



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE
INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO
INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE RECURSOS
NATURALES**

**“COMPOSTAJE DE DOS MATERIALES DE BAGAZO DE
MAGUEY TEQUILERO (*Agave tequilana Weber*) Y SU
DETERMINACIÓN FÍSICA Y FISICOQUÍMICA.”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

(PRODUCCIÓN Y PROTECCIÓN VEGETAL)

PRESENTA:

PAULINA ALEJANDRA FLORES RÍOS



DIRECTOR DE TESIS: GILBERTO ÍÑIGUEZ COVARRUBIAS

DIRECTOR DE TESIS: GABINO ALBERTO MARTÍNEZ GUTIÉRREZ

SANTA CRUZ XOXOCOTLÁN, OAXACA, DICIEMBRE DE 2009.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 01 del mes de diciembre del 2009 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **"Compostaje de dos materiales de bagazo de maguey tequilero (*Agave tequilana Weber*) y su determinación física y fisicoquímica"**.

Presentada por el alumno:

<u>Flores</u> <small>Apellido paterno</small>	<u>Ríos</u> <small>materno</small>	<u>Paulina Alejandra</u> <small>nombre(s)</small>							
		Con registro: <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 20px;">B</td> <td style="width: 20px;">0</td> <td style="width: 20px;">7</td> <td style="width: 20px;">1</td> <td style="width: 20px;">1</td> <td style="width: 20px;">2</td> <td style="width: 20px;">9</td> </tr> </table>	B	0	7	1	1	2	9
B	0	7	1	1	2	9			

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA
Directores de tesis:

Dr. Gabino Alberto Martínez Gutiérrez

Dr. Gilberto Ifiguez Covarrubias

Dr. Jaime Ruiz Vega

Dra. Yolanda Doñaji Ortiz Hernández

Dra. Martha Angélica Bautista Cruz

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. Juan Rodríguez Ramírez





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día **01** del mes **diciembre del año 2009**, el (la) que suscribe **Flores Ríos Paulina Alejandra** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B071129**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Drs. Gabino Alberto Martínez Gutiérrez y Gilberto Iñiguez Covarrubias y cede los derechos del trabajo titulado: **“Compostaje de dos materiales de bagazo de maguey tequilero (*Agave tequilana* Weber) y su determinación física y fisicoquímica”**. al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó floresrios_pau@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Flores Ríos Paulina Alejandra



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. (CONACYT), por el apoyo económico que me brindó para realizar mis estudios de maestría.

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Regional Integral, (CIIDIR IPN - Unidad Oaxaca) por el apoyo económico brindado, pero sobre todo por la formación académica de gran calidad que en sus aulas se imparte, y a todo el personal que ahí labora, que de alguna manera me apoyó.

Al Departamento de Madera, Celulosa y Papel de la Universidad de Guadalajara, por ser la base de este trabajo.

Muy en especial quiero expresar mi agradecimiento a los directores de esta tesis:

Al Dr. Gabino Alberto Martínez Gutiérrez por su invaluable apoyo y experiencia, al compartir su tiempo y conocimientos y gran dosis de paciencia para la redacción de esta tesis y, sobre todo, por brindarme su amistad.

Al Dr. Gilberto Íñiguez Covarrubias, quien creyó y confió en mí, por darme la oportunidad de colaborar con él, por sus valiosas aportaciones y todo el apoyo recibido en la realización de la tesis en la Universidad de Guadalajara.

A la Dra. Yolanda Donají Ortiz Hernández, por sus valiosos consejos y recomendaciones.

A la Dra. Martha Angélica Bautista Cruz por su colaboración y apoyo en la elaboración de esta tesis, y por brindarme su amistad.

Al Dr. Jaime Ruiz Vega, por sus comentarios y sugerencias en la elaboración de esta tesis.

A la Ing. Rosaura Hernández Montelongo, quien me apoyó y guió en el laboratorio, pero especialmente por ser una gran amiga, con quien conté en todo momento.

Al Ing. Arturo Camacho, por su gran apoyo para efectuar los análisis de laboratorio, su paciencia, gran disposición y la amistad que me brindó.

A todo las personas que conocí en el Departamento de Madera, Celulosa y Papel de la Universidad de Guadalajara, en especial a “Don Polo” “Don Memo”, al Dr. “Toño” Rodríguez, al Dr. Ricardo.

Al Dr. Fuentes por su amistad, a la Dra. Arcelia por sus valiosos consejos, a Jesús por su apoyo en el trabajo de campo y laboratorio, a Sergio y Fabiola entre tantos que hicieron de mi estancia en Jalisco algo muy especial.

A mis amigas Nancy, Elizabeth, Ana y compañeros del CIIDIR.

A mi esposo José Antonio y a “las tías” por su infinito e invaluable apoyo que me ofrecieron para con mi hijo, durante la realización de esta tesis y siempre.

Quiero expresar un profundo agradecimiento a **toda mi familia**, en especial a mi madre, mis abuelos, mis hermanas Leila y Sara, mis hermanos Luis y Enrique, mis tías Isa, Teté, Lucy y Clau, a mis tío Vicente, Gerardo y Andrés, quienes siempre me apoyaron, confiaron y creyeron en mí e impulsaron mi crecimiento profesional.

DEDICATORIAS

En primer lugar deseo agradecer a la mujer que con su apoyo, ejemplo constante de lucha, paciencia inagotable, espíritu incansable y gran fortaleza, me enseñó a tener fe en mí para buscar siempre la superación profesional: A mi madre, por el inmenso amor que me (nos) tiene.

A mis abuelos, por su apoyo y consejos; ellos estarán en mi corazón y en mi mente por siempre.

Y a ti Alejandrino, el motor de mi existencia, gracias por los momentos maravillosos que me has brindado, gracias por tu paciencia cuando he tenido que utilizar parte de nuestro tiempo como familia para consagrarme a esto que ahora te ofrezco.

Reciban todos y todas esta tesis, producto del esfuerzo y pasión por mi profesión.

A TODOS GRACIAS

RESUMEN

En el estado de Jalisco, México, la industria del tequila se ha incrementado significativamente y con ello también la generación de residuos en forma de bagazo. En el año 2008 se produjeron 312.1 millones de litros de tequila que originaron más de 450 millones de toneladas de bagazo, derivado de los diferentes procesos de molienda y extracción de azúcares del maguey para la obtención del tequila. El bagazo obtenido de la molienda a base de molinos o de desmeduladoras no es recomendable para utilizarlo como sustrato de cultivos, porque se argumenta que los componentes primarios difieren entre la materia prima del compostaje y el producto final. El objetivo de esta investigación fue evaluar el proceso de biodegradación del bagazo -obtenido bajo diferentes métodos de "molienda"- de maguey tequilero (*A. tequilana* Weber) proveniente de dos "tequileras" además de efectuar su caracterización física, química y fisicoquímica. Los resultados demostraron que el método de "molienda" modificó el contenido de médula y fibra y que el compostaje mejoró las propiedades físicas y fisicoquímicas, con excepción de la conductividad eléctrica. Las relaciones aire - agua del material mejoraron al refinarse, alcanzando valores óptimos. Por lo tanto, si el bagazo del maguey tequilero se va a utilizar como sustrato de cultivo, se recomienda someterlo a compostaje; independientemente de cualquiera de los dos métodos de "molienda", siendo mejor aún cuando es refinado o molido de manera que se asemeje al sustrato de turba (*Sphagnum*).

Palabras clave: Compostaje, bagazo de agave, sustrato.

SUMMARY

In the state of Jalisco, Mexico, the tequila industry has increased significantly and hence the problem in terms of waste generation in the form of bagasse. In 2008 there was a production of 312.1 million liters of tequila, this originated over 450 million tons of bagasse, derived from the different processes of milling and extraction of sugars from the agave for tequila production. The bagasse obtained through mills, or by a depithing machine, is not recommended, for use as plant growth because it is argued that the primary components are different from the raw material for composting and the final product. The aim of this study was to evaluate the process of biodegradation of bagasse obtained under different methods of "milling" of agave (*A. tequilana* Weber) obtained of two "tequila factories", in addition, the physical characterization, chemistry and physico-chemistry were carried out. The results showed that the method of "grinding" changed the pith content, and fiber content, and that composting gave improvements to physical and physicochemical properties, except to electrical conductivity. The air-water relationship, improved in refined materials reaching optimal values. Therefore, if the agave tequila bagasse is to be used as growing media plant, it is recommended to compost it regardless of the method of "milling" used, being best when it is crushed so that it resembles to the peat (*Sphagnum*) substrate.

Key words: Composting, agave bagasse, substrate

JUSTIFICACIÓN

La industria tequilera genera grandes volúmenes de bagazo (desperdicio orgánico) procedente de la molienda durante el proceso de extracción de azúcares. Se menciona que durante el año 2008 la producción de bagazo fue de 450 millones de toneladas (CRT, 2009), que no puede ser utilizada de manera directa como sustrato para cultivos, porque la descomposición de esa materia orgánica es muy lenta, debido a la alta relación carbono/nitrógeno (Sánchez *et al.*, 1998; Íñiguez *et al* 2005), además de tener un alto contenido de lignina que la hace resistente a la degradación microbiana (Segura *et al.*, 2007). Si la tendencia de aumento del 2003 a la fecha, con respecto a la producción de tequila se mantiene, se hace necesario encontrar a corto plazo un sistema técnico y económicamente viable para el manejo del bagazo de agave. El compostaje es un proceso factible para la degradación y estabilización de la materia orgánica (Silva *et al.*, 2003) que podría ser una solución al problema de residuos y al mismo tiempo cerrar el ciclo con la utilización del compost en el cultivo sin suelo. Por lo tanto, es importante evaluar la descomposición controlada de este residuo, analizar sus propiedades físicas, químicas y la fitotoxicidad del mismo, a fin de saber si es posible utilizarlo o no como sustrato de cultivo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS	13
ÍNDICE DE FIGURAS	14
I. INTRODUCCIÓN	15
II. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
III. HIPÓTESIS	18
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	19
4.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGAVE TEQUILERO	19
4.2 BAGAZO DE AGAVE	20
4.3 COMPOSTAJE.....	22
4.3.1 <i>Residuos orgánicos para compostaje</i>	23
4.3.2 <i>Parámetros de calidad en el compostaje y criterios de evaluación del compost.</i>	24
4.3.2.1 Temperatura.....	24
4.3.2.2 Aireación	26
4.3.2.3 Humedad	26
4.3.2.4 Tamaño de partícula y densidad	27
4.3.2.5 pH	28
4.3.2.6 Relación Carbono/Nitrógeno.....	28
4.3.3 <i>Microorganismos en el compostaje</i>	29
4.4 MADUREZ.....	29
4.5 COMPOST COMO SUSTRATO.....	30
4.6 SUSTRATOS DE CULTIVO.....	31
4.6.1 <i>Definición</i>	31
4.6.2 <i>Función</i>	32
4.7 PROPIEDADES DE UN SUSTRATO	33
4.7.1 <i>Propiedades físicas</i>	33
4.7.1.1 Tamaño de las partículas y su distribución.....	34
4.7.1.2 Densidad real	34
4.7.1.3 Densidad Aparente.....	35
4.7.1.4 Espacio poroso total.....	35
4.7.2 <i>Relaciones agua-aire</i>	36
4.7.2.1 Curva de liberación de agua	37
4.7.2.2 Capacidad de aireación	38
4.7.2.2 Agua fácilmente disponible	38
4.7.2.3 Agua de reserva	38
4.7.2.4 Agua difícilmente disponible	39
4.8 PROPIEDADES QUÍMICAS Y FISICOQUÍMICAS.....	40
4.8.1 <i>pH</i>	40
4.8.2 <i>Conductividad eléctrica</i>	40
4.8.3 <i>Relación Carbono Nitrógeno (C/N)</i>	41
4.8.4 <i>Componentes fibrosos</i>	41



4.8.5	<i>Fitotoxicidad</i>	42
V.	MATERIALES Y MÉTODOS	43
5.1	LOCALIZACIÓN	43
5.2	MATERIALES UTILIZADOS.....	43
5.3	COMPOSICIÓN BÁSICA Y DETERMINACIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y FISICOQUÍMICAS DEL BAGAZO DE MAGUEY USADO COMO MATERIA PRIMA.....	45
5.3.1	<i>Determinación de fibra y médula</i>	45
5.3.2	<i>Nitrógeno total</i>	45
5.3.3	Materia seca, cenizas, materia orgánica, carbono orgánico total	45
5.3.4	<i>pH y conductividad</i>	46
5.3.5	<i>Celulosa, hemicelulosa y lignina ácido detergente</i>	46
5.4	EVALUACIÓN DEL COMPOSTAJE.....	46
5.4.1	<i>Temperatura</i>	47
5.4.2	<i>Humedad y aireación</i>	47
5.4.3	<i>Muestreo</i>	47
5.4.4	<i>Determinaciones químicas y físico-químicas</i>	48
5.4.5	Celulosa, hemicelulosa y lignina ácido detergente.....	48
5.4.6	<i>Degradación de componentes</i>	49
5.4.6.1	Pérdida de materia orgánica.....	49
5.4.6.2	Pérdida de volumen	49
5.4.6.3	Pérdida de COT, NTK, celulosa y hemicelulosa.....	49
5.5	DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL COMPOST DE BAGAZO DE <i>Agave tequilana Weber</i>	50
5.5.1	<i>Propiedades físicas</i>	50
5.5.1.1	Densidad de campo.....	50
5.5.1.2	Análisis granulométrico.....	50
5.5.1.3	Densidad aparente, densidad real y espacio poroso total.....	51
5.5.1.4	Curva de liberación de agua.....	52
5.5.2	<i>Determinaciones químicas y físico-químicas</i>	52
5.5.3	<i>Pruebas de fitotoxicidad</i>	53
5.5.3.1	Brote de semillas y crecimiento relativo	53
5.5.3.2	Índice de germinación.....	53
5.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	54
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
6.1	COMPOSICIÓN BÁSICA, CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE DOS MATERIALES DE BAGAZO DE AGAVE TEQUILERO (<i>Agave tequilana Weber</i>).....	56
6.2	EVOLUCIÓN DE ALGUNOS PARÁMETROS EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE DE DOS BAGAZOS DE <i>Agave tequilana weber</i>	58
6.2.1	<i>Temperatura</i>	58
6.2.2	<i>Relación Carbono/Nitrógeno</i>	60
6.2.3	<i>pH</i>	61
6.2.4	<i>Conductividad eléctrica (C.E.)</i>	62
6.2.5	<i>Densidad de campo y comportamiento del volumen</i>	64



6.2.6	<i>Materia orgánica</i>	66
6.2.7	<i>Pérdidas de nitrógeno total de Kjeldahl y carbono orgánico total (COT)</i>	68
6.2.8	<i>Componentes fibrosos</i>	69
6.3	PROPIEDADES DEL COMPOST DE BAGAZO DE AGAVE TEQUILANA WEBER.	72
6.3.1	<i>Físicas</i>	72
6.3.1.1	Distribución del tamaño de partículas de compostas refinadas y sin refinar.	72
6.3.1.2	Densidad real, aparente, espacio poroso total e índice de grosor 74	74
6.3.1.3	Relaciones aire-agua 75	75
6.3.1.4	Curva de liberación de agua. 77	77
6.3.2	<i>Propiedades químicas y fisicoquímicas</i>	78
6.3.2.1	pH y conductividad eléctrica. 78	78
6.3.2.2	Relación Carbono/Nitrógeno..... 80	80
6.3.2.3	Componentes fibrosos 80	80
6.4	BIOENSAYOS DE GERMINACIÓN	81
6.4.1	<i>Brote y vigor relativo</i> 81	81
6.4.2	<i>Índice de germinación</i> 82	82
VII.	CONCLUSIONES	84
	RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	86
VIII.	LITERATURA CITADA.	89
	ANEXOS96

ÍNDICE DE CUADROS

4.1	Características químicas del bagazo de la industria del tequila y mezcal.....	21
4.2	Clasificación de sustratos basados en su naturaleza química.....	32
4.3	Niveles óptimos de propiedades físicas de sustratos.....	39
6.1	Composición básica del bagazo de maguey tequilero (<i>Agave tequilana Weber</i>).....	56
6.2	Valores de las propiedades químicas y fisicoquímicas del bagazo de maguey tequilero (<i>Agave tequilana Weber</i>) tal como se obtuvo de las tequileras.....	57
6.3	Correlación entre la pérdida de materia orgánica y volumen en compostaje de bagazo de <i>Agave tequilana Weber</i> .	68
6.4	Algunas propiedades físicas del compost y el compost refinado de bagazo de <i>Agave tequilana weber</i> proveniente de las tequileras “La Cofradía” y “La Regional”	76
6.5	Relaciones aire – agua del compost refinado y sin refinar de bagazo de <i>Agave tequilana Weber</i> de dos tequileras en comparación con un sustrato y niveles óptimos.	77
6.6	Propiedades químicas y fisicoquímicas del compost de bagazo de agave proveniente de dos tequileras en comparación con valores de referencia	79

ÍNDICE DE FIGURAS

4.1	Evolución de la temperatura en el tiempo de compostaje.....	25
4.2	Curva de liberación de agua.....	37
5.1	Puntos de muestreo en pila de compostaje.....	48
6.1	Comportamiento de la temperatura durante el compostaje de <i>Agave tequilana Weber</i> proveniente de dos tequileras: a) “La Cofradía” b) “La Regional”.....	59
6.2	Comportamiento de la relación C/N en el compostaje de bagazos de maguey tequilero (<i>Agave tequilana Weber</i>).....	61
6.3	Cambios de pH durante el compostaje de bagazo de <i>Agave tequilana Weber</i> proveniente de las tequileras “La Cofradía” y “La Regional”.....	62
6.4	Cambios de la conductividad eléctrica durante 126 días de compostaje de bagazo de agave (<i>A. tequilana Weber</i>) proveniente de las tequileras “La Cofradía” y “La Regional”.....	64
6.5	Densidad de campo mostrada en el compostaje de bagazo de <i>Agave tequilana Weber</i> proveniente de las tequileras “La Cofradía” y “La Regional”.....	65
6.6	Comportamiento del volumen durante el compostaje de bagazo de <i>Agave tequilana Weber</i> proveniente de las tequileras “La Cofradía” y “La Regional”.....	66
6.7	Pérdida de nitrógeno total en el compostaje de bagazo de <i>Agave tequilana Weber</i> proveniente de las tequileras “La Cofradía” y “La Regional”.....	69
6.8	Degradación de fibra con respecto al tiempo de compostaje de bagazo de <i>Agave tequilana Weber</i> de la tequilera “La Cofradía”.....	70
6.9	Degradación de fibra con respecto al tiempo de compostaje de bagazo de <i>Agave tequilana weber</i> de la tequilera “La Regional”.....	71
6.10	Distribución del tamaño de partícula de dos compost de bagazo de <i>Agave tequilana Weber</i> de las tequileras “La Cofradía” y “La Regional” en comparación al sustrato turba Sphagnum.....	73
6.11	Distribución del tamaño de partícula del compost refinado del bagazo de <i>Agave tequilana Weber</i> de la tequilera “La Cofradía” y “La regional”, en comparación al sustrato turba Sphagnum.....	74
6.12	Curva de liberación de agua del compost refinado y sin refinar de bagazo de agave de dos tequileras en comparación con un sustrato comercial.....	78
6.13	Germinación de semillas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) utilizando extractos a diferentes concentraciones del compost refinado y sin refinar de bagazo de dos tequileras.....	83



I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de México, el agave, a través de sus especies y ubicación regional, ha sido fuente generadora de bienes económicos, sociales, ecológicos y culturales. Entre las bebidas que se destilan de esta planta están el pulque, la bacanora, el sotol, el mezcal y el tequila que se obtiene del *Agave tequilana Weber*, variedad azul, originario del estado de Jalisco

En México, la producción de tequila ha ido en aumento y con ello la problemática de los residuos que de este proceso se desprenden. Tan sólo en el año 2008 se produjeron 312.1 millones de litros de tequila y tequila 100% (CRT 2009). Es importante tener en cuenta que para obtener un litro de tequila 100% se requieren siete kilogramos de agave. Entre los residuos derivados se encuentra el bagazo proveniente de la extracción de los azúcares fermentables de las cabezas de la planta *Agave tequilana* (Íñiguez et al, 2005).

En el 2008 con esta producción de tequila se consumieron 1,125.1 millones de toneladas de agave (CRT, 2009). Lo cual representa una estimación basada de 450.04 millones de toneladas de residuo en forma de bagazo.

El término residuo se refiere a aquellas materias originadas en las actividades de producción y consumo que no han alcanzado, en el contexto en que se producen, ningún valor económico; ello puede deberse tanto a la falta de tecnología adecuada para su aprovechamiento como a la inexistencia de un mercado para los productos recuperados (Costa et al., 1991).

Hasta hace poco más de 20 años, la acumulación de bagazo de agave representó un problema para las industrias tequileras que procuraban deshacerse de él, al venderlo a bajo precio o regalarlo (Íñiguez et al, 2007). El bagazo de agave hasta 1999 se utilizaba en la fabricación de ladrillos para construir viviendas y, en mayor volumen, en la fabricación de colchones, previa remoción de la médula en seco o



en húmedo, con el fin de aprovechar sólo la parte fibrosa del bagazo. El bagazo que no se utilizaba para estos fines por lo general se incineraba o enterraba (Íñiguez et al, 2007).

También el bagazo de agave podría ser utilizado para elaborar cepas en el cultivo de hongos comestibles, fibras para la industria papelera, sustratos de vegetales y abono (Casillas, 1999).

Este material podría ser utilizado con éxito en la agricultura después de haber sido sometido a compostaje, con el cual sus propiedades físicas, químicas y biológicas podrían ser las óptimas, ya que este tratamiento mejora las condiciones de fitotoxicidad de materiales, degradando la materia orgánica y obteniendo material estable. (Varnero *et al.*, 2007), su uso como acondicionador de suelos o como sustrato o componente de sustrato dependerá de las características que presente al final de este procedimiento.

