CN, que estuvieron altamente correlacionadas con otras variables evaluadas. Estas variables se podrían utilizar como unos indicadores útiles para predecir la dinámica del proceso de compostaje y la calidad del producto final.

Tabla 17. Comparación calidad compost obtenido contra calidades comerciales de compost de subproductos de la industria azucarera

Aponte Nutricional	Compost Provicom	Compost Biocane	Compost ensayo
Nitrógeno Total	1.0%	1.0%	1.3 %
P₂O₅	1.3 %	1.0 %	1.7 %
K₂O	2.5 %	2.6 %	1.0 %
CaO	3.5 %	3.7 %	1.9 %
MgO	1.3 %	1.1 %	0.8 %
S	1.0 %	1.3 %	No se realizó
Fe	1.4 %	1.3 %	1.3 %
Mn	350 ppm	450 ppm	700 ppm
Cu	80 ppm	35 ppm	67 ppm
Zn	90 ppm	80 ppm	160 ppm
Boro	17 ppm	20 ppm	No se realizó
Humedad máxima	30 %	15 %	21 %
Cenizas	41 %	60 %	47 %
COOT	15 %	10 %	12 %
pH	8.1	7.5	6.8
Densidad real	0.53 g cm ⁻³	0.70 g cm ⁻³	No se realizó
Saturación	102 %	75%	88 %
CIC	41 mee 100g	30 meq 100 g	No se realizó
Relación C/N	15	10	9
Materia Orgánica	No reporta	No reporta	31 %
Conductividad eléctrica	No reporta	No reporta	12.3

5. Conclusiones

El tiempo de compostaje que asegura una adecuada maduración y una máxima expresión de los contenidos de nutrientes en el compost terminado es de mínimo 90 días. Materiales que no han alcanzado este tiempo mínimo de compostaje pueden no estar aportando sus máximos contenidos nutricionales al compost.

El tratamiento que al final del ensayo presentó la mejor calidad y los mejores contenidos nutricionales fue el correspondiente a la mezcla de 50% de Cachaza y 50% de Bagazo, en proporción p/p, adicionada con 2 metros cúbicos de vinaza.

La variable que presentó mejores correlaciones con los otros parámetros evaluados fue la conductividad eléctrica. Otras variables con una alta correlación fue el porcentaje de humedad, los contenidos de zinc y la relación C/N. Estas variables se podrían utilizar como índices para predecir la calidad del producto final, con respecto a la mayoría de sus componentes.

A. Anexo: Datos variables utilizadas en correlaciones de Pearson.

Sistema SAS 00:06 Friday, January 2, 2013 1

Procedimiento CORR

17 Variables: PHP CE HDAD PCENZ MO CO NT P205 K20
 CAO MGO FE MN CU ZN CN SAT

Estadísticos simples

Variable	N	Media	Desviación típica	Suma	Mínimo	Máximo
PHP	119	7.21261	0.31955	858.30000	6.25000	7.80000
CE	119	6.35476	5.87589	756.21600	0.39800	38.60000
HDAD	119	39.68729	13.68145	4723	7.82100	68.11000
PCENZ	119	33.18095	13.67012	3949	2.52200	74.40100
MO	119	27.13169	6.90298	3229	10.68400	44.25700
CO	119	10.20152	3.48035	1214	2.20900	22.18400
NT	119	0.68916	0.31226	82.01000	0.19400	1.63800
P205	119	1.31757	1.19559	156.79100	0.08400	6.49800
K20	119	0.66218	0.44288	78.80000	0.07400	2.61300
CAO	119	1.31655	0.67410	156.67000	0.12000	4.05700
MGO	119	0.46629	0.18513	55.48900	0.04700	0.88200
FE	119	0.93068	0.40867	110.75100	0.08000	2.56100
MN	119	0.03739	0.01521	4.44900	0.00300	0.09200
CU	119	0.00445	0.00172	0.52900	0	0.00900
ZN	119	0.00867	0.00390	1.03200	0.00100	0.01900
CN	119	16.82292	8.36075	2002	7.94300	58.47800
SAT	119	106.20647	30.46877	12639	50.18200	177.48100

