



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

**Aprovechamiento de los biosólidos de la industria
tequilera para la elaboración de composta de
bagazo de agave**

Tesis

que para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias en Biosistemática y Manejo de
Recursos de Naturales y Agrícolas**

Presenta

Juan Francisco Jiménez Martínez

Zapopan, Jalisco

09 de Diciembre 2010



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

Aprovechamiento de los biosólidos de la industria tequilera para la elaboración de composta de bagazo de agave

Por

Juan Francisco Jiménez Martínez

Maestro en Ciencias en Biosistemática y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas

Aprobado por:

Dr. Ramón Rodríguez Macías
Director de Tesis e Integrante del Jurado

Fecha

Dr. José Ignacio del Real Laborde
Asesor del Comité Particular e Integrante del Jurado

Fecha

Dr. Eduardo Salcedo Pérez
Asesor del Comité Particular e Integrante del Jurado

Fecha

Dr. Lino de la Cruz Larios
Integrante del Jurado

Fecha

INDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
INDICE	III
LISTA DE CUADROS	VI
LISTA CUADROS DEL APÉNDICE	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
1. INTRODUCCION	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1. Materiales para la producción de composta	4
2.2. Bagazo de agave tequilero	4
2.2.1. Composición del bagazo de agave	4
2.2.2. Usos del bagazo de agave	5
2.3. Definición de biosólidos	6
2.3.1. Composición de los biosólidos	6
2.3.2. Usos de los biosólidos	8
2.4. Definición de compostaje y composta	8
2.5. Métodos de compostaje	9
2.6. Compostaje utilizando bagazo de agave	9
2.7. Compostaje utilizando biosólidos	10
2.8. Características químicas de la composta	11
2.8.1. pH	11
2.8.2. Conductividad eléctrica (CE)	11
2.8.3. Nitrógeno total (NT)	12
2.8.4. Fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca)	12
2.9. Propiedades físicas de la composta	12
2.9.1. Humedad	13
2.9.2. Densidad aparente	13
2.9.3. Granulometría	13

2.9.4. Olor	14
3. OBJETIVOS	15
3.1. Objetivo general	15
3.2. Objetivos Particulares	15
3.3. HIPOTESIS	15
4. MATERIALES Y METODOS	16
4.1. Área de estudio	16
4.2. Materias primas	16
4.3. Formación de las pilas para el compostaje	16
4.4. Proceso de compostaje	17
4.5. Monitoreo de parámetros durante el proceso de compostaje	18
4.5.1. Temperatura	18
4.5.2. Toma de muestras para la determinación de la humedad, CE y pH	19
4.5.3. Determinación de la humedad	20
4.5.4. Determinación del pH y CE	20
4.6. Caracterización química de la composta	21
4.7. Caracterización física	21
4.8. Diseño experimental	22
4.9. Pruebas biológicas del producto final	22
4.10. Análisis microbiológicos en composta	22
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES	23
5.1. Caracterización química de los materiales iniciales	23
5.2. Manejo de las pilas durante el proceso de composteo	23
5.3. Parámetros evaluados durante el proceso de compostaje	25
5.3.1. Temperatura	25
5.3.2. Humedad	28
5.3.3. Potencial hidrogeno (pH)	30
5.3.4. Conductividad eléctrica (CE)	32
5.4. Características químicas de las compostas	34
5.4.1. Conductividad eléctrica	34
5.4.2. pH	36

5.4.3. Nitrógeno total	37
5.4.4. Fósforo	39
5.4.5. Potasio	40
5.4.6. Calcio	41
5.5. Prueba microbiológica en las compostas	42
5.5.1. Granulometría	42
5.5.2. Densidad aparente (Da)	44
5.5.3. Capacidad de absorción o retención de agua	46
5.5.4 Prueba biológica de las compostas	47
5.5.5. Potencial hidrógeno (pH)	48
5.5.6. Conductividad eléctrica (CE)	48
5.5.7. Vigor de planta	48
5.5.8. Altura y materia seca de plántulas	49
5.5.9 Prueba microbiológica en las compostas	50
6. CONCLUSIONES	51
7. LITERATURA CITADA	52
8. APÉNDICE	56

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Composición del bagazo de agave	5
Cuadro 2. Composición química de los biosólidos de la industria textil	7
Cuadro 3. Variables químicas analizadas en el bagazo de agave y biosólidos de la industria tequilera	16
Cuadro 4. Descripción de tratamientos evaluados	18
Cuadro 5. Composición química del bagazo de agave y biosólidos generados por Tequila Sauza S. de R.L de C.V	23
Cuadro 6. Manejo de volteos y humedad durante el proceso de composteo de bagazo de agave, tratamientos con aplicación de biosólidos cada siete días	24
Cuadro 7. Manejo de volteos y humedad durante el proceso de composteo de bagazo de agave, tratamientos con aplicación de biosólidos cada catorce días	25
Cuadro 8. Comparación de medias de conductividad eléctrica por el efecto de los factores principales de periodos de volteo y dosis de biosólidos	35
Cuadro 9. Comparación de medias de pH por el efecto de los factores principales de periodos de volteo y dosis de biosólidos	37
Cuadro 10. Comparación de medias de fósforo por el efecto de los factores principales de periodos de volteo y dosis de biosólidos	39
Cuadro 11. Comparación de medias de potasio por el efecto del factor principal de dosis de biosólidos	41
Cuadro 12. Comparación de medias de calcio por el efecto de los factores principales de periodos de volteo y dosis de biosólidos	41
Cuadro 13. Comparación de medias de la densidad aparente debido a los efectos principales de periodos de volteos y dosis de biosólidos	44
Cuadro 14. Comparación de medias de la retención de agua debido al efecto principal de dosis de biosólidos	46

Cuadro 15. Variables de respuesta de la plántulas de pepino a compostas evaluadas	48
Cuadro 16. Contenido microbiológicos en composta de bagazo y en los biosólidos generados por Tequila Sauza S. de R.L. de C.V	50

LISTA DE CUADROS DEL APÉNDICE

Apéndice A1.	Análisis de varianza de conductividad eléctrica (CE) en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días	57
Apéndice A2.	Análisis de varianza del pH presente en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días	57
Apéndice A3.	Análisis de varianza del contenido de nitrógeno total en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días	57
Apéndice A4.	Análisis de varianza de contenido de fósforo en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días	58
Apéndice 5A.	Análisis de varianza del contenido de potasio en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días	58
Apéndice A6.	Análisis de varianza del contenido de calcio en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días	58
Apéndice A7.	Análisis de varianza de la densidad aparente (Da) en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días	59
Apéndice A8.	Análisis de varianza de capacidad de absorción de compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Incorporación del inóculo mediante una volteadora mecánica	17
Figura 2. Toma y registro de temperatura	19
Figura 3. Muestreo de pila de composteo	20
Figura 4. Potenciómetro y conductímetro para medir pH y CE	21
Figura 5. Valores de temperatura durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 7 días	26
Figura 6. Valores de temperatura durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 14 días	27
Figura 7. Valores de humedad durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 7 días	28
Figura 8. Valores de humedad durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 14 días	30
Figura 9. Valores de pH durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 7 y 14 días	31
Figura 10. Valores de conductividad eléctrica (CE) durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 7 días	32
Figura 11. Valores de conductividad eléctrica (CE) durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 14 días	34
Figura 12. Efecto de la interacción de los periodos de volteo e aplicación y dosis de biosólidos en la conductividad eléctrica	36
Figura 13. Efecto de la interacción de los periodos de volteo y dosis de biosólidos en la concentración de nitrógeno total	38
Figura 14. Efecto de la Interacción de los periodos de volteo y dosis de biosólidos la concentración de fósforo	40
Figura 15. Distribución granulométrica en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación biosólidos cada 7 días	43

Figura 16. Distribución granulométrica en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación con biosólidos cada 14 días	43
Figura 17. Efecto de la Interacción de los periodos de volteo y dosis de biosólidos en la densidad aparente	45
Figura 18. Efecto de la Interacción de los periodos de volteo y dosis de biosólidos en la capacidad de retención de agua	47
Figura 19. Vigor de plántulas obtenidas en los materiales utilizados	49
Figura 20. Altura de plántula pepino cultivadas en los diferentes materiales	50

1. INTRODUCCION

El genero Agave es uno de los grupos de plantas que identifican a México en el mundo, dentro de este se encuentra el agave tequilero, *Agave tequilana* Weber var. Azul, el cual es la única fuente de materia prima autorizada para la elaboración de la bebida reconocida a nivel mundial como tequila. Cuando la planta alcanza entre 5 y 7 años de edad las piñas o cabezas de agave son cosechadas y llevadas a la destilería para realizar la molienda y extracción de sus azúcares para la fermentación y destilación final del tequila. Como resultado de este proceso de producción se generan dos tipos de residuos con características físicas y químicas diferentes: el bagazo de agave y la vinaza. El bagazo de agave es un material fibroso que dependiendo del tipo de proceso puede contener una gran cantidad de humedad al momento de salir de la destilería dificultando su disposición de manera inmediata y haciendo necesario contar con equipo especializado para su manejo. La vinaza es un líquido oscuro rojizo que contienen una concentración elevada de materia orgánica, tiene una temperatura alta al momento de la descarga, y un pH extremadamente ácido por lo cual está catalogada como una agua residual compleja con alto potencial contaminante para los cuerpos de agua que pudieran recibirla.

El Consejo Regulador del Tequila (CRT) reporta en 2008 que por cada litro de tequila que se produjo en sus dos categorías (tequila mixto y tequila 100 % agave) se generan 3.6 kg de bagazo en base húmeda y de acuerdo con Linerio *et al.*, (2004), 10 litros de vinaza en promedio. Considerando estas cifras y de acuerdo con las estadísticas del CRT que señalan que para el año 2009 se produjeron alrededor de 249 millones de litros de tequila en sus dos categorías, podemos ver la magnitud del problema del manejo de residuos que enfrenta la industria en su conjunto

De acuerdo con García *et al.*, (2005) el bagazo de agave ha tenido diferentes usos: Como materia prima para la elaboración de papel, fuente de combustible, medio para cultivo de hongos comestibles, así como alimento de ganado. En lo que respecta a las vinazas los usos han sido más limitados debido a los volúmenes de producción que se generan y a su composición físico química, por lo cual la mayoría de las empresas han optado por realizar descargas clandestinas a los arroyos o aplicaciones en suelos

agrícolas. Una de las investigaciones más recientes donde se ha estudiado el uso de ambos residuos es la que realizaron Iñiguez *et al.*, (2005) que mediante la técnica del compostaje con volteos mezclaron bagazo y vinaza sin tratar, concluyendo que este es un método eficaz para el aprovechamiento de estos residuos. Esta técnica ha permitido el desplazamiento de gran parte de bagazo, pero no se han podido solventar en su totalidad los grandes volúmenes de vinaza generados

Por lo anterior es necesario adoptar tecnologías que contemplen no solo tratar para disminuir los volúmenes de vinaza, sino que también reduzcan los contaminantes presentes a niveles permisibles para su manejo y que permitan lograr un aprovechamiento de los recursos presentes en estos residuos. Este tipo de ventajas se han obtenido a través del procesamiento de estas aguas en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), ya que se obtienen otros subproductos como son los biosólidos; constituidos principalmente por materiales orgánicos que pueden proveer macronutrientes y micronutrientes esenciales para el crecimiento vegetal. Estos residuos pueden manejarse en forma sólida, semi-líquida o líquida llegando a tener una concentración entre el 94 al 97 % de agua (USEPA, 2000 y Mohamud, 1996). De acuerdo a Vaca *et al.*, (2005) se tiene documentados diferentes usos de estos materiales, sin embargo las opciones más comunes de disposición son: la incineración, depositarlos en rellenos sanitarios o la aplicación como mejoradores de suelo, las cuales tienen sus desventajas ya que la incineración es muy costosa y la disposición en rellenos sanitarios sobre la superficie es una solución temporal a un problema permanente.

Debido al contenido de materia orgánica y de nutrientes presentes en los biosólidos, se les debe de catalogar como productos con un gran potencial, por lo cual es necesario buscar opciones más adecuadas para beneficio directo en la agricultura. El compostaje constituye una alternativa interesante, ya que este es un proceso biológico en el cual se da la descomposición de la materia orgánica. La presencia de agua durante el proceso es imprescindible para las necesidades primordiales de los microorganismos (Moreno *et al.*, 2007), por tal motivo esta investigación pretende aprovechar las propiedades presentes en los biosólidos al integrarlos como fuente de agua al proceso de

compostaje de bagazo de agave para obtener una composta con propiedades físicas y químicas favorables para utilizarse como abono orgánico en suelos destinados a la agricultura.

2. ANTECEDENTES

2.1. Materiales para la producción de composta

La mayoría de los materiales de origen vegetal o animal se puede someter a la descomposición a través del proceso de compostaje. Entre los materiales de tipo vegetal se pueden mencionar los residuos agroindustriales como tallos, cáscaras, bagazos, rastrojos, restos de podas, frutas procedentes de diversas especies cultivadas y en lo que se refiere a desechos de tipo animal se encuentran los excrementos en forma de sólidos y semisólidos como ejemplo los estiércoles (Sztern *et al.*, 1999)

Cada unos de estos desechos o residuos son generados por diferentes sectores de la sociedad entre los cuales se puede mencionar el domestico, urbano, ganadero, forestal y el agroindustrial, a pesar de que los materiales presentan una composición física y química muy variada, tienen características ideales que permiten su reciclaje a través de la técnica del compostaje llegando a obtener un material con características agronómicas ideales para utilizarse como abono o enmienda al suelo

2.2. Bagazo de Agave Tequilero

El bagazo o fibra de agave es el residuo inicial de la producción tequila y se genera a partir de la molienda de las piñas o cabezas de agave. De acuerdo con García *et al.*, (2005) esta fibra representa el 40 % del peso total del agave que se consume. El CRT, (2009) registró un consumo de 924 mil toneladas de agave para la producción de tequila y de tequila 100% agave, lo cual implica la generación de volúmenes importantes de este residuo.

2.2.1. Composición del Bagazo de Agave

Alonso *et al.*, (1997) reportan que el bagazo de agave tequilero es un residuo conformado por un material fibroso heterogéneo y un material no fibroso en forma de

partículas finas ambos materiales están constituidos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Por otro lado González *et al.*, (2005) como resultado de su investigación encontraron que el bagazo de agave está constituido como se describe en el siguiente Cuadro 1

Cuadro1. Composición del bagazo tequilero

Componente	Valor
pH	5.4
Materia Orgánica (% Base seca)	91.2
Cenizas (% Base seca)	8.8
Carbono Orgánico total (% Base seca)	50.6
Nitrógeno Total (% Base Seca)	0.53
Relación C:N	95.5
Celulosa (% Base Seca)	41.9
Hemicelulosa (% Base Seca)	12.1
Lignina (% Base Seca)	7.2

González *et al.*, 2005

2.2.2. Usos del bagazo de agave

Valenzuela, (1997) cita que el bagazo de agave se utiliza actualmente como material de embalaje de loza, para rellenar muebles y en la fabricación de adobes, así también hace mención que desde 1987 se investiga el uso de este material como sustrato para la producción de hongos comestibles (*Pleorotus ostreatus*).