En este trabajo se sometió a compostaje, bagazo de agave de dos tequileras diferentes y se determinaron las características físicas, químicas, fisicoquímicas y de fitotoxicidad del compost para su posible uso como sustrato de cultivo.



II. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el proceso de compostaje del bagazo de maguey tequilero (*A. tequilana Weber*) proveniente de dos “tequileras” con métodos diferentes de “molienda” y determinar las características físicas, químicas y fisicoquímicas

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer el comportamiento de las variables más importantes, durante la degradación controlada de dos materiales de bagazo de maguey tequilero (*A. tequilana Weber*).
- Determinar las características físicas, químicas y fisicoquímicas del compost de dos materiales de bagazo de maguey tequilero (*A. tequilana Weber*) para su posible uso como sustrato de cultivo.



III. HIPÓTESIS

El compostaje permite obtener un producto final, cuyos valores de las propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas se ubiquen dentro de los niveles de referencia recomendados para sustratos de cultivos.

IV. REVISION DE LITERATURA

4.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGAVE TEQUILERO

La familia Agavaceae está integrada por ocho géneros, entre los cuales se encuentran el género Agave. De esta familia, en el Continente Americano se encuentran 273 especies descritas, desde el norte de Dakota hasta Bolivia y Paraguay. México cuenta con 205 especies, de las cuales, 151 son endémicas (Amador, 2002)

Principales especies de agave en Jalisco

En el estado de Jalisco son explotadas, para la obtención de aguardiente, las siguientes especies de agave: sigüin: *Agave cantala* Roxb., moraleño: *Agave cupreata* Trel., mezcal grande o raicilla: *Agave longisepala* Tod, mezcal mano larga o chino bermejo: *Agave palmaris* Trel., mezcal pata de mula: *Agave pesmulae* Trel., mezcal blanco: *Agave pseudotequilana* Trel., maguey chato *Agave subtilis* Trel., y mezcal azul: *Agave tequilana* Weber (Halffter, 1957 y Villalvazo, 1986).

Generalidades del agave azul (*tequilana* Weber).

El agave azul *Agave (tequilana* Weber), es la planta que se utiliza para la elaboración de tequila y que ha sido cultivada por más de un siglo en la región de Jalisco. Esta es una planta surculosa que se extiende radialmente, de 1.2 a 1.6 metros de altura. Las hojas de 90 a 120 cm son lanceoladas, acuminadas y de fibras firmes, casi siempre rígidamente estiradas, cóncavas de ascendentes a horizontales, de 8 a 10 cm de ancho; con espina terminal de 2 cm, color rojo oscuro; los dientes son rojizos triangulares de 3 a 4 mm y separados a una distancia de 1 a 1.5 cm. Lo más ancho de las hojas se encuentra hacia la mitad y son angostas y gruesas hacia la base. Las raíces de esta planta son gruesas y de ellas surgen brotes que serán luego los que permitirán sembrar nuevas plantas; a

raíz de tierra se forma una piña esférica compuesta de gajos alargados que son las bases de las hojas y del tallo o "mesontle" (Gentry, 1982 y Amador, 2002)).

Esta planta es cultivada solamente en regiones muy restringidas y establecidas como territorios protegidos por la denominación de origen del tequila. Esos territorios incluyen al estado de Jalisco (con 125 municipios) y algunos municipios de los estados de Nayarit (8 municipios), Guanajuato (7 municipios) Michoacán (30 municipios) y Tamaulipas (11 municipios). El mayor cultivo de plantas de *Agave tequilana Weber* está en el estado de Jalisco con un total de 356,935,509 plantas seguido por los estados de Nayarit (30,253,514 plantas), Michoacán (12,497,927 plantas), Tamaulipas (8,154,124 plantas) y Guanajuato (7,894,106 plantas) (CRT, 2007).

Una vez que las plantas de *Agave tequilana Weber* han alcanzado su estado de madurez después de 8 a 10 años de ser cultivadas, son jimadas (lo que se refiere a quitar las hojas o pencas de la piña o tronco) para cosechar las "piñas" o troncos que son la materia prima para la elaboración del tequila. (Iñiguez *et al.*, 2001) determinaron que del total del peso fresco de la planta, 54% correspondió a la "piña" o tronco de la planta, 32% a hojas y 14% como material sin utilidad aparente.

4.2 BAGAZO DE AGAVE

Descripción

El bagazo de agave es el residuo fibroso que queda después de que las cabezas de agave cocidas son destrozadas, enjuagadas y exprimidas para extraerle los azúcares fermentables para la producción de tequila. El bagazo está compuesto principalmente de fibras heterogéneas de 10 a 12 cm de largo y material orgánico no fibroso en forma de partículas finas (médula) que corresponden a la corteza y envoltura fibrovascular dispersa en el interior de la cabeza de la planta de agave (Iñiguez *et al.*, 2007).

En peso húmedo el bagazo representa cerca de 40% del peso total de la cabeza de agave procesada (Cedeño, 1995). En el año 2003 se consumieron 412.9 millones de toneladas de agave para tequila y tequila 100% agave, en el 2008 se incrementó esta cantidad ascendiendo a 1,125.1 millones de toneladas (CRT, 2009), de las cuales, aproximadamente 450.04 millones de toneladas corresponden al bagazo derivado de este proceso.

El cuadro 4.1 nos muestra algunas características químicas reportadas del bagazo residual de la industria del tequila (Alonso y Rigal, 1997 e *Íñiguez et al.*, 2005) y de la industria del mezcal (Zárate, 2006).

Cuadro 4.1 Características químicas del bagazo de la industria del tequila y mezcal.

	(Alonso y Rigal, 1997)	(Íñiguez et al, 2005)	(Zárate, 2006)
Celulosa (%)	43	41.9	43
Lignina (%)	15	7.20	15
Hemicelulosa (%)	19	12.10	19
Nitrógeno total (%)	3	0.53	3
Pectinas (%)	1	-	1
Grasas (%)	1	-	-
Azúcares	5	-	10
Reductores (%)			
Cenizas (%)	6	8.80	-
Otros (%)	2	-	9

Usos

El bagazo de agave se ha utilizado como combustible para calderas, como forraje para aves y ganado, en la fabricación de ladrillos y adobes y como relleno en muebles y colchones (Cedeño, 1995).

Ancona *et al.* (2007) mencionaron la utilización de bagazo de henequén como sustrato para el cultivo de *Pleurotus Ostreatus* y *P. Djamor* en Yucatan, a su vez el sustrato residual del cultivo de estos hongos ha sido aceptado como alimento para las lombrices en vermicompostaje.

Un estudio hecho por Zárate (2006) indicó que las características físicas, químicas y biológicas del compost de bagazo de agave mezcalero permitieron utilizarlo como sustrato en el cultivo sin suelo de melón; sin embargo, mencionó también que su mezcla con otros materiales, como polvo de fibra de coco, mejoró sus características como sustrato.

Escoto *et al.* (2006), señalaron el uso de bagazo de agave tequilero para la fabricación de papel hecho a mano con buenos resultados después de un tratamiento fermentativo, mecánico y químico.

Íñiguez (1999) mencionó que aún persisten diversos inconvenientes en el uso del bagazo de agave; para la nutrición animal presenta poca digestibilidad y para la elaboración de adobes y ladrillos es muy rígido y no se mezcla homogéneamente con la arcilla.

4.3 Compostaje

Diversos residuos orgánicos considerados como basura se utilizan para obtener productos con valor agregado, mediante el compostaje, el cual es un proceso biooxidativo de transformaciones microbianas en condiciones controladas, donde se obtiene un producto final denominado compost, orgánicamente estable, libre de patógenos y semillas de malezas, que puede ser aplicado de manera eficiente al suelo para mejorar sus propiedades. (Hoitink y Kuter, 1986 y Haug, 1993).

Comienza con la ruptura de partículas grandes en tamaños más pequeños, bajo condiciones naturales las lombrices, nemátodos y los insectos del suelo como ácaros, colémbolos, hormigas y escarabajos son los que se encargan de esta descomposición mecánica. Bajo condiciones controladas, ésto se puede suplir con la molienda. Una vez establecidas las condiciones físicas, bacterias, hongos, actinomicetos y protozoarios colonizan la materia orgánica e inician la descomposición (Cooperband, 2002).

La descomposición de los sustratos orgánicos puede realizarse de manera aeróbica o anaeróbica (Silva *et al.*, 2003), En el compostaje aerobio ocurre una degradación biológica en donde los microorganismos transforman los compuestos orgánicos mediante reacciones metabólicas, en las que se separan los electrones de los compuestos y se oxidan las estructuras de carbono a dióxido de carbono y agua. Nunca se produce una oxidación completa debido a que una parte del material orgánico se transforma y otra no es biodegradable (Eweis, 1999).

Este proceso ocurre en fases distintas: En la primera de ellas se da una gran actividad de microorganismos mesofílicos quienes utilizan gran parte del carbono como fuente de energía expulsando CO₂ y generando calor debido a que las reacciones metabólicas son de naturaleza exotérmica. Esto incrementa la temperatura, lo que da paso a una segunda fase en la cual la materia orgánica alcanza su bioestabilización a través de reacciones bioquímicas de oxidación llevadas a cabo por organismos de naturaleza termofílica; En la última fase, denominada de maduración, la temperatura disminuye, actuando mohos y actinomicetos que contribuyen a la estabilidad del compost. (Sullivan y Miller, 2004; Cooperband, 2002; Tchobanoglous, 1993).

4.3.1 Residuos orgánicos para compostaje

Los residuos orgánicos son todos aquellos que tienen su origen en los seres vivos, animales o vegetales; incluyen estiércol animal, residuos de cultivos, desechos provenientes de la transformación de alimentos. Los residuos orgánicos son típicamente subproductos de actividades agropecuarias, industriales y municipales (Westerman y Bicudo, 2005).

Los sustratos de naturaleza seca, tales como residuos agrícolas y residuos de jardines, pueden requerir separación en la fuente, adición de nutrientes, particularmente nitrógeno, reducción de tamaño y adición de agua a la mezcla para evitar limitaciones microbiológicas por escasez de humedad. En este caso se

debe utilizar un agente absorbente que mantenga un alto grado de humedad en el material, favoreciendo la actividad microbiológica y fuentes adicionales de nitrógeno (Silva et al, 2003).

4.3.2 Parámetros de calidad en el compostaje y criterios de evaluación del compost.

La descomposición está determinada por las características del material inicial y por diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos como los que se mencionan a continuación.

4.3.2.1 Temperatura.

La temperatura es el factor principal que afecta la actividad microbiana en el compostaje, se define como la unidad de calor y se expresa en °C, °F y/o °K dada por un valor variable en tiempo y espacio (Montenegro y Malagón, 1990). Los microorganismos que pululan en estos sistemas dependen de la temperatura y pueden ser de tres clases; a) criófilos y sicrófilos 0 – 25 °C, b) mesófilos de 25 – 45°C, y c) termófilos > 45°C (Sullivan y Miller, 2004; Bagstam, 1978).

Al inicio de la descomposición, el material se encuentra a temperatura ambiente, por lo tanto bacterias sicrófilas son las que inician la degradación. Su actividad produce pequeñas cantidades de calor incrementando la temperatura (Dickson *et al.*, 1991), este cambio en el entorno, da paso a la primera etapa denominada mesofílica, dando un calentamiento gradual debido a la biodegradación del sustrato. Los microorganismos presentes en el material, se multiplican rápidamente y la temperatura se eleva hasta valores promedio de 40 a 45°C. Durante este período se descomponen compuestos como azúcares, proteínas almidones y grasas (Silva *et al.*, 2003 y Crawford, 1985).

A su vez la descomposición de microorganismos mesófilos aumenta más la temperatura creando un ambiente donde pueden prosperar los microorganismos

termófilos (Dickson *et al.*, 1991), en esta etapa (termófila) cuando la temperatura llega aproximadamente a los 60°C la actividad de los hongos cesa y la descomposición es llevada a cabo por actinomicetos y cepas de bacterias que forman esporas. La velocidad de descomposición se modera y se alcanza el máximo de temperatura. En esta etapa se degradan ceras, proteínas, hemicelulosas y algo de lignina y celulosa (Cegarra, 1994 y Silva *et al.*, 2003).

Después de esta etapa, debido a que las bacterias termófilas se reducen en número, la temperatura disminuye, por lo que los microorganismos mesófilos dominan otra vez (Crawford, 1985 y Bagstam, 1978).

La figura 4.1 nos muestra una curva típica de temperatura/tiempo en compostaje, identificando las diferentes etapas que se desarrollan.

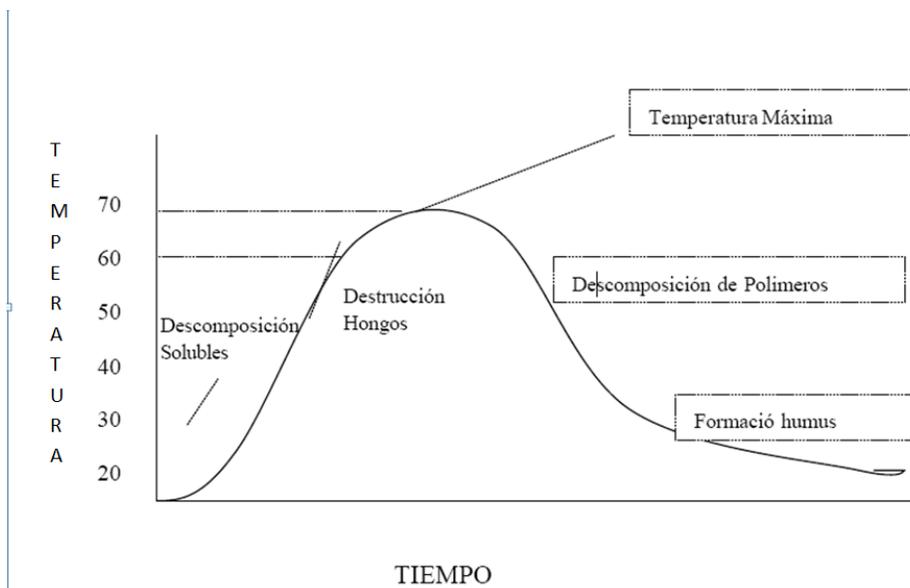


Figura 4.1 Evolución de la temperatura en el tiempo de compostaje.
Fuente: (Silva *et al.*, 2003)

4.3.2.2 Aireación

El aire suministrado durante el compostaje cumple tres propósitos fundamentales:

- Satisfacer la demanda de oxígeno necesaria, debido a que la degradación es una vía esencialmente oxidativa en el que se consume O_2 y se produce CO_2 . El oxígeno es necesario para llevar a cabo por la actividad de los microorganismos la descomposición aeróbica, de determinadas moléculas del sustrato (Sullivan y Miller, 2004)
- Regular el contenido de humedad del sustrato a través del secado. El aire suministrado arrastra parte de la humedad del material. Esto es de especial importancia cuando estos sobrepasan los valores recomendados, (Silva *et al.*, 2003).
- Remoción del calor generado durante la descomposición, con el propósito de controlar el aumento de temperatura, ya que un aumento por arriba de los $70^{\circ}C$ perjudica la actividad de microorganismos termófilos (Silva *et al.*, 2003).

El consumo de oxígeno está relacionado con la actividad microbiana de acuerdo con los cambios de temperatura y humedad (Sullivan y Miller, 2004).

4.3.2.3 Humedad

El contenido de humedad es un factor crítico para conseguir un óptimo compostaje, afecta la actividad microbiana y provee un medio de transporte requerido para disolver los nutrientes para las actividades metabólicas y físicas de los microorganismos (Tiquia *et al.*, 2002). Si ésta es demasiado baja, se produce el secado rápido de la pila, provocando una disminución en la actividad microbiológica, lo que conduce a un producto estable físicamente e inestable biológicamente. Si la humedad es muy elevada, la aireación disminuye y el proceso pasa a ser anaerobio induciendo malos olores (Tiquia *et al.*, 2002). El

contenido de humedad ideal para compostaje está en el intervalo de 50% – 60% y puede ajustarse mediante la mezcla de componentes o mediante la adición de agua (Tchobanoglous, 1993).

4.3.2.4 Tamaño de partícula y densidad

La densidad se refiere al peso por unidad de volumen sin tener en cuenta los espacios porosos; ésta comprende la composición mineral y el contenido de materia orgánica (Jaramillo y Gómez, 1986). Por lo tanto la densidad en el compostaje está ligada al tamaño de partícula.

El tamaño de las partículas influye en la porosidad, densidad, contenido de humedad, la fricción interna, las características del flujo, las fuerzas de arrastre de los materiales, en la transferencia de oxígeno, en la actividad microbiana y en la velocidad de las reacciones bioquímicas (Crawford, 1985; Cooperband, 2002 y Silva *et al.*, 2003).

Tamaños de partículas grandes promueven espacios abundantes por los cuales se dan pérdidas significativas de humedad y menor transferencia de oxígeno, lo que disminuye la actividad microbiana (Silva *et al.*, 2003). Las partículas pequeñas tienen mayor área superficial por unidad de volumen, por lo tanto, los microorganismos tienen mayor área superficial para colonizar. Por su parte, un tamaño excesivamente pequeño de partícula origina problemas de compactación al disminuir la porosidad, impidiendo una adecuada ventilación (Cooperband, 2002 y Silva *et al.*, 2003).

El tamaño de las partículas en el producto final del compostaje proporciona una cierta cantidad de indicadores importantes para quien lo utiliza. Las partículas de mayor tamaño (es decir, las retenidas por una malla de 12 mm) dificulta una eficiente distribución en algún tipo de aplicaciones en campo. El cribado puede eliminar las partículas de mayor tamaño de un compost; sin embargo, es difícil quitar las más pequeñas, las partículas de tamaño pequeño pueden también

limitar la utilización para aplicaciones tales como mezclas para macetas o pasto, en donde es necesario un drenaje rápido. Las partículas demasiado finas son indeseables para su utilización en acolchados porque pueden retener bastante agua como para provocar la germinación de semillas de malas hierbas (Sullivan y Miller, 2004).

4.3.2.5 pH

El valor de pH óptimo para el compostaje está entre 6.5 y 8.0. Si el grado de descomposición no es adecuado, el pH puede caer a valores entre 4-5, retrasándose la degradación (Tchobanoglous, 1993).

El pH del material fermentado varía con el tiempo, durante los primeros días de compostaje el pH cae a 5 o menos. Durante esta etapa el material orgánico se encuentra a temperatura ambiente, comienza la reproducción de microorganismos mesófilicos y sube rápidamente la temperatura. Entre los productos de esta etapa inicial están los ácidos orgánicos simples que causan la caída de pH. Después de aproximadamente tres días, la etapa llega a la temperatura termofílica y el pH debe subir de 8 a 8.5 unidades. El pH cae ligeramente durante la etapa de enfriamiento y llega a un valor entre 7 a 8 en el compost maduro (Silva *et al.*, 2003).

4.3.2.6 Relación Carbono/Nitrógeno

El carbono es la fuente de energía en la descomposición utilizada por los microorganismos para la activación metabólica, mientras que el nitrógeno es el material básico para la síntesis de material celular, por lo tanto la relación C/N es uno de los aspectos más importantes en el balance nutrimental del compost. Es deseable que la relación C/N esté en el rango de 25:1 a 50:1 en la mezcla inicial (Tchobanoglous, 1993).

La relación C/N se considera como un indicador del grado de avance de descomposición, así al inicio de esta fase la relación debe ser del orden de 30:1 y al final cuando se alcanza la madurez, puede ser de 10:1 (Tchobanoglous, 1993). Valores de 20 o menos, cuando los valores iniciales fueron de 30 o más, se consideran aceptables en el compost y pueden interpretarse como indicadores de suficiente estabilidad (Cegarra, 1994).

4.3.3 Microorganismos en el compostaje.

La secuencia y número de organismos presentes en cada etapa dependen del material y de los organismos anteriores en la sucesión así como de las condiciones del proceso (Crawford, 1985).

Al inicio, como los microorganismos mesofílicos (autóctonos) aumentan en número, la temperatura sube. Estos organismos mesofílicos son sucedidos por bacterias y hongos termofílicos hasta que la temperatura sobrepasa los 40°C. Estos son reemplazados por bacterias formadoras de esporas y actinomicetos termofílicos hasta que el material en descomposición alcanza los picos máximos de temperatura, cuando ésta enfría, la mitad es reinvasada (Crawford, 1985); (CIWMB).

4.4 MADUREZ

La madurez es muy importante en la utilización de un compost como sustrato de macetas, para productos envasados y para evitar la transmisión de enfermedades. La madurez es un término general utilizado para describir la oportunidad de aplicación de un compost en determinados usos. Los materiales maduros están listos para emplearse porque contienen concentraciones aceptables o despreciables de compuestos fitotóxicos (Sullivan y Miller, 2004).

La madurez puede ser evaluada por métodos sensoriales, químicos, de estabilidad o de fitotoxicidad. Los test de germinación y crecimiento estiman directamente la



inhibición del crecimiento de la planta por el compost bajo condiciones ambientales específicas (Sullivan y Miller, 2004). Los efectos fitotóxicos de un material orgánico inmaduro se deben a diversos factores, entre los cuales destacan los contenidos de amonio, de ácidos orgánicos volátiles, de metales pesados y de sales (Varnero et al, 2007).

El Índice de Germinación (IG) es una variable sensible y completa para evaluar el grado de madurez química requerido en materiales que se utilizarán como componente base para la elaboración de sustratos especializados de uso agrícola. Este índice sería especialmente útil, si se considera el efecto “maceta” que se presenta cuando se incorporan los sustratos en pequeños contenedores, adquiriendo mayor relevancia el potencial fitotóxico (Varnero *et al.*, 2007).