B. Anexo: Análisis de varianza de las variables evaluadas

Variable dependiente: pH Pasta saturada

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.00156387	0.00039097	1.64	0.2273
REPET	3	0.00120401	0.00040134	3.05	0.0338
TRAT*REPET	12	0.00324602	0.00027050	2.06	0.0306
DIAS	5	0.01599261	0.00319852	24.31	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.00315380	0.00015769	1.20	0.2802

Media = 7.21

C V = 1.25

R² = 0.72

Variable dependiente: Conductividad eléctrica

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.99740342	0.24935086	3.41	0.0441
REPET	3	0.42613909	0.14204636	3.98	0.0110
TRAT*REPET	12	0.90833689	0.07569474	2.12	0.0255
DIAS	5	7.00385036	1.40077007	39.20	<.0001
TRAT*DIAS	20	1.06771778	0.05338589	1.49	0.1094

Media = 6.35

C V = 25.38

R² = 0.79

Variable dependiente: Humedad

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.20052116	0.05013029	0.84	0.5251
REPET	3	0.29300069	0.09766690	10.61	<.0001
TRAT*REPET	12	0.69552873	0.05796073	6.30	<.0001
DIAS	5	1.75454252	0.35090850	38.13	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.08091250	0.00404562	0.44	0.9794

Media = 39.68

C V = 6.07

R² = 0.81

Variable dependiente: Porcentaje de cenizas

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.36814346	0.09203587	1.23	0.3505
REPET	3	0.18053350	0.06017783	3.94	0.0115
TRAT*REPET	12	0.86391182	0.07199265	4.72	<.0001
DIAS	5	1.59773394	0.31954679	20.94	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.13921475	0.00696074	0.46	0.9746

Media = 33.18

C V = 8.25

R² = 0.73**Variable dependiente: Materia Orgánica**

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.50351512	0.12587878	14.08	0.0002
REPET	3	0.06454700	0.02151567	3.90	0.0121
TRAT*REPET	12	0.10889355	0.00907446	1.65	0.0975
DIAS	5	0.43651024	0.08730205	15.83	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.12073305	0.00603665	1.09	0.3734

Media = 27.13

C V = 5.17

R² = 0.75**Variable dependiente: Carbono Orgánico**

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.91598110	0.22899528	7.47	0.0029
REPET	3	0.09467860	0.03155953	3.49	0.0198
TRAT*REPET	12	0.37769034	0.03147420	3.48	0.0004
DIAS	5	0.25007310	0.05001462	5.53	0.0002
TRAT*DIAS	20	0.23362007	0.01168100	1.29	0.2119

Media = 10.20

C V = 9.2

R² = 0.73

Variable dependiente: Nitrógeno Total

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.38178775	0.09544694	27.77	<.0001
REPET	3	0.03464867	0.01154956	11.24	<.0001
TRAT*REPET	12	0.04239032	0.00353253	3.44	0.0005
DIAS	5	0.17422402	0.03484480	33.92	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.02645014	0.00132251	1.29	0.2148

Media = 0.68

C V = 14.53

R² = 0.89

Variable dependiente: Contenido P2O5

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	1.89555068	0.47388767	47.71	<.0001
REPET	3	0.09049434	0.03016478	9.23	<.0001
TRAT*REPET	12	0.11920748	0.00993396	3.04	0.0016
DIAS	5	0.80875103	0.16175021	49.48	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.46564609	0.02328230	7.12	<.0001

Media = 1.31

C V = 17.58

R² = 0.93

Variable dependiente: Contenido K2O2

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.07279908	0.01819977	2.57	0.0921
REPET	3	0.03803405	0.01267802	2.25	0.0892
TRAT*REPET	12	0.08611016	0.00717585	1.28	0.2513
DIAS	5	0.57867353	0.11573471	20.57	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.08735459	0.00436773	0.78	0.7324