Otra forma de aprovechamiento del bagazo es la que exponen Iñiguez *et al.*, (2001) quienes lo utilizaron como fuente de alimento para ganado llevando acabo la separación de medula de la fibra. Por otro lado Linerio *et al.*, (2004) hacen mención de los usos más comunes que ha tenido el bagazo como son: Utilizarlo como material de relleno en la elaboración de colchones, asientos para vehículos automotores, así como para la manufactura de ladrillos y por ultimo como fuente para la elaboración de biofertilizante, en el cual se incluye la practica de compostaje o degradación biológica controlada

Rodríguez, (2004) determinó que el bagazo de agave precompostado, compostado o vermicompostado pueden ser sustituto de las turbas comerciales con base en los resultados obtenidos en su investigación para la producción de plántulas en contenedor. Recientemente se han tenido otros enfoques como el que mencionan Escoto *et al.*, (2006) obteniendo un papel de buena calidad realizando la mezcla de la pulpa de bagazo de maguey con la pulpa de papel bond y el más reciente obtenido por Laborde, (2009) el cual consiste en una película plástica con añadidos de bagazo de agave para la fabricación de bolsas biodegradables

2.3. Definición de biosólidos

Mahamud, (1996) menciona que los biosólidos son materiales orgánicos ricos en nutrientes que pueden tener una consistencia sólida, semi-sólida o líquida. Así mismo Jacobs *et al.*, (2001) definen a los biosólidos, como residuos sólidos, semisólidos y líquidos que se generan durante el tratamiento de lodos sanitarios, domésticos o industriales, en cual reducen su nivel de patogenicidad , su poder de fermentación y su capacidad de atracción de vectores.

Los biosólidos son principalmente materiales orgánicos producidos durante el tratamiento de aguas residuales y estos pueden contener entre 94 a 97 % de agua USEPA, (2000).

2.3.1. Composición de los Biosólidos

La composición de los biosólidos puede variar dependiendo de su procedencia, es decir que los biosólidos generados por la industria pueden presentar concentraciones más altas de algunos elementos o sustancias con respecto a los generados por el sector domestico. La USEPA, (2000) menciona que debido a que los biosólidos son provenientes de un proceso de estabilización presentan una concentración importante de nutrientes, un bajo contenido de microorganismos patógenos, y una presencia permisible de metales pesados, que se pueden utilizar como fertilizante, acondicionador o mejorador de suelo. En relación a esto Jurado *et al.*, (2004) citan que los biosólidos contiene un alto

porcentaje de humedad, materia orgánica (MO) y nutrientes para las plantas como nitrógeno y fósforo

De acuerdo con la investigación realizada por Iñiguez *et al.*, (2006) se obtuvo la caracterización química de biosólidos originados de la industria textil, la cual se expone en la siguiente Cuadro 2

Cuadro 2. Composición química de los biosólidos de la Industria Textil

Parámetro	Valor
pH	8.9
Cenizas (%)	14.70
Materia Orgánica (%)	85.30
C.E. (mmhoscm ¹)	2.68
N Total (%)	6.00
Relación C/N	7.9
P Total (%)	0.988
K Total (%)	0.271
Ca Total (%)	0.992
Mg Total (%)	0.432
Na Total (%)	0.913
Zn (mg kg ¹)	90.644
Mn (mg kg ¹)	117.693
Fe (mg kg ¹)	1289.257
Cu (mg kg ¹)	185.367

Iñiguez *et al.*, (2005)

2.3.2 Usos de los Biosólidos

Quinchia *et al.*, (2004) mencionan que las alternativas más utilizadas para disponer de los biosólidos son la incineración, su aplicación en rellenos sanitarios y su uso en el sector agrícola por medio del compostaje o por su aplicación directa sobre terrenos que se encuentren degradados por la industria minera o en terrenos con actividades silvopastoriles o de paisajismo. Sin embargo en ocasiones esta actividad se ve limitada por la cuestión del transporte y las distancias que se deben de recorrer debido a que no existen terrenos cercanos al área de producción de los biósólidos. A pesar de su viabilidad, los biosólidos representan un riesgo de contaminación para el suelo, las aguas subterráneas y el aire, además de representar un desperdicio de nutrimentos que pueden ser reutilizados.

2.4. Definición de compostaje y composta

El compostaje es una técnica utilizada desde hace mucho tiempo en la agricultura, esta consiste en apilar los residuos orgánicos para llevar a cabo la descomposición y ser transformados en un producto fácilmente manejable y aprovechable como un sustrato o mejorador de suelo. INTEC, (2009) cita que el compostaje es la descomposición biológica aeróbica (en presencia de aire) de los residuos orgánicos en condiciones controladas. Para Dalzell *et al.*, (1991) el compostaje es un proceso de descomposición de la materia orgánica por una gran cantidad de microorganismos en un medio húmedo, caliente y aireado para dar un producto final llamado humus, el cual sirve en la agricultura para mejorar la estructura y las propiedades de retención de agua del suelo y para suministrar nutrientes a las plantas a medida que la composta se descompone finalmente en material mineral. La composta se define como el producto que resulta del proceso de compostaje, este material está constituido principalmente por materia orgánica estabilizada, ya que se degrada generando partículas más finas tomando un color oscuro (Córdova, 2006).

2.5. Métodos de compostaje

El método de compostaje varía de acuerdo con la inversión, funcionamiento, disponibilidad de terreno, complejidad operacional, condiciones de aireación y período de volteo. Normalmente se tienen dos categorías de métodos: los abiertos en los cuales no se utilizan contenedores; y los cerrados donde los materiales se encuentran en túneles o en reactores. Stofella *et al.*, (2005) mencionan que el método de hilera con volteo es uno de los más comúnmente practicados a gran escala, donde se forman hileras o pilas largas y estrechas. El volteo es simplemente una agitación de los materiales y este se lleva a cabo con cargadores o maquinas especiales de volteo, este volteo tiene la función de mezclar y combinar los materiales permitiendo realizar una homogenización adecuada, así como liberar los gases y el calor que se encuentran en el interior de la pila ayudan a distribuir el agua, nutrientes, microorganismos e intercambiar material del entorno frío oxigenado con las áreas cercanas al núcleo. La mezcla de materiales a compostar se coloca en hileras o pila de sección triangular o trapezoidal. Para la elección del tamaño de pila debe de tenerse en cuenta la proporción de materiales fácilmente degradables presentes en el residuo y la estructura y porosidad del mismo. Las pilas suelen tener una base de 3 a 4 metros como máximo y una altura de unos 2.0 a 2.5 m, la longitud va desde unos pocos hasta varias decenas de metros, por lo cual este tipo de compostaje es relativamente económico (Moreno *et al.*, 2007).

2.6. Compostaje utilizando bagazo de agave

Hasta la fecha es contado el número de trabajos que tratan sobre el uso del bagazo de agave tequilero para producción de composta, entre los que podemos citar son los realizados por Iñiguez *et al.*, (2005 y 2006) y Rodríguez *et al.*, (2004). Las dos investigaciones utilizan la técnica del compostaje como una alternativa para el tratamiento de estos residuos donde de acuerdo con los resultados obtenidos se confirma que este proceso es viable para dicho tratamiento. Rodríguez *et al.*, (2004) evaluó y caracterizó la composta de bagazo de agave como fuente de sustrato para la propagación de jitomate y brócoli en almácigo, concluyendo que la composta presenta características

físicas y químicas muy similares a la turba o peat moss y puede sustituir el uso de este material para el desarrollo de inicial de estos cultivos.

2.7. Compostaje utilizando biosólidos

La presencia de nutrimentos en algunos materiales orgánicos como es el caso de los biosólidos hace de ellos una alternativa importante para utilizarse como productos que mejoran las propiedades de otros materiales cuando estos se mezclan. Laos *et al.*, (2000) hacen referencia a la elaboración de composta bajo un sistema de pilas con volteos expuestas al viento y sin sombreado, a las cuales se les mezclaron biosólidos y donde al término de 3 meses, se obtuvo una composta madura con las características de una enmienda de calidad excepcional. Así también Uribe *et al.*, (2002) determinaron la viabilidad de la producción de composta utilizando biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Cañaveralejo en Cali, Colombia donde se pudo comprobar que el producto obtenido como composta reúne los requisitos que se exigen para considerarlo como abono orgánico o de enmienda. Así también Quichia *et al.*, (2004) determinaron el potencial que presentan los biosólidos como un material susceptible al composteo, en esta investigación evaluaron el propio proceso y el material obtenido, teniendo como resultado un material de excelente calidad orgánica que aporta nutrientes.

Iñiguez *et al.*, (2006) llevaron a cabo un trabajo de investigación en el cual sometieron a compostaje biosólidos generados por una planta tratadora de aguas residuales textiles mezclados con bagazo de agave, resultando un proceso exitoso por el cual obtuvieron un producto físicamente similar a una composta de follaje de pinos y encinos. Otro trabajo es el que indican Torres *et al.*, (2007) los cuales compostearon biosólidos mezclados con residuos de poda y de cachaza como materiales de soporte, llegando a la conclusión de que el proceso de compostaje además de ser una alternativa de estabilización de la materia orgánica, favorece la gestión de los biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales

2.8. Características químicas de la composta

Las propiedades químicas derivan directamente de la composición elemental del material o materiales involucrados en el proceso de compostaje. Actualmente existe un gran número de pruebas químicas que pueden ser utilizadas para determinar las propiedades químicas del material obtenido como composta, entre ellas destacan: pH, Conductividad eléctrica (CE), Relación carbono/nitrógeno, Capacidad de intercambio catiónico y Nitrógeno total.

2.8.1. pH

Coperband, (2007) menciona que los rangos de pH de las compostas que se producen en general se encuentra entre 5.0 y 8.0 las compostas para uso hortícola deben de tener un pH entre 6.0 y 7.5 para un adecuado desarrollo y por ultimo menciona que las compostas cuando son aplicadas al suelo pueden alterar el pH debido a las propiedades físicas y químicas del suelo. En relación a esto Stofella *et al.*, (2005) mencionan que la escala de valores del pH en la mayor parte de los compuestos acabados varía entre 6.0 y 8.0, el valor final de pH de una composta depende mucho de la materia prima, del proceso de fabricación y de la adición de cualquier enmienda. Una acidez o alcalinidad extrema pueden dañar el sistema radicular de las plantas, inhibir el desarrollo de las mismas, así como su crecimiento

2.8.2. Conductividad eléctrica (CE)

Moreno *et al.*, (2007) mencionan que la conductividad eléctrica no proporciona información específica sobre las clases de sales presentes, pero es un excelente indicador de la presencia de sales solubles que existen en la composta. Los altos contenidos de sales pueden repercutir directamente en la germinación de las semillas y en el desarrollo general del cultivo, todo esto dependiendo de la tolerancia de los cultivos a la salinidad y del tipo del suelo. En relación con la conductividad eléctrica Stofella *et al.*, (2005) mencionan que la salinidad se determina por medio de la conductividad (CE). Al igual que para la medición del pH, las sales solubles pueden ser determinadas por medio de los

métodos de pasta saturada o volumétrica. Las sales sodio (Na), cloro (Cl) o boro (B) pueden ser tóxicas para las plantas a elevadas concentraciones.

2.8.3. Nitrógeno total (NT)

El contenido total de N de las composta puede variar sustancialmente según la materia prima, las condiciones del proceso, maduración y almacenaje. En una composta el nitrógeno total es la suma de sus formas orgánicas e inorgánicas y este se determina por dos métodos de laboratorio: Kjeldhal total y por combustión. Algunos procedimientos de Kjeldhal no comprenden el N nítrico ($\text{NO}_3\text{-N}$) en la medición del nitrógeno total. Para la mayor parte de las compostas la omisión de la forma NO_3 en los análisis de N total resulta insignificante, ya que las compostas contienen menos de 0.2 % de $\text{NO}_3\text{-N}$ (Stofella *et al.*, 2005).

2.8.4. Fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca)

Las cantidades totales de P, K, Ca se determinan por la digestión total de la composta en un ácido fuerte, seguido de un análisis por espectrometría de absorción atómica o espectrometría inductiva de plasma. Solamente una parte del fósforo y del calcio total presente en una muestra de composta será utilizable por la plantas y por lo contrario la totalidad del K es utilizado por las plantas.

2.9. Propiedades físicas de la composta

La mayor parte de los factores cualitativos mas importantes de una composta depende de la planificación del compostaje y de su utilización. Dentro de las propiedades físicas de las composta podemos mencionar: Contenido de humedad, densidad aparente, capacidad de retención de agua, tamaño de partículas, olor y color

2.9.1. Humedad

El contenido de la humedad de una composta es fácilmente determinado, aunque puede fluctuar mucho debido a las diferencias del material, del proceso y las condiciones de almacenaje. La humedad se puede expresar en referencia a peso o a volumen Stoffela *et al.*, (2005). Moreno *et al.*, (2007) mencionan que generalmente las compostas con menos del 30% de humedad se pulverizan y son de manejo desagradable y en aquellas por encima del 50 % de humedad el peso de la composta repercute en un exceso por el costo del transporte.

2.9.2. Densidad aparente

La densidad aparente o peso de la unidad de volumen de una composta viene afectada por el contenido de humedad de materia inorgánica, distribución del tamaño de las partículas y el grado de descomposición. La mayor parte de las compostas con un contenido de humedad real del 35-55 % tendrán una densidad aparente de 500 a 700 Kg/m³ Stoffela *et al.*, (2005). La mayoría de las compostas presentan una densidad aparente entre 400 y 700 kg/m³ y esta se incrementa con el tiempo de compostaje, como consecuencia de una mayor descomposición y una reducción del tamaño de las pilas (Moreno *et al.*, 2007)

2.9.3. Granulometría

La granulometría o la distribución porcentual del tamaño de las partículas es de gran utilidad para conocer el grado de descomposición del material y determinar sus posibles usos en la agricultura. En relación a la granulometría Stofella *et al.*, (2005) menciona que el tamaño de las partículas proporciona una cierta cantidad de indicadores importantes para determinar el uso de las compostas, dado que las partículas de mayor tamaño (retenidas en malla 12 mm) dificultan una eficiente distribución en la aplicación en campo, así como las muy pequeñas pueden también limitar la utilización para aplicaciones tales como mezclas para macetas o green de golf donde se requiere de un drenaje rápido.

2.9.4. Olor

La presencia de malos olores puede indicar que el producto se encuentra en fases iniciales del proceso o que este ha sufrido condiciones de anaerobiosis (Moreno *et al.*, 2007). Las compostas de bagazo de agave en mezcla con biosólidos obtenidas por Iñiguez *et al.*, (2006) presentaron un olor a tierra de jardinería a los 155 días después de haber iniciado el proceso de composteo.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de biosólidos obtenidos del tratamiento de los desechos líquidos de la industria tequilera, como fuente de humedad durante el proceso de compostaje del bagazo de agave.