4.5 COMPOST COMO SUSTRATO

Existen varias revisiones publicadas que ilustran la utilización de compost en la producción agrícola de viveros y semilleros, (Abad et al, 2004; Sullivan y Miller, 2004; Fitzpatrick, 2004 y Sterrett, 2004). En general, éste puede utilizarse como un sustituto barato de la turba u otros componentes orgánicos de medios de crecimiento. Algunos productos de la degradación de sustratos orgánicos han demostrado acelerar el crecimiento de algunas especies, y de esta forma, decrecer el periodo de producción de estos cultivos. También han demostrado tener un efecto represivo sobre algunos patógenos de plantas (Hoitink y Kuter, 1986).

Para una utilización eficiente de los compost como medio de cultivo es necesario tener en cuenta el contenido nutricional, ya que común que contengan cierto número de nutrientes esenciales; sin embargo, esta concentración es generalmente insuficiente para un soporte nutricional, así como también el nivel de sales solubles, ya que estas causan efectos negativos en el crecimiento de las plantas; de igual manera hay que tener en cuenta la compactación, ya que algunos productos con buena porosidad al inicio pueden compactarse durante el

periodo y por último, la fitotoxicidad causada por químicos producidos por microorganismos en etapas tempranas de compostaje, que se ve reflejada en la deformidad o muerte de partes de la planta. (Fitzpatrick, 2004).

4.6 SUSTRATOS DE CULTIVO

4.6.1 Definición

Sustrato agrícola es aquel material sólido distinto de suelo *in situ*, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radical, desempeñando así una función de soporte para la planta, que puede o no intervenir en el proceso de nutrición mineral de la planta (Abad et al, 2004).

Los sustratos sólidos se pueden dividir en dos grandes grupos; orgánicos e inorgánicos, basados en la naturaleza química de los mismos (cuadro 4.2) (Adams, 2004 y Urrestarazu, 2002); también pueden dividirse dependiendo del grado de modificación que el propio sustrato introduce en diversos parámetros de la solución de fertirriego, teniendo dos posibilidades: que no ejerza efecto sobre la composición iónica de la propia disolución o bien que altere la disolución nutritiva pudiendo variar la proporción de nutrientes transportados, en el primer caso son los sustratos denominados químicamente inertes mientras el segundo recibe el nombre de químicamente activos (Urrestarazu, 2002).

Cuadro 4.2 Clasificación de sustratos basados en su naturaleza química.

Clasificación	Ejemplo
I. Materiales inorgánicos (minerales)	Arenas, lana de roca, perlita, etc.
II. Materiales orgánicos	II.1 De origen natural Turbas
	II.2 De síntesis Espuma de poliuretano, poliestireno expandido, etc.
	II.3 Residuos y subproductos de diferentes actividades de producción y consumo Residuos sólidos urbanos, cascarilla de arroz, fibra de coco, etc.

Fuente: Urrestarazu (2002)

4.6.2 Función

El sustrato de cultivo está constituido por un material poroso, en el que se desarrolla el sistema radicular de la planta y del que ésta toma el agua y los nutrientes que necesita para su desarrollo y el oxígeno necesario para el funcionamiento correcto del sistema vascular (Zarate, 2007).

Abad et al (2004) sugirieron que la finalidad de cualquier sustrato de cultivo es producir una planta/cosecha de calidad y abundante en el más corto periodo de tiempo con los más bajos costos de producción.

Las funciones principales del sustrato en el cultivo pueden resumirse de la siguiente forma con base en puntos de concordancia de varios autores (Abad et al., 2004; Urrestarazu 2004; Pire y Pereira 2003; Cabrera 1999 y Ansorena 1994):

- Soporte físico para la planta
- Proporcionar el oxígeno necesario para el correcto funcionamiento
- Constituye la reserva hídrica y de nutrientes de las raíces.

El sustrato es un sistema de tres fases, cada una con una función propia, la fracción sólida asegura el mantenimiento mecánico del sistema radicular y la estabilidad de la planta, la fracción líquida aporta a la planta el agua y, por interacción con la fracción sólida los nutrientes necesarios. Por último, la fracción gaseosa asegura las transferencias de oxígeno y CO₂ del entorno radicular (Lemaire *et al.*, 2005). En la interacción de estas fases radica la importancia de conocer las propiedades físicas, químicas y físico-químicas del sustrato, ya que estas condicionan su manejo.

4.7 PROPIEDADES DE UN SUSTRATO

Los sustratos sólidos poseen las siguientes propiedades:

Baratos y fácilmente disponibles, reproducibles, con una estructura estable, bien aireados, con una buena capacidad de retención de humedad, libre de patógenos, fitotoxinas y semillas de malezas.

Las propiedades de los sustratos, así como su determinación, se han vuelto más importantes a medida que ha aumentado la cantidad de nuevos materiales empleados en su conformación (Verdonck *et al.*, 1983).

4.7.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de un sustrato son de *primerísima importancia*. Una vez que la planta esté creciendo en él no es posible modificarlas. Esto contrasta con las características químicas de los sustratos que pueden ser modificadas mediante técnicas de cultivo apropiadas (Abad *et al.*, 2004 y Baixauli y Aguilar 2002).

La caracterización física estudia la distribución volumétrica del material sólido, el agua y el aire (Abad *et al.*, 2004).

Las propiedades físicas de un sustrato no pueden predecirse, de forma sencilla, a partir de las características de los materiales que lo conforman, pues éstos varían

significativamente de una zona a otra. Además, las mezclas de los distintos materiales producen complejas interacciones que alteran las propiedades físicas de la mezcla final (Ansorena, 1996).

4.7.1.1 Tamaño de las partículas y su distribución.

Muchos de los sustratos están constituidos por una mezcla de partículas con tamaños diferentes, por ende varía también el tamaño de los poros; la distribución de estos determina el balance entre el contenido de agua y aire del sustrato a cualquier nivel de humedad (Abad et al 2004). En la práctica, la porosidad aumenta a medida que lo hace el tamaño de partícula (Ansorena 1994).

Para Abad *et al.* (2004) el mejor sustrato es aquel material de textura media a gruesa, con una distribución del tamaño de los poros entre 30 y 300 μm (equivalente a una distribución del tamaño de las partículas entre 0,25 y 2,5 μm) que retiene suficiente agua fácilmente disponible y posee además un adecuado contenido de aire.

La mayoría de las partículas para componentes orgánicos e inorgánicos deseables para la elaboración de sustratos según Bunt (1988) deberán encontrarse entre 0.5 y 4 mm, y con menos del 20% presente en partículas más finas que 0.5 mm.

4.7.1.2 Densidad real

La densidad real (D_r) de un suelo o sustrato se define como la relación entre el peso seco de sus partículas sólidas y el volumen que éstas ocupan, sin considerar los poros y huecos. Su valor es propio del material y, a diferencia de la densidad aparente, no depende del grado de compactación ni del tamaño de partícula. En materiales difíciles de humectar la densidad real puede calcularse con base en el contenido de cenizas (% referido a materia seca) (Ansorena, 1994).

4.7.1.3 Densidad Aparente

La densidad aparente (D_a) se define como la materia seca contenida en un centímetro cúbico de medio de cultivo (Ansorena 1994). Para Abad *et al.*, (2004) se define como la masa seca del material sólido por unidad de volumen aparente del sustrato húmedo, es decir incluyendo el espacio poroso entre las partículas. Debido a que los sustratos y contenedores se transportan durante su manejo y manipulación, es importante tener en cuenta el peso de los mismos sobre todo para productores que compran sustrato a granel por volumen (Ansorena, 1996).

También se debe tener en cuenta el anclaje de la planta, ya que mientras más alta sea la planta más fuerte deberá ser el sustrato. En los invernaderos, donde el viento no es un factor limitante, la densidad aparente del sustrato puede ser tan baja como $0,15 \text{ g/cm}^3$ (Abad *et al.*, 2004). Las plantas que crecen al aire libre deberían ser cultivadas en sustratos más fuertes, con densidades aparentes comprendidas entre $0,50 \text{ g/cm}^3$ y $0,75 \text{ g/cm}^3$ (Noguera, 2000).

4.7.1.4 Espacio poroso total

El Espacio Poroso Total (EPT) se refiere al volumen total del sustrato de cultivo no ocupado por partículas orgánicas o minerales (Abad *et al.*, 2004). La porosidad varía en un amplio rango de valores, desde un 30% en suelos compactados hasta cifras del orden de 95% en algunas turbas; el valor óptimo para sustratos está por encima del 85% de volumen (Ansorena, 1994).

La porosidad es cerrada cuando los vacíos en el interior de los gránulos (porosidad intraparticular) no son accesibles ni al aire ni al agua y no pueden por tanto influir en la alimentación hídrica ni en la respiración del sistema radicular, en caso contrario se habla entonces de porosidad abierta donde el agua puede



circular por el interior de las partículas pudiendo participar entonces en la nutrición hídrica de las plantas (Abad *et al.*, 2004).

El espacio poroso total puede calcularse mediante la siguiente relación entre la densidad aparente y real (De Boodt y De Waele 1968):

$$EPT = (1 - D_a/D_r) * 100$$

Donde D_a = Densidad aparente y D_r = Densidad real.

4.7.2 Relaciones agua-aire

Un sustrato que tenga una elevada porosidad tendrá las ventajas potenciales de una buena aireación y retención de agua. Sin embargo, es necesario que la distribución de tamaños de poro sea la adecuada para que el sustrato retenga las cantidades convenientes de agua y aire (Ansorena 1994). Consecuentemente una alta porosidad total no indica por sí misma una buena textura y/o estructura del suelo, si no que es necesario conocer la porosidad que proporciona el agua y aquella que proporciona la aireación (Abad *et al.*, 2004).

Un sustrato a capacidad de contenedor (es decir una vez que ha sido saturado y dejado drenar libremente hasta alcanzar el equilibrio), pierde agua a medida que la planta va efectuando una succión, debido a la transpiración del agua por las hojas, al principio la planta extrae con facilidad el agua retenida en los poros grandes, no obstante, a medida que las raíces van extrayendo el agua, irá quedando la que ocupe los poros más pequeños; en consecuencia la succión que la planta realice será mayor, lo que equivale a decir que el agua que queda retenida se encuentra menos disponible. Para conocer la disponibilidad de agua en el sustrato para las plantas suele simularse en el laboratorio lo que ocurre en la maceta, empleando un equipo de succión, estos pueden ser de dos tipos: de embudo con placa filtrante o de lecho de arena, el primer tipo es la metodología de De Boodt (1974 b)

y el segundo tipo es el adoptado por la Sociedad Internacional de Ciencia Hortícola como método de referencia (Ansorena, 1994).

4.7.2.1 Curva de liberación de agua.

Siguiendo la metodología de De Boodt (1974 b) a cada succión aplicada el sustrato perderá una determinada cantidad de agua; midiendo el contenido de agua del sustrato tras la aplicación de diferentes succiones puede trazarse la curva de liberación de agua (Figura 4.2) donde se toma la suma de los porcentajes de fase sólida y aire. De Boodt y Waele (1968) proponen un intervalo de 0 a 100 cm de columna de agua de succión.

Aplicando al sustrato succiones de 10, 50 y 100 cm de columna de agua y determinando su contenido en agua a cada tensión, puede trazarse la curva que refleja la distribución de las fases sólida, líquida y gaseosa.

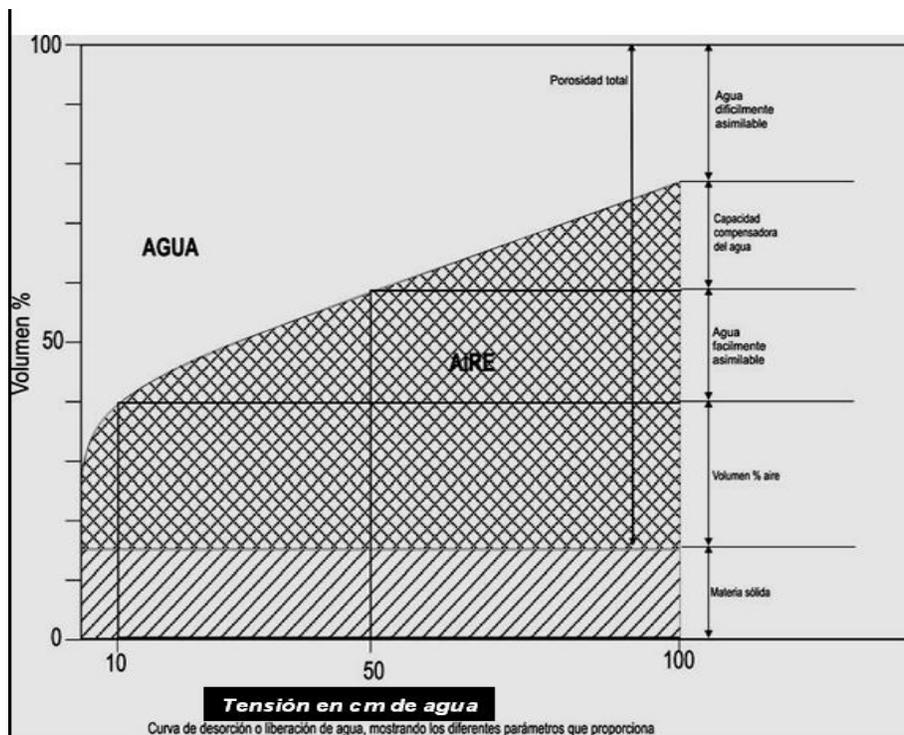


Figura 4.2 Curva de liberación de agua.

4.7.2.2 Capacidad de aireación

Se define como la proporción del volumen de sustrato de cultivo que contiene aire después de que dicho sustrato ha sido saturado con agua y dejado drenar. Usualmente a 10 cm de tensión de columna de agua, su valor óptimo está entre 20% y 30 % del volumen (Abad *et al.*, 2004).

Es esencial un nivel suficiente de la fase gaseosa para evitar los riesgos de asfixia de las raíces en situación de exceso de agua; un déficit de oxígeno puede reducir el crecimiento de las raíces y de la parte aérea; no obstante, en condiciones de hipoxia mantenidas durante varios días puede provocar la muerte de algunas raíces (Abad *et al.*, 2004).

4.7.2.2 Agua fácilmente disponible.

Es el volumen de agua retenida por un sustrato entre succiones de 10 y 50 cm de columna de agua (Ansorena, 1994). El valor óptimo es entre 20% y 30% del volumen.

Un sustrato puede tener baja capacidad de retención de agua fácilmente disponible porque: 1) su porosidad total es baja, 2) los poros son grandes y gran parte del agua se pierde por gravedad, 3) los poros son muy pequeños y la planta es incapaz de extraer una parte importante del agua antes de marchitarse y 4) una combinación de lo anterior (Abad *et al.*, 2004).

4.7.2.3 Agua de reserva

Es la cantidad de agua (% en volumen) que libera un sustrato al pasar de 50 a 100 cm de columna de agua, el valor óptimo según Abad *et al.*, (2004) se encuentra entre el 4% y el 10% en volumen. El límite de 100 cm de tensión se ha encontrado

experimentalmente, trabajando con especies del género ficus (DeBoodt *et al.*, 1974b).

La suma del agua fácilmente disponible y el agua de reserva es decir el agua retenida entre 10 y 100 cm de succión, se denomina agua disponible y su nivel óptimo está entre el 24 y el 40 % del volumen de sustrato (Abad *et al.*, 2004).

4.7.2.4 Agua difícilmente disponible

Es aquella que se encuentra retenida a tensiones superiores a 100 cm. no es recomendable para las plantas ornamentales cultivadas en sustrato que la tensión del agua en éste supere los 100 cm de columna de agua, ya que cuanto más elevada sea la fuerza de succión que ha de ejercer la planta, mayor será el gasto energético y en consecuencia disminuirá la energía disponible para la producción de materia seca.

A manera de resumen, en el cuadro 4.3 se muestran los niveles óptimos para las propiedades físicas de los sustratos.

Cuadro 4.3 Niveles óptimos de propiedades físicas de sustratos.

Propiedad	Nivel óptimo	
	Abad et al (2004)	De Boodt (1974)
Tamaño de partícula (mm)	0,25 – 2,50	- -
Densidad aparente (g/cm ³)	< 0,4*	0,215
Espacio poroso total (% en volumen)	>85	85
Capacidad de aireación (% en volumen)	20 – 30	20 – 30
Agua fácilmente disponible (% en volumen)	20 – 30	20 – 30
Agua de reserva (% en volumen)	4 – 10	6 – 10
Agua total disponible (% en volumen)	24 – 40	26 – 40

*Abad et al 1992

4.8 PROPIEDADES QUÍMICAS Y FISICOQUÍMICAS

Las propiedades químicas y fisicoquímicas se derivan de la composición elemental de los materiales y del modo de estar de los elementos fijados a éstos y su relación con el medio (Rodríguez, 2004). Los materiales orgánicos son los componentes que contribuyen mayoritariamente a la química de los sustratos, debido a la formación y presencia de sustancias húmicas (Noguera, 2000).

4.8.1 pH

Las plantas pueden vivir en un amplio intervalo de pH del sustrato sin sufrir desordenes fisiológicos aparentes, siempre y cuando todos los nutrientes se suministren en forma “asimilable”. No obstante el crecimiento y desarrollo de la planta se ven reducidos de modo marcado en condiciones de acidez o alcalinidad extremas (Noguera, 2000). El pH influye en la asimilabilidad de los nutrientes por la planta, con pH inferior a 5 pueden presentarse deficiencias de nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y con valores superiores a 6.5 se disminuye la asimilabilidad del hierro (Fe), fósforo (P), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn) y cobre (Cu) (Baixauli y Aguilar, 2002). Los óxidos metálicos (Fe, Mn, Cu, Zn, etc.) se hacen más solubles al bajar el pH, (debajo de 5) pudiendo llegar a resultar fitotóxicos (Noguera, 2000).

El valor óptimo de pH para los sustratos orgánicos (5,2 – 6.3), es también el más favorable para la actividad de los microorganismos beneficiosos para las plantas como: bacterias nitrificantes, hongos micorrizicos, etc. (Handreck y Black 1991, citado por Zárate, 2006)

4.8.2 Conductividad eléctrica

Se refiere a la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato (Noguera 2000; Adams, 2004). En aquellos que son inertes la salinidad es prácticamente nula, mientras que en sustratos orgánicos puede tener valores

elevados (Baixauli y Aguilar, 2002). En hidroponía cuando la salinidad es alta puede requerirse un riguroso lavado del sistema (Adams, 2004).

Los efectos de una salinidad elevada pueden ser positivos, tales como el mejoramiento de los frutos de tomate, o negativos como ocurre en algunos cultivos de flores, cuando el rendimiento disminuye (Adams, 2004).

El valor óptimo para sustrato de cultivo recomendado por Ansorena (1994) se encuentra entre 0.75 y 3.49 dS/cm.

4.8.3 Relación Carbono Nitrógeno (C/N)

La relación C/N se usa tradicionalmente como índice de origen de la materia, de su madurez y su estabilidad. Los daños que aparecen en las plantas cultivadas en materiales orgánicos inmaduros son debidos tanto a una inmovilización del nitrógeno como a una baja disponibilidad del oxígeno en la rizósfera. Esta situación está provocada por la actividad de los microorganismos, que descomponen los materiales orgánicos y utilizan el nitrógeno para la síntesis de sus proteínas celulares. El oxígeno es también consumido por la actividad microbiana. Una relación C/N inferior a 40 es considerada como óptima para el cultivo en sustrato y es un índice de un material orgánico maduro y estable. (Abad *et al.*, 2004).

4.8.4 Componentes fibrosos

En muchos sustratos orgánicos es interesante determinar los contenidos en lignina, celulosa y hemicelulosa, ya que de este modo se puede conocer la biodegradabilidad del material. Cuanto mayor sea el contenido en compuestos ligno-celulósicos, mayor dificultad tendrán los microorganismos para degradar la materia orgánica (Hoitink y Poole, 1980; Handrek, 1992 y Thomas *et al.*, 1998). Por ello, un material con una relación C/N elevada puede no requerir de compostaje si el contenido en componentes fibrosos es elevado.



4.8.5 Fitotoxicidad

La potencialidad de un sustrato de cultivo para producir una planta en condiciones óptimas es el resultado de la interacción compleja entre distintos tipos de factores, y, en consecuencia, su calidad sólo puede ser evaluada finalmente mediante la realización de ensayos de crecimiento vegetal (Abad *et al.*, 2004). Existen diversos métodos que permiten predecir el comportamiento de las plantas frente a distintos sustratos, los parámetros pueden incluir complejas técnicas analíticas para cuantificar moléculas fitotóxicas, o rápidos ensayos sensibles a elementos potencialmente fitotóxicos que afecten a la planta (Gariglio *et al.*, 2002). El Índice de Germinación como variable que integra diferentes grados de fitotoxicidad, representa un indicador más robusto para describir el potencial fitotóxico de un material orgánico. Este índice permitiría evaluar el grado de madurez requerido para los residuos orgánicos, que se seleccionen como componente base en la elaboración de sustratos especializados de uso agrícola, especialmente si se considera que se utilizan en contenedores de volumen reducido, con lo cual se maximiza la zona de retención de diversos metabolitos (Varnero *et al.*, 2007).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación consta de tres partes: la primera es la determinación de la composición de la materia prima, la segunda se refiere al desarrollo y seguimiento del compostaje por medio del monitoreo de parámetros químicos y fisicoquímicos, y la tercera es la determinación de las propiedades físicas, químicas y de fitotoxicidad del compost del bagazo de maguey tequilero.

5.1 LOCALIZACIÓN

El trabajo de campo de la presente investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Departamento de Madera, Celulosa y Papel, pertenecientes al Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (C.U.C.E.I.), de la Universidad de Guadalajara. Las determinaciones físicas, químicas y fisicoquímicas se realizaron en el laboratorio de Biotecnología Ambiental del mismo departamento, localizado en el área del Centro de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad de Guadalajara en el predio Las Agujas, municipio de Zapopan, Jalisco.