Media = 0.66

C V = 36.14

R² = 0.67

Variable dependiente: Contenido CaO

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.55327958	0.13831989	6.89	0.0040
REPET	3	0.08656698	0.02885566	4.57	0.0054
TRAT*REPET	12	0.24023927	0.02001994	3.17	0.0011
DIAS	5	0.15608017	0.03121603	4.94	0.0006
TRAT*DIAS	20	0.15684236	0.00784212	1.24	0.2470

Media = 1.31

C V = 22.82

R² = 0.71**Variable dependiente: Contenidos de Magnesio**

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.01357933	0.00339483	1.34	0.3126
REPET	3	0.02112291	0.00704097	9.00	<.0001
TRAT*REPET	12	0.03062046	0.00255170	3.26	0.0008
DIAS	5	0.21675197	0.04335039	55.43	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.00590793	0.00029540	0.38	0.9916

Media = 0.46

C V = 7.17

R² = 0.83**Variable dependiente: Contenidos de Hierro**

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.07170762	0.01792690	1.30	0.3246
REPET	3	0.01991044	0.00663681	2.05	0.1136
TRAT*REPET	12	0.16034290	0.01336191	4.14	<.0001
DIAS	5	0.41897918	0.08379584	25.94	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.04166700	0.00208335	0.64	0.8648

Media = 0.93

C V = 20.56

R² = 0.75

Variable dependiente: Contenidos de Manganeso

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.00143050	0.00035763	11.26	0.0005
REPET	3	0.00027119	0.00009040	8.83	<.0001
TRAT*REPET	12	0.00036997	0.00003083	3.01	0.0018
DIAS	5	0.00177890	0.00035578	34.76	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.00010879	0.00000544	0.53	0.9436

Media = 0.03

C V = 20.16

R² = 0.83

Variable dependiente: Contenidos de Cobre

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.00001019	0.00000255	2.80	0.0745
REPET	3	0.00000469	0.00000156	6.34	0.0007
TRAT*REPET	12	0.00001090	0.00000091	3.68	0.0002
DIAS	5	0.00002645	0.00000529	21.47	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.00000351	0.00000018	0.71	0.8019

Media = 0.001

C V = 25.79

R² = 0.75

Variable dependiente: Contenidos de Zinc

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.00010851	0.00002713	16.84	<.0001
REPET	3	0.00001350	0.00000450	7.16	0.0003
TRAT*REPET	12	0.00001953	0.00000163	2.59	0.0063
DIAS	5	0.00013504	0.00002701	42.95	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.00001210	0.00000060	0.96	0.5157

Media = 0.00

C V = 21.11

R² = 0.86

Variable dependiente: Relación C/N

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.64273462	0.16068365	3.59	0.0380
REPET	3	0.26908381	0.08969460	8.19	<.0001
TRAT*REPET	12	0.51668991	0.04305749	3.93	0.0001
DIAS	5	0.43317667	0.08663533	7.91	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.22353572	0.01117679	1.02	0.4504

Media = 16.82

C V = 8.58

R² = 0.72**Variable dependiente: Porcentaje de saturación**

Fuente	GL	SC	CM	F-Valor	Pr > F
TRAT	4	0.36175263	0.09043816	5.90	0.0073
REPET	3	0.03202184	0.01067395	1.80	0.1546
TRAT*REPET	12	0.18360618	0.01530052	2.58	0.0065
DIAS	5	0.76498664	0.15299733	25.80	<.0001
TRAT*DIAS	20	0.12440312	0.00622016	1.05	0.4198

Media = 106.20

C V = 3.82

R² = 0.77

Bibliografía

ALUNA CONSULTORES LIMITADA. Legislación relacionada con el manejo de los residuos sólidos en Colombia. Bogotá D.C.: Estudio nacional del reciclaje y los recicladores. 2011. 25 p.

ALTAMIRANO, María y CABRERA, Carlos. Estudio comparativo para la elaboración de compost por técnica manual. En: Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG. 2006. vol. 9. No. 17 p.75-84

ARBELAEZ, C. Efectos comparativos de tres presentaciones de cachaza en algunas propiedades químicas de los suelos en la productividad de la caña de azúcar. Tesis de magister en ciencias agrarias con énfasis suelos. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 1992. 60 p.