3.2. Objetivos Particulares

- 3.2.1. Evaluar el comportamiento de la temperatura, pH, conductividad eléctrica y el contenido de humedad durante el proceso de compostaje de bagazo de agave.
- 3.2.2. Evaluar el comportamiento de los materiales como compostas en bioensayos agronómicos mediante pruebas de vigor inicial en plántulas de pepino.
- 3.2.3. Caracterizar física y químicamente los materiales obtenidos al final del proceso de composteo.

3.3. HIPOTESIS

La incorporación de biosólidos como fuente de humedad al proceso de compostaje del bagazo de agave sustituirá la aplicación de agua de uso agrícola; obteniendo como producto final un producto adecuado para uso agrícola.

4. MATERIALES Y METODOS

4.1. Área de estudio

Esta investigación se realizó en las instalaciones del Rancho el Indio, propiedad de la empresa Tequila Sauza, S. de R.L. de C.V. ubicado en el municipio de Tequila, en el Estado de Jalisco, con coordenadas 20°53'41" de latitud Norte y 103°50'10.50" longitud Oeste.

4.2. Materias Primas

El bagazo de agave y los biosólidos que se utilizaron para realizar esta investigación fueron proporcionados por la destilería La Perseverancia y la Planta Tratadora de Aguas Residuales (PTAR) respectivamente, ambas propiedad de la empresa Tequila Sauza, S. de R.L. de C.V. Al inicio se realizó una caracterización de los materiales en experimentación donde se determinaron las variables que se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Variables química analizadas en el bagazo de agave y biosólidos de la industria tequilera

Parámetro	Unidad	Método
Materia orgánica, ceniza y carbono total	(%)	Descomposición por Fusión
Relación C/N		Cálculo
Nitrógeno total	(%)	Kjendalh
Fósforo	(%)	Digestión HNO ₃ y HClO ₄
Potasio	(%)	ISP Plasma
Ca, Mg, Cu, Fe,Zn	(mg kg ¹)	Digestión HNO ₃ y HClO ₄
Conductividad eléctrica 1:2	(mS cm ¹)	Conductímetro
pH 1:2		Potenciómetro

4.3. Formación de las pilas para el compostaje

Se formaron ocho pilas con bagazo de agave fresco, cada una de las pilas estaba conformada por aproximadamente 30 toneladas de material en base húmeda, alcanzando una longitud de 30 metros. Para llevar a cabo esta labor se contó con el apoyo de dos camiones del volteo de 7 m³ de capacidad. Cada una de las pilas fue inoculada con material semicompostado con 60 días en proceso de biodegradación, este material fue distribuido en la parte superior de cada una de las pilas utilizando un tractor equipado con pala frontal, para posteriormente ser incorporado utilizando una volteadora mecánica remolcada por un tractor como se muestra en la Figura 1



Figura. 1 .Incorporación del inóculo mediante una volteadora mecánica

4.4. Proceso de Compostaje

El proceso de compostaje se realizó al aire libre bajo el método de pilas con volteos. Los volteos y riegos de las pilas se realizaron de acuerdo con los tratamientos descritos en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Descripción de tratamientos evaluados

Tratamiento	Descripción
1	Bagazo de agave con volteo y riego con 1,560 l de agua c/ siete días
2	Bagazo de agave con volteo y riego con 1,560 l de biosólidos c/ siete días
3	Bagazo de agave con volteo y riego con 3,120 l de biosólidos cada siete días
4	Bagazo de agave con volteo y riego con 4,680 l de biosólidos c/ siete días
5	Bagazo de agave con volteo y riego con 1,560 l de agua c/14 días
6	Bagazo de agave con volteo y riego con 1,560 l de biosólidos c/14 días
7	Bagazo de agave con volteo y riego con 3,120 l de biosólidos c/14 días
8	Bagazo de agave con volteos y riego con 4,680 l de biosólidos c/14 días

4.5. Monitoreo de parámetros durante el proceso de compostaje

4.5.1. Temperatura

Desde el día que se estableció el experimento se inició la toma y registro de las temperaturas, esto se realizó para cada una de las ocho pilas. El registro se llevó a cabo cada tercer día de manera directa considerando seis puntos diferentes en línea recta sobre la parte alta de la pila (Figura 2). Para la toma de las temperaturas se utilizó un termómetro bimetálico marca Rochester con un vástago de 60 cm de largo el cual fue colocado a 40 cm de profundidad, dejándolo por un lapso de 2 minutos para cada una de las lecturas.



Figura.2. Toma y registro de la temperatura

4.5.2. Toma de muestras para la determinación de la humedad, CE y pH

Para determinar el comportamiento de los indicadores humedad, pH y conductividad eléctrica (CE), se tomaron muestras cada semana durante el tiempo que duró el proceso de compostaje de cada una de las ocho pilas, para esto se formaron muestras compuestas considerando la metodología descrita por Stofella *et al.*, (2005), modificando el número de muestras y la cantidad de la muestra debido al tamaño de las pilas como se describe a continuación:

1. Tamaño de muestra: Se formó una muestra compuesta equivalente a 2 kilos de composta por cada una de las pilas
2. Número y localización de la toma de muestras: Se seleccionaron 4 puntos de muestreo a lo largo de cada una de las pilas. Las muestras fueron tomadas a una profundidad de 40 cm aproximadamente
3. Toma de submuestras: De cada punto de muestreo se tomó una submuestra formada por un aproximadamente medio kilo de composta. Al final se tuvieron un total de 4 submuestras como representación de una pila, como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Muestreo de pila de composteo

4.5.3. Determinación de la humedad

El porcentaje de humedad se determinó de acuerdo con la metodología descrita por Ansorena, (1994) . En un recipiente seco y tarado (T) se pesaron 20 g de la muestra (T+M), se calentó a 105°C en la estufa hasta llegar a peso constante (T+MS) para posteriormente estimar la pérdida de peso mediante la siguiente formula:

$$\text{Humedad \%} = (100) \frac{(T+M) - (T+MS)}{(T+M) T}$$

4.5.4. Determinación del pH y CE

Para determinar el comportamiento del pH y conductividad eléctrica (CE) durante todo el proceso de compostaje, cada ocho días se tomaron muestras del material de cada pila, del cual se preparó una serie de mezclas de agua y composta, para esto se utilizó una relación de 1:5 p/v, se colocaron 20 g de composta y 100 ml de agua destilada en un recipiente, posteriormente se agitó de manera manual por un periodo de cinco minutos, una vez hecha la mezcla se dejó reposar por cinco minutos, y por último se procedió a medir el pH por medio del potenciómetro y conductividad eléctrica por medio del método de conductímetro Figura 4



Figura 4. Potenciómetro y conductímetro para medir pH y CE

4.6. Caracterización química del producto final

Para el estudio químico de las compostas resultantes, se tomaron muestras de cada uno de los tratamientos bajo la misma metodología descrita para medir humedad y pH, solo que al final la cantidad de muestra tomada para llevar a cabo el análisis fue del doble de la anterior. Los análisis químicos y las técnicas empleadas para el análisis de estos materiales fueron: pH 1:2 (potenciómetro), conductividad eléctrica 1:2 (CE) (Conductímetro), Materia orgánica (MO) (Descomposición por fusión), Cenizas (Descomposición por fusión), Carbono total (Descomposición por fusión), Relación carbono/nitrógeno (calculado), Nitrógeno Total (Kjendahl), Potasio (ISP plasma), Fósforo, Cobre, Hierro, Zinc y Boro por (Digestión con HNO_3 Y HClO_4).

4.7. Caracterización física

Los materiales obtenidos fueron sometidos a las siguientes pruebas físicas: Densidad aparente (método de la probeta), granulometría (4.75, 1.18 y >1.18mm) y capacidad de absorción de agua por diferencia entre el peso seco y la máxima saturación de agua, técnicas descritas por Ansorena, (1994).

4.8. Diseño Experimental

Se empleo un diseño factorial de 2 x 4 completamente al azar, donde el primer factor son los periodos de volteo (7 y 14 días) y el segundo factor son las cuatro dosis de biosólidos 0; 1,560; 3,120 y 4,680 litros.

4.9. Pruebas biológicas de compostas

Para la siembra se utilizaron charolas de poliestireno, las cuales se llenaron manualmente con las diferentes composta y se apisonaron ligeramente con la parte inferior de otra charola, dejando aproximadamente un cm entre la parte superior de la charola y la superficie de la composta. Posteriormente se procedió a sembrar una semilla por celda, se tapó con el mismo material asegurándose que esta quedara cubierta. La especie utilizada fue pepino *Cucumis sativus L* (como planta indicadora). El pepino es un buen indicador en este análisis debido a su alta tolerancia a salinidad.

Las charolas se colocaron en un invernadero con condiciones controladas de humedad, temperatura y luz.

La evaluación de las plántulas se realizó 23 días después de la siembra, para lo cual se tomaron al azar plántulas de la parte central de cada tratamiento, se midieron las variables: vigor de plántulas, altura de plántula, número de hojas verdaderas y peso de materia seca de la planta. Para el análisis de resultados se utilizó un diseño estadístico completamente al azar con diez tratamientos y cuatro repeticiones, con cinco plántulas cada una y se procesaron con el paquete estadístico FAUANL (Olivares, 1994)

4.10. Análisis Microbiológicos en composta

Muestras de cada uno de los materiales obtenidos como composta se sometieron a los siguientes análisis microbiológicos: Coliformes fecales, Salmonella Spp y Huevos de helmintos, todos de acuerdo con las técnicas descritas en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMANRNAT-2002, anexos III, IV y V respectivamente.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización química de los materiales iniciales

A continuación se presenta la caracterización química de los materiales utilizados para realizar esta investigación en donde se puede observar que existen diferencias importantes en la concentración de nutrientes, conductividad eléctrica y pH entre los dos materiales como se muestra en Cuadro 5.

Cuadro 5. Composición química del bagazo de agave y biosólidos generados por Tequila Sauza S de R.L. de C.V.

Determinación	Bagazo	Biosólidos
Humedad (%)	80	97
M.O. (%)	88.60	78.04
Ceniza (%)*	11.40	21.96
Carbono total (%)*	51.51	45.37
Relación C/N	66.90	6.61
Nitrogeno total (%)*	0.77	6.87
Fósforo (%)*	0.07	1.88
Potasio (%)*	0.26	1.32
Sodio (%)*	0.05	1.92
Calcio (%)*	3.68	1.98
Magnesio (%)*	0.23	0.59
Cobre (ppm)*	4.85	143.95
Hierro(ppm)*	371.00	6010.10
Zinc (ppm)*	30.49	2219.58
Boro (ppm)*	161.23	264.56
pH	6.23	8.51
Conductividad eléctrica mS cm ¹	1.63	4.12

*Base seca

Fuente: Elaboración propia

5.2. Manejo de las pilas durante el proceso de composteo

Los Cuadros 6 y 7 presentan de manera resumida el manejo aplicado a las ocho pilas durante el proceso de compostaje. Específicamente el Cuadro 6 presenta el manejo realizado cada 7 días a los tratamientos del 1 al 4, los cuales recibieron 18 volteos y 13 riegos en total. En el transcurso del proceso de compostaje se realizaron algunos ajustes

en la dosis de agua como fue en el caso del T 1 en la semana 15, así como también en los tratamientos 3 y 4 entre las semanas 16 a 19, esto debido a que los materiales de estos tratamientos presentaba grumos por la alta cantidad de humedad presente. Por último en las semanas 9, 10, 13 y 14 no se aplicaron riegos debido a problemas técnicos con el sistema de bombeo, sin embargo el volteo se efectuó de manera normal.

Cuadro 6. Manejo de volteos y humedad durante el proceso de composteo de bagazo de agave, tratamientos con aplicación de biosólidos cada 7 días

S e m a n a	M a n e j o	T r a t a m i e n t o s			
		1	2	3	4
1	V / H				
2	Re p o s o				
3	V o l t e o / r i e g o	1 5 6 0	1 5 6 0	3 1 2 0	4 6 8 0
4	V o l t e o / r i e g o	1 5 6 0	1 5 6 0	3 1 2 0	4 6 8 0
5	V o l t e o / r i e g o	1 5 6 0	1 5 6 0	3 1 2 0	4 6 8 0
6	V o l t e o / r i e g o	1 5 6 0	1 5 6 0	3 1 2 0	4 6 8 0
7	V o l t e o / r i e g o	1 5 6 0	1 5 6 0	3 1 2 0	4 6 8 0
8	V o l t e o / r i e g o	1 5 6 0	1 5 6 0	3 1 2 0	4 6 8 0
9	V o l t e o / r i e g o	0	0	0	0
10	V o l t e o / r i e g o	0	0	0	0
11	V o l t e o / r i e g o	1 5 6 0	1 5 6 0	3 1 2 0	4 6 8 0
12	V o l t e o / r i e g o	1 5 6 0	1 5 6 0	3 1 2 0	4 6 8 0
13	V o l t e o	0	0	0	0
14	V o l t e o	0	0	0	0
15	V o l t e o / r i e g o	3 1 2 0	1 5 6 0	3 1 2 0	4 6 8 0
16	V o l t e o / r i e g o	1 , 5 6 0	1 5 6 0	1 5 6 0	2 3 4 0
17	V o l t e o / r i e g o	1 5 6 0	1 5 6 0	1 5 6 0	2 3 4 0
18	V o l t e o / r i e g o	1 5 6 0	1 5 6 0		
19	V o l t e o / r i e g o	1 5 6 0	1 5 6 0		
	T o t a l d e V o l t e o s	1 8	1 8	1 8	1 8

En el cuadro 7 se resume el manejo aplicado a los tratamientos del 5 al 8 los cuales recibieron volteos y humedad cada 14 días. En total a todos los tratamientos de este grupo se les dieron 10 volteos durante todo el proceso de composteo, excepto el tratamiento 5 el cual recibió 11 debido a que presentaba bajo nivel de humedad. En lo que corresponde a los riegos aplicados a estos tratamientos se presentó un comportamiento muy similar al de los tratamientos que se manejaron con volteos y riegos cada siete días. Se realizaron ajustes en el tratamiento 5 durante la semana 16, así como en los tratamientos 7 y 8 durante las semanas 17 y 19. En ambos esquemas de manejo a los 133 días después de haber iniciado el proceso de compostaje la mayoría de materiales tomaron una apariencia en color, olor y textura semejante a la tierra de bosque

Cuadro 7. Manejo de volteos y humedad durante el proceso de composteo de bagazo de agave, tratamientos con aplicación de biosólidos cada 14 días

Semana	Manejo	Tratamientos			
		5	6	7	8
1	V/H				
2	Reposo				
3	Volteo/riego	1560	1560	3120	4680
5	Volteo/riego	1560	1560	3120	4680
7	Volteo/riego	1560	1560	3120	4680
9	Volteo	0	0	0	0
11	Volteo/riego	1560	1560	3120	4680
13	Volteo	0	0	0	0
15	Volteo/riego	1560	1560	3120	4680
16	Volteo/riego	3,120			
17	Volteo/riego	1560	1560	1560	2340
19	Volteo/riego	3,120	1560		
	Total volteos	11	10	10	10

5.3. Parámetros Evaluados durante el proceso de compostaje

5.3.1. Temperatura

La temperatura es el factor principal que afecta la actividad microbiana durante el proceso de compostaje. En las Figuras 5 y 6 se presentan los valores promedio registrados en los ocho tratamientos durante el proceso de compostaje. Las ocho pilas iniciaron con una temperatura alrededor de alrededor los 60 °C esto es debido a que conservaban la temperatura con la cual sale el bagazo del proceso de industrialización. En la Figura 5 se observan los valores promedio de temperatura alcanzados por los tratamientos 1 a 4 las cuales oscilaron entre los 41 y 69.3°C.