5.2 MATERIALES UTILIZADOS

El bagazo de agave utilizado para este estudio fue proporcionado por dos fábricas de tequila: “La Regional” y “La Cofradía” (Anexo 1). En la tequilera “La Regional” las cabezas de agave --de donde se obtuvo el bagazo--, fueron cocidas en autoclaves durante un periodo de nueve horas para luego ser pasadas por una desgarradora, consistente en una pequeña flecha provista de varias hileras de cortadoras a manera de “cabezas de hacha” alineadas horizontalmente, con otra hilera “de cabezas de hachas” colocada en forma fija frente a la flecha en movimiento. Después de la desgarradora, el material destrozado pasó por una serie de cuatro “molinos” a manera de rodillos donde el material era “lavado con

agua de la llave” y exprimido para obtener al máximo los azúcares fermentables para la elaboración del tequila. Después de este proceso se obtuvo el bagazo de agave para la realización de este estudio.

En la tequilera “La Cofradía”, las cabezas de agave de donde se obtuvo el bagazo fueron cocidas en hornos de mampostería por un tiempo de 36 horas para después pasarlas por una desgarradora similar a la utilizada en la tequilera “La Regional”. Después de la desgarradora, el material destrozado pasó por dos desmeduladoras colocadas en serie (Anexo 2), consistentes en cilindros de acero inoxidable con un eje central provisto de varias aspas para facilitar el desprendimiento de la médula y transportar el material destrozado de un extremo a otro. Los mismos cilindros tienen a lo largo de la parte alta varias llaves de agua para facilitar la extracción de los azúcares fermentables mediante el “lavado” del material destrozado. La parte baja de los cilindros está provista de una malla por donde salían los jugos juntamente con la médula desprendida de las fibras del agave. Al final de los dos cilindros se encontraba una prensa de rodillos para extraer lo más posible de azúcares a las fibras de agave. Del material (bagazo) al final de esta etapa se tomó la muestra para el desarrollo de la presente investigación.

Una vez terminada la biodegradación, de cada pila de compost se obtuvo una muestra de aproximadamente 18 litros, a las cuales se les sometió a un proceso de refinado para lo que se utilizó un equipo Sprout-waldron operation modelo 105-A. El producto se pasó por esta maquinaria una vez en cada abertura de 50, 30 y 15 mm de los discos que, junto con el agua necesaria, redujo el tamaño de las fibras, las abrió y fueron lavadas. A estas muestras refinadas se le hicieron las pruebas físicas y de fitotoxicidad que se le realizaron a las muestras de compost sin refinar, además de cenizas, pH y conductividad eléctrica.



5.3 COMPOSICIÓN BÁSICA Y DETERMINACIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y FISICOQUÍMICAS DEL BAGAZO DE MAGUEY USADO COMO MATERIA PRIMA.

5.3.1 Determinación de fibra y médula.

Debido a los dos diferentes procedimientos de elaboración de tequila antes mencionados de donde se obtuvo la materia prima para este estudio, se perciben claras diferencias visuales en ambos bagazos, por lo que se les pasó manualmente por una malla de 4 mm de diámetro, para hacer una separación de la fibra y la médula, pesando cada uno de los componentes obtenidos para obtener el porcentaje de composición, el cual se reportó en base seca.

5.3.2 Nitrógeno total.

El contenido de Nitrógeno total (NTK) fue determinado por el procedimiento macroKjeldahl (AOAC, 1984). Los resultados fueron reportados en base seca.

5.3.3 Materia seca, cenizas, materia orgánica, carbono orgánico total

La humedad o materia seca se determinó al secar la muestra 24 horas a 105°C. Para el análisis de cenizas se puso esta misma muestra a la mufla a 550°C por 2 horas. El material volátil se consideró materia orgánica (AOAC, 1984).

El carbono orgánico total (COT) fue calculado mediante la siguiente ecuación (Golueke, 1977):

$$\% \text{ COT} = (100 - \text{cenizas})/1.8 \dots\dots\dots (\text{ec. 1})$$

La relación C/N fue calculada con base en los análisis anteriores de carbono y nitrógeno total Kjeldahl.

Los resultados obtenidos se reportaron en base seca.

5.3.4 pH y conductividad

El pH y la conductividad de las muestras fueron determinados de extractos en agua en una relación peso/volumen de 1:5 (CWMI, 1976). El pH fue medido con un potenciómetro HANNA pH 211 y la conductividad se tomó con un medidor de temperatura y conductividad modelo 407303, marca EXTECH.

5.3.5 Celulosa, hemicelulosa y lignina ácido detergente.

Las determinaciones de celulosa y hemicelulosa fueron realizadas mediante los análisis de fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) y lignina ácido detergente (LAD) de acuerdo con la técnica descrita por Goering y Van Soest (1970). El contenido de hemicelulosa se calculó por la diferencia del contenido de FDN menos el contenido de FDA. El contenido de celulosa se calculó como la diferencia entre LAD y FDA. Los resultados obtenidos de los parámetros se reportaron en base seca.

5.4 EVALUACIÓN DEL COMPOSTAJE.

Se pusieron a compostaje cuatro pilas de bagazo de agave, dos con bagazo de la fábrica de tequila “La Cofradía” (1,130 kilogramos por pila en base húmeda) y dos con bagazo de la fábrica de tequila “La Regional” (una pila con 1,210 kilogramos y la otra con 1,190 kilogramos de bagazo en base húmeda).



Con base en el análisis de carbono y nitrógeno del bagazo proveniente de las dos tequileras y la cantidad de estos mismos materiales a compostar (en base seca), antes de iniciar, los dos materiales fueron ajustados con nitrato de amonio (NH_4NO_3); debido a que la adición de nitrógeno aumenta la descomposición de los residuos (Sánchez, 1998), hasta alcanzar una relación C/N, 25, ya que éste es un valor recomendado como óptimo para iniciar el compostaje (Tchobanoglou, 1993; Cegarra, 1994),

5.4.1 Temperatura

Durante el tiempo que duró la degradación del bagazo (126 días), diariamente se midió la temperatura en cada pila, colocando en distintos lugares ocho sensores de temperatura (de carátula de 13 cm. de diámetro con una varilla de 60 cm de largo (Anexo 4), para graficar posteriormente el promedio de los cambios de temperatura registrados en relación con el tiempo transcurrido. También se registró la temperatura promedio del medio ambiente.

5.4.2 Humedad y aireación

Las pilas fueron removidas semanalmente para facilitar la aireación aprovechando la oportunidad para agregar agua de la llave cuando fuera necesario para mantener la humedad de las pilas entre 40 y 65%.

5.4.3 Muestreo

Al inicio y a los días 28, 56, 84, 112, y 126, se tomaron muestras compuestas de las pilas para los análisis de humedad o materia seca, cenizas, carbono orgánico total, nitrógeno total Kjeldhal, pH, conductividad eléctrica, hemicelulosa, celulosa y lignina

La muestra compuesta de cada pila se obtuvo partiendo las pilas longitudinalmente en dos partes y tomando dos litros de cada uno de los nueve puntos representados esquemáticamente en la Figura 5.1. Los 18 litros de muestras se mezclaron en una bolsa de plástico para tomar luego tres submuestras de dos litros cada una. Una submuestra final de seis litros para el análisis de humedad y para secarse a 50°C, luego molerse y guardarse en bolsas de plástico selladas para los análisis químico y físico posteriores.

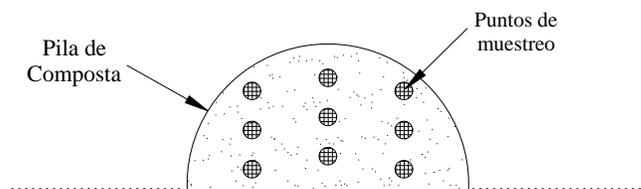


Figura 5.1. Puntos de muestreo de pila de compostaje.

5.4.4 Determinaciones químicas y físico-químicas.

El nitrógeno total, materia seca, cenizas, materia orgánica, carbono orgánico total, relación C/N, pH y conductividad fueron realizadas siguiendo las técnicas descritas anteriormente en el apartado 5.3.2 – 5.3.4.

5.4.5 Celulosa, hemicelulosa y lignina ácido detergente.

Las determinaciones de celulosa, hemicelulosa y lignina ácido detergente fueron realizadas mediante la técnica descrita por Goering y Van Soest (1970), de la misma manera como se describe en el apartado 5.3.5

5.4.6 Degradación de componentes

5.4.6.1 Pérdida de materia orgánica

La proporción de pérdida de Materia Orgánica (MO) por la mineralización durante este proceso fue calculada de acuerdo con la siguiente ecuación propuesta por Íñiguez *et al.*, (2006):

$$R_m = 1 - (A_i / A_f) \dots\dots\dots(\text{ec. 2})$$

Donde A_i representa la masa de sólidos no volátiles (SNV) (cenizas) inicial, y A_f la masa de SNV en cualquier momento de la toma de muestra en el tiempo de compostaje. Al multiplicar por 100, R_m expresa la pérdida de la masa como porcentaje de la masa inicial.

5.4.6.2 Pérdida de volumen

La fracción de volumen perdido se calculó utilizando las mediciones, inicial y final de cenizas y densidad de acuerdo con Íñiguez *et al.*, (2006):

$$R_v = 1 - [(A_i / A_f) (D_i / D_f)] \dots\dots\dots(\text{ec. 3})$$

Donde A_i y A_f son los contenidos inicial y final de cenizas, y D_i y D_f son densidad inicial y final. Al Multiplicar R_v por 100 se expresa la perdida de volumen como porcentaje del volumen inicial.

5.4.6.3 Pérdida de COT, NTK, celulosa y hemicelulosa

La pérdida de COT, NTK, celulosa y hemicelulosa se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación (Íñiguez *et al.* 2006):



$$PS = 1 - \frac{YX_0}{Y_0X} \dots\dots\dots(ec. 4)$$

Donde Y_0 es el porcentaje inicial de COT o NTK o celulosa o hemicelulosa, “Y” el porcentaje en cualquier punto del muestreo de los mismos, X_0 porcentaje inicial de cenizas y X el porcentaje de cenizas en cualquier punto del muestreo.

5.5 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL COMPOST DE BAGAZO DE *Agave tequilana Weber*.

5.5.1 Propiedades físicas

5.5.1.1 Densidad de campo.

La densidad de campo de muestras de bagazo y de material durante el desarrollo de compostaje (Días 0 28, 56, 84, 112 y 126), fue determinada de acuerdo con la técnica descrita por TMECC para el análisis de la densidad en campo (3.01 – C, 2001). Para esto se puso la muestra hasta una tercera parte de una cubeta de 21 litros, ésta se dejó caer al suelo 10 veces para añadir luego otra tercera parte más de muestra y dejar caer la cubeta nuevamente al suelo otras 10 veces. Se llenó completamente la cubeta con la muestra y se dejó caer otras 10 veces, para al final volver a llenar la cubeta y dejarla al ras. La cubeta se pesó y se tomaron muestras para análisis de humedad ya que la densidad es reportada en base seca.

5.5.1.2 Análisis granulométrico

Muestras compuestas de los dos compost fueron sometidas a un análisis granulométrico. Para esto se colocaron 100 g de muestra en tamices ordenados por tamaño (4.76, 1.98, 1.00, 0.5, 0.25, 0.105 mm) en una tamizadora que se hizo funcionar durante 10 minutos de forma intermitente. Al cabo de este tiempo se



pesó el contenido de cada tamiz y del colector del fondo en recipientes tarados con precisión de 0.01g.

5.5.1.3 **Densidad aparente, densidad real y espacio poroso total.**

Para este análisis se siguió la metodología de De Boodt *et al* (1974, 1975) y Gabriels y Verdonck (1991). Se utilizó muestra saturada (en dos aros superpuestos), que fue sometida a una succión de 10 cm de columna de agua por aproximadamente 48 horas, después de este tiempo se separaron los aros superpuestos y se pesó el aro inferior con muestra que ocupa el volumen del mismo al ras, eliminando con una cuchilla (sin compactar la muestra) lo que sobresalía del borde, se llevó esta muestra a peso constante y se volvió a pesar.

Se calculó la densidad aparente (DA) y espacio poroso total (EPT) según las siguientes fórmulas:

$$DA \text{ (seca)} = \text{muestra seca} / \text{volumen (g.cm}^{-3}\text{)} \dots\dots\dots(\text{ec. 5})$$

$$DA \text{ (húmeda)} = \text{muestra húmeda} / \text{volumen (g.cm}^{-3}\text{)} \dots\dots\dots(\text{ec. 6})$$

La densidad real (DR) se calculó a partir del contenido en cenizas (C% referido a la materia seca) de la muestra, considerando que el substrato es una mezcla de componentes, uno orgánico (su materia orgánica) y otro mineral (sus cenizas) cuyas densidades reales son 1.5 y 2.65 g.cm⁻³ respectivamente, el valor de la densidad real será:

$$DR = 397.5 / (2,65 - 1.15 * \text{cenizas}) \dots\dots\dots (\text{ec. 7})$$

El EPT se calculó en función de las densidades real y aparente según la siguiente fórmula:

$$EPT = (1 - (DA \text{ (seca)} / DR) \times 100 \dots\dots\dots(\text{ec. 8})$$

5.5.1.4 Curva de liberación de agua.

Este análisis se realizó según la técnica descrita por De Bootd *et al* (1974) y Gabriels y Verdonck (1991). Donde a una cantidad conocida de muestra a la que previamente se le determinó densidad aparente y porcentaje de humedad, se saturó en agua por 48 horas y se sometió a succiones sucesivas de 10, 50 y 100 cm de agua, que se obtuvieron mediante un desnivel en las columnas de agua de un sistema de vasos comunicantes.

Una vez alcanzado el equilibrio para cada succión, entre la tensión con que es retenida el agua por el substrato y la succión aplicada, se determinó el contenido de agua de la muestra por diferencia de pesos, se obtuvieron cuatro puntos que permitieron trazar la curva de liberación de agua.

Capacidad de aire (CA), agua fácilmente asimilable (AFA), agua de reserva o capacidad tampón (AR) y agua difícilmente asimilable (ADA).

CA= Diferencia en % en volumen entre EPT y contenido de agua a 10 cm de succión.

AFA= % de agua liberada por la muestra cuando la succión aumenta de 10 a 50 cm.

AR= % en volumen de agua liberada por la muestra cuando la succión aumenta de 50 a 100 cm.

ADA= % de agua que el sustrato retiene a tensiones superiores a 100 cm.

5.5.2 Determinaciones químicas y físico-químicas.

El nitrógeno total, materia seca, cenizas, materia orgánica, carbono orgánico total, relación C/N, pH y conductividad fueron realizadas siguiendo las técnicas descritas anteriormente en el apartado 5.32 – 5.3.4.

Las determinaciones de celulosa, hemicelulosa y lignina ácido detergente fueron realizadas mediante la técnica descrita por Goering y Van Soest (1970), de la misma manera como se describe en el apartado 5.3.5

5.5.3 Pruebas de fitotoxicidad

5.5.3.1 Brote de semillas y crecimiento relativo

A muestras de bagazo de agave de las dos tequileras y de los dos compost finales se les realizó una prueba de fitotoxicidad mediante el análisis de brote de semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) y crecimiento relativo; para esto, las muestras de bagazo y compost se molieron en un molino de guillotina con una criba de 8 mm. La evaluación del vigor y del crecimiento relativo fue realizada de acuerdo con el procedimiento seguido por TMECC (Método 05.05-A, 2001).

5.5.3.2 Índice de germinación

a) Obtención de la pasta saturada y extracto de saturación.

La pasta saturada fue preparada siguiendo el método del extracto de “saturación” descrito por Warncke (1986). Se tomaron 300 ml de material húmedo y se depositaron en un vaso de precipitados de 500 ml de capacidad adicionando agua destilada, se agitó hasta lograr que la saturación presentara un brillo metálico y consistencia pastosa y dejando reposar durante dos horas.

El extracto de saturación fue obtenido filtrando la pasta en embudos Buchner (15 cm Ø con papel filtro.

b) Análisis de Zucconi

Se realizó una prueba de fitotoxicidad a muestras de compost mediante el análisis de Índice de Germinación. Los análisis de germinación se realizaron siguiendo la metodología de Zucconi (Zucconi *et al.*, 1981 a y b) modificada. Se utilizaron semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) y extracto de saturación, obtenido por el método de la “pasta saturada” descrito anteriormente (apartado 5.5.3.2), al 100 % y a tres diluciones con agua destilada (75, 50 y 25 %).

Se tomaron 5 cajas Petri (9 cm de Ø) y en cada una de ellas se colocó un papel filtro sobre el que, una vez humedecido con unas gotas del extracto, se depositaron 10 semillas de la especie a estudiar. Sobre estas semillas se colocó otro papel filtro humedecido también con el extracto. Para cada caja Petri se utilizaron en total alrededor de 1,5 ml de extracto. Los análisis se realizaron por triplicado, en todos los casos se realizó un ensayo con agua destilada (testigo). Transcurridos 5 días se evaluaron en cada caja el porcentaje de germinación (%G) y se calculó la longitud media de la radícula (Lm) de las semillas germinadas. A partir de estos dos datos, el índice de germinación (IGe) se obtiene según la ecuación:

$$IGe(\%) = \frac{\% G \text{ extracto} \cdot Lm \text{ extracto}}{\% G \text{ agua dest} \cdot Lm \text{ agua dest}} 100$$

Donde IGe (%) = Índice de germinación, %G extracto = % de germinación del extracto, % G agua dest = % de germinación del agua destilada, Lm extracto = longitud media del extracto, Lm agua dest = longitud media del agua destilada.

5.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) a través de un diseño lineal completamente aleatorio, para determinar si el tiempo afecta significativamente las propiedades químicas y físico-químicas estudiadas en la degradación del bagazo



de cada tequilera. Asimismo se realizó un análisis de varianza para determinar si se presentó diferencia significativa en los parámetros físicos, químicos y físico-químicos estudiados entre el compost de una tequilera y otra. Cuando el ANOVA resultó significativo se aplicó la prueba de Tukey y para algunos parámetros se realizaron regresiones lineales y polinomiales. Los análisis estadísticos y correlaciones se realizaron con el programa SAS (Statistical Analysis System) para Windows v8 y Excel Microsoft Office 2007.

Previo al análisis estadístico, los valores de las variables que estaban expresadas en porcentaje fueron transformados aplicando la función arcoseno; es necesario aclarar que los análisis de varianza y las pruebas de medias se realizaron con los datos transformados, sin embargo, los resultados se muestran en las unidades originales (%) para su mejor comprensión.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 COMPOSICIÓN BÁSICA, CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE DOS MATERIALES DE BAGAZO DE AGAVE TEQUILERO (*Agave tequilana Weber*).

El bagazo de la tequilera “La Regional” mostró 21.9% más médula que el material proveniente de “La Cofradía”, No obstante el material de esta última presentó 21.9% más fibra que la primera tequilera (Cuadro 6.1). La médula es un material orgánico no fibroso en forma de partículas finas que corresponden a la envoltura fibrovascular dispersa en el interior de la cabeza de la planta de agave (Íñiguez *et al.*, 2007); por lo cual y dependiendo del contenido medular, los bagazos pueden mostrar diferencias en el compostaje al contener mayor o menor cantidad de partículas finas.

Cuadro 6.1 Composición básica del bagazo de maguey tequilero (*Agave tequilana Weber*)

TEQUILERAS	Médula	Fibra	TOTAL
	%	%	
“La Cofradía”	34.4 b	65.6 a	100.0
“La Regional”	56.3 a	43.7 b	100.0
<i>Significancia</i>	*	*	

*: $P \leq 0.05$

No se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las tequileras para los parámetros humedad, materia seca, nitrógeno total Kjeldahl (NTK), celulosa, fibra detergente neutra y fibra detergente ácida (cuadro 6.2), la mayoría de estos valores se encontraron dentro de los niveles de referencia indicados por Íñiguez (2006). El contenido de NTK no mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tequileras, estos valores se alejaron del valor de referencia, principalmente el bagazo de “La Cofradía” (0.27%), el cual puede deberse al proceso de desmedulado al que es sometido el agave durante la producción del tequila, contrariamente, el bagazo de la tequilera “La Regional” sólo es pasado por molinos y no sufre el proceso de desmedulado. A pesar de esto, los valores son bajos si se comparan con los alcanzados por los residuos verdes, los cuales tienen un contenido de NTK de 1.5% (Jouraiph, 2005).

Cuadro 6.2 Valores de las propiedades químicas y fisicoquímicas del bagazo de maguey tequilero (*Agave tequilana Weber*) tal como se obtuvo de las tequileras.

PARÁMETROS	TEQUILERAS		Valores de Referencia
	“La Cofradía”	“La Regional”	
Humedad, (%)	64.40 a	66.20 a	71.00 ¹
Materia seca, (%)	35.60 a	33.80 a	29.00 ¹
pH	3.51 a	3.52 a	5.40 ¹
Conductividad ds.m ⁻¹	1.51 a	1.31 a	Nd
Cenizas, (%)	3.10 b	5.30 a	8.80 ¹
Materia orgánica, (%) ^{bs}	96.90 a	94.70 b	91.20 ¹
Carbono orgánico total, (%) ^{bs}	53.83 a	52.61 b	50.60 ¹
Nitrógeno Total de Kjeldahl ,(NTK, %) ^{bs}	0.27 a	0.35 a	0.53 ¹
Relación C:N	199.38 a	150.32 b	95.50 ¹
Fibra detergente neutro, (FDN, %) ^{bs}	55.33 a	57.80 a	58.80 ²
Fibra detergente ácido, (FDA, %) ^{bs}	47.39 a	42.95 a	46.70 ²
Hemicelulosa, (%) ^{bs}	7.94 b	14.85 a	12.10 ²
Celulosa, (%) ^{bs}	14.26 a	14.16 a	41.90 ²
Lignina detergente ácido, (%) ^{bs}	33.13 a	28.79 b	7.20 ²

^{bs} Base seca

¹ Valores con letras iguales entre filas son estadísticamente iguales (Tuckey p , <0.05)

¹ Íñiguez *et al.*, 2006a ²Íñiguez *et al.*, 2005

6.2 EVOLUCIÓN DE ALGUNOS PARÁMETROS EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE DE DOS BAGAZOS DE *Agave tequilana weber*.