ASLAM, Danielle; HORWATH, William and VANDERGHEYNST, Jean. Comparison of several maturity indicators for estimating phytotoxicity in compost-amended soil. In: Waste Management, 2008. Vol. 28. p. 2070-2076.

ASSOCIATION OF AMERICAN PLANT FOOD CONTROL OFFICIALS AAPFCO. Product label guide. Apex, North Caroline: US Composting council, 2012. 21 p.

BARZEGAR, A.; YOUSEFI, A., and DARYASHENAS. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and tiled of wheat. Plant Soil, 2002. p. 295-30.

BASS, Larry; BILDERBACK, T and POWELL, M. Composting: a guide to managing organic yard wastes. Greensboro, NC: North Carolina cooperative extension service, 1997. 8 p.

BERNAL, M.; ALBURQUERQUE, J. and MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. In: Bioresource Technology. 2009. No. 100. p. 5444–5453.

BLANDON, G; RODRÍGUEZ, N y DÁVILA, M. Caracterización microbiológica y físico-química de los subproductos del beneficio del café en proceso de compostaje. En: Revista Cenicafe. Chinchiná, Colombia: 1998. No. 03 p. 169 -185

BOLAÑOS, Martha. Evaluación de actividad enzimática (deshidrogenasa, proteasa, fosfatasa y arisulfatasa) en la rizosfera de plátano Musa AAB: relación con propiedades de un Andisol. Tesis doctor en ciencias agropecuarias. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 2006. 237 p.

BRADY, Nyle and WEIL, Ray. Elements of the nature and properties of soils. Second edition. New Jersey: Pearson-Prentice Hall, 2004. 606 p.

CAMPITELLI, Paola and CEPPI, Silvia. Chemical, physical and biological compost and vermicompost characterization: A chemometric study. In: Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. January, 2008. Vol. 90. no. 1. p. 64–71.

CASTALDI, P.; ALBERTI, G.; MERELLA, R. and MELIS, P. Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity. In: Waste Management, 2005. p. 209-213.

CEGARRA, J. Compostaje de Desechos Orgánicos y Criterios de Calidad del Compost. Programa Universitario de Ciencia y Tecnología Agropecuaria (PUI) (Ed.). En: Memorias Curso Master Internacional Aprovechamiento de Residuos Orgánicos. Palmira, Valle del Cauca, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 1994.

CENTRAL DE ABASTECIMIENTOS DEL VALLE DEL CAUCA S.A. CAVASA. [En línea]. Cali: Cavasa, 2013. [Consultado 22 de marzo, 2013]. Disponible en internet: <http://www.cavasa.com.co/p-compostaje.php>

CIFUENTES, Rolando; de LEON, Roberto y PORRES, Carlos. Producción de abono orgánico a partir de cachaza y tallos de caña de azúcar recuperados de las carreteras. En: Revista de la Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala, agosto, 2011. No. 23. p. 8–17.

CHRISTIAN, Archer; EVANYLO, Gregory and PEASE, James. On farm composting: a guide to principles, planning and operations. Blacksburg, Virginia: Virginia Cooperative Extension (VCE), 2009. 36 p.

CLIMENT, M.; ABAD, M., y ARAGÓN, P. El compost de residuos sólidos urbanos (R.S.U), Sus características y aprovechamiento en la Agricultura. En U. P. Valencia (Ed.). Valencia, España: Ediciones y promociones LAV, S.L. 1996.

COMISIÓN EUROPEA. Informe de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones sobre la estrategia temática para la prevención y el reciclado de residuos. Brussels: Comisión al parlamento europeo, 2011. 11 p.

COOPERBAND, Leslie. The Art and Science of Composting A resource for farmers and compost producers. Madison: University of Wisconsin. Center for Integrated Agricultural Systems, 2002. 14 p.

CORBIT, A. Manual de referencia de Ingeniería Medioambiental. Madrid, España: Brage McGraw-Hill interamericana de España. 2003. p.

COSTA, F.; GARCÍA, C.; HERNÁNDEZ, T. y POLO. A. Residuos orgánicos urbanos: Manejo y utilización. Murcia, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, 1991. 181 p.