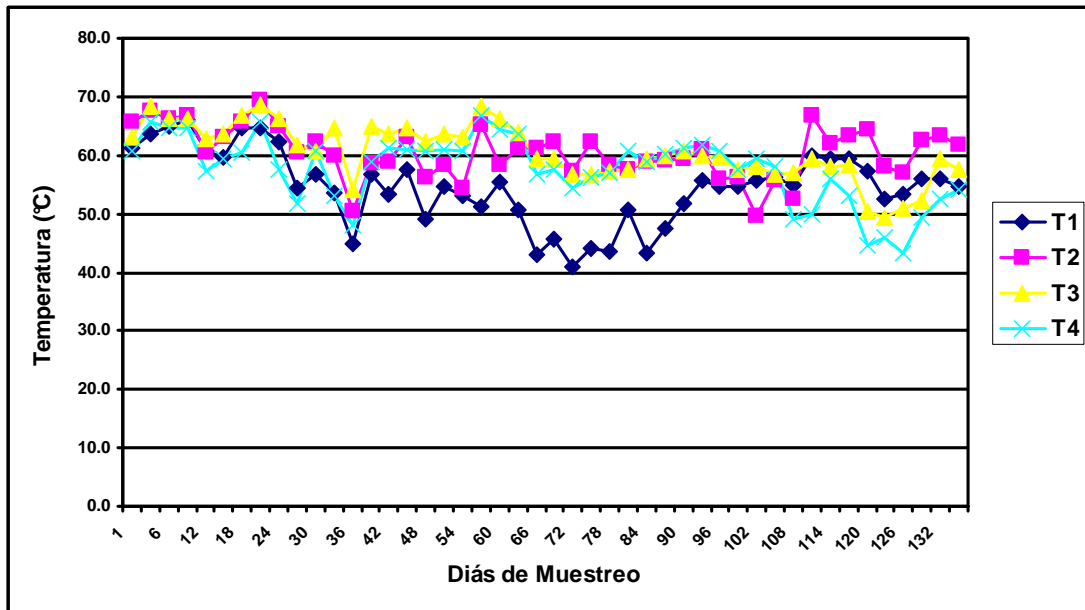


Figura 5. Valores de temperatura durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 7 días

En este primer grupo de tratamientos el T 1 fue el que presentó los niveles de temperatura más bajos con respecto al resto de los tratamientos de este grupo, llegando a caer a los 40°C a 72 días después de haber iniciado el proceso de compostaje. Por el contrario el tratamiento T 2 fue el que presentó los registros más altos de temperatura llegando alrededor de los 70°C.

En la Figura 6 se presentan los valores promedios de temperatura de los tratamientos del 5 al 8 en los cuales se les aplicaron riegos y volteos de manera quincenal, el comportamiento de las temperaturas de este segundo grupo de tratamientos osciló entre los 38.8 y los 68 °C

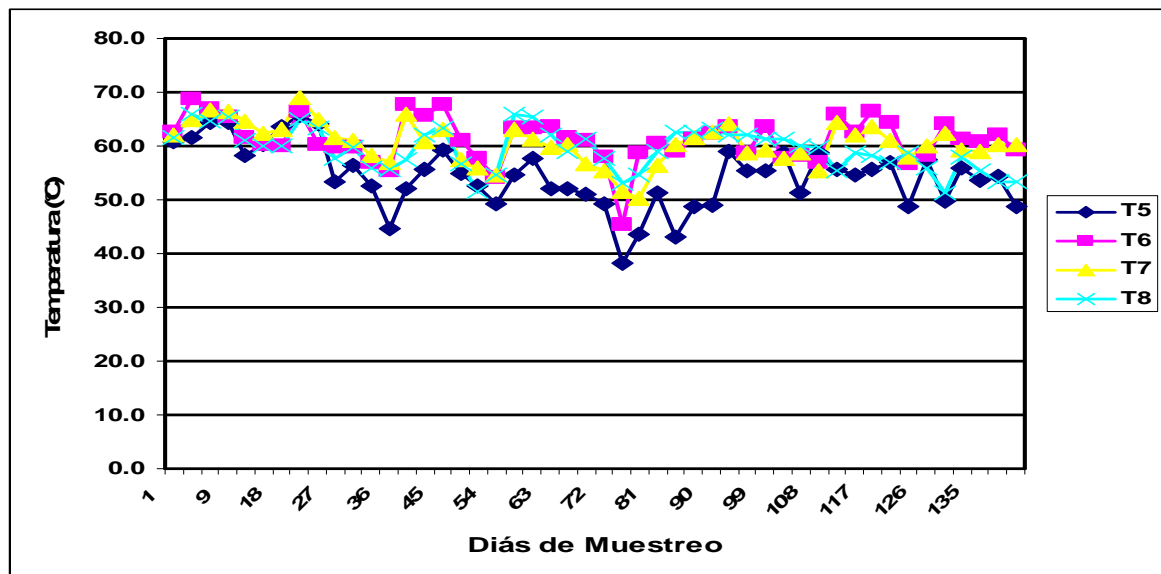


Figura 6. Valores de temperatura durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 14 días

En este grupo se observa que el tratamiento 5 fue el que presentó los valores más bajos de temperatura, en relación con el resto de los tratamientos del mismo grupo, llegando por debajo de los 40°C como valor mínimo y máximo de 65.7°C alrededor de los 40 y 77 días respectivamente después de haber iniciado el proceso de compostaje coincidiendo con un periodo de sequía debido a problemas técnicos sin embargo posteriormente la temperatura subió a niveles por arriba de los 55°C de manera gradual, permitiendo que ocurriera una adecuada degradación del material. Así también en esta gráfica se puede observar que el tratamiento 7 registró los valores promedios más altos de temperatura llegando a niveles de 45.3°C como mínimo y 69.0°C como máximo. Resultados similares reportan Stofella *et al.*, (2005) y Coperban, (2007) donde mencionan que el rango de temperatura normal está entre 35 y 60°C, sin pasar de los 70°C ya que se inhibe el proceso de descomposición. Así también los valores máximos de temperatura de 68 y 70 °C alcanzados por los tratamientos 2 y 7 respectivamente son valores son muy semejantes a las obtenidas por Iñiguez *et al.*, (2006) quienes compostearon bagazo de agave en mezcla con biosólidos generados de la industria textil registrando valores máximos de 69 y 74 °C

5.3.2. Humedad

El compostaje es un proceso biológico de descomposición de la materia orgánica y la presencia del agua es imprescindible para que se desarrolle en forma adecuada. La humedad inicial de todas las pilas fue del 80 %. En específico en la Figura 7 se muestran los valores de humedad alcanzados por el efecto de adición de agua y de biosólidos cada 7 días en los tratamientos del 1 al 4. En general el comportamiento de la humedad para estos tratamientos osciló entre el 43.4 y el 81.3 %

En este primer grupo se observa que los tratamientos 1 y 2 presentan valores de humedad muy semejantes entre si y ligeramente más bajos con respecto a los tratamientos 3 y 4 durante los primeros 70 días del proceso de compostaje, posteriormente a los 77 días los cuatro tratamientos tuvieron una disminución en su contenido de humedad, este efecto coincide con la falta de riego de agua y biosólidos por dos semanas continuas durante el proceso compostaje, sin embargo la humedad promedio se mantuvo por arriba del 40 % en todos los casos. Al final del proceso de composteo (140 días) todos tratamientos presentaron una humedad alrededor del 50 %

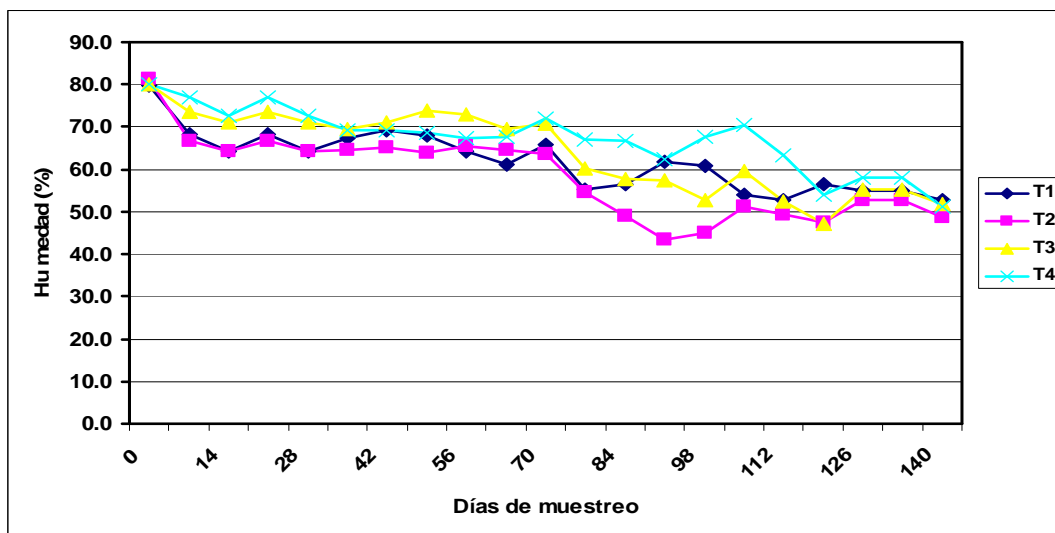


Figura 7. Valores de humedad durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 7 días

En la Figura 8 se muestran los valores medios de humedad alcanzados por los tratamientos del 5 al 8 que recibieron aplicación de agua y de biosólidos cada 14 días. El comportamiento de la humedad de este segundo grupo de tratamientos osciló entre el 25.8 y 80.8 % de humedad durante todo el proceso de compostaje. En esta Figura 8 se observa que el tratamiento 5 presentó los valores de humedad más bajos durante el tiempo que duró el proceso de compostaje, la humedad máxima fue del 80 % al inicio del proceso y llegó a 25.8 % como mínima a los 120 días. Por lo contrario el tratamiento 8 fue el que registró los valores de humedad más altos durante la mayor parte del proceso de composteo, presentando una humedad inicial del 80.8 % y de 54 % al finalizar

Los valores de humedad registrados en los 8 tratamientos durante el proceso de compostaje son adecuados, considerando lo que citan Moreno *et al.*, (2007) los valores de humedad óptima para el crecimiento microbiano están entre 50 a 70 %. Al presentarse valores por debajo del 30% decrece la actividad biológica y al haberlos sobre el 70 % el agua desplaza al aire de los espacios libres existentes entre las partículas, reduciendo la transferencia de oxígeno produciéndose una anaerobiosis. Los valores registrados en los ocho tratamientos durante el proceso de compostaje se encuentran dentro de este rango, excepto la humedad presente al inicio del proceso cuando la humedad de todos los tratamientos osciló entre 80 y 81.3 %, así como la humedad del T 5 a los 112 días cuando registro 25.8 %. Sin embargo estos valores de humedad no causaron ningún problema para el proceso ya que el periodo en que se presentaron fue solo de una semana. Así también estos valores coinciden con lo obtenido por García *et al.*, (2005) cuando su prueba de compostaje partió de una humedad del 80 % y fue disminuyendo favorablemente hasta llegar a estar entre 50 a 60 %, para favorecer la degradación biológica del material.

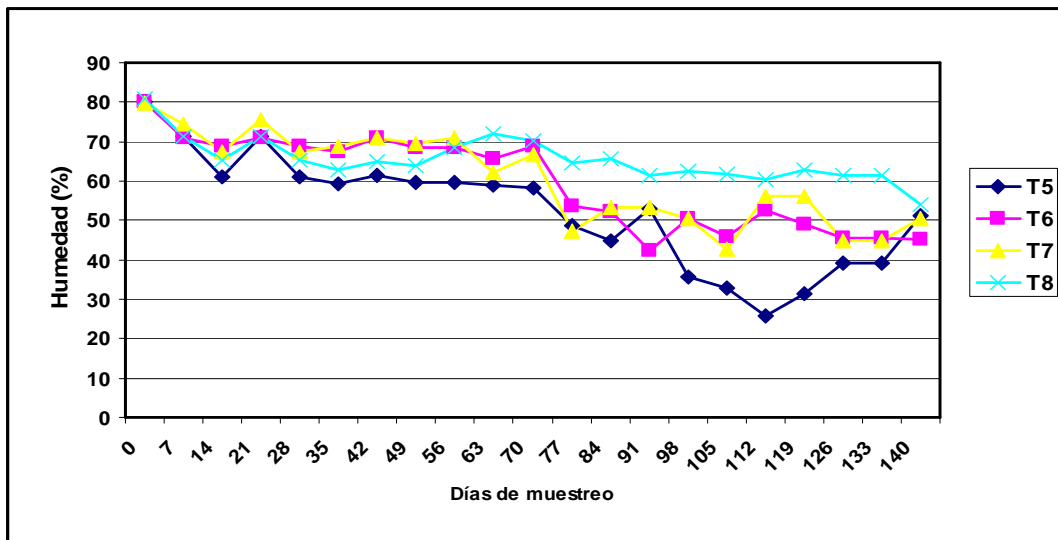


Figura 8. Valores de humedad durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 14 días.