6.2.1 Temperatura

El comportamiento de la temperatura en el interior de las pilas durante el compostaje del bagazo de maguey tequilero obtenido de “La Cofradía” (a) y “La Regional” (b), se muestra en la figura 6.1, donde los días en que se removieron las pilas para facilitar la aireación están representados por las flechas vacías y los días donde además de la remoción de bagazo se adicionó agua, están representados por las flechas en negrillas. La adición de agua se inició para el bagazo de “La Cofradía”; a los 21 días y para el de “La Regional” a los 28, probablemente esta diferencia se debió a que este último bagazo contiene mayor cantidad de médula, por lo tanto tiene mayor cantidad de partículas pequeñas que retienen más cantidad de agua.

Los incrementos y decrementos de temperatura al inicio del compostaje de bagazo proveniente de la tequilera “La Regional” se muestran desiguales con respecto al de la tequilera “La Cofradía”. La primera mostró una tendencia parabólica definida, con temperatura máxima de 65°C a los 50-60 días y la segunda no mostró tendencia alguna, alcanzó la temperatura máxima de 59°C a los 22 días de haber iniciado el compostaje, manteniéndose casi constante hasta los 90 días, a partir del cual la temperatura comenzó a descender. Al respecto, Íñiguez *et al.* (2006 b) encontraron que al remover las pilas para facilitar la aireación, en bagazo de maguey tequilero se pueden alcanzar hasta 70°C en los siguientes 7 días. Estas diferencias en el comportamiento de la temperatura en el interior de las pilas se puede atribuir a: 1) Al movimiento y presencia del oxígeno, 2) mayor contenido de médula en el bagazo de la tequilera “La Regional”. Debido a que el oxígeno es un factor limitante, al ser utilizado por los microorganismos y disminuir su difusión en el interior de las pilas, las cuales al paso del tiempo sufren un proceso de compactación, éste puede ser mayor en el bagazo proveniente de la tequilera “La

Regional” debido al contenido de médula, (cuadro 6.1) por lo que ésta es de menor tamaño que la parte fibrosa, lo que podría dificultar la difusión de oxígeno a través de las pilas, por lo tanto retardar el incremento de las temperaturas con respecto al bagazo de “La Cofradía” la cual contiene menor cantidad de médula.

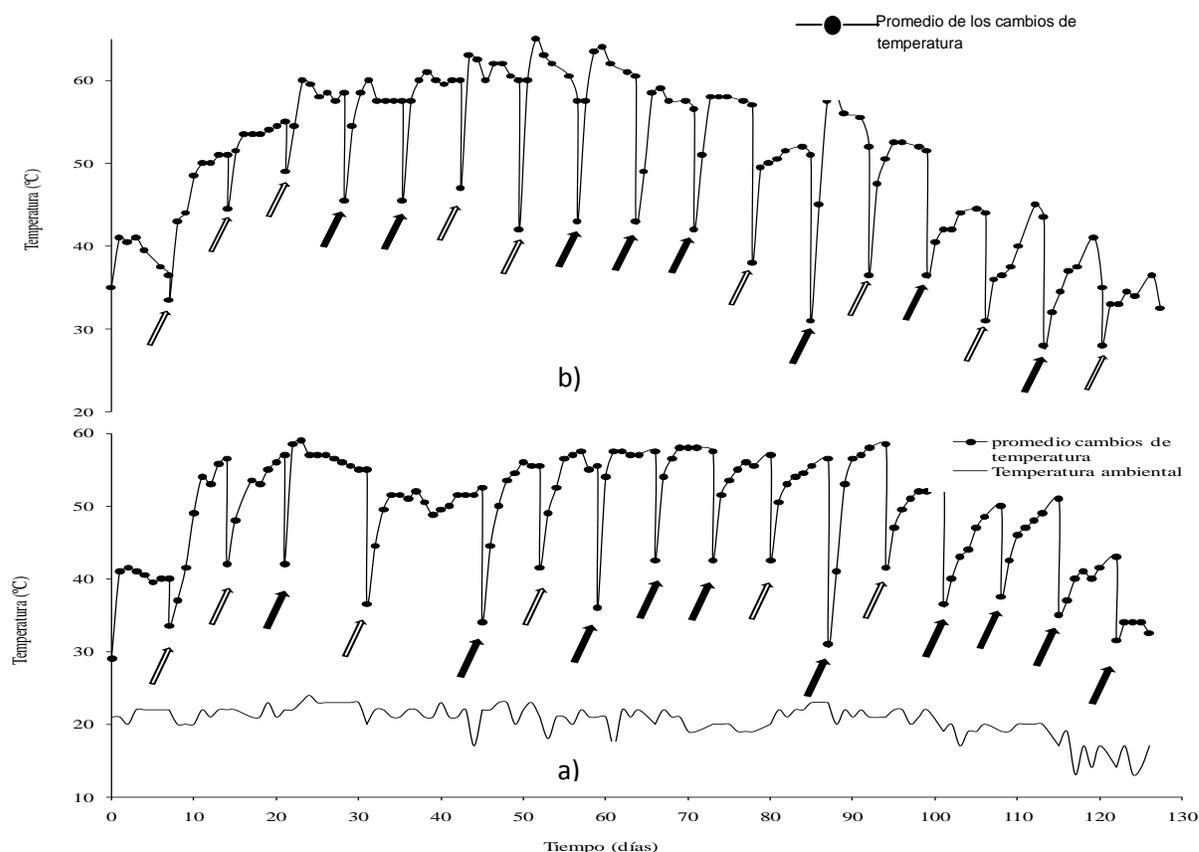


Figura 6.1 Comportamiento de la temperatura durante el compostaje de *Agave tequilana Weber*, proveniente de dos tequileras: a) “La Cofradía”, b) “La Regional” durante 26 días de proceso.

En el compostaje de residuos agroindustriales es común alcanzar o sobrepasar estas temperaturas (Íñiguez *et al.*, 2005). Íñiguez *et al.* (2004), reportaron temperaturas de hasta 73 y 74 °C en biodegradación de bagazo de agave (*A. tequilana Weber*) entre los días 74 y 90, En el presente ensayo, el tiempo de estudio de la degradación de los dos materiales fue de 126 días, al descender la

temperatura y estabilizarse en 37°C para el bagazo de “La Regional” y 33°C para el de “La Cofradía”. De manera general se puede decir que la humedad y la aireación afectaron la temperatura de las pilas, ya que los descensos de temperatura correspondieron a condiciones posteriores al volteo y la adición de agua; asimismo ocasionaron ascensos de este parámetro en días siguientes a dicha actividad.

6.2.2 Relación Carbono/Nitrógeno.

La relación C/N durante las 8 primeras semanas (56 días), no mostró diferencias significativas ($p < 0.05$), entre el bagazo de una tequilera y la otra. El bagazo de “La Regional” mostró un aumento del valor de la relación C/N ajustado (25) a 31 en los primeros 28 días, mientras que el bagazo de “La Cofradía” a este mismo tiempo de compostaje mostró un aumento de 25 (relación C/N ajustada) a 28.5, aumentando hasta 32 al segundo muestreo (56 días), posterior a este tiempo, los valores de esta relación en ambos materiales, descendieron y fue a los 84 días cuando mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el bagazo de una tequilera y otra, continuaron estas diferencias hasta el final del proceso. Posterior a la sexta semana el valor de este parámetro fue superior en el bagazo proveniente de la tequilera “La cofradía” y permaneció con esta tendencia hasta finalizado el estudio. Los valores de ambos compost se encuentran en los niveles de referencia indicados por el Test Methods for the Examination of Compost and Composting (TMECC, 2001; Ansorena, 1994; Abad *et al.*, 2004 y Tchobanoglous, 1994). La relación C/N es ampliamente utilizada como un indicador del tipo de materia orgánica, su madurez y estabilidad (Bernal *et al.*, 1998; Paredes *et al.*, 2000; Brewer y Sullivan, 2003; Brito *et al.*, 2008), por lo que en materiales con alto valor puede repercutir en la inmovilización del nitrógeno (Abad *et al.*, 2002; Arenas *et al.*, 2002). Como lo encontrado por Martínez *et al.*, (2009) en la cáscara de almendra, con valor de C/N de 172.8, cuando la cáscara estaba nueva, no

obstante, al ser reutilizada como sustrato de tomate (*L. esculentum* Mill.) y melón (*Cucumis melo* L.) a los 265 días de uso se estabilizó en una relación C/N de 10.4.

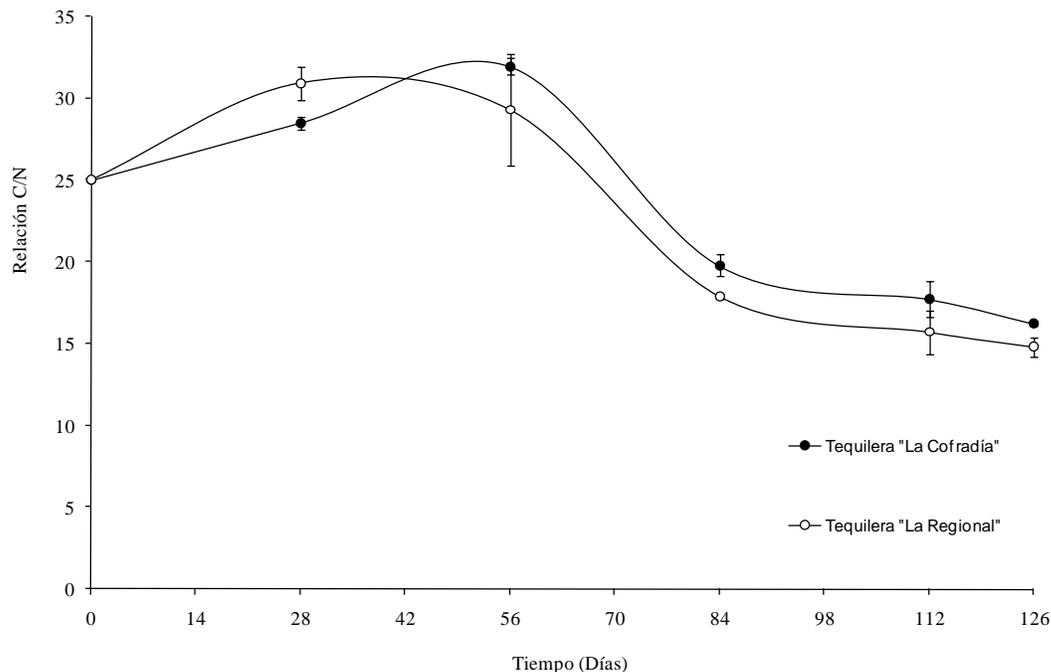


Figura 6.2. Comportamiento de la relación C/N en el compostaje de dos bagazos de maguey tequilero (*Agave tequilana Weber*).

6.2.3 pH

El valor inicial de pH en la materia prima para ambos bagazos fue de 3.5, a partir del cual se inicia el compostaje. Los valores de pH de los dos materiales estudiados no mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) al inicio del proceso (figura 6.3). Durante la etapa de descomposición, los valores de pH del material proveniente de “La Regional” mostraron un comportamiento sigmoideal hasta los 80 días, para después disminuir someramente, siendo siempre superiores los valores de pH del material de “La Cofradía”, fue claro el comportamiento del pH de ambos materiales que ascendieron desde el inicio del compostaje y se estabilizaron a

partir del día 28, con valores que fluctuaron entre 5.3 y 5.7, los cuales están dentro de los niveles de referencia para sustratos de cultivo indicado por Abad *et al.*, (1993). Al respecto, Brito *et al.*, (2008) indicaron que valores bajos de pH pueden representar una ventaja para reducir la volatilización de NH_3^- durante el proceso de compostaje. La diferencia de pH en los dos materiales, probablemente se debió a la degradación de compuestos ácidos orgánicos (Peigne and Girardin, 2004), la cual fue mayor en el bagazo de “La Regional”, que también mostró mayor contenido de médula.

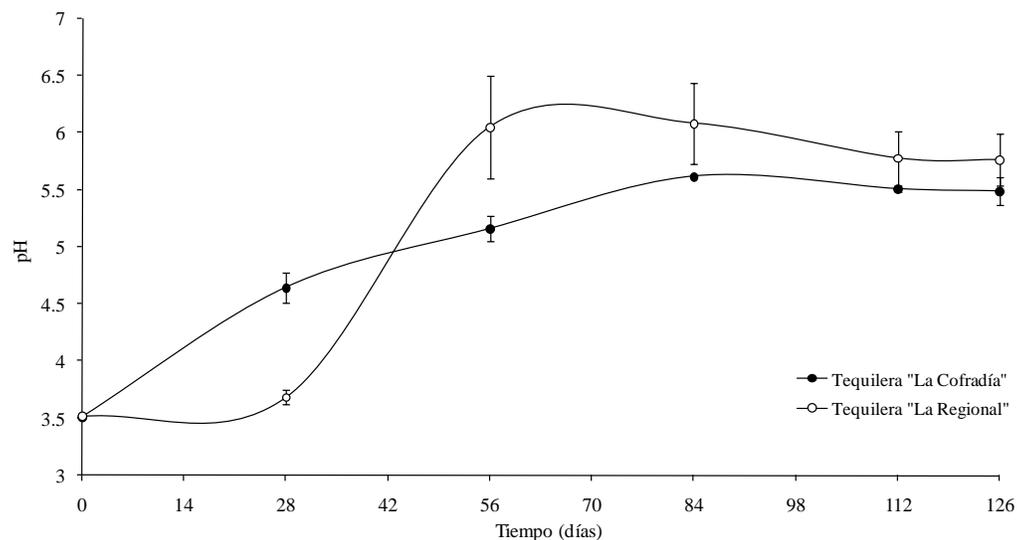


Figura 6.3 Cambios de pH durante el compostaje de bagazo de *Agave tequilana Weber* proveniente de las tequileras “La Cofradía” y “La Regional”

6.2.4 Conductividad eléctrica (C.E.)

Los valores de C.E. de las muestras de compost de ambas tequileras mostraron diferencia significativa ($p < 0.05$), teniendo estos valores un comportamiento

similar, (aumentando su valor del inicio al primer muestreo y manteniéndose en valores cercanos hasta el final). El valor de la conductividad eléctrica fue mayor en el bagazo de “La Cofradía” que en el de “La Regional” (figura 6.4), aunque ambos materiales iniciaron con valores muy similares de 1.5 y 1.3 dS m⁻¹ respectivamente, antes de la adición del nitrato de amonio. A los 28 días de compostaje el valor de la conductividad eléctrica en ambos bagazos se incrementó de manera considerable llegando a tomar valores de 15.23 y 11.55 dS m⁻¹ para los bagazos de “La Cofradía” y “La Regional” respectivamente, los cuales se mantuvieron en valores similares llegando al final del periodo a 14.4 y 11.9 dSm⁻¹ en el mismo orden anterior. El incremento tan notorio en la C.E. dentro de las primeras cuatro semanas puede deberse a la adición de nitrato de amonio, ya que las conductividades de los iones que lo forman de acuerdo con Alarcón (1998) son elevadas. En datos registrados por algunos autores sobre conductividad en compostaje donde no se ha adicionado una fuente de nitrógeno al material, no muestran ese aumento considerable, por ejemplo Brito *et al.*, (2008) reportaron conductividades eléctricas en compostas de estiércol de ganado vacuno con rangos de 0.5 a 1.5 dS m⁻¹., Iñiguez *et al.*, (2006a) en compostas de bagazo de agave con mezcla de biosólidos reportaron un aumento en la conductividad eléctrica de 1.5 a 3.5 dS m⁻¹., en un período de 100 días; sin embargo en compostaje de Bagazo de agave (*tequilana Weber*) con vinazas tequileras, en las que se añadió urea como fuente de nitrógeno Iñiguez *et al.* (2005) reportaron conductividad eléctrica elevada (9.8 dSm⁻¹).

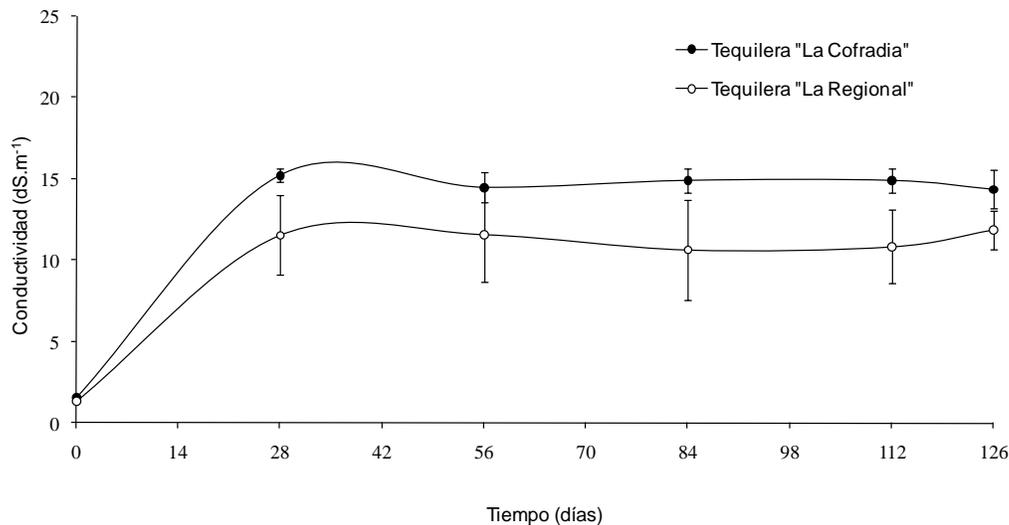


Figura 6.4 Cambios de la conductividad eléctrica durante 126 días de compostaje de bagazo de agave (*A. tequilana Weber*) proveniente de las tequileras “La Cofradía” y “La Regional”.

6.2.5 Densidad de campo y comportamiento del volumen

La densidad de campo (DDC) del bagazo de maguey tequilero utilizado en el estudio fue de 90.6 kg m^{-3} para el de “La Cofradía” y 123.90 Kg m^{-3} para el de “La Regional” y la DDC final de las compostas fue de 106.88 Kg m^{-3} y 142 Kg m^{-3} , para “La Cofradía” y “La Regional” respectivamente. (Figura 6.5) Estos resultados, tanto iniciales como finales para ambos materiales, fueron menores a los reportados por Íñiguez *et al.*, (2006a) en un estudio del compostaje de bagazo de agave que no fue sometido a cocimiento, sino que los azúcares fermentables fueron extraídos con agua caliente, en una mezcla con biosólidos, donde indicaron una DDC inicial de 125.6 kg m^{-3} y una final de 236 kg m^{-3} .

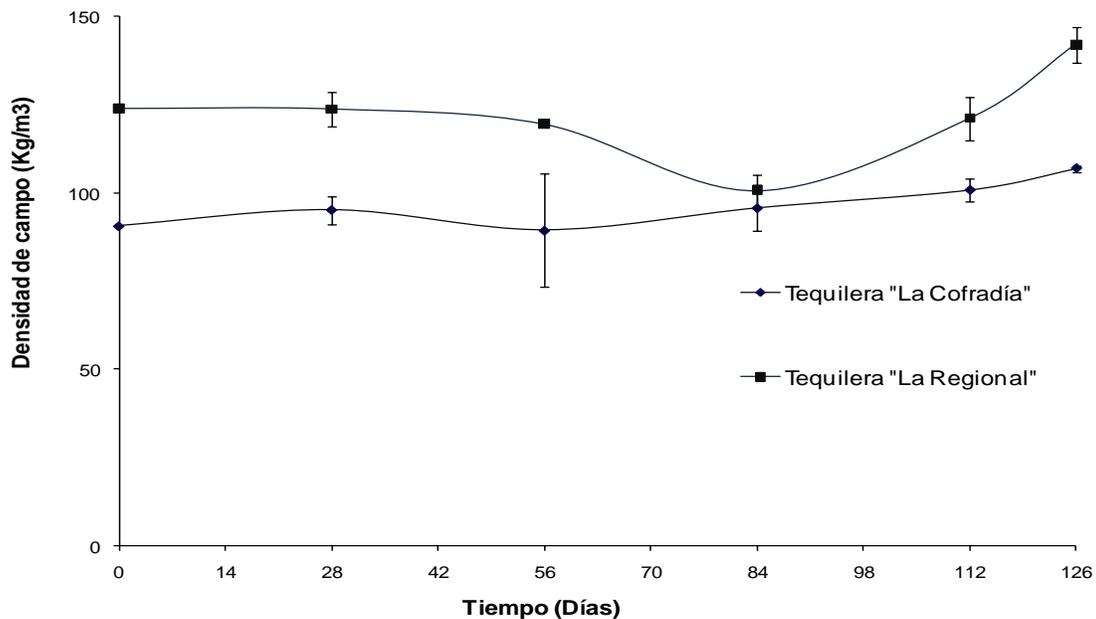


Figura 6.5. Densidad de campo mostrada en el compostaje de bagazo de *Agave tequilana Weber* proveniente de las tequileras “La Cofradía” y “La Regional”.

Del inicio del compostaje hasta el día 56 para el bagazo de “La Cofradía” y 84 para el de “La Regional” la densidad tomada en campo disminuyó ligeramente y se mantuvo cercana al valor inicial. Esto podría deberse a la heterogeneidad del material al inicio del proceso. Al final del proceso, ambas compostas tuvieron una densidad mayor a la mostrada en el material inicial, esto podría deberse a la disminución del tamaño de partícula visualmente observado; como lo reportado por Íñiguez *et al.* (2006 a) donde la densidad de campo en compostas de bagazo de *A. tequilana Weber* en mezcla con biosólidos aumentó, debido a la disminución del volumen misma que a su vez fue causada por la disminución del tamaño de partícula, volumen del poro y a la pérdida de materia orgánica.