COYNE, Mark. Soil microbiology: An exploratory approach. Albany, NY: Delmar publishers. 1999. 462 p.

ESTRADA, P. Mónica. Manejo y procesamiento de la gallinaza. En: Revista Lasallista de Investigación. Bogotá D.C., enero–Junio, 2005. Vol. 2, no. 1. p. 43-48.

FOGIEL, Andrew. Composting on the farm. East Lansing, MI: Michigan State University, 2003. 12 p.

FUNDACIÓN HOGARES JUVENILES CAMPESINOS FHJC. Manual de agricultura alternativa; Principios. Colección Cuidando la creación. Santafé de Bogotá D.C.: Ediciones San Pablo. 2004. 96 p.

GALLEGO, J.; MUÑOZ, E. and HERNANDEZ, L. Effects of vinasse-microorganisms blend application on a Vertisol with sugarcane. In: Agronomía Colombiana. vol. XXX no. 1 January - April. 2012. p. 116-123. ISSN 0120-9965.

GARCIA, Álvaro y ROJAS, Carlos. Posibilidades de uso de la vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de acción en los suelos. En: Revista Técnicaña. Cali, 2006. Vol. 10. no. 17. p. 3 -13.

GENEVINI, P.; ADANI, A.; VEEKEN, Y. and SCAGLIA, B. Evolution of humic acid-like and core-humic acid-like during high-rate composting of pig faeces amended with wheat straw. In: Soil Science. Plant Nutrition, 2002. Vol. 48. p. 135-141.

GORDILLO, F. y CHAVEZ, E. Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales azucareros. (E. S. TECNOLÓGICA, Ed.) Repositorio de la Escuela superior politécnica del litoral, Ecuador. 2010. p. 1-10.

HERNÁNDEZ, Gloria; SALGADO, Sergio; PALMA, David; LAGUNES, Luz; CASTELAN, Mepivoseh y RUÍZ, Octavio. Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un gleysol mólico de Chiapas, México. En: Revista Interciencia. Noviembre, 2008. Vol. 33. No. 11. p. 855 – 860.

HÓMEZ, G. Mauricio. Aspectos descriptivos técnicos para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en un matadero municipal para procesos de compostaje y lombricultura. En: Revista Asociación Peruana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental; AIDIS. Gestión ambiental en el siglo XXI. Lima; 1998. p.1-11.

INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO ICA. Fertilización en diferentes cultivos: Manual de asistencia técnica No. 25. Santafé de Bogotá D.C.: Ediciones Produmedios, 1992. 64 p.

INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO ICA. Resolución 00150: Reglamento Técnico de fertilizantes y acondicionadores de suelos para Colombia. En: I. T. Agropecuario. Bogotá, Colombia, 2003.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS ICONTEC. Fertilizantes y acondicionadores de suelo. Definiciones, clasificación y fuentes de materias primas NTC 1927 1997. Bogotá D.C.: El Instituto. 1997. 15 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS ICONTEC. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo NTC 5167 2004. Bogotá D.C.: El Instituto. 2004. 40 p.

IRISARRI, Daniel. Usos Industriales y Agrícolas de la Vinaza de Caña de Azúcar. En: Revista Técnicaña. Cali, 2006. Vol. 10. no. 17. p. 19 - 24.

JARAMILLO, Claudia. Evaluación agronómica de un suelo calizo enmendado con compost de alperujo. Tesis de magíster en ciencias agrarias con énfasis suelos. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 2012. 83 p.

JARAMILLO, Daniel. Introducción a la ciencia del suelo. Publicaciones Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2002. 613 p.

KIEHL, E. Manual de Compostagem: Maturação e Qualidade do Composto. Sao Paulo, Brasil. 1998. p.

LABRADOR, Juana. La materia orgánica en los agrosistemas (Ministerio de agricultura, pesca y alimentación ed.). Madrid, España: Ediciones Mundi Prensa. 2001.

LAURA, R. and IDNANI, A. A study on the ameliorative effects of addition of farm compost, charcoal dust and sawdust in saline and alkali soil. *Agrochimica*, 1973. p. 480-488.