5.3.3. Potencial hidrógeno (pH)

El pH es un factor indicativo importante ya que influye activamente sobre la actividad microbiana durante el proceso de compostaje. En la Figura 9 se muestra la evolución de los valores promedio de pH para cada uno de los ocho tratamientos durante el proceso de compostaje. Todos los tratamientos al inicio del proceso presentaron un pH promedio de 4.3 y de 9 al final del mismo. En esta Figura 9 se muestra que en la primera semana de haber iniciado el proceso de compostaje el valor promedio de pH sube prácticamente arriba de 7 en todos los tratamientos, excepto para el tratamiento 4 el cual presenta un valor promedio de pH de 6.4. A partir de la semana 8 todos los tratamientos presentan un comportamiento similar ya que registran un incremento en el pH hasta llegar a un valor promedio de 9, valor que se mantiene hasta que se dio por finalizado el proceso compostaje, a los 140 días. El comportamiento del pH durante el proceso de compostaje de los ocho tratamientos que se estudiaron difiere al menos al principio del proceso con lo citado por Gordillo *et al.*, (2010), quienes mencionan que en la primera etapa, es decir al inicio del proceso el pH sufre una disminución debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más frágil produciendo una liberación de ácidos orgánicos, para posteriormente pasar a una segunda fase donde se produce una

alcalinización por la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas presentes. En la tercera y última etapa el pH tiende a la neutralidad, esto es debido a la formación de compuestos húmicos, manteniéndose arriba de 7.5 lo cual es síntoma de una buena descomposición, este comportamiento se corrobora en la Figura 9 en donde el valor inicial en promedio de pH para todos los tratamientos es de 4.3 y no se observa que haya tal disminución, por lo contrario, a partir de la semana tres se llega a valores de pH neutros, pasando a valores alcalinos a partir de la semana cinco, manteniéndose estos hasta terminar el proceso de compostaje. Este mismo comportamiento se puede corroborar en los trabajos realizados por Iñiguez *et al.*, (2006) y Rodríguez., (2010) donde se compostó bagazo de agave con biosólidos de la industria textil y agua de riego como fuente de humedad, obteniendo valores de pH entre 7.7 a 8.6 y 4.3 a 8.8 respectivamente

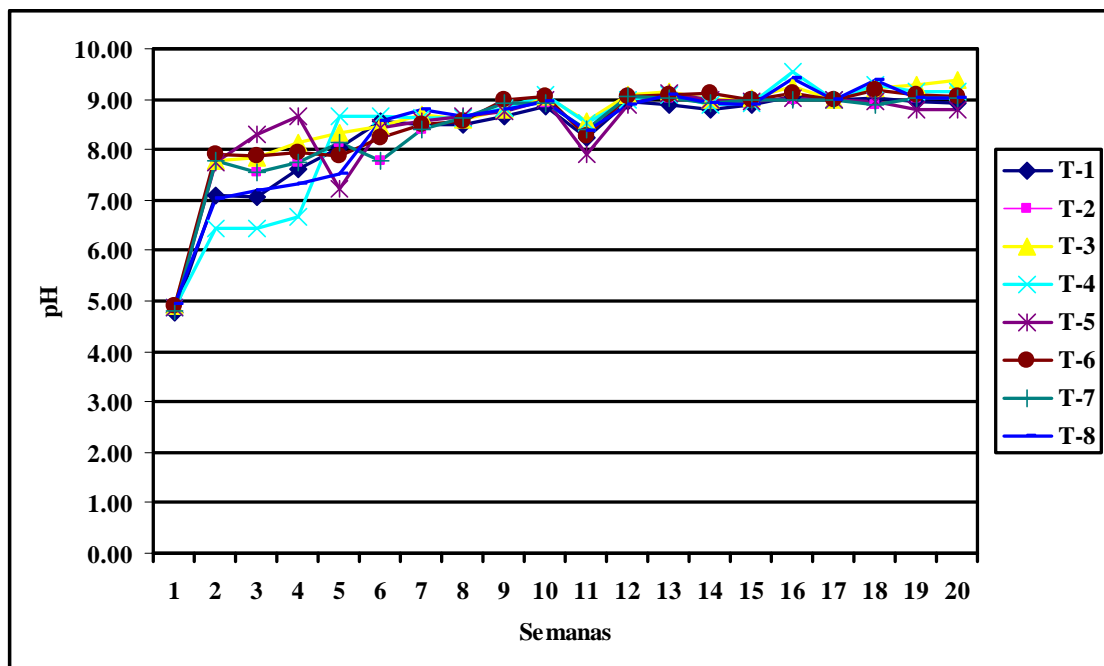


Figura 9. Valores de pH durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 7 y 14 días.

5.3.4. Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica nos indica la concentración de sales solubles presentes en la fase líquida de las compostas. Todos los tratamientos partieron del mismo valor de conductividad eléctrica que fue de 0.14 mS cm^{-1} y la tendencia de todos los tratamientos fue aumentar conforme pasaba el tiempo de proceso. En la Figura 10 se muestran los valores promedio de conductividad eléctrica alcanzados por los tratamientos del 1 al 4 durante el periodo de composteo, en este grupo la conductividad eléctrica osciló de los 0.14 a los 2.28 mS cm^{-1} . Los tratamientos con los valores más altos de conductividad eléctrica a partir de los 35 días después de haber iniciado el proceso de compostaje fueron los tratamiento 2, 3 y 4 con valores que cambian de 0.14 a 2.28 ; 0.14 a 2.15 ; y 0.14 a 1.99 mS cm^{-1} respectivamente, contrastando con el T 1 el cual presentó valores entre 0.14 y 0.68 mS cm^{-1}

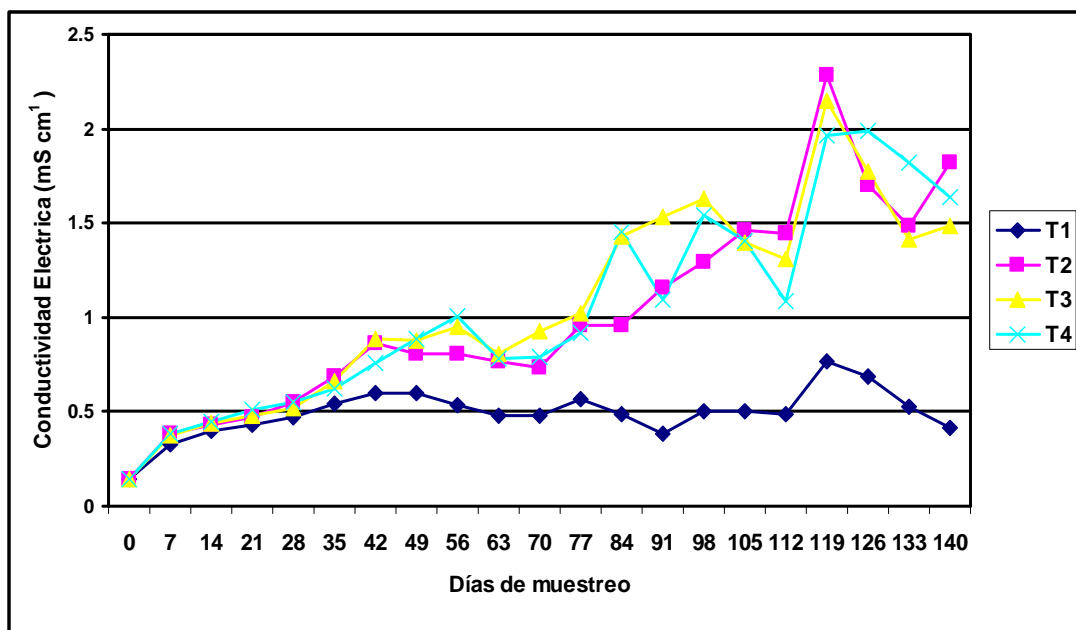


Figura 10. Valores de conductividad eléctrica (CE) durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 7 días.

En la Figura 11 se muestran los valores promedio de conductividad eléctrica alcanzados por los tratamientos del 5 al 8 en los cuales los valores evolucionaron entre 0.14 a 2.07 mS cm^{-1} durante proceso de compostaje. En este segundo grupo de

tratamientos se observa un comportamiento muy similar al grupo anterior donde los tratamientos 6, 7 y 8, presentaron los valores más altos de conductividad eléctrica (CE) a partir de 56 días después de haber iniciado el proceso de compostaje con valores que cambian entre 0.14 a 1.84; 0.14 a 2.07; y de 0.14 a 1.61 mS cm¹ respectivamente, comparados con el T 5 que presentó valores entre 0.14 y 0.73 mS cm¹. En relación a esto Moreno *et al.*, (2007) mencionan que este es un comportamiento normal, ya que la conductividad eléctrica (CE) tiende a aumentar durante el proceso de compostaje, debido a la propia mineralización de la materia orgánica. O en algunas ocasiones veces puede ocurrir un descenso de la CE durante el proceso, el cual se puede deber al fenómeno de lixiviación en la masa, provocando una excesiva humectación de la misma, como se puede ver en los tratamientos 1 al 4, los cuales presentan una ligera caída durante los 15 días antes de que se diera por terminado el proceso de compostaje. Esta misma tendencia se puede corroborar con los resultados obtenidos por Iñiguez *et al.*, (2006) durante el composteo del bagazo de agave utilizando biosólidos en donde los valores de la conductividad eléctrica fueron de 1.45 mS cm¹ a los 37 días, llegando a 3.35 mS cm¹ a los 155 días después de haber el iniciado el proceso de compostaje.

Este mismo comportamiento fue reportado Quinchia *et al.*, (2004) durante una prueba para determinar el potencial de los biosólidos como un material susceptible al compostaje en combinación con estiércol de equino, donde obtuvieron valores aproximados de la conductividad eléctrica de 1.7 al inicio y de 3.8 mS cm¹ al finalizar el proceso.

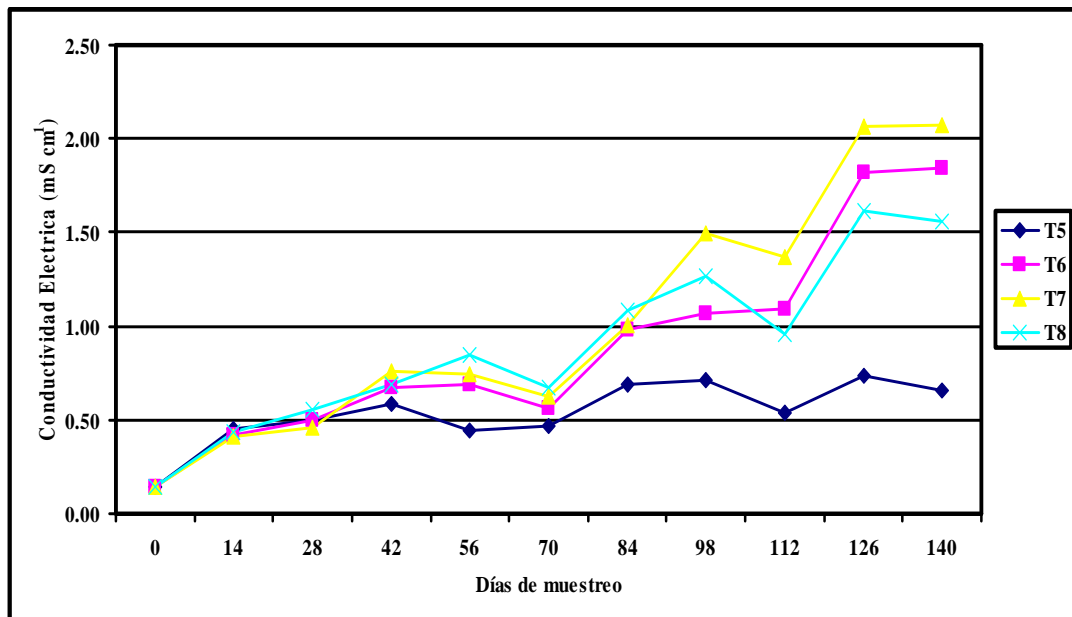


Figura 11. Valores de conductividad eléctrica (CE) durante el proceso de composteo de bagazo de agave con aplicación de biosólidos y volteos cada 14 días.

5.4. Características Químicas de las Compostas

5.4.1. Conductividad eléctrica

El análisis de varianza de los valores de CE (Apéndice A1) presentes en las compostas mostró diferencia significativa ($P \leq 0.05$) para los factores principales de periodo de volteo y dosis de biosólidos. Los tratamientos que recibieron volteo cada 14 días presentaron un valor promedio de conductividad eléctrica más alto (1.78 mS cm⁻¹) Cuadro 8. En relación con el factor de dosis de biosólidos, la dosis de 1,560 l de biosólidos registró el valor promedio de conductividad eléctrica más alta (2.18 mS cm⁻¹) sin embargo este valor es estadísticamente igual a los valores presentados en los tratamientos que recibieron dosis de 3,120 y 4,680 litros de biosólidos.

Cuadro 8. Comparación de medias de conductividad eléctrica por el efecto de los factores principales de periodos de volteo y dosis de biosólidos.

Periodo de Volteo (días)	Dosis de Biosólidos (l)				Media de Periodos
	0	1,560	3,120	4,680	
7	0.64	1.95	1.52	1.76	1.47 b
14	0.55	2.18	2.35	2.13	1.78 a
Media de Dosis	0.58b	2.18a	1.93a	2.13a	

Con respecto a la interacción entre periodos de volteo y dosis de biosólidos se observa en la Figura 12 que entre los tratamientos con periodo de volteo de 7 días con la dosis de 1,560 se registró el valor más alto de conductividad eléctrica de 1.95 mS cm¹, mientras que entre los tratamientos con periodo de 14 días la mayor conductividad se presentó con la dosis de 3,120 l de biosólidos con un valor promedio de 2.35 mS cm¹. Los cambios observados en la conductividad eléctrica están relacionados con dos factores: primero con el propio proceso de compostaje ya que de acuerdo a Moreno *et al.*, (2007) la conductividad eléctrica generalmente tiende a aumentar durante el proceso de compostaje debido a mineralización de la materia orgánica y segundo por la propia adición de los biosólidos, ya que las compostas que fueron humedecidas con estos materiales presentan valores de conductividad eléctrica casi 3 veces más altos con respecto a las compostas que fueron humedecidos solamente con agua, lo cual puede estar directamente relacionado con la presencia de sulfatos, cloruros y de sodio en los biosólidos los cuales hayan aumentado considerablemente la conductividad eléctrica. Sin embargo estos valores se encuentran dentro del rango de los valores normales, ya que Cooperban, (2000) señala que las concentraciones de sales debe de ser menor a 6 mS cm¹ en compostas que se van a utilizar como enmienda al suelo.

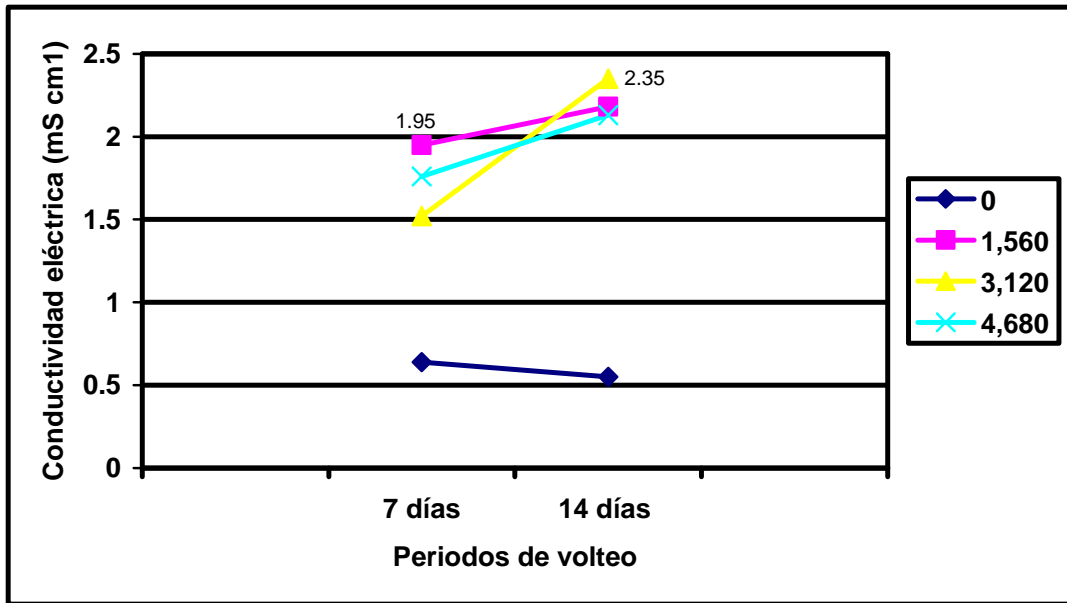


Figura 12. Efecto de la Interacción de los periodos de volteo y dosis de biosólidos en la conductividad eléctrica.