Después de 126 días de compostaje, las pérdidas teóricas de volumen (ecuación 3) fueron de 77.5% y 75% para el bagazo de “La Cofradía” y “La Regional” respectivamente. La reducción de volumen (Figura 6.6) fue debido a la

disminución del tamaño de partícula del bagazo (observado visualmente), así como al aumento de la densidad de campo como se puede ver en la figura 6.5, y a la pérdida de la materia orgánica, como lo muestra el resultado de la correlación entre estos parámetros (cuadro 6.3.) Al final existió una diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) entre la pérdida de volumen de las pilas de compost de una tequilera y otra.

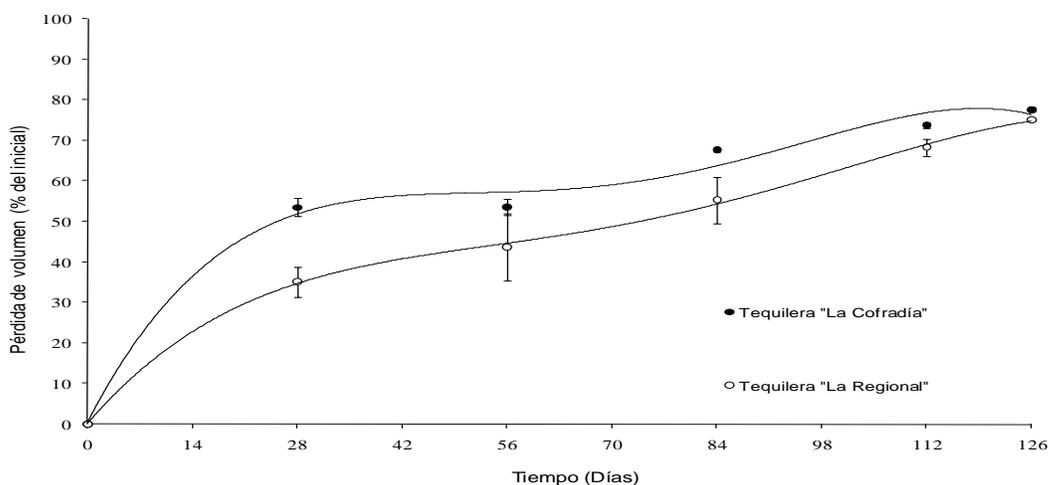


Figura 6.6 Comportamiento del volumen durante el compostaje de bagazo de *Agave tequilana Weber* proveniente de las tequileras “La Cofradía” y La Regional”.

6.2.6 Materia orgánica

La pérdida de materia seca para el bagazo de “La Cofradía” fue de 62.2% mientras que para el bagazo de “La Regional” fue de 65.8%, una diferencia entre una tequilera y otra apenas de 3.6% debido probablemente al mayor contenido de médula en el bagazo de “La Regional”. Datos muy cercanos a los reportados por Íñiguez *et al.* (2006) al someter a compostaje durante 155 días, biosólidos y bagazo de *Agave tequilana Weber* en una proporción en kilogramos (base húmeda) de 1:1.9, en los que tuvieron una pérdida de materia seca del 67.8%.

Las pérdidas teóricas de materia orgánica de acuerdo con la ecuación 2 muestran una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) entre tequileras, a pesar de que fueron muy similares para ambos bagazos, de 73.6% para el de “La Cofradía” y de 71.5% para el bagazo de “La Regional. Debido a las cantidades relativamente pequeñas de materia prima que se utilizaron para este estudio fue posible determinar en la práctica las pérdidas de peso, en este caso comparables con las pérdidas de materia orgánica, si se asume que los sólidos no volátiles se conservan completamente durante la biodegradación (Íñiguez 2006). Para el bagazo de “La Cofradía” esta pérdida fue de 62.2%, y tuvo una diferencia del 11% con la pérdida teórica (73.6%), mientras que para el bagazo de “La Regional”, la pérdida fue de 65.8%, una diferencia con la pérdida teórica (71.5%) apenas de 5.7%. Estos resultados demuestran la validez de poder utilizar la ecuación 2 para calcular la pérdida de materia orgánica cuando se realicen compostajes de estos bagazos a mayor escala tomando en cuenta solamente el contenido de cenizas al inicio y final del proceso sin tener que pesar los kilogramos de masa obtenida.

La pérdida de materia orgánica puede variar ya sea por el tipo del material inicial, así como por la duración del proceso. Por ejemplo, en materiales orgánicos diferentes al bagazo de agave tequilana weber las pérdidas de materia orgánica son mayores y más aún si se mezclan con estiércol (Brito *et al.*, 2008), La pérdida de materia orgánica de 62.2 y 65.5 es muy similar al 67.8% reportado por Íñiguez *et al* (2006) en el compostaje de bagazo de agave y biosólidos durante 155 días.

Al relacionar los porcentajes de pérdida de materia orgánica (ecuación 2) y volumen (ecuación 3) para el compostaje de bagazo de “La Cofradía” y “La Regional”, se encontraron los siguientes resultados:

Cuadro 6.3. Correlación entre la pérdida de materia orgánica y volumen en compostaje de bagazo de *Agave tequilana Weber*.

Ecuación	R ²	Tequilera
$y = 1.0419x - 0.4996$	0.9978	“La Cofradía”
$y = 0.9824x - 0.6752$	0.9772	“La Regional”

6.2.7 Pérdidas de nitrógeno total de Kjeldahl y carbono orgánico total (COT)

El contenido de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) a partir del día 56 no muestra diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre el bagazo de una tequilera y otra. Las pérdidas, de NTK sí presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el bagazo de una tequilera y otra, éstas se ilustran en la figura 6.7. En las primeras cuatro semanas se perdió cerca del 50% de NTK en ambas pilas de bagazo, estos valores alcanzaron hasta 63% y 58% en las pilas de “La Cofradía” y “La Regional”, respectivamente, al finalizar la descomposición del material. Esto se debe a que durante el compostaje se involucran varias reacciones bioquímicas que se producen durante la mineralización y a las altas temperaturas, los riegos para mantener la humedad de las compostas, el manejo de las pilas y la naturaleza soluble del fertilizante aplicado para reducir la relación C:N (25:1) determinaron la cantidad de nitrógeno perdido, ya que estos factores determinan el balance NH_3/NH_4 y las emisiones de NH_3 (Peigné y Girardin, 2003).

El contenido de COT durante todo el compostaje mostró diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), pero no en las pérdidas entre las pilas de una tequilera y otra. Los valores finales de pérdida de COT son de 76% y 75% para el bagazo de “La Cofradía” y “La Regional”, respectivamente.

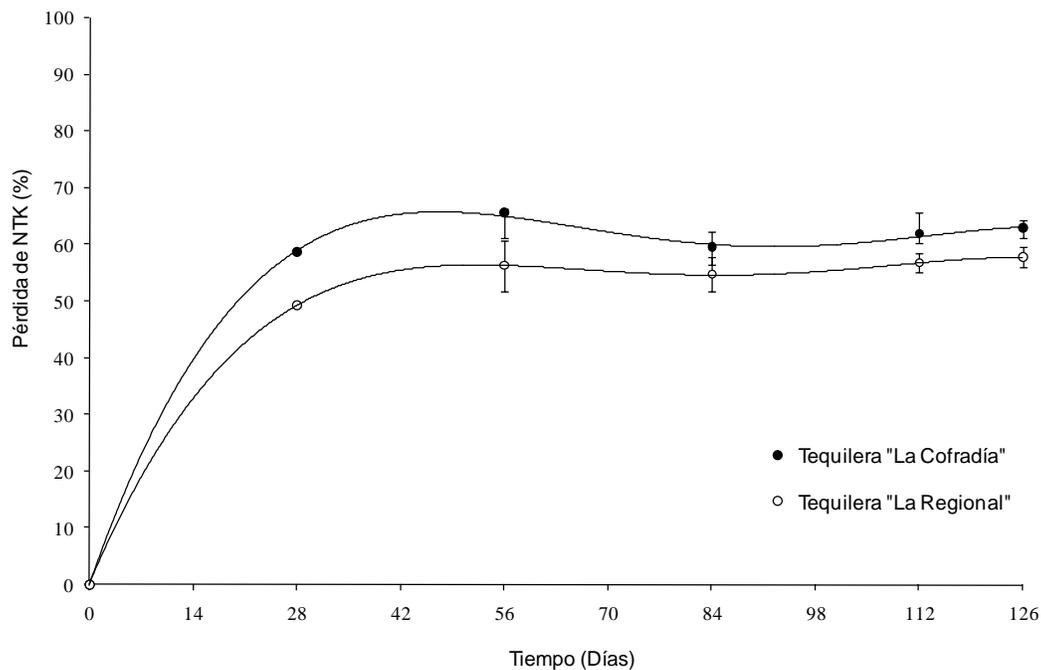


Figura 6.7 Pérdida de nitrógeno total en el compostaje de bagazo de *Agave tequilana Weber* proveniente de las tequileras “La Cofradía” y “La Regional”.

6.2.8 Componentes fibrosos.

Después de 126 días se registraron valores promedio de 80.51%, 88.76% y 55.3% de degradación de celulosa, hemicelulosa y Lignina ácido detergente para las pilas de la tequilería “La Cofradía” (figura 6.8), los valores de degradación para estos mismos parámetros en el bagazo de la tequilería “La Regional” fueron de 83.97%, 95.78% y 46.5% respectivamente. (figura 6.9). En ambos casos la degradación de la celulosa y hemicelulosa fue mayor que la degradación de la lignina, esto es explicado porque en el hábitat del compostaje sólo una proporción de microorganismos tienen la capacidad de hidrolizar los polímeros de dichos componentes (Crawford, 1985). De estos polímeros de alto peso molecular, la celulosa y la hemicelulosa son más fácilmente degradados que la lignina (Jouraiphy *et al.*, 2005).

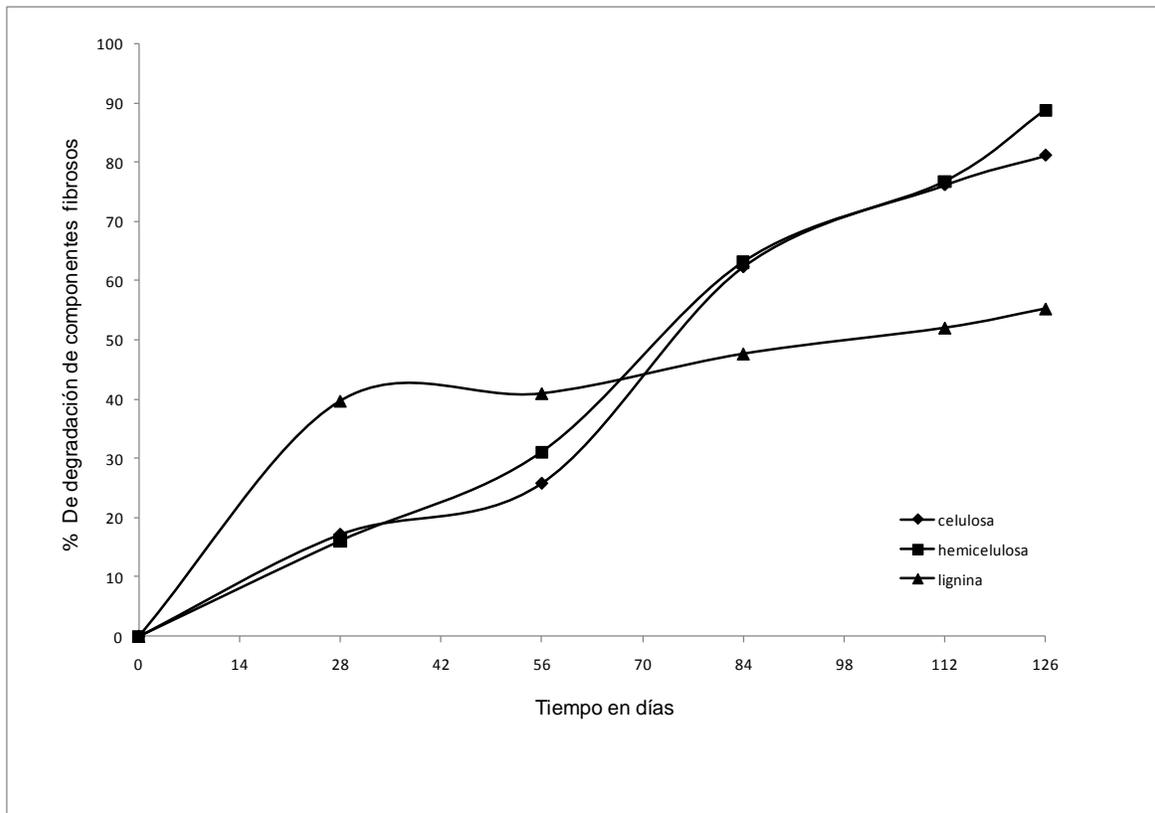


Figura 6.8. Degradación de fibra con respecto al tiempo de compostaje de bagazo de *Agave tequilana Weber* de la tequilera “La Cofradía”.

Los valores de pérdida de celulosa (80.51% y 83.97%) coincidieron con los obtenidos por Íñiguez *et al.* (2005) de 80% y 87% aproximadamente en 126 de 252 días que duró la degradación total del bagazo de maguey tequilero, al cual se le añadió urea como fuente de nitrógeno para ajustar la relación C/N.

Los valores de pérdida de hemicelulosa fueron mayores que la pérdida de celulosa en ambos compost, esto coincide con estudios de degradación controlada de residuos de la molienda de olivo mezclados con paja de trigo (Baddi *et al.*, 2003) y composta de lodos residuales en mezcla con residuos verdes (Jouraiphy, *et al.*, 2005) donde en ambos estudios los porcentajes de degradación de hemicelulosa son mayores que los porcentajes de degradación de celulosa; sin embargo, los valores que reportaron en estos casos (76% y 69.5%) son inferiores a los valores

encontrados en las pilas de compostaje de bagazo de maguey tequilero de 88.76% para “La Cofradía” y 95.7% para “La Regional”. Esto es explicado por el uso de nitrato de amonio al inicio para ajustar la relación C/N de pilas.

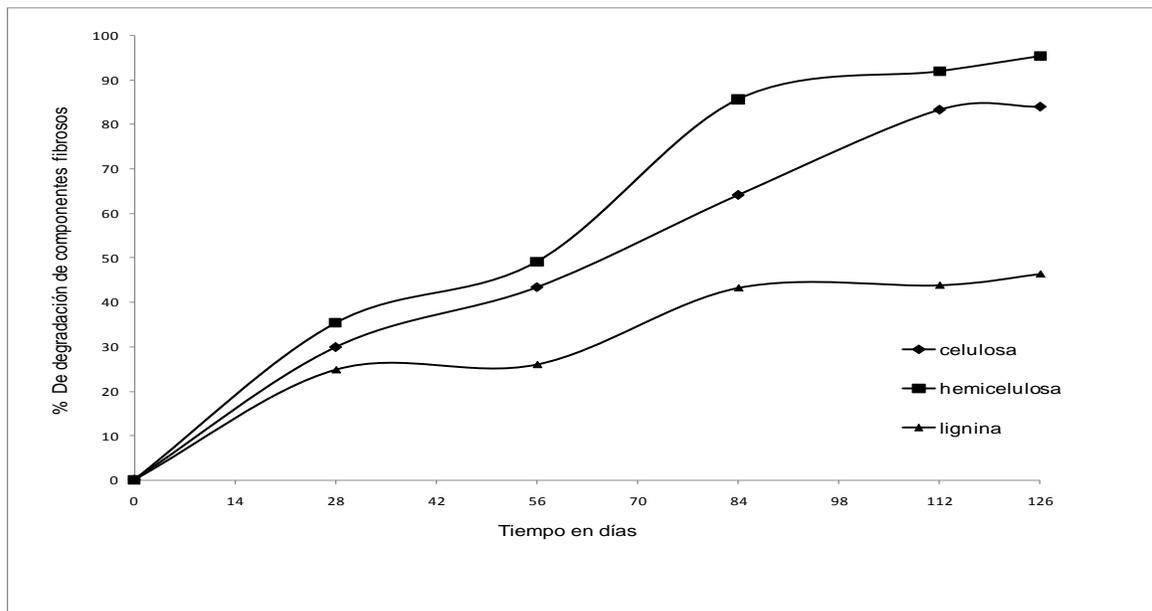


Figura 6.9. Degradación de fibra con respecto al tiempo de compostaje de bagazo de *Agave tequilana Weber* de la tequilera “La Regional”.

Respecto a la degradación de lignina, se observó que en ambos bagazos en el primer mes del compostaje hubo un porcentaje considerable de degradación, siendo mayor en las pilas de “La Cofradía” (40%), esto coincide con un estudio hecho por Jouraiphy *et al.* (2005) en compostaje de lodos residuales y residuos verdes donde en el primer mes se degradó casi tres veces más lignina que celulosa.

6.3 PROPIEDADES DEL COMPOST DE BAGAZO DE *Agave tequilana* Weber.

6.3.1 Físicas

6.3.1.1 *Distribución del tamaño de partículas de compostas refinadas y sin refinar.*

El 63.7 y 61.8 del porcentaje en peso del material compostado de “La Cofradía” y “La Regional”, respectivamente, fueron retenidos por las mallas de 0.25 a 2.00 mm de abertura, mientras que el sustrato de turba presentó 50.4% de su distribución granulométrica en este intervalo de partículas. De acuerdo con Abad *et al.* (2004) el mejor material que se pretenda utilizar como sustrato de cultivo se define como aquel de textura media a gruesa con una distribución de tamaño de partícula entre 0.25 y 2.5 mm luz. Los compost de las tequileras tienen mayor porcentaje en peso dentro del rango óptimo del tamaño de partículas, que el sustrato de referencia turba *sphangum*, no obstante el porcentaje en peso retenido entre .25 y 0.10 mm de abertura fue tan sólo de 0.9% en “La Cofradía” y del 2.4% en “La Regional” mientras que el de turba fue de 12.3%, siendo estos valores de relevancia en las propiedades físicas, ya que según Handreck (1983) la fracción en este intervalo, presenta la máxima influencia en la porosidad de aire y en la retención de agua y es la que determina un cambio brusco en la curva de liberación de agua; al respecto, Ansorena (1994) indicó que las propiedades físicas de los sustratos dependen en gran medida de la distribución del tamaño de partícula, por lo que modificando o seleccionando adecuadamente esta característica se pueden alcanzar propiedades óptimas.

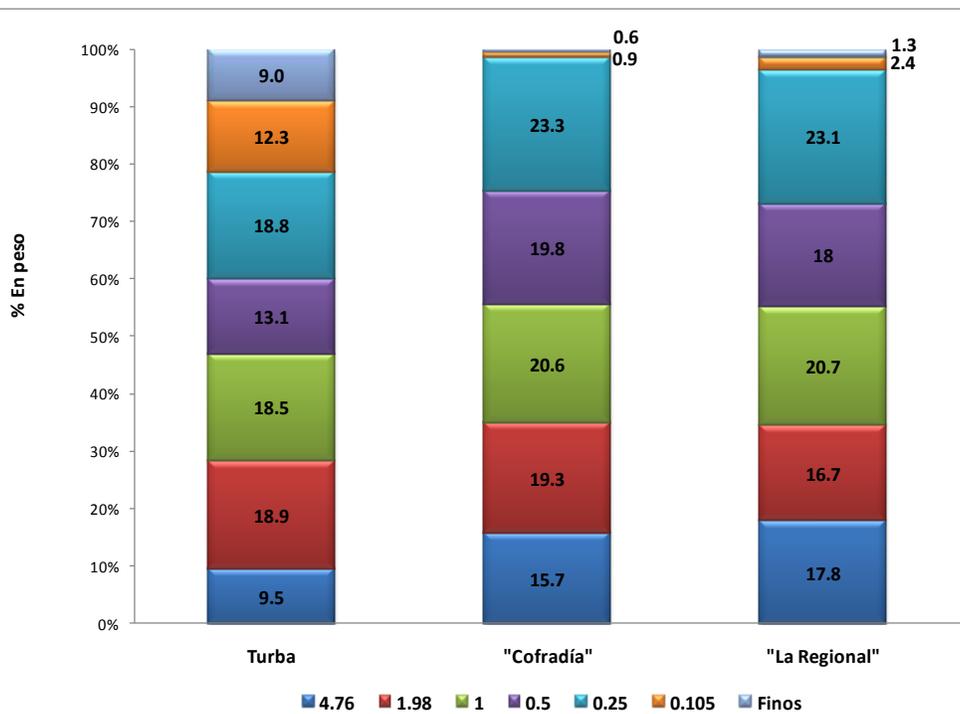


Figura 6.10 Distribución del tamaño de partícula de dos compost de bagazo de *Agave tequilana Weber* de las tequileras "La Cofradía" y "La Regional" en comparación al sustrato turba Sphagnum.

A los compost de ambos bagazos que fueron refinados también se les realizó un análisis granulométrico. Los resultados se pueden observar en la figura 6.11, donde se muestra el comportamiento del tamaño de partícula de estos materiales. Del producto refinado de "La Cofradía", el 73.1% quedó detenido entre las cribas de 0.25 y 2.0 mm de abertura; en estas mismas cribas, para el producto refinado de "La Regional" la cantidad retenida fue de 71.83%. Con respecto al tamaño de partícula que tiene mayor influencia en la retención de agua (entre 0.1 y 0.25 mm) (Handreck, 1983), aumentó en los compost de 0.9% y 2.4% a 12.9% y 14.28% en peso de material refinado, para "La Cofradía" y "La Regional" respectivamente.