LEE, B.; KIM, J. and CHANG, W. Evaluation of stability of compost prepared with Korean food wastes. In: *Soil Science, Plant Nutrition*, 2002. Vol. 48. p. 1-8.

LUQUE, M. Alternativas económicas para el manejo de residuos. X Jornada de Conservación Ambiental. 1997. p. 10.

MARIÑO, D. Evaluación del proceso de compostaje de los Residuos sólidos orgánicos en la finca la Virginia, Corregimiento Bolo la Italia, Municipio de Palmira. Palmira, Valle del Cauca, Colombia: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración. 2004. p.

MAZZARINO, M. Aprovechamiento Integral de Residuos orgánicos en el n.o. De Patagonia. Quintral, Bariloche, Argentina: Grupo de Suelos del CRUB, Universidad. 2005. p.

MELÉNDEZ, G. Indicadores químicos de calidad de Abonos Orgánicos. En: Centro de Investigaciones Agronómicas, CIA, CATIE, (Ed.), *Abonos Orgánicos: Principios, aplicaciones e impacto en la Agricultura*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica CIA. 2003. p.

MINAMBIENTE. Guía Ambiental para el subsector se caña de azúcar. Bogotá, Colombia. 2005. p.

MONTENEGRO, Sandra. Influencia de la aplicación de vinaza sobre la presencia, actividad y biomasa microbiana del suelo en el cultivo de maíz dulce (*Zea mays*). Tesis

de grado magíster en ciencias agrarias con énfasis en suelos. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 2008. 124p.

MOON, Peter. Basic On-Farm composting manual. Final report. Seattle, Washington: The Clean Washington Center, 1997. 36 p

MORENO, J., and MORAL, R. Compostaje. Madrid, España: Ediciones Mundi-prensa. 2007. p.

MULDOWNEY, Loren. Assessing Compost Quality. Compost and Mulch Marketing Workshop. New Brunswick, NJ: New Jersey agricultural experiment station. January, 2011. 28 slides.

MUÑOZ, A. Fernando. Evaluación de la aplicación de compost en el cultivo de la caña de azúcar. En: Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo (16º: 2-5 Octubre, 2012: Riohacha, La Guajira). Memorias. Bogotá D.C.: SCCS, 2012. 128 p.

NARVAEZ, Magda. Evaluación de actividad de fosfatasas y deshidrogenasas por efecto de la aplicación de vinazas en suelos cultivados con maíz dulce (*Zea Mays*). Tesis de grado magíster en ciencias agrarias con énfasis en suelos. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias 2008. 124 p.

NEW YORK CITY DEPARTMENT OF SANITATION. New York city master composter manual. NYC: Department of sanitation NYC, 2012. p. 158.

OSORIO, Maria. Compostaje al servicio de la comunidad. El mundo, Medellín: (4 noviembre, 2010); sin p. [consultado el 22 de marzo de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.elmundo.com/portal/resultados/detalles/?idx=164066>

PANSU, Marc and GAUTHEYROU. Jacques. Handbook of soil analysis. Mineralogical, organic and inorganic methods. Netherlands: Springer publishers. 2006.

PELAEZ, Carlos y RESTREPO, Alejandro. Compostaje y uso en pre vivero de subproductos de la palma de aceite. Medellín: Ambisa S.A. 2004. 37 p.

PEÑA, A. Los residuos industria azucarera (CEA) y el medio ambiente. [En línea]. Washington: Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental, 1999. [Consultado en Octubre de 2010]. Disponible en internet: <http://www.bvsde.paho.org>

PÉREZ, M.; SÁNCHEZ, R.; PALMA, David y SALGADO, Sergio. Caracterización química del compostaje de residuos de caña de azúcar en el sureste de México. En: Revista Interciencia. 2011. vol. 36. no. 1. p. 45 - 52.

PICCOLO, A. Supramolecular structure of humic substances: A novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. Portici, Italy: Dipartimento di scienze Chimico-Agrarie, Università Degli Studi di Napoli Federico II. 2002. P

QUINTERO, Rafael. Investigaciones sobre el manejo de las vinazas aplicadas al suelo. Documento de trabajo número 631. Cali, Colombia: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia CENICAÑA. 2008. 21 p.