5.4.2. pH

El análisis de varianza de los valores de pH de las compostas obtenidas presentó diferencia significativa al ($P \leq 0.05$) solo para los efectos principales de periodo de volteo y dosis de biosólidos (Apéndice A2). El factor periodo de volteo y aplicación nos indicó que los tratamientos que recibieron el volteo y la aplicación de biosólidos cada 7 días presentaron un valor promedio superior de pH (9.08) en relación con el grupo de tratamientos que recibieron volteo e aplicación de biosólidos cada 14 días (8.9) (Cuadro 9).

Por otra parte con respecto al factor de dosis de biosólidos, los tratamientos que recibieron las dosis de 3,120 y 4,680 litros de biosólidos durante el proceso de compostaje presentaron los valores promedio más altos de pH (9.10) sin embargo son estadísticamente iguales al valor promedio que presentaron los tratamientos que solo recibieron la dosis de 1,560 l de biosólidos.

Cuadro 9. Comparación de medias de pH por el efecto de los factores principales de periodos de volteo y dosis de biosólidos.

Periodos de Volteo (días)	Dosis de Biosólidos (l)				Media de Periodos
	0	1,560	3,120	4,680	
7	8.90	9.10	9.17	9.15	9.08a
14	8.80	9.07	9.02	9.05	8.98 b
Media de Dosis	8.85b	9.08a	9.10a	9.10a	

El valor final de pH en composta terminada va a estar influenciado por el tipo de materia prima y por los materiales que se incorporen durante el proceso de compostaje. Moreno *et al.*, (2007) mencionan que los valores de pH en compostas terminadas fluctúan entre 6.5 y 8.5, por lo cual los valores de pH registrados en estas compostas se encuentran por arriba de estos valores, sin embargo es importante mencionar que en la prueba biológica estos materiales presentaron los valores más altos en vigor de planta de 4 y 5 respectivamente indicando que se encuentran dentro parámetros normales. De acuerdo con Ruiz, (2009) estos valores de pH alcalinos presentes en las compostas están relacionados con la producción de nitrógeno de tipo amoniacal, el cual se produce en la última etapa del proceso de compostaje y este fenómeno no es ajeno en el compostaje del bagazo de agave, ya que cuando han transcurrido alrededor de tres meses de haber iniciado el proceso se percibe un fuerte olor a amoniaco. Así también los valores de pH más alcalinos que presentan las compostas están influidos por la alcalinidad presente en los biosólidos ya que estos presentan un valor de pH de 8.7 (Cuadro 5)

5.4.3. Nitrógeno total

El análisis de varianza para los valores totales de nitrógeno presente en las compostas no mostró diferencias significativas en factores principales, pero si para la interacción de ambos factores ($P \leq 0.05$) (Apéndice A3). La interacción de los factores principales de periodos de volteo y dosis de biosólidos se presenta en la Figura 13 en

donde los tratamientos con un periodo de volteo de 14 días las dosis de 1,560 y 3,120 litros de biosólidos utilizadas registraron las concentraciones más altas de nitrógeno total (1.93 y 1.94). De acuerdo a Stofella *et al.*, (2005) el contenido de nitrógeno total en las compostas puede variar sustancialmente según la materia prima, condiciones del proceso y maduración. Por lo cual este comportamiento puede estar relacionado con los dos primeros factores anteriormente mencionados ya que los biosólidos presentan una concentración de 6.87 % (Cuadro 5) y al manejo proporcionado en cuanto a los riegos y volteos, ya que en general estos tratamientos fueron los recibieron menos cantidad de biosólidos y número de volteos permitiendo esto la conservación del nitrógeno

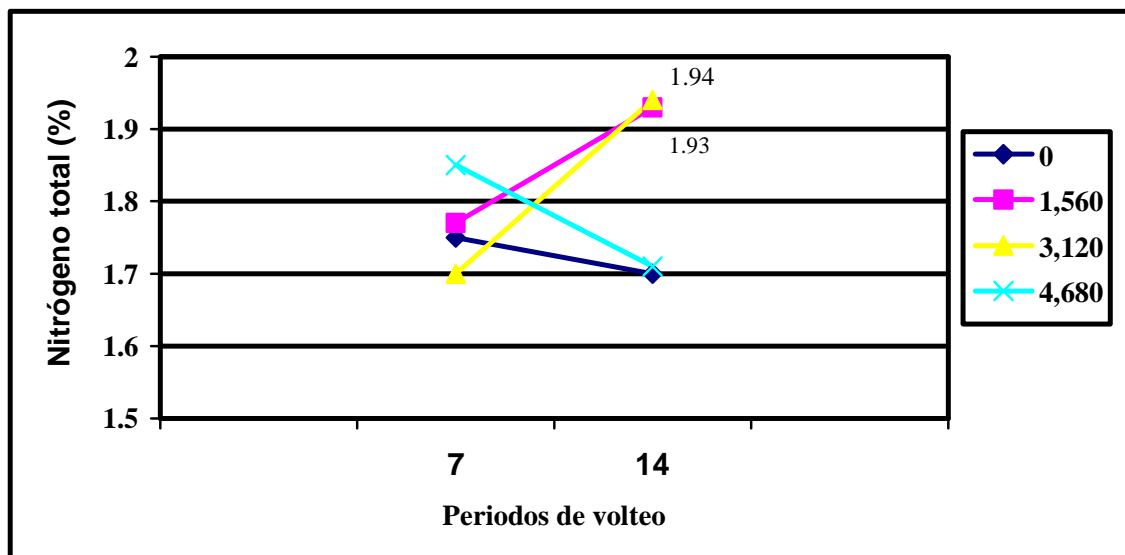


Figura 13. Efecto de la Interacción de los periodos de volteo y dosis de biosólidos en la concentración de nitrógeno total

Los valores presentes de nitrógeno total en la compostas se encuentran dentro del rango normal, ya que de acuerdo a la Agencia del Medio Ambiente para el Mantenimiento de Energía (ADEME) citada por Velasco, (2002) el parámetro de calidad para nitrógeno total en compostas de residuos orgánicos va de 1 a 2.4 % con una media de 1.5 %.

5.4.4. Fósforo

El análisis de varianza de los valores de fósforo presente en las compostas mostró diferencia significativa ($P \leq 0.05$) para factores principales de periodo de volteo y dosis de volteo así como para la interacción entre ambos factores (Apéndice A4). Se procedió a realizar la comparación de medias mediante la prueba de tuckey, indicando que para el factor de periodo de volteo los tratamientos que recibieron los volteos y aplicación de biosólidos cada siete días presentan concentración mayor de fósforo (0.30) en relación con los tratamientos que se voltearon y aplicaron los biosólidos cada 14 días (0.27) (Cuadro 10). Para el caso del factor de dosis de biosólidos los tratamientos que recibieron la dosis más alta (4,680l) son los que presentan el valor más alto de fósforo de 0.37%.

Cuadro 10. Comparación de medias de fósforo por el efecto de los factores principales de periodos de volteo y dosis de biosólidos.

Periodo de Volteo (días)	Dosis de Biosólidos (l)				Media de periodos
	0	1,560	3,120	4,680	
7	0.15	0.32	0.33	0.40	0.30 a
14	0.16	0.25	0.32	0.34	0.27 b
Media de Dosis	0.15 d	0.28c	0.32 b	0.37 a	

En relación a la interacción de los factores principales periodos de volteo y dosis de biosólidos se observa en la Figura 14 donde en los tratamientos realizados con un periodo de 7 días la dosis más alta (4,680 l) de biosólidos utilizada se registró la mayor concentración de fósforo de 0.40 %, este mismo comportamiento se presentó para el periodo de 14 días donde concentración de fósforo llegó a 0.34 %.

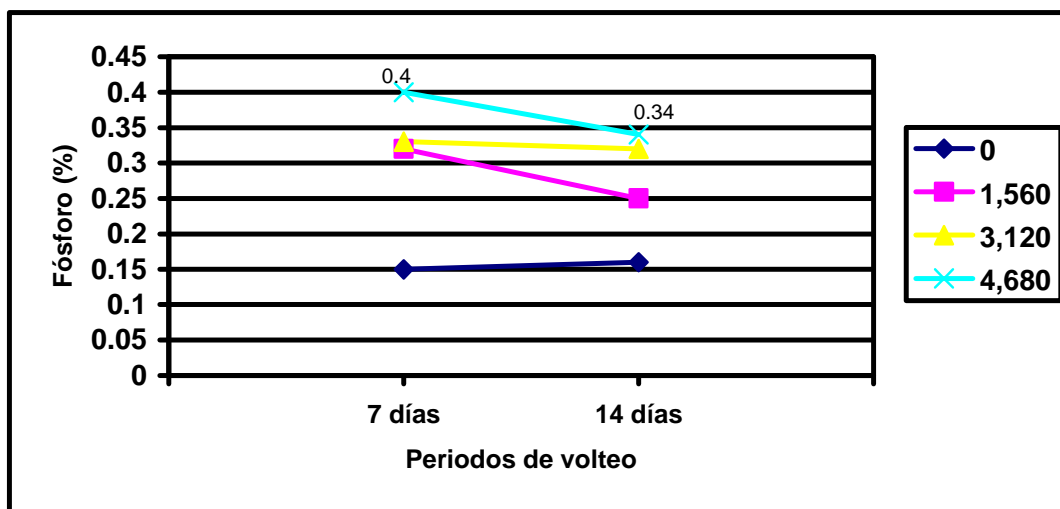


Figura 14. Efecto de la Interacción de los periodos de volteo y dosis de biosólidos en la concentración de fósforo

Los cambios observados en las concentraciones de fósforo están relacionados con la integración de los biosólidos ya que se observa una tendencia ascendente en la concentración del fósforo en relación con las diferentes dosis de biosólidos utilizadas dado que las características propias de este elemento como es su poca movilidad, evitan su lixiviación. Los valores de fósforo presentes en las diferentes compostas se encuentran dentro de los rangos óptimos, ya que de acuerdo con la Agencia del Medio Ambiente para el Mantenimiento de la Energía citado por Velasco, (2002) se indica un rango entre 0.1 al 1 % de fósforo presente en la compostas.

5.4.5. Potasio.

El análisis de varianza presentó diferencia significativa ($P \leq 0.05$) solo para el efecto principal de dosis de biosólidos (Apéndice A5). Para ello se procedió a realizar la prueba de medias utilizando la prueba de Tuckey, indicando que la dosis de 3,120 l de biosólidos mostró la concentración de potasio más alta (0.42) (Cuadro 11), siendo esta estadísticamente igual a la de las dosis de 1,560 y 4,680 litros de biosólidos.

Cuadro 11. Comparación de medias de potasio por el efecto principal de dosis de biosólidos.

Periodo de Volteo (días)	Dosis de Biosólidos (l)				Media de Periodos
	0	1,560	3,120	4,680	
7	0.20	0.43	0.40	0.42	0.36
14	0.26	0.37	0.44	0.38	0.36
Media de Dosis	0.23 b	0.40a	0.42a	0.40a	

Todas las compostas presentaron valores adecuados de potasio ya que Velasco, (2002) menciona que el rango ideal para este nutrimento es entre 0.2 a 3.1 %. Es importante resaltar que los materiales que fueron humedecidos con biosólidos presentan casi dos veces el contenido de potasio con respecto a los materiales que recibieron solo agua como fuente de humedad, siendo esta diferencia atribuible a la incorporación de los biosólidos sin importar la dosis

5.4.6. Calcio.

El análisis de varianza no mostró diferencia significativa ($P \leq 0.05$) para los efectos principales de periodos de volteo y de dosis de biosólidos (Apéndice A6), indicando que la aplicación de los biosólidos no afecta la concentración de calcio en la compostas (Cuadro12)

Cuadro 12. Comparación de medias de calcio por el efecto de los factores principales de periodo de volteo y dosis de biosólidos.

Periodo de Volteo (días)	Dosis de Biosólidos (l)				Media de Periodos
	0	1,560	3,120	4,680	
7	5.70	6.02	5.50	6.10	5.83
14	5.55	5.42	6.1	5.57	5.66
Media de Dosis	5.62	5.81	5.81	5.83	

Las concentraciones de calcio presentes en este tipo de compostas son normales ya que en trabajos realizados con anterioridad utilizando agua pozo se obtuvieron valores de calcio muy semejantes (6.87%), por lo cual con base en estos resultados y los anteriores estas concentraciones están directamente relacionadas con la composición del bagazo de agave el cual presenta hasta casi un 4 % de calcio y así también por el proceso de compostaje ya que Bucher, (2008) citado por Crespo, (2010) menciona que la concentración de este nutrimento tiende a incrementarse debido a la descomposición de células vegetales. Estos valores presentes de calcio en cada una de los materiales se encuentran dentro del rango normal, ya que de acuerdo a Stoffella *et al.*, (2007) las concentraciones de calcio en las compostas varían entre 2.1 a 7.5 %, con una media de 3.9 %

5.5. Propiedades Físicas de las Compostas

5.5.1. Granulometría

La granulometría o la distribución porcentual del tamaño de las partículas nos permiten conocer el grado de descomposición de los materiales iniciales así como también determinar su mejor uso en la agricultura. La Figura 15 nos presenta la distribución por tamaños de los gránulos que componen las compostas de los tratamientos del 1 al 4. Los compostas que recibieron biosólidos como fuente de humedad (T 2, T 3 y T 4) presentaron valores muy semejantes en las tres fracciones evaluadas. Por el contrario el T 1 presentó el 69.35 % de la partículas en la fracción menor de 1.18 mm.