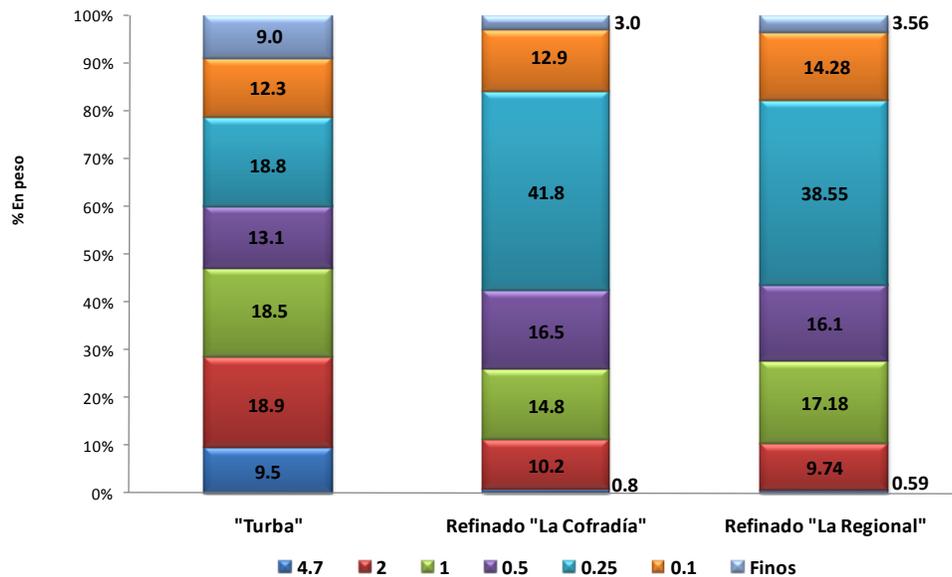


Figura 6.11. Distribución del tamaño de partícula del compost refinado del bagazo de *Agave tequilana Weber* de las tequileras "La Cofradía" y "La Regional", en comparación al sustrato turba *Sphagnum*.

6.3.1.2 Densidad real, aparente, espacio poroso total e índice de grosor

El cuadro 6.4 muestra los resultados obtenidos del análisis estadístico para los parámetros: densidad real (DR), densidad aparente (DA) y espacio poroso total (EPT). Se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los compost refinados y sin refinar sólo para la variable densidad real, en la cual el proceso de "molienda", que sufre durante el refinado, disminuyó ligeramente el valor de densidad real, sin superar el valor de referencia (1.54 g cm^{-3}) de la turba *Sphagnum*. La "molienda" no afectó drásticamente a los parámetros densidad aparente y espacio poroso total, cuyos valores se ubicaron en los valores de referencia recomendados por *Abad et al.* (1993), los cuales son: densidad aparente: $< 0.4 \text{ g cm}^{-3}$, densidad real entre 1.45 y 2.65 g cm^{-3} , espacio poroso total mayor a 85%. Los valores obtenidos en todas las variables son adecuadas para que estos subproductos de la industria del tequila se puedan utilizar como sustratos de cultivo sin suelo de plantas y cosechas.

El índice de grosor, referido como la suma (% en peso) de partículas superiores a 1 mm de diámetro, mostró que como era de esperarse, el proceso de refinado, repercutió en la disminución de este índice, mostrando diferencia significativa ($p < 0.05$) con los subproductos no refinados. A la vez, el valor de este índice, para los residuos refinados, se alejó del valor de la turba *Sphagnum*, lo que ocasionará mayor retención de agua y menor aireación al contener partículas más finas, pudiendo causar hipoxia radical en plantas cultivadas en contenedores de poca altura (Martínez *et al.*, 2009).

Estos parámetros están estrechamente relacionados entre sí y con la retención de agua por parte del sustrato y la distribución granulométrica de las partículas, ya que al disminuir la porosidad ocupada por aire, al compactar un sustrato manteniéndose la masa, aumentará la densidad aparente y aumentará la retención de agua (Ansorena 1994) y al estar bien distribuidas las partículas finas y grandes mejoran estos parámetros como lo demuestran Martínez *et al.* (2009) en un estudio de las propiedades de cáscara de almendra como sustrato, donde evaluaron el comportamiento de estas mismas variables y otras, a diferentes tiempos de uso en cultivo de tomate y melón, concluyendo que el mejoramiento de esas variables con el tiempo de uso se debe a la mejor distribución granulométrica de partículas que produce el mismo uso.

6.3.1.3 Relaciones aire-agua

Los valores de las relaciones aire-agua se muestran en el cuadro 6.5. Como era de esperarse, se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) para todas las propiedades analizadas entre los dos grupos de materiales; refinado y no refinado. La capacidad de aireación de los dos materiales refinados disminuyó y fue entonces cuando se ubicó en el intervalo óptimo para sustratos de cultivo, también se acercó al valor de la turba *Sphagnum*. Al refinar el compost aumentó su valor del agua fácilmente disponible y se ubicó en el intervalo óptimo, siendo muy parecido al de la turba *Sphagnum*. El agua de reserva mostró diferencias

significativas ($P < 0.05$) entre el valor de “La Cofradía” sin refinar y todos los demás valores; que a su vez entre ellos no muestran diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$); sólo los materiales refinados se encontraron dentro de los valores recomendados como óptimos para su utilización como sustrato de cultivo.

Cuadro 6.4. Algunas propiedades físicas del compost y el compost refinado de bagazo de *Agave tequilana Weber* proveniente de dos tequileras.

Propiedad	Sin refinar		Refinado		Turba
	“La Cofradía”	“La Regional”	“La Cofradía”	“La Regional”	
Densidad real (g cm^{-3})	1.581 b [†]	1.632 a	1.537 c	1.578 b	1.54
Densidad aparente (g cm^{-3})	0.875 a	0.133 a	0.141 a	0.178 a	0.13
Espacio poroso total (%)	94.46 a	91.85 a	90.83 a	88.70 a	91.52
Índice de grosor	55.60 b	55.22 b	25.80 a	27.51 a	46.90

† : Valores con letras iguales entre filas no son estadísticamente diferentes (Tuckey $p < 0.05$)

El agua total disponible y el agua difícilmente disponible de los materiales refinados, aumentaron con respecto a los materiales no refinados y se ubicaron en el intervalo óptimo para sustratos de cultivo indicado por Abad *et. al.* (2000). El comportamiento de estas propiedades está fuertemente relacionado con la distribución del tamaño de partículas (figuras 6.10 y 6.11), y que también puede ser explicado por la disminución en el índice de grosor para los materiales refinados (26.00), mientras que en los materiales no refinados casi se duplicó su valor (55.20), lo que indicó que en los productos refinados el porcentaje en peso de partículas menores a 1 mm fue de 74, mientras en el segundo únicamente de 45.

Cuadro 6.5. Relaciones aire – agua del compost refinado y sin refinar de bagazo de *Agave tequilana Weber* de dos tequileras en comparación con un sustrato y niveles óptimos.

Propiedad	Sin refinar		Refinado		turba	I.O.
	“C”	“R”	“C”	“R”		
Capacidad de aireación (%v/v)	65.02 a ¹	49.23 b	24.94 c	19.66 c	25.44	10-30
Agua fácilmente disponible (% v/v)	08.68 b	13.10 b	33.22 a	35.69 a	29.88	20-30
Agua de reserva (%v/v)	03.20 b	09.50 a	04.55 a	4.36 a	10.84	04-10
Agua total disponible (%v/v)	11.88 c	22.60 b	37.77 a	40.05 a	40.72	24- 40
Agua difícilmente disponible (%)	17.57 b	20.03 b	28.13 a	29.00 a	35.35	Nd.

¹ ; Valores con letras iguales entre filas no son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$)
 “C”; “La Cofradía”; “R”; “La Regional”
 I.O.; Intervalo óptimo (Abad *et al.*, 2000); Nd.; no determinado.

6.3.1.4 Curva de liberación de agua.

Las variaciones de humedad de los cuatro materiales evaluados en comparación al de sustrato de turba *Sphagnum*, se muestran en la figura 6.12. De 0 a 1 kPa de tensión, los materiales de “La Cofradía” y “La Regional”, tal como salen del compostaje (sin moler), muestran tendencias lineales; sin embargo, al pasar a 2 kPa de tensión, los valores de ambos materiales, adquieren una tendencia asintótica hasta el final de las tensiones. No obstante, el material de “La Regional”, difiere con el de “La Cofradía” en el contenido de aire-agua; el primero, si se utiliza como sustrato en cultivos, contendrá menos aire y más agua que el material de “La Regional” (cuadro 6.5).

Respecto a los dos materiales refinados, ambos presentaron desde el inicio de su tensión de humedad, una tendencia parabólica, muy similar al de sustrato de turba *Sphagnum*, lo que indica que con el refinado mejoraron sustancialmente sus relaciones aire-agua, y alcanzaron un estado casi en equilibrio. El mejoramiento de las relaciones aire-agua en los materiales refinados y su comportamiento en la curva de liberación de agua ya se había previsto con los valores de la capacidad

de aireación, agua fácilmente disponible y agua de reserva, así como con los valores del índice de grosor.

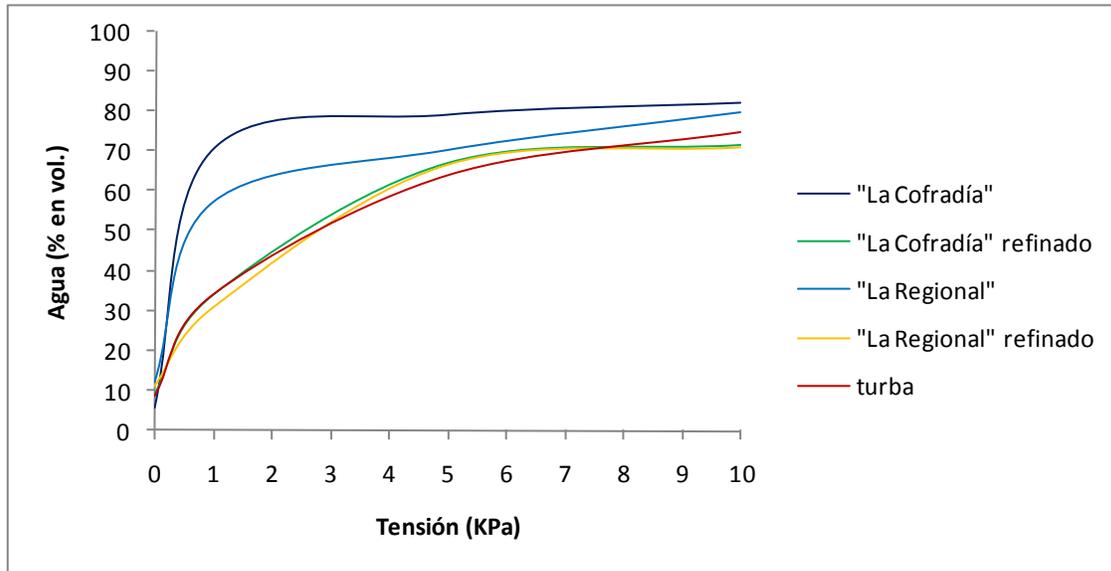


Figura 6.12. Curva de liberación de agua del compost refinado y sin refinar de bagazo de agave de dos tequileras en comparación con un sustrato comercial.

6.3.2 Propiedades químicas y fisicoquímicas

6.3.2.1 pH y conductividad eléctrica.

El pH de ambos compost (cuadro 6.6) se ubicó dentro del nivel óptimo para sustrato de cultivo recomendado por Abad *et al.* (2002), siendo este rango de 5.2 a 6.3. Los valores determinados fueron 5.5 y 5.8 ("La Cofradía" y "La Regional"). Como ya se mencionó en el apartado 5.2 a los materiales que se refinaron se les realizó además de las determinaciones físicas, los análisis de pH y conductividad eléctrica, y en cuanto al primer parámetro al ser refinado, el valor aumentó de 5.5 a 6.4 en el refinado de "La Cofradía" y de 5.8 a 6.5 en el refinado de "La Regional". El valor de pH en los materiales que fueron refinados de ambas tequileras estuvo dentro de valor recomendado como óptimo.

La conductividad eléctrica del compost de bagazo de *Agave tequilana Weber* en este estudio resultó muy por encima del valor recomendable para sustrato de cultivo (menor a 5 dS.m⁻¹) según Ansorena (1994), ya que los valores determinados fueron de 14.40 para “La Cofradía” y 11.90 dSm⁻¹ para “La Regional”, (cuadro 6.6), probablemente, debido a la adición de nitrato de amonio.

El compost, después de ser refinado, mostró diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre ambos, siendo los valores promedio de 0.55 dS m⁻¹ para “La Cofradía” y de 0.28 dS m⁻¹ para “La Regional”. Esta disminución de los valores de conductividad eléctrica es debida al lavado que sufre la muestra durante el proceso de refinado; aunque en este caso el lavado está implícito, la lixiviación controlada y el lavado previo del sustrato son técnicas de manejo utilizadas en el cultivo sin suelo para prevenir o corregir el exceso de sales en los sustratos (Ansorena, 1994; Adams, 2004; Salas y Urrestarazu, 2004).

Cuadro 6.6 Propiedades químicas y fisicoquímicas del compost de bagazo de agave proveniente de dos tequileras en comparación con valores de referencia.

PARAMETROS	Composta		Referencia
	“La Cofradía”	“La Regional”	Turba ¹
Humedad, (%)	61.00 a [†]	45.70 b	Nd
Materia seca, (%)	39.00 b	54.30 a	Nd
pH	5.50 b	5.80 a	3.17
Conductividad dS.m ⁻¹	14.40 a	11.90 b	0.21
Cenizas, (%)	11.75 b	18.62 a	Nd
Materia orgánica, (%) ^{bs}	88.25 a	81.38 b	97.9
Carbono orgánico total, (%) ^{bs}	49.03 a	46.02 b	Nd
Nitrógeno Total, (NTK, %) ^{bs}	3.02 a	3.12 a	Nd
Relación C:N	16.24 a	14.75 b	48
Fibra detergente neutro, (FDN,	69.68 a	64.55 b	Nd
Fibra detergente ácido, (FDA,	66.27 a	62.12 b	Nd
Hemicelulosa, (%) ^b	3.41 a	2.43 a	16.7
Celulosa, (%) ^b	10.14 a	7.98 b	37.5
Lignina detergente ácido, (%) ^b	56.13 a	54.14 b	26.4
^{bs} ase seca.			
[†] : Valores con letras iguales entre filas no son estadísticamente diferentes (Tuckey $p < 0.05$)			
¹ Aba <i>et al.</i> (2002)			

6.3.2.2 *Relación Carbono/Nitrógeno*

Los valores de la relación C/N al término de la degradación de ambos bagazos (cuadro 6.6), se ubicaron dentro del rango de un compost maduro, ya que esta relación con valor inferior a 20 se utiliza comúnmente como indicador de suficiente estabilidad (Cegarra, 1994). El valor de la relación C/N de la tequilera “La Cofradía” se ubicó en 16.24 y el de “La Regional” en 14.75, encontrándose diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los valores de C/N. Estos datos coinciden con los obtenidos por Íñiguez *et al.* (2005) en compostaje de bagazo de agave y vinazas tequileras donde reportaron relación C/N de 13.9 a 19.9 en sus diferentes tratamientos. Concuerta también con los resultados obtenidos del compostaje de otros materiales como residuos de jardín mezclados con lodos residuales y residuos de la molienda de olivo; donde la relación C/N reportada es de 12.2 y 16.5, (Ait Baddi *et al.*, 2004; Jouraiphy, *et al.*, 2005).

6.3.2.3 *Componentes fibrosos*

Los valores de celulosa, hemicelulosa y lignina (LAD) que se determinaron en el bagazo de agave de ambos compost (cuadro 6.6), difirieron en gran medida de los valores de la turba, la cual es el sustrato de uso común en agricultura; los valores de hemicelulosa y celulosa con respecto al sustrato referido, son inferiores, al contrario de la lignina en el bagazo que duplica el valor de la turba. Para la tequilera “La Cofradía”, la celulosa, hemicelulosa y lignina ácido detergente toman valores de 3.41, 10.14 y 56.13% respectivamente. Y para la tequilera “La Regional” de 2.43, 7.98 y 54.14% en el mismo orden anterior. Estos valores se acercan a los reportados por Abad *et al* (2002) en polvo de coco de origen tailandes; los cuales son 7.3% para hemicelulosa, 22.6% para celulosa y 54.3% para lignina ácido detergente.

No existe una restricción en cuanto al contenido en componentes fibrosos para la utilización como sustrato de cultivo, sin embargo niveles altos de lignina indican un material que no es fácilmente atacable por los microorganismos y por lo tanto no se degrada con facilidad (Noguera, 2000).

6.4 BIOENSAYOS DE GERMINACIÓN

6.4.1 Brote y vigor relativo

De acuerdo con la metodología de bioensayos para la determinación de madurez en términos de brote y vigor relativo, los resultados mostraron que en ambas tequileras se tuvieron resultados de compost muy maduro, ya que el brote de semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.), de la tequilera “La Cofradía” fue de 97% y de 91.5% para “La Regional”. Según la técnica de evaluación (TMECC, 2001. Método 05.05-A) un sustrato a base de compost y vermiculita (mezcla de 50- 50% en volumen), con valores de brote mayores a 90%, indican que es muy maduro, valores entre 90% - 80% maduro y valores menores a 80% inmaduro.

En cuanto al análisis de vigor relativo, los resultados indicaron que los compost de ambas tequileras resultaron ser inmaduros por haber tenido resultados de vigor menores a 85% ya que según los datos de referencia del TMECC (2001. Método 05.05-A) valores de vigor relativo, mayores al 95% indica que son muy maduros, valores entre 85% y 95% maduros y valores menores al 85% indican que son inmaduros. Por otro lado no se registró brote alguno de semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) cuando éstas se pusieron a germinar en bagazo de agave recién salido de las tequileras. En bagazo de agave sin cocción, sino sólo lavado con agua caliente para extraer los azúcares fermentables, germinaron 100% de las semillas sembradas, lo que demuestra que durante el cocimiento de las cabezas de agave para hidrolizar los azúcares fermentables se forman los compuestos fitotóxicos [melanoidinas (Sirianuntapiboon *et al.*, 1988; Wedzicha y

Maputo, 1992; Kitts *et al.*, 1993)] que luego habrán de degradarlos a través del compostaje para que el producto residual pueda ser utilizado con fines hortícolas.

6.4.2 Índice de germinación

Los extractos de las pastas de saturación evaluados mostraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre el compost refinado y sin refinar, los materiales que se sometieron a proceso de refinado mostraron los mayores índices de germinación en semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.), e incluso superaron al testigo ambos materiales refinados. (figura 6.13) Todas las concentraciones evaluadas en los extractos de refinados, y la concentración al 25% del compost de “La Regional” son superiores al nivel aceptable ($> 50\%$). (Abad *et al.*, 2002), para ser utilizados como abonos orgánicos (Zucconi y Bertoldi, 1991).

De acuerdo con estos resultados, los materiales que se sometieron a refinado son apropiados para la germinación de semillas de lechuga, debido probablemente al lavado que conlleva, lo que disminuye la Conductividad eléctrica. Ya que de 14.4 y 11.9 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ después de refinados reducen su valor a 0.55 y 0.28 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ para las tequileras “La Cofradía” y “La Regional” respectivamente.

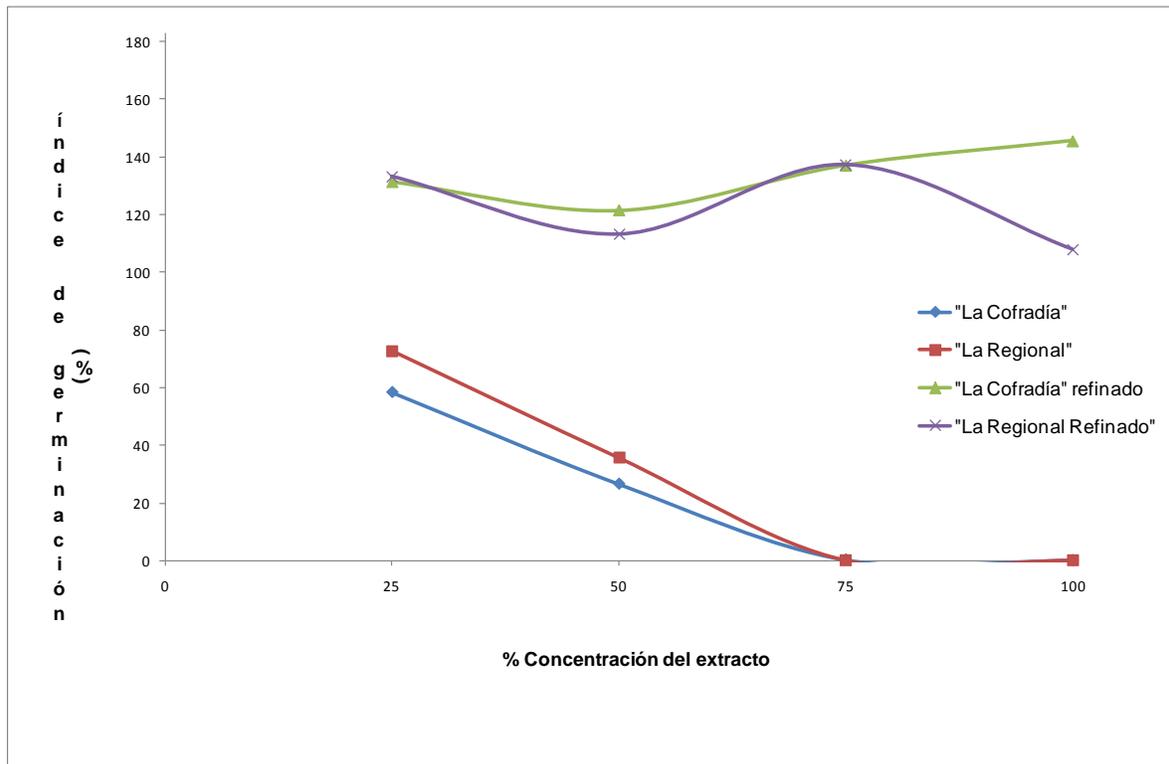


Figura 6.13. Germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) utilizando extractos a diferentes concentraciones del compost refinado y sin refinar de bagazo de dos tequileras.