RÖBEN, E. Manual de Compostaje Para Municipios. Loja, Ecuador: DED. 2002.

RYNK, Robert and COLT, Michael. Composting at home. Boise, Idaho: Cooperative extension system, University of Idaho College of Agriculture. 1997. 41 p.

RYNK, Robert. (Editor). On-Farm Composting Handbook. NRAES sheet No. 54. Ithaca, NY: Northeast Regional Agricultural Engineering Service NRAES, 1997. 186 p.

SALAMANCA, Claudia. Efecto de las fuentes orgánicas obtenidas de los subproductos agroindustriales de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) y el plátano (*Musa* spp.) sobre la actividad microbiana y enzimática en el suelo. Tesis de grado magíster en ciencias agrarias con énfasis en suelos. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 2008. 63 p.

SALAMANCA, Sandra. Compostaje de residuos industriales en Colombia. En: Revista Técnicaña. Julio, 2012. no. 28 p. 13 - 18.

SÁNCHEZ, Danilo. Estudio de factibilidad para la creación de la planta de abonos orgánicos de Colombia. Trabajo de grado Administrador del medio ambiente y de los recursos naturales. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de ciencias básicas. 2013. 117 p.

SATISHA, G. and DEVARAJAN, L. Effect of amendments on windrow composting of sugar industry pressmud. In: Waste Management. 2007. vol. 27. p. 1083–1091

SOLANS, Xavier; ALONSO, Rosa y GADEA, Enrique. Plantas de compostaje para el tratamiento de residuos: Riesgos higiénicos. Ficha técnica No. 597. Madrid, España: Instituto nacional de higiene y seguridad en el trabajo, 2008. 7 p.

SOTO Gabriela y MUSCHLER, Reinhold. Génesis, fundamentos y situación actual de la agricultura orgánica. En: Revista Manejo integrado de plagas. Diciembre, 2001. no. 62 p. 101-105.

SOTO, M. Abonos orgánicos, Principios, aplicaciones e impacto en la agricultura. En: Gloria Meléndez (ed.), Abonos orgánicos: definiciones. San José, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. 2003.

SUZUKI, Takeshi; IKUMI, Yoshio; OKAMOTO, Syo-taro; KATANABE, Ikuo; FUJITAKE, Nobujide and OTSUKA, Hiroo. Aerobic composting of chips from clear-cut trees with various co-materials. In: Bioresource Technology. 2004. Vol. 95 p.121–128.

SYLVIA, David; HARTER, Peter.; FUHRMANN, Jeffrey and ZUBERER, David. (Editors). Principles and applications of soil microbiology. 2nd Edition. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. 640 p. ISBN 0-13-094117-4.

TCHOBANOGLIOUS, T. Gestión integral de. Madrid, España: Editorial McGraw Hill Interamericana de España. 1994.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE USDA. Part 637 Environmental Engineering, National Engineering Handbook. Chapter 2. Composting. Washington D.C.: USDA, 2000. 67 p. plus Appendix.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY EPA. Municipal Solid Waste in the United States, 2009 facts and figures. Washington D.C.: EPA, December 2010. Chapter 3. pag. 164.

WARD, Megan. Composting A beginner's guide. Slippery rock, Pennsylvania: Slippery Rock University. 2002. 26 p.

YOSHIOKA, Isabel. Actividad de fosfatasas ácida y alcalina en un suelo cultivado con plátano Musa AAB: en tres sistemas de manejo. Tesis de magíster en ciencias agrarias con énfasis suelos. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 2005. 99 p.

ZMORA, Sharon; MARKOVITCH, Omer; TARCHITZKY, Jorge and CHEN, Yona. Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity. In: Soil Biology and Biochemistry. 2005. vol. 37. pag. 2109 – 2116.

ZEREGA, Luis. Manejo y uso agronómico de la cachaza en suelos cañameleros. En: Revista científica de la caña de azúcar. Yaritagua, Venezuela, 1993. vol.11. No. 2.