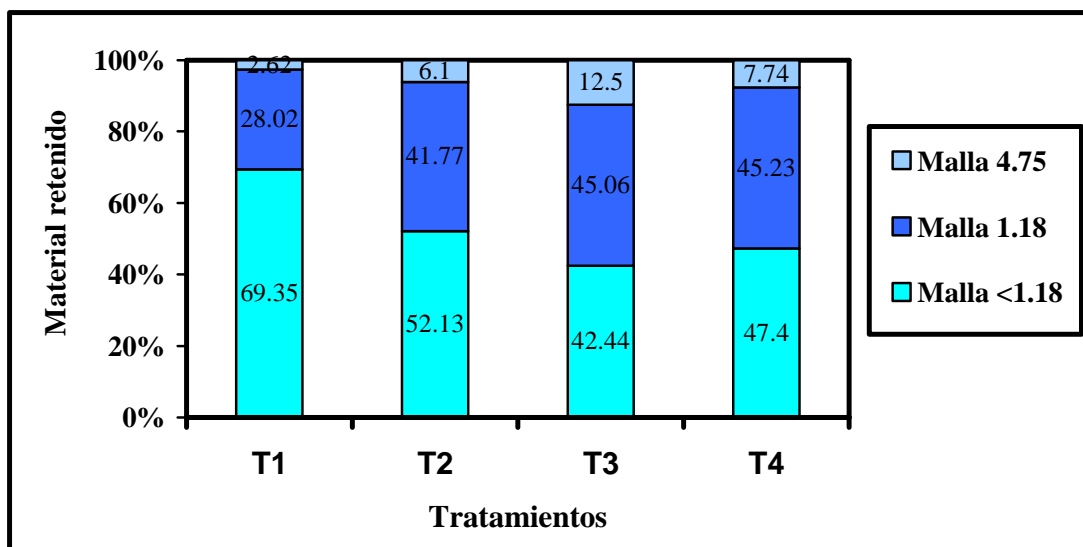


Figura 15. Distribución granulométrica en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de cada 7 días.

En la Figura 16 se presenta la distribución granulométrica de los tratamientos del 5 al 8 los cuales recibieron biosólidos cada 14 días. Esta distribución de las partículas es muy semejante a la de los tratamientos que fueron volteados cada 7 días.

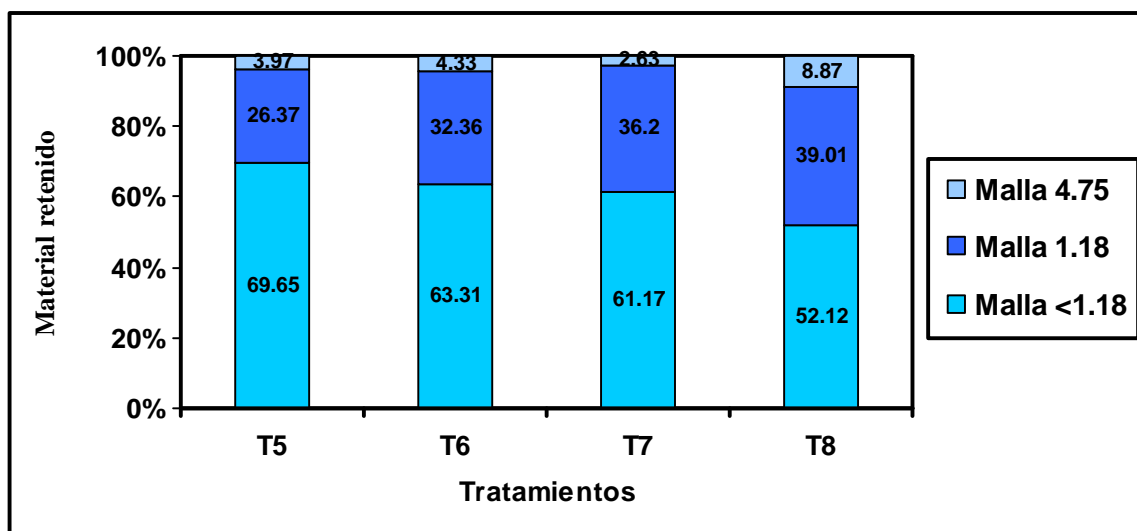


Figura 16. Distribución granulométrica en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación con biosólidos cada 14 días

La presencia de partículas más finas en los tratamientos uno y cinco está relacionada con dos factores de gran importancia: el primero relacionado con la ausencia de los biosólidos ya que los sólidos presentes en estos materiales permiten formar un estructura granulosa de mayor tamaño y el segundo factor relacionado con la trituración mecánica llevada a cabo por el paso del equipo aireador rompiendo la fibra en partículas más pequeñas. Sin embargo el tamaño de partículas se encuentra dentro del rango adecuado al cual hace mención Stofella *et al.*, (2005) partículas menores a 12 mm

5.5.2. Densidad aparente (Da)

El análisis de varianza de los valores de densidad aparente de las compostas presentó diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para los factores principales de periodos de volteo y dosis de biosólidos, así como para la interacción de ambos factores (Apéndice A7). Para el factor de periodos de volteos, los tratamientos que se voltearon cada 7 días registraron una densidad aparente más alta (Cuadro 13). Con respecto al factor de dosis de biosólidos, la dosis de 3,120 l presentó el valor promedio más alto de densidad aparente, el cual es muy semejante al valor que presentan los tratamientos que recibieron la dosis de 4,680 l (Cuadro 13)

Cuadro 13. Comparación de medias de la densidad aparente debido a los efectos principales de periodos de volteos y dosis de biosólidos.

Periodo de Volteo(días)	Dosis de Biosólidos (l)				Media de Periodos
	0	1,560	3,120	4,680	
7	0.52	0.57	0.67	0.58	0.58 a
14	0.40	0.51	0.55	0.58	0.51 b
Media de Dosis	0.46d	0.54c	0.61a	0.58b	

Con respecto a la interacción entre periodos de volteo y dosis de biosólidos, en la Figura 17 se puede observar que para el periodo de tratamiento de 7 días la dosis de 3,120 l presentó el valor más alto de densidad aparente (0.67), mientras que en el periodo de 14 días el valor más alto de densidad aparente (0.58) se presentó con la aplicación de la dosis más alta de biosólidos

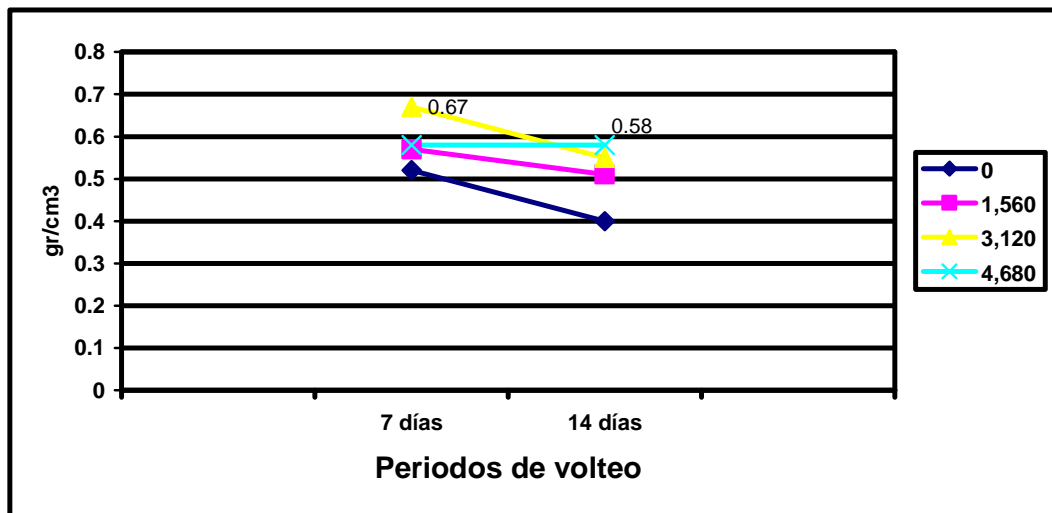


Figura 17. Efecto de la Interacción de los periodos de volteo y dosis de biosólidos en la densidad aparente.

El comportamiento de esta variable está altamente influido por el manejo proporcionado durante el proceso de compostaje, ya que se encuentra ligado con el número de volteos aplicados y la propia integración de los biosólidos ya que los sólidos presentes en estos materiales se adhirieron a la fibra de agave formando una estructura de grano grueso en las compostas que se integraron con más frecuencia y en mayor cantidad, dando como resultado un peso más alto en comparación con las que recibieron agua como fuente de humedad. Estos valores de densidad aparente presentes en las compostas se encuentran dentro del rango óptimo, Stofella *et al.*, (2005) mencionan que la densidad aparente debe estar entre 0.5 a 0.7 gr/cm³

5.5.3. Capacidad de absorción o retención de agua

El análisis de varianza de los valores de retención de agua obtenidos de las compostas mostró diferencia significativa ($P \leq 0.05$) solo para el efecto principal de dosis de biosólidos, así como para la interacción de los factores de periodo de volteo y dosis de biosólidos (Apéndice A8) . Se realizó la comparación de medias mediante la prueba de Tuckey la cual indicó que para el factor de dosis de biosólidos el valor promedio más alto de capacidad de absorción lo presentó el material que recibió solo agua como fuente de humedad (Cuadro14), que es estadísticamente igual a los valores presentados con las dosis de 1560 y 3120 litros de biosólidos

Cuadro 14. Comparación de medias de la retención de agua debido al efecto principal de dosis de biosólidos.

Periodo de Volteo (días)	Dosis de Biosólidos (l)			
	0	1,560	3,120	4,680
7	61.13	57.24	57.59	56.37
14	59.18	62.65	56.15	58.98
Media de Dosis	60.15a	59.45ab	57.27b	57.26b

En relación con la interacción de periodos de volteo y dosis de biosólidos se observa en la Figura 18 que en el periodo de 7 días la dosis agua registró el valor promedio más alto de absorción de agua, mientras que en el periodo de 14 días el valor más alto de absorción se presentó con la dosis de 1,560 l de biosólidos. La respuesta de esta variable está estrechamente relacionada con la densidad aparente, ya que los materiales que presentan una mayor densidad aparente presentan un porcentaje de retención más bajo, debido a que los poros se encuentran ocupados por los sólidos integrados por los biosólidos, evitando así la captación de mayor cantidad de agua. De acuerdo con (García *et al.*, 2001) citado por (Bracho *et al.*, 2009) estos valores de capacidad de retención de humedad se encuentran dentro del rango normal el cual ocurre entre el 40 y el 60%

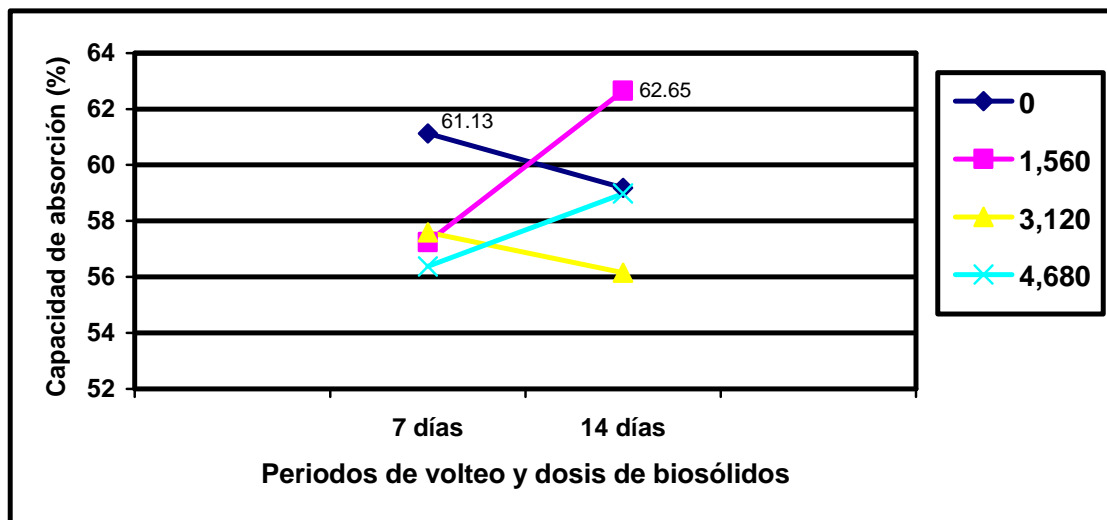


Figura 18. Efecto de la interacción de periodos de volteo y dosis de biosólidos en la capacidad de absorción de agua

5.5.4. Prueba biológica de Compostas

Es importante mencionar que esta prueba está indicada para materiales que son mezclados con otros componentes para formar un sustrato con características adecuadas para utilizarse en contenedores, sin embargo es importante conocer el comportamiento de las compostas por si solas. En el cuadro 15 se presentan los resultados obtenidos de las variables de respuesta de plántulas de pepino a compostas evaluadas.

Cuadro 15. Variables de respuesta de plántulas de pepino a compostas evaluadas

Tratamientos	pH	C.E mS cm ¹	vigor de planta	Hojas verdaderas	Altura de planta cm.	Diámetro de tallo mm	Peso seco mg. plantas
T1	7.97	2.43	3	1c	9.58e	2.6cd	0.16de
T2	7.76	6.52	3	1c	10.32de	2.52cde	0.16e
T3	8.06	7.3	4	1.2bc	11.4bc	2.75bc	0.19cd
T4	7.77	5.56	5	2a	13.87a	3.2a	0.28a
T5	8.17	3.96	4	1.8a	11.84b	2.87b	0.22b
T6	7.91	6.55	4	1.4b	11.57bc	2.3e	0.20bc
T7	7.71	7.28	3	2a	10.61cd	2.42de	0.16de
T8	7.54	7.5	3	1.1bc	9.8de	2.6bcd	0.18cde
T9 peat moss	3.8	0.21	1	0d	2.54f	1.2g	0.04g
T10 agrolita	6.3	0.12	2	1c	3.18f	1.74f	0.08f

Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales

5.5.5. Potencial hidrógeno (pH)

Los materiales más ácidos fueron el peat moss y la agrolita (T 9 y T 10) mientras que los tratamientos restantes tuvieron valores de pH básicos de 7.54 a 8.17 (Cuadro 15), esto debido a la basicidad característica de los materiales orgánicos que han sufrido un proceso de degradación, en el cual el pH se eleva por efecto del desprendimiento de amoníaco proveniente de la descomposición de las proteínas (Soliba, 1998). Mientras que Bunt, (1988) señala que el pH óptimo para el crecimiento de plantas en sustratos orgánicos está entre 5.0 y 5.5, sin embargo no excluye que algunas especies puedan desarrollarse satisfactoriamente fuera de este intervalo.

5.5.6. Conductividad eléctrica (CE)

La mayoría de las compostas analizadas presentaron una CE eléctrica dentro del rango adecuado Cooperban, (2000) señala que la concentración de sales debe de ser menor a 6 mS cm¹ en compostas que se van a utilizar como enmienda al suelo. Para las compostas que presentaron un valor más alto de conductividad eléctrica, podrían

considerarse realizar riegos con agua acidulada cuando todavía el material se encuentre acordonado (en forma de pila).

5.5.7. Vigor de planta

Dentro de una escala de valores de 1 a 5 los materiales de los tratamientos: 3, 4, 5 y 6 fueron los mejores, ya que se obtuvieron plántulas de mayor vigor, a pesar de sus valores de pH y conductividad eléctrica (mejor desarrolladas, mayor número de hojas verdaderas, altura y coloración), mientras que 9 y 10 presentaron los valores más bajos (Figura 19).