VII. CONCLUSIONES

El tipo de extracción de azúcares del tequila repercutió en el contenido de médula y fibra del subproducto bagazo. El obtenido en la destiladora “La Regional” mostró 21.9% más médula que el obtenido en “La Cofradía”; sin embargo, esta última tuvo 21.9% más fibra que la primera.

No se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en la mayoría de los parámetros químicos y fisicoquímicos del bagazo de maguey tequilero tal y como sale de las destiladoras. Sin embargo, los valores de la relación C/N y lignina ácido detergente sí presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tequileras y son superiores al valor de referencia.

Durante el desarrollo del compostaje, algunos parámetros como: relación C/N, la conductividad eléctrica y la densidad de campo tuvieron un comportamiento similar entre ambos compost, siendo, en general, mayores los valores de la tequilera “La Cofradía” en los dos primeros y menor en el tercero.

Se degradó en ambos bagazos más de 50% de carbono orgánico total, nitrógeno total y materia orgánica y disminuyó teóricamente, el volumen en más de 75%. Los componentes fibrosos se degradaron arriba de 80% en celulosa, 88% en hemicelulosa y 46% en lignina ácido detergente.

El compostaje modificó todos los valores de los parámetros químicos y fisicoquímicos del bagazo de agave de ambas tequileras y los ubicó dentro de los valores recomendados como óptimos para su uso como sustrato de cultivo, excepto la conductividad eléctrica.

El refinado del compost, modificó su distribución granulométrica, aumentando en 9 y 10% las partículas entre 0.25 y 2.0 mm de luz, respectivamente y en 12% las



partículas entre 0.1 y 0.25 mm de luz, para las tequileras “La Cofradía” y “La Regional”, respectivamente, esto mejoró todos los valores de las relaciones aire-agua y de la curva de liberación de agua, ubicándolos en el intervalo óptimo para sustratos de cultivo como la turba *Sphagnum*.

La fitotoxicidad del extracto del compost mostrada en el índice de germinación en semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) fue causada por la conductividad eléctrica alta “La Regional, 14.4 y “La Cofradía”, 11.09 dS m⁻¹) y disminuyó hasta 0.55 y 0.28 dS.m⁻¹ respectivamente, al ser refinada.

Es necesario someter a compostaje el bagazo de *Agave tequilana weber*, proveniente de cualquiera de los dos métodos de extracción de azúcares del tequilera, si se va a utilizar como sustrato de cultivo; sin embargo, es mejor refinarlo o molerlo para obtener un sustrato similar al de la turba *Sphagnum*.



RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

- Realizar una evaluación agronómica de ambos compost refinados y sin refinar en diferentes especies hortícolas.
- Determinar las características físicas y fisicoquímicas del compost de bagazo de agave tequilero en mezcla con otros materiales orgánicos regionales como: fibra o polvo de coco, corteza de pino, y otros residuos de las agroindustrias (azucarera, café, papel, etc)
- Evaluar el comportamiento de las variables fisicoquímicas en degradación controlada de bagazo de agave tequilero sin la utilización de nitrógeno, para evitar el aumento de la conductividad eléctrica en el producto final.
- Realizar un análisis de beneficio/costo del lavado y refinado del material con conductividad eléctrica alta, antes de usarlo en gran escala.

VIII. LITERATURA CITADA.

- Abad, M.; Martínez, H. M.D.; Martínez, G.P.F. y Martínez, C. J. 1992. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. I Jornadas de sustratos. *Actas de Horticultura*, 11, 141-145. SECH.
- Abad, M. 1993. Sustratos. Características y propiedades. pp 42-60. En *Cultivo sin suelo*. F. Canovas y J. Díaz (ed). Instituto de Estudios Almerienses FIAPA.
- Abad, B. M.; Noguera, M. P.; Carrión, B. C. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. En: *Tratado de cultivo sin suelo (3.a ed.)* Urreztarazu M. pp 904. España: Ediciones Mundi-Prensa.(4)113-158.
- Abad, M.; Noguera, P.; Puchades, R.; Maquieira, A.; Noguera V. 2002. Physico-chemical properties of some coconut coir dusts for use a peat substitute for containerised ornamental plants. *Bioresource Technology*. 82, 241-245.
- Adams, P. 2004. Aspectos del manejo de los diferentes sustratos, su comparación, elección y factores medioambientales a considerar. En *Tratado de cultivo sin suelo*. Urrestarazu G. M. (3.a ed.), pp 904. España: Ediciones Mundi-Prensa. (7) 239-251.
- Ait Baddi, G. Albuquerque J.A.; González, J.; Cegarra, J.; Hafidi, M. 2004. Chemical and spectroscopic analyses of organic matter transformations during composting of olive mill wastes. *International Biodeterioration & Biodegradation* 54. 39 – 44.
- Alarcon, V. L. 1998. Fundamentos teóricos de la conductividad eléctrica. *Horticultura*.128, 97-98.
- Alonso, M.S. y Rigal, L. 1997. Caracterización y valorización del bagazo de *Agave tequilana* Webwer de la industria del tequila. *Revista de Chapingo, serie Horticultura* , 3 (2), 31-39.
- Amador, R. M de J. 2002. Efecto de vinazas en agave tequilero en la nutrición y su relación con problemas fitosanitarios. Tesis de licenciatura. Estado de México, México: Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma de Chapingo.



- Ancona, M. L.; Cetz, Z. G.; Belmar, C. R.; Sandoval, C.C. 2007. Cultivo de *Pleurotus ostreatus* y *P. DJamour* en Yucatán. En: El cultivo de setas *Pleurotus* spp en México. El Colegio de la Frontera Sur. Tapachula, Chiapas. Sánchez-Vázquez J.E., Martínez-Carrera D., Mata G., Leal-Lara H. (Eds.) 236 p. (3.6) 131-141.
- Ansorena, J., 1994. Sustratos. Propiedades y Caracterización. Ediciones Mundi-Prensa.
- Ansorena, J. 1996. Aireación de sustratos hortícolas. Horticultura 111 29-34.
- AOAC 1984, *Official method of analysis*. 14^a ed. Association of official Analytical Chemist, Washington, D.C. 952 pp.
- Arenas, M.; Vavrina, C.S.; Cornell, J.A.; Hanlon, E.A.; Hochmuth, G.J. 2002. Coir as an alternative to peat in media for tomato transplant production. HortScience 37:309-312.
- Bagstam, G. 1978. Population changes in microorganisms during composting of spruce bark. I. Influence of temperatura control. Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol. 5:315-330.
- Baixauli, S. C.; Aguilar O. J. M. 2002. Cultivo sin suelo de hortalizas. Aspectos prácticos y experiencias. Editorial Generalitat Valencia. pp110.
- Bernal, M.P.; Paredes C.; Sánchez-Monedero, M.A.; Cegarra J. 1998. Maturity and stability parameters of compost prepared whit a wide range of organic waste. Biores Technol 63: 91:99.
- Brewer, L.J. y Sullivan D. M. 2003. Maturity and stability evaluation of composted yard trimming. Science and utilization. 2: 96-112.
- Brito, L. M.; Coutinho, J. y Smith, S.R. 2008. Methods to improve the composting process of the solid fraction of dairy cattle slurry. Bioresource Technology 99:8950-8960.
- Bunt, A.C., 1988. Media and Mixes for Container-Grown Plants. 2nd ed. Unwin Hyman Ltd., London, 309 pp.
- Cabrera, R. I, 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. Revista Chapingo, serie Horticultura. Vol V(1)5-11.



- Casillas, J. A. 1999. Usos comerciales del bagazo de agave. *Gaceta Universitaria U de G.* 26 de julio.
- Cedeño, C.M. 1995. Tequila production. *Crit. Rev. Biotechnol*, 15 (1), 1-11.
- Cegarra, J. 1994. Compostaje de desechos orgánicos y criterios de calidad del compost. *Memorias VII Congreso Colombiano de la ciencia del suelo*, (págs. 22-30). Bucaramanga.
- Cooperband, L. 2002. *The Art and Science of Composting, A resource for farmers and compost producers.* University of Wisconsin-Madison, College of Agricultural and Life Sciences. Center for Integrated Agricultural System (CIAS).
- Costa, F. García C., Hernández T., Polo A., 1991 *Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización.* Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Centro de Edafología y Biología Aplicada de Segura Murcia, 181p.
- Crawford. J. H. 1985. *Composting of Agricultural Wastes.* (P. N. Cheremisnoff, & R. P. Ouellette, Edits.) *Biotechnology Applications and Research* , 68-77.
- CRT. 2007. CONSEJO REGULADOR DEL TEQUILA. Recuperado el 08 de diciembre de 2007, de Consejo Regulador del Tequila: <http://www.crt.org.mx>
- CRT. 2009. CONSEJO REGULADOR DEL TEQUILA. Recuperado el 06 de MARZO de 2009, de Consejo Regulador del Tequila: <http://crt.org.mx>
- CIWMB (California Integrate waste Management Board). *Compost microbiology and the soil food web.* 442-00-013. available on: www.ciwmb.ca.gov/publications/Organics/44200013.doc.
- CWMI 1976. *The science and engineering of Composting. Monitoring compost pH.* Cornell Waste Management Institute <http://compost.css.cornell.edu/monitor/monitorph.html>. 02/08/2008
- De Boodt, M.; De Waele, N. 1968. Study of the physical properties of artificial soils and the growth of ornamental plants. *Pedologie XVIII* (3): 275-300.



- De Boodt M., Verdonck O. y Cappaert I. 1974 a. Method for measuring the water release curve for organic substrates. *Acta horticulturae* 37, 2054-2062.
- De Boodt, M.; Verdonck, O. y Cappaert, I. 1974 b. Determination and study of the water availability of substrates for ornamental plant growing. *Acta Horticulturae*, 35: 51-58.
- De Boodt, M. 1975. Caractères physiques et disponibilité en eau des substrats. *Annales de Gembloux* (881): 59-72.
- Dickson, N.; Richard, T.; Kozlowsky, R. 1991. Composting to Reduce the waste Stream. A guide to small scale food and yard waste composting. Ithaca New York. Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES) Cooperative Extension. p 44.
- Escoto, G. T.; Vivanco, C.E.M.; Lomelí, R. M. G.; Arias, G. A. 2006. Tratamiento fermentativo-químico- mecánico del bagazo de maguey (Tequilana weber) para su aplicación en papel hecho a mano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5 (1): 23-27.
- Eweis J. B. 1999. Principios de biorecuperación. Tratamiento para descontaminación y regeneración de suelos y aguas subterráneas mediante procesos biológicos y fisicoquímicos. España: Mc Graw Hill.
- Fitzpatrick, G. E. 2004. Utilización de los compost en los sistemas de cultivo de plantas ornamentales, viveros y semilleros. En: Utilización de compost en los sistemas de cultivo hortícola. Stofella, P. B. y Kahn, B. A. (Editores). Mundi prensa, editorial. (6)135-149.
- Gabriëls R., y Verdornk O. 1991. Phisycal and chemical characterization of plant substrates towards a European estandarization. *Acta horticulturae* 294, 249-259.
- Gariglio, N. F.; Buyatte, M.A.; Pilatti, R. A.; Gonzalez Rossia, D.E.; Acosta, M. R. 2002. Use of a germination bioassay to test compost maturity of willow (*Salix* sp.) Sawdust. *Neiv Zealand. Crop and Horticultural Sci.*, 30 (2):135-139.
- Goering, H.K., and. Van Soest P.J. 1970. Forage fiber analysis. Apparatus, reagents, procedures, and some application. *Agric. Handbook 379*, ARS. USDA Washington, DC. 1-20.



- Gouleke C.G. 1977. Biological Processing: Composting and hydrolysis En: *Handbook of solid waste management* (D.G Wilson Ed.) Van Norstrand Reinhold, Nueva York. pp 197.225.
- Halffter, G. 1957. Plagas que afectan a las distintas especies de agave cultivadas en México. Dirección General de Defensa Agrícola. México, D.F.: SAG.
- Handreck, K.A. 1983. Particle size analysis and the Físical properties of growing media for containers. *Commun. In soil Sci. Plant Anal.*, 14(3), 209-222.
- Handreck, K.; Black, N. 1991. Growing media for ornamental plants & turf. New South Wales University Prees. Australia. 401 pp.
- Haug, R. T. 1993. The Practical Handbook of compost Engineering. Lewis Publisher.
- Hoitink, H.A.J; Kuter G. A. 1986. Effects of composts in growth media on soil borne pathogens, In: The role of the organic matters in modern agriculture. Chen, Y. y Y. Avnimelech (Eds). Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht, Netherlands. Pp 289-306.
- Hoitink , H.A.J. y Poole, H.A., 1980. Factors affecting quality of composts for utilization in container media. *HortScience*, 15:171-173.
- Iñiguez, C. G., (1999). Experiencias en el estudio de agave en Casa Cuervo S.A. de C. V. Memorias de vinculación retos y oportunidades para el aprovechamiento del bagazo de maguey. Edita Gilberto Iñiguez Covarrubias. Pp 17.
- Iñiguez, C. G.; Díaz, T. R.; San Juan, D.R.; Ansaldo, H. J.; Rowell, M. R. 2001. Utilization of by-products form the tequila industry. Part 2: potential value of *Agave tequilana Weber azul* leaves. *Bioresource technology*. 77; 101-108.
- Iñiguez, C. G.; Crohn, D.M. 2004. Utilization of by products the tequila industry. Part 6. Fertilization of potted geranium with a slaughterhouse waste compost. *Rev. Int. de Contam. Ambient.* 20(2) 53-58.
- Iñiguez, C. G.; Acosta, N.; Martínez, L.; Parra, J.; Gonzalez, O. 2005. Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 7. Compostaje de



bagazo de agave y vinazas tequileras. *Rev. Int. de Contam. Ambient.* 21(1) 37-50.

- Iñiguez, C. G.; Parra, J.; Velasco, P.A. 2006 a. Utilización de subproductos de la industria tequilera parte 8 Evolución de algunos constituyentes de la mezcla de biosólidos-bagazo de agave durante compostaje. *Rev. Int. De Contaminación Ambiental.* 22 (2) 82-93.
- Iñiguez, C. G.; Rodríguez, R.; Virgen, G. 2006 b. Compostaje de material de descarte y aguas residuales de la industria de curtiduría. *Rev. Int. de Contam. Ambient.* 22(3) 113-123.
- Iñiguez, C. G.; Fuentes, T. F.J.; Lange, S.E.; Rowell, R.M. 2007. Bagazo de agave como materia prima para la fabricación de tableros aglomerados. Obtención de Materiales Compuestos Empleando Polímeros Naturales. Eds. Francisco J. Fuentes Talavera, José Antonio Silva Guzmán, Juan Ramos Quitarte. Impreso en México.
- Jouraiph, A.; Amir, S.; El Gharous, M.; Revel, J.C.; Hafidi, M. 2005. Chemical and spectroscopy analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste. *International Biodeterioration & Biodegradation* 56 101–108.
- Kitts, D.D.; W.C.H., Stich, H.F. y Powrie, W.D. 1993. Effect of glucose-lysine maillard reaction products on bacterial and mammalian cell mutagenesis. *J. Agric. Food chem.*, 41, 2353-2358.
- Lemaire, F.; Dartigué, A.; Rivière, L.M.; Charpentier, S.; Morel, P. 2005. Cultivos en macetas y contenedores. Principios agronómicos y aplicaciones. Mundiprensa. Pp 210.
- Martinez, G.G.A.; Ortiz, H. Y.D.; Urreztarazu, G.M.; Salas San Juan, M,C.; Escamirosa, T.C. 2009. La rotación de cultivos y las propiedades de la cáscara de almendra como sustrato. *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 32 (2):135-142.
- Montenegro y Malagon. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección Agrológica, Santa Fe de Bogotá.



- Noguera, M.P. 2000. Caracterización y evaluación agronómica del residuo de fibra de coco: Un nuevo material para el cultivo en sustrato. Tesis de doctorado en ciencias químicas. Universidad Politécnica de Valencia. Pp274.
- Peigné, J.; Girardin, P. 2004. Environmental impacts of farm-scale composting practices. *Water, air and soils pollution*. 153: 45-68.
- Pire, R.; Pereira, A. 2003. Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. *Bioagro* 15(1): 55-63.
- Rodríguez. 2004. Desarrollo y caracterización de sustratos orgánicos a partir del bagazo de agave tequilero. Tesis doctorado del Colegio de Posgraduados. Edo. de México.
- Salas M.C.; Urrestarazu, 2004 Sustrato alternativo para su uso en cultivo sin suelo. *Phytona* 123, 52-55.
- Sánchez, S.R.; Studdert, G.A.; Echeverría, H.E. 1998. Dinámica de mineralización de nitrógeno en residuos de cosecha en descomposición en argiudol típico. *Ciencia del suelo*, 16: 1-6.
- Segura, S.F.; Echeverri, F.R.; Patiño, L.I. A.C. y Mejía, C. A.I. 2007. Descripción discusión acerca de los métodos de análisis de fibra y del valor nutricional de forrajes y alimentos para animales. *VITAE, Revista de la facultad de química farmacéutica. Colombia*. 14 (1) 72-81.
- Silva, V. J.P.; López, M. P.; Valencia, A. P. 2003. Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje. Curso internacional de sistemas integrados sostenibles para el tratamiento de aguas residuales y opción de reuso, (pág. 25). Guayaquil.
- Sirianuntapiboon, S.; Somchai, P.; Ohmoms, S. y Attampasampunna, P. 1988. Screen of filamentous fungi having the ability to decolorize molasses pigments. *Agr. Biol. Chem.* 52, 387-392.
- Sterrett. 2004. Los compost como sustratos para la horticultura en la producción de material de transplante. En S. y. Kahn, Utilización de compost en los sistemas de cultivo hortícola.
- Statistical Analysis System (SAS) para Windows v8.



- Sullivan y Miller. 2004. Propiedades cualitativas, medición y variabilidad de los compost. En Stofella y. Kahn, Utilización de compost en sistemas de cultivo hortícola.
- Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S. 1993. Gestión integral de residuos sólidos (Vol. II). Madrid, España: Mc Graw Hill. Pp 1106.
- Thomas, G.V., Prabhu, S.R., Reeny, M.Z. y Bopaiah, B.M. 1998. Evaluation of lignocellulosic biomass from coconut palm as substrate for cultivation of *Pleurotus sajorcaju* (Fr.) Singer. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 14:879-882.
- Tiquia et al. 2002. Effects of mulching and fertilization on soil nutrients, microbial activity and rhizosphere bacterial community structure determined by analysis of TRFLPs of PCR- amplified 16S rRNA genes. *Applied Soil Ecology* , 21, 31-48.
- TMECC 2001 Test methods for examination of composting and compost. Consultado el 03 del febrero del 2005 <http://tmecc.org/tmecc>
- Urrestarazu, G. M. 2002. Sustratos orgánicos. 5.a edición del Curso Internacional de Cultivo sin suelo, (pág. 38). Almería.
- Urrestarazu, G. M. 2004. Bases y sistemas de los Cultivos sin suelo. En: Tratado de cultivo sin suelo. (3.a ed.,) Urrestarazu, G. M. pp 904. España: Ediciones Mundi-Prensa.(4):3-37.
- Varnero, M. T.; Rojas, A.M.; Orellana, R.R. 2007. Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Revista de la Ciencia del suelo*, 7 (1), 28-37.
- Verdonck, O.; Penninck, R.; and De Boodt, M. 1983. The physical properties of different horticultural substrates. *Acta horticultrae*, 150: 161-167.
- Villalvazo, R. A. S. 1986. Problema y aspectos agropecuarios en México. El Cultivo del mezcal en la región de Tequila, Jalisco. Tesis de licenciatura. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Wedzicha, B.I. y Kaputo, M.T. 1992. Melanoidins from glucose and glycine: Composition, characteristics and reactivity towards sulfhite ion. *Food Chem.* 43, 359-367.



- Westerman, P.W.; Bicudo, J. R. 2005. management consideration for organic waste use in agriculture. *Bioresource Technology* , 96, 215-221.
- Zarate, A. G. 2006. Caracterización y evaluación agronómica de materiales orgánicos potenciales para utilizarse como sustratos en cultivo sin suelo de melón (*cucumis melo L.*). Tesis de maestría, CIIDIR -IPN, Producción y protección vegetal, Oaxaca.
- Zarate, N. B. 2007. Producción de tomate (*Lycopersicon esculentum Mill.*) hidropónico con sustratos, bajo invernadero. Tesis de maestría, CIIDIR-IPN, Producción y protección vegetal, Oaxaca.
- Zucconi, F.; Bertoldi, M. 1991. Specification for solid waste compost. In: the staff of Biocycle (Eds), pp 261-264 the Biocycle guide to the art and science of composting. JG Press. Inc. Emmaus, Pa.
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. y De Bertoldi, M., 1981 a.. Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle* 22: 54-57.
- Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A. y De Bertoldi, M. 1981b. Biological evaluation of compost maturity. *BioCycle*22: 27-29.



ANEXOS

Anexo 1



Bagazo de *Agave tequilana Weber* utilizado como materia prima para el compostaje.

Izquierda. “La Regional”

Derecha. “La Cofradía”

Anexo 2



Equipo “desmedulador” utilizado en la tequilera “La Cofradía” para la extracción de azúcares

Anexo 3



Formación de pilas de compostaje y adición de nitrato de amonio

Anexo 4



Medición de temperaturas, insertando los sensores.

Anexo 5



Movimiento de las pilas cada semana para facilitar la aireación y adición de agua cuando fue necesario

Anexo 6



Muestreo cada 28 días para las determinaciones correspondientes, tomando dos litros de cada uno de los 9 puntos muestreados