Figura 19. Vigor de plántulas obtenidas en los materiales utilizados.

5.5.8. Altura y materia seca de plántulas

Se observaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) entre los materiales evaluados, sobresaliendo los materiales de tratamientos 3, 4, 5 y 6 respectivamente desarrollando plántulas con mayor altura (Figura 20) y en cuanto a la producción de materia seca los tratamientos 4, 5 y 6 respectivamente demostraron que estos materiales se encuentran en condiciones aceptables para su utilización. Es importante señalar que los

materiales de los tratamientos 9 y 10 que por sí solos no presentan las condiciones adecuadas para utilizarse, deben de ser suplementados



Figura 20. Altura de plántula de pepino cultivada en los diferentes materiales

5.5.9. Prueba microbiológica en las compostas

En el cuadro 16 se presentan los resultados de los análisis microbiológicos de cada una de las compostas obtenidas. Todos los materiales mostraron un nivel muy abajo del límite permitido para coliformes fecales así como de huevos del helminto y en caso de salmonella spp todos estuvieron abajo del límite permitido. Es de importancia mencionar que los biosólidos por si solos presentaron una carga importante de coliformes fecales, sin embargo por efecto de las altas temperaturas durante el proceso de compostaje, estos organismos no se ven reflejados en la compostas.

Cuadro 16. Contenido microbiológico en composta de bagazo y en biosólidos de la industria tequilera

Tratamientos	Coliformes fecales NMP/g ST*	Salmonella spp NMP/g ST*	Huevos de helminto*
1	>3.0	>3.0	>1.4
2	>3.0	>3.0	>1.1
3	>3.0	>3.0	>1.2
4	>3.0	>3.0	>1.5
5	>3.0	>3.0	>1.7
6	>3.0	>3.0	>1.3
7	>3.0	>3.0	>1.0
8	>3.0	>3.0	>1.7
Biosólidos	680	>3.0	>1.0
Indicador	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10

*NOM-004 SEMARNAT-2002. Anexo III, IV y V

6. CONCLUSIONES

Las compostas que recibieron biosólidos como fuente de humedad durante el proceso de compostaje presentaron valores más altos en las variables de temperatura, conductividad eléctrica y humedad. Con respecto al pH su comportamiento fue muy similar en los ocho tratamientos.

Las compostas a las cuales se les aplicaron biosólidos como fuente de humedad durante el proceso de composteo independiente del periodo de aplicación presentaron concentraciones más altas de NT, P y K.

Los valores básicos de pH así como los niveles de conductividad eléctrica presentes en las compostas obtenidas no influyeron significativamente en las variables de respuesta de las plántulas, obteniendo así un buen desarrollo llegando en algunos casos al nivel máximo dentro de la escala de vigor

Las propiedades físicas de las compostas obtenidas de los tratamientos 2,3,4,6,7 y 8 presentaron características iguales o en algunos casos superiores a las presentadas en las compostas que resultaron de los tratamientos 1 y 5, encontrándose todas las compostas dentro de los valores adecuados para utilizarse como enmienda al suelo.

Las compostas obtenidas de los diferentes tratamientos mostraron un nivel muy abajo del límite permitido para el número probable de coliformes fecales, así como en la cantidad de huevos de helminto y con respecto al número más probable de *Salmonella* spp todos los materiales mostraron niveles por abajo máximo permitido

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación se determina que los biosólidos producto del tratamiento de aguas residuales de la industria tequilera utilizados en este estudio, presentan una alternativa para ser aprovechados como fuente de humedad en el proceso de compostaje del bagazo de agave.

7. LITERATURA CITADA

- Ansorena M., J. 1994. Sustratos propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España
- Alonso M.S., Rigal L. 1997. Caracterización y Valorización del Bagazo de *Agave tequilana* Weber de la Industria del Tequila. Revista Chapingo Serie Horticultura 3(2):31-39.
- Bracho, J., Pierre, F., Quiroz, A. 2009. Caracterización de componentes de sustratos locales para la producción de plántulas de hortalizas en el estado de Lara, Venezuela
- Buncher ,A.2008.Recyclingstoffe im Gartenbau. Lehrauftragte/Bucaher/Skrip Recyclingstoffe 2008.pdf. Institut für Gartenbau, Fachhochschule Weihenstphan,Deutschland.
- Bunt, A. C. 1998. Media and mixes for container-grow plants. Unwin Hyman Ltd London.
- Cooperban,L 2000. The art and sciencie of composting. A resource for famers and compost producers. University of Wisconsin-Madison
- Cooperband, L. 2007. Curso Internacional Teórico Práctico. Calidad de Composta: Estándares, técnicas de evaluación y aplicaciones. Universidad de Guadalajara México.
- Córdova, M, C, A.2006.Estudio de factibilidad técnico económica para instalar una planta de compostaje utilizando desechos vegetales urbanos.99p
- Crespo González, M.R.2010. Calidad de composta de bagazo y mejoramiento del sustrato para plántulas de agave. Informe interno de investigación.
- CRT. 2008. Estadísticas de producción, exportación y consumos de materias primas para la elaboración del tequila.Consejo Regulador del Tequila. Guadalajara, Jalisco,Mexico. <http://www.crt.org.mx>
- CRT. 2009. Estadísticas de producción, exportación y consumos de materias primas para la elaboración del tequila. Consejo Regulador del Tequila. Guadalajara, Jalisco, México. <http://www.crt.org.mx>
- Dalzell H. W., Biddlestone A. J., Gray K. R., Turairajan K. 1991. Manejo del suelo: Producción y uso del composte en ambientes tropicales. Boletin de suelos de FAO N° 56. 178p.

- Escoto,G.T.,Vivanco Castellanos, E.M., Lomeli Ramirez.M.G.,Arias G.A.2006. Tratamiento Fermentativo-químico del bagazo de agave de maguey (*Agave tequilana* Weber) para su aplicación en papel hecho a mano. <http://redaluy.uaemex.m>
- García,E.N., Prado, L. E., Robles, F., Rodríguez Valdez F J. (2005). Implementación del Proceso de Compostaje para el Tratamiento de Biosólidos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Municipales. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electromecánica SC.
- García ,O.,Alcantar,G., Cabrera,F.G y Volke,K.2001.Evaluación de sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii* cultivadas en maceta.
- Gordillo, F., Chávez E. 2010. Evaluación comparativa de la calidad del composta producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales azucareros. CICYT
- González, G.Y., González, R. O., Nungaray, A. J 2005. Potencial del bagazo de agave tequilero para la producción de biopolímeros y carbohidrasas por bacterias celulíticas y para la obtención de compuestos fenólicos. <http://redalyc.uaemex.mx>
- Iñiguez, C. G., Lange, S. E., Rowell, R.M. 2001. Utilization of byproducts from the tequila industry: part 1: agave bagasse as a raw material for animal feeding and fiberboard production.
- Iñiguez, C, G. Acosta, N., Martínez, L., Parra, J., González, O. 2005 .Utilización de subproductos de la industria tequilera .Parte 7.Compostaje de bagazo de agave y vinazas tequileras
- Iñiguez, . G., J. Parra Velasco, P. A. 2006. Utilización de subproductos de la industria tequilera. Evolución de algunos constituyentes de la mezcla de biosólidos de bagazo de agave durante el compostaje. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, UNAM. Año/vol 22, N° 2 pp. 83-89.
- INTEC. 2009. Corporación de Investigación Tecnológica. Manual de Compostaje Santiago de Chile. 82p
- Jacobs, W. L.,MecCreary,S.D. 2001. Utilizing biosolids on agricultural land. Department of crop and soil sciences. Michigan State University.32pp.
- Jurado, G. P., Luna L. M., Barretero H.R 2004. Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos.
- Laborde, A. (2009) Biosolutions México. Plásticos biodegradables. Universia, México

- Laos, F., Mazarino, M. J. Satti, P., Roselli, L., Moyano, S., Ruival, M., Moller Poilsen, L. 2000. Planta de composta de biosólidos: Investigación y desarrollo en Bariloche, Argentina.
- Linerio-Gil, J. E., A. Guzmán Carrillo. 2004. Tratamiento de efluentes y aprovechamiento de residuos. Ciencia y tecnología del tequila. Avances y perspectivas. CATEJ.Guadalajara,Jalisco, México.
- Mahamud, M. Gutiérrez, A., Sastre, H.(1996). Biosólidos generados en la Depuración de Aguas (I): Planteamiento del Problema. Ingeniería del Agua.
- Moreno, C. J., Moral H R. 2007.Compostaje. Ediciones Mundi Prensa. España.569p
- Olivares S, E. 1994. Paquete de diseños experimentales FAUNI.Version 2.5.Facultad de Agronomía UANL.Marín,N.L.
- Ortiz-Hernández, Ma. L., M, E, Gutiérrez-Ruiz, E. Sánchez-Salinas.1995. Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la ciudad industrial del valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. Rev.Int.Contam.Ambient.11(2),105-115.
- Quinchia, A, M., Carmona, D, M. 2004. Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales combinada. Revista EIA, Numero 2p.89-108.
- Rodríguez Macías, R. 2004. Desarrollo y caracterización de sustratos orgánicos a partir del bagazo de agave tequilero. Tesis doctoral de Colegio de Postgrados. Montecillos, Edo.de México.
- Rodríguez Macías, R. 2010.Dinámica y cuantificación de grupos microbianos durante el proceso de compostaje del bagazo de agave tequilero. Informe interno de investigación.
- Ruiz Figueroa, J.F. 2009.Ingeniería del Compostaje. Primera edición. Universidad Autónoma Chapingo.
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT 2002). Protección ambiental. Lodos y Biosólidos. Especificaciones y Limites Permisibles de Contaminantes para su Aprovechamiento y Disposición Final. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Soliba, M. 1998. Aplicación del compostaje para la obtención de productos alternativos a los sustratos tradicionales In:Pastor,J.N (ed) tecnología de sustratos.

Aplicación a la producción viverística ornamental, hortícolas y forestal.
Universidad de Leida España.

Stofella P. J., Kahn B. A. 2005. Utilización de Compost en los Sistemas de Cultivo Hortícola. Ed Mundi Prensa: España. 397p

Sztern D., M A Pravia.1999. Manual para la elaboración de composta. Bases conceptuales y procedimientos. Organización Panamericana de la Salud. OMS.67p

Torres Pérez, Escobar, J. C, Uribe, I. Imery, R. 2007. Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. <http://www.scielo.br>.

Uribe Montes. H. R., Orozco H. G., Chavez S.N., Espino Valdez S.Ma 2002. Factibilidad del uso de biosólidos en el cultivo de maíz forrajero. Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental.

U.S.EPA (2000). Folleto Informativo de Tecnología de Biosólidos. Aplicación de Biosólidos al Terreno. EPA 832-F-00-064.Septiembre 2000.

Vaca, M M; Villavicencio M B., Cárdenas J I, Velazquez C A .2005. Manejo ambiental de Biosólidos para Uso Agrícola.
www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico

Valenzuela Zapata Ana G. 1997. El Agave tequilero su Cultivo e Industria. Editorial Monsanto.

Velasco, V. J. 2002. Alternativa Tecnológica del reciclaje de los desechos orgánicos del Colegio de Postgraduados. Tesis de Maestría.

8. APÉNDICE

Cuadro A1. Análisis de varianza de conductividad eléctrica (CE) en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días

FV	GL	SC	CM	F	P>F
F. Volteos (A)	1	0.877808	0.877808	21.3060	0.000**
F. Dosis (B)	3	11.603859	3.867953	93.8824	0.000**
Interacción A X B	3	0.881111	0.293704	7.1287	0.002**
Error	24	0.988800	0.041200		
Total	36	14.351578			

C.V.=12.38%

Cuadro A2. Análisis de varianza del pH presente en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días

FV	GL	SC	CM	F	P>F
F. Volteos (A)	1	0.069580	0.069580	16.2085	0.001**
F. Dosis (B)	3	0.363281	0.121094	28.2085	0.000**
Interacción A X B	3	0.016357	0.005452	1.2701	0.307NS
Error	24	0.103027	0.004293		
Total	31	0.552246			

C.V.=0.73%

Cuadro A3. Análisis de varianza del contenido de nitrógeno total en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días

FV	GL	SC	CM	F	P>F
F. Volteos (A)	1	0.031281	0.031281	3.6906	0.057NS
F. Dosis (B)	3	0.068558	0.022853	2.6963	0.064NS
Interacción A X B	3	0.229774	0.076591	9.0367	0.000**
Error	24	0.203415	0.008476		
Total	31	0.533028			

C.V.=2.61%

Cuadro A4. Análisis de varianza de contenido de fósforo en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días

FV	GL	SC	CM	F	P>F
F. Volteos (A)	1	0.006617	0.006617	16.4554	0.001**
F. Dosis (B)	3	0.203764	0.067921	168.9194	0.000**
Interacción A X B	3	0.008659	0.002886	7.1786	0.002**
Error	24	0.009650	0.000402		
Total	31	0.228690			

C.V.=3.80%

Cuadro A5. Análisis de varianza del contenido de potasio en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días

FV	GL	SC	CM	F	P>F
F. Volteos (A)	1	0.000010	0.000010	0.0055	0.940NS
F. Dosis (B)	3	0.144112	0.048037	27.7799	0.000**
Interacción A X B	3	0.016166	0.005389	3.1162	0.044NS
Error	24	0.041501	0.001729		
Total	31				

C.V.=6.94 %

Cuadro A6. Análisis de varianza del contenido de calcio en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días

FV	GL	SC	CM	F	P>F
F. Volteos (A)	1	0.005508	0.0055508	0.4858	0.501NS
F. Dosis (B)	3	0.0111124	0.003708	0.3270	0.808NS
Interacción A X B	3	0.055038	0.018346	1.6179	0.211NS
Error	24	0.272141	0.011339		
Total	31	0.343811			

C.V.=4.46%

Cuadro A7. Análisis de varianza de la densidad aparente (Da) en compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días

FV	GL	SC	CM	F	P<F
F. Volteos (A)	1	0.030104	0.030104	129.0074	0.000**
F. Dosis (B)	3	0.069545	0.023182	99.3424	0.000**
Interacción A X B	3	0.013113	0.004371	18.7307	0.000**
Error	16	0.003734	0.000233		
Total	23	0.116496			

C.V.=2.78%

Cuadro A8. Análisis de varianza de capacidad de absorción de compostas de bagazo de agave con volteos y aplicación de biosólidos cada 7 y 14 días

FV	GL	SC	CM	F	P>F
F. Volteos (A)	1	4.843750	4.843750	1.7279	0.205NS
F. Dosis (B)	3	40.101563	13.367188	4.7685	0.018*
Interacción A X B	3	35.437500	11.812500	4.2139	0.022*
Error	16	44.851563	2.803223		
Total	23	125.234375			

C.V.=2.86